

文章编号: 1007-4627(2017) 03-0290-06

PandaX 实验的进展与展望

符长波¹, 陈勋¹, 陈云华², 崔祥仪¹, 方德清³, Karl Giboni¹, Franco Giuliani¹, 韩柯¹, 季向东^{1,4,5,†}, 巨永林⁶, 刘江来¹, 马余刚³, 冒亚军⁵, 任祥祥¹, 谈安迪⁴, 王宏伟³, 王萌⁷, 王秋宏³, 王思广⁵, 吴士勇², 肖梦蛟¹, 谢鹏伟¹, 杨勇¹, 张宏光¹, 张涛¹, 赵力¹, 周宁¹, 周小鹏⁵
(PandaX-II 项目合作组)

- (1. 上海交通大学物理与天文学院粒子物理与核物理研究所, 上海 200240;
2. 雅砻江水电发展有限公司, 成都 610051;
3. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;
4. 马里兰大学物理系, College Park, 马里兰州 20742, 美国;
5. 北京大学物理学院, 北京 100871;
6. 上海交通大学机械动力学院, 上海 200240;
7. 山东大学物理学院, 济南 250100)

摘要: PandaX 是位于四川的中国锦屏地下实验室 (CJPL) 内的, 利用氙作为工作物质, 探测暗物质等其它极稀有事件的大型地下粒子探测实验计划。PandaX 探测器中的氙工作在气液两相的模式。通过检测液相和气相中闪烁光强的比例, 实现对目标粒子包括 WIMP 和 Axion 等疑似信号的鉴别。PandaX 已顺利完成了有效区体积约为 120 kg 氙的一期计划, 目前正在运行实施有效区体积约为 500 kg 氙的二期计划。在 WIMP 质量为 45 GeV/ c^2 附近, 探测灵敏度达 $2.97 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ (90% 置信度), 没有发现 WIMP 疑似信号。本工作介绍了 PandaX 一期和二期的进展, 以及后续升级计划, 其中包括升级 PandaX 的时间投影室至 4 吨, 建造用于屏蔽岩石放射性本底的水屏蔽, 以及 ^{136}Xe 双贝塔衰变的研究计划等。

关键词: 暗物质; PandaX; 液氙

中图分类号: P14 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.290

1 引言

目前科学界普遍认为, 宇宙全部物质中仅有约 20% 是由普通物质所构成, 而其余的 80% 是由所谓的“暗物质”构成^[1]。实验上有诸多暗物质的存在间接证据, 例如: 宇宙 2.7K 背景辐射的角分布谱、恒星速度异常、引力透镜效应等。然而暗物质的存在与否, 目前还缺少直接证据, 实验上还没有直接观测到组成暗物质的粒子本身。目前在理论上提出了很多暗物质候选粒子, 其中弱相互作用重粒子 (Weak Interaction Massive Particle, WIMP) 和轴子 (Axion) 被认为是较有希望的候选者^[2]。对于 WIMP 和 Axion, 实验家提出了不少实验观测方案, 例如: 观测银河系中暗物质晕环中的 WIMP 湮灭时可能产生的普通物质粒子; 观测在大型强子对撞机 (LHC) 等高能加速器中可能产生的 WIMP 暗物质粒

子; 利用特殊设计的探测器, 通过 WIMP 与原子核的相互作用来实现对它的探测等。显然, 如果 WIMP 存在, 它和原子核的碰撞截面一定非常小, 因此需要大型的、超灵敏的低放射性本底的探测器才能实现对 WIMP 的探测。

为了实现超高灵敏度的探测, 目前国际上此类直接探测实验多在地下进行。这样可以利用岩石、土壤、冰层等天然材料, 屏蔽由宇宙射线带来的本底干扰^[3]。此外, 采用低放射性材料建造探测器本身, 也是提高探测灵敏度的重要手段之一。目前一般选用已具有成熟的超高提纯工艺的半导体材料, 和容易提纯的惰性气体作为探测的工作介质。例如, CDMS 合作组^[4]等使用了锗作为工作物质, 利用锗晶体中产生的电子和空穴载流子实现对暗物质的探测; PandaX (Particle AND Astrophysical Xenon detector) 项目合作组^[5,6],

收稿日期: 2017-03-03; 修改日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 11375114, 11435008, 11455001, 11505112, 11525522); 科技部基金 (2016YFA0400301)

作者简介: 符长波 (1974-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 从事核物理研究; E-mail: cbfu@sjtu.edu.cn.

† 通信作者: 季向东, E-mail: xdj@sjtu.edu.cn.

以及 XENON、LUX 项目合作组^[7], LUX^[8], 是利用惰性气体氙作为工作物质, 以期利用氙产生的闪烁光信号实现对暗物质探测。

在所有直接检测方案中, 气液两相型氙探测技术有独特的优势。首先, 在两相型探测器中, 待测粒子在液氙和气氙中闪烁光强之比可被用来鉴别入射粒子的种类, 重建该事件的位置与能量信息, 从而实现对待测粒子的鉴别。对事件的鉴别是暗物质探测这类超稀有事件的重要一环。其次, 氙原子质量大, 与 WIMP 的散射截面相对较高。WIMP 核散射可能是相干的(或非相干的), 因此散射截面与原子质量数 A (或 A^2) 成比例。第三, 由于氙原子序数高, 对外来 γ 射线自屏蔽效果有相对大的优势, 从而减少本底, 增加信噪比。第四, 氙是惰性元素, 纯化难度较小, 而且自然界中没有长寿命放射性的氙同位素。第五, 氙液化温度约 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此低温系统实现起来相对容易。第六, 氙气价格相对便宜, 探测器如果升级到 10 吨级大小时, 造价仍在可承受的合理范围, 工程难度也相对较小。PandaX 位于四川的中国锦屏地下实验室(CJPL), 已顺利地完成了有效区体积约为 120 kg 氙的一期计划, 目前正在运行实施有效区约为 500 kg 的二期计划。本文将介绍 PandaX 一期和二期的进展, 以及实验的后续发展升级计划。

2 PandaX 实验装置简介

PandaX 主要由以下几个子系统构成: 时间投影室(Time Project Chamber, TPC)、低温和气体在线处理系统以及放射性本底辐射控制相关装置等。

2.1 时间投影室

时间投影室的设计如图 1 所示。它主要由电场笼和光电倍增管(PMT)阵列构成。TPC 的主要工作原理是: 当被探测粒子与液氙相互作用时, 可生成光子, 这些光子信号被 PMT 探测后即所谓的 S1 信号。在发出上述光子信号的同时, 氙也会发出一定数量的电子, 而这些电子在外加电场的驱动下, 在液氙中漂移后进入气态氙中。这些电子可以在气氙中产生新的光信号, 这些新的光信号被称为 S2 信号。利用不同类型的粒子之 S1/S2 比例不同的特点, 可以实现对粒子类型的鉴别。通过测量 S1 和 S2 信号的幅度, 信号的相对时间, 以及在 PMT 阵列上的信号分布, 就可以获得该粒子的种类、能量和位置信息, 实现粒子的运动学重建。

电子的漂移速度的均匀性, 以及在气液界面上拉出电场的均匀型, 是 TPC 性能的重要指标, 因此需要利用电场笼来实现上述均匀电场。电场笼是一个圆柱

形的笼装结构。它的轴向中间部分是均匀分布的等电位环状金属丝; 两端由网状细丝构成的阳极、阴极、栅极、屏蔽网, 和 PMT 阵列等。其中栅极作用是把电子从气液界面拉出的; 屏蔽网作用是降低电场对 PMT 影响。PMT 用来探测 S1、S2 光信号。在对被探测粒子进行三维位置重建时, 粒子的轴向位置是由 S2 对 S1 信号的相对延迟时间(即电子的漂移时间)获得; 而径向位置由 PMT 信号的相对强弱加权平均获得。

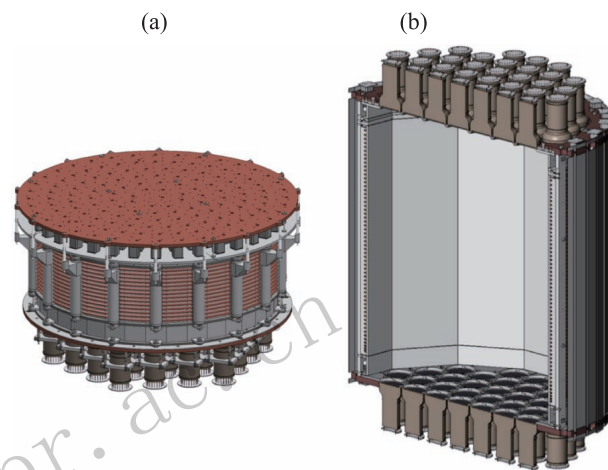


图 1 (在线彩图) PandaX 一期(a)和二期(b)的时间投影室

除电场均匀性之外, 氙的液位高低也会影响到 S1/S2 信号大小, 因此采用了约 10 L 的溢流室(overflow chamber)来对液位进行精确控制。通过调节溢流室入口高度, TPC 中的液位可以控制在 $< 0.1\text{ mm}$ 精度水平。流向溢流室的液体将通过吸气管进入气体纯化器, 并经过冷凝液化后再回到探测器中。

TPC 的主体骨架主要采用放射性较低的聚四氟乙烯和高纯无氧铜。聚四氟乙烯主要起绝缘支撑作用, 同时因其对光的良好反射性能而提高了 TPC 的光子收集效率。考虑到系统工作时温差很大, 不同材料低温热胀冷缩系数差异很大, 因此设计中采用了特殊的“互锁”的结构来消除热胀冷缩对结构的可能破坏。

PandaX 一期的 TPC 直径为 60 cm, 漂移长度为 15 cm, 有效区体积约 120 kg 的液体氙。使用了 143 只 1 英寸和 37 只 3 英寸的 PMT。通过对光收集效率进行优化, 以实现对于约 $10\text{ GeV}/c^2$ 的浅暗物质的高灵敏度的低能量探测阈值。PandaX 二期的设计类似, 但漂移长度将增加到 60 cm。PMT 阵列也有改进, 共使用了 110 只 3 英寸 PMT。

2.2 低温和气体在线处理系统

低温与循环系统的功能是: 维持氙的纯度、温度、压力, 使探测器能够稳定且安全的运行。它由以下 3 个

模块组成：低温冷凝器、气体纯化和紧急温度与压力维持系统。

其中低温冷凝器是由低温制冷机和热交换器构成。它的功能是补偿整个探测器系统的热损。由于探测器有限的热屏蔽能力，外界热量可使得少部分氦汽化。汽化的氦遇到冷凝器后液化，重新回流到探测器中，从而实现探测器的压力与温度平衡。

气体纯化器是提高氦气纯度的重要装置。如果不采取措施，氦气纯度会越来越差。这是因为探测器材料表面会不停释放出微量的杂质气体；系统也可能存在着极微小泄露。这些杂质，特别是电负性杂质如 H_2O ， O_2 ， CO_2 和 CO 等，会影响到液氦中光子和电子的传输效率。因此必须采用在线纯化的方法对氦进行处理。这里我们利用循环泵驱动，使得氦气以约 30 SLPM 的速度，流入气体纯化器。氦气与纯化器中的吸附剂发生化学反应，从而实现对有害杂质的脱除，提高液氦中闪烁光的衰减长度和电子漂移的寿命。

由于大量的低温液态氦的使用，系统的安全变得尤为重要。系统需要应对诸如断电、泄露等各种可能的紧急非正常状况。在外部电力缺失时：液氮将用来维持系统的温度与压力；沸石低温气体吸附剂将继续保障真空绝热层的真空度，减少冷量的流失速度；不间断电源可保障低功耗设备能够继续运行，实现对系统的有效监视与控制。在这样的紧急温度与压力维持系统的保障下，即使没有外部电力供应，系统依然在没有人干预的情况下，能独立维持数天的时间。

2.3 放射性本底控制相关装置

PandaX 项目的科学目标是探测极为稀有的暗物质和双贝塔衰变等信号，因此控制好放射性本底是最关键的几个首要任务之一。事实上，低本底控制贯穿于实验的整个进程：从实验的选址，探测器的结构与所用材料，探测器运行过程中氦气的控制，到最后的数据分析，放射性本底都是最重要考虑问题之一。这里我们仅着重探讨探测器结构所用材料的低本底控制问题。

为了获得更高的探测灵敏度，用于建造探测器的材料中的放射性必须足够低。材料的放射性测量是探测器设计与建造的第一步。目前已经开发了各种技术用来测量较低的放射性水平，例如：中子活化分析 (NAA)，电感耦合质谱 (ICP-MS)，和高纯度锗 (HPGe) 伽玛计量站等。PandaX 项目一期和二期主要采用伽玛计量站筛选材料。同时，PandaX 项目组目前也在发展 ICP-MS 技术，进一步提高放射性本底测量灵敏度。

PandaX 伽玛计量站由 HPGe 探测器和屏蔽系统组

成。HPGe 探测器采用 Ortec 公司制造的 3.69 kg 的 P 型同轴 HPGe 晶体，相对效率约为 175% (相对于标准 NaI 闪烁探测器)。它的较大质量使得它在 0.01 至 20 MeV 的能量范围内的光子的检测非常有效。屏蔽系统的主要目的是减少由周围环境引起的放射性背景辐射水平。由于 CJPL 内的宇宙射线 μ 子通量非常低，约每周 1 个事件的水平，因此不再考虑 μ 子的影响。

伽玛计量站的结构如图 2 所示。系统的主体屏蔽采用铅和高纯无氧铜。上盖可在导轨上活动，方便取放待测样品。因整个屏蔽体完全气密，样品取放时带来的氦气可被尽快地抽除或置换掉，提高了探测灵敏度和效率。样品室内的氦水平降低约 100 倍，至 1.5 Bq/m^3 水平。

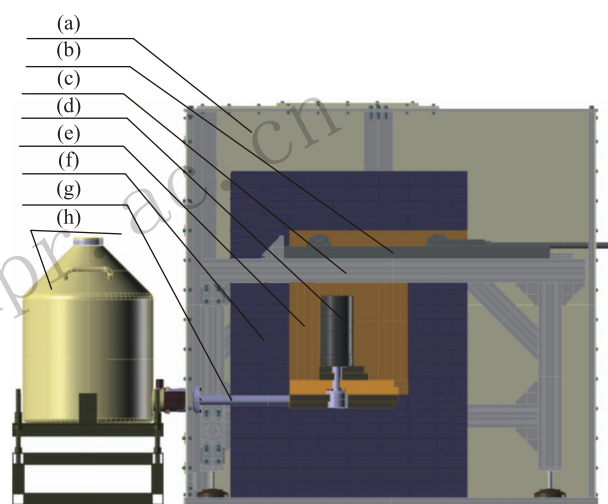


图 2 (在线彩图) PandaX 伽玛计数站的示意图

(a) 气密外壳，防止氦气进入；(b) 导轨；(c) 铝合金承重支架；(d) HPGe晶体的碳纤维罩；(e) 铜室；(f) 铅屏蔽层；(g) 低温冷指；(h) 低温液氮杜瓦瓶。

3 PandaX 运行状况与升级计划

PandaX 项目被设计为分阶段实施，逐步提高探测器规模和灵敏度。考虑到探测器技术的研发和运行经验的积累，项目一期和二期共享屏蔽体和低温装置等，仅 TPC 的尺寸有所不同。项目一期探测器有效区体积可容纳 120 kg 氦；项目二期目标有效区氦质量增加到约 0.5 吨的水平。项目一期在前期研发准备的基础上，于 2012 年 8 月系统在 CJPL 开始整体安装调试。并于 2013 年进行了两次工程运行调试，并最终于 2014 年 3 月正式进行科学数据采集。与一期的运行平行，二期的研发准备也同时进行。2014 年在 CJPL 进行整体安装调试，并于 2015 年 2 月进行正式开始数据采集。其总曝光量约 3.3 万千克天数据，给出了暗物质 WIMP 的自

旋相关、以及自旋无关截面的世界最好约束结果(发表时)^[9,10]。图3是PandaX 3.3万千克天曝光量数据给出的WIMP与物质相互作用截面上限。目前PandaX二期系统仍然在运行。

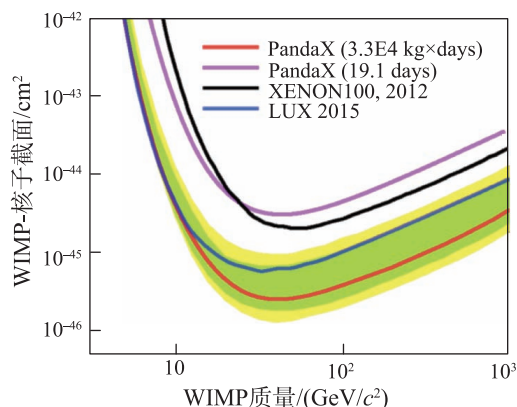


图3 (在线彩图) PandaX 3.3万千克天曝光量所给出的WIMP与物质的自旋无关相互作用截面上限(红线) 其它实验组的主要结果有: PandaX-II 19天结果^[12](紫红), XENON100 225天结果^[13](黑), 以及LUX 2015年结果^[14](蓝)

由于CJPL得天独厚的自然条件, 她是目前世界上最深的地下实验室, 是进行极稀有物理事件探测、岩土力学等学科研究的理想场所(CJPL的详细描述见参考文献^[11])。实验室的二期扩建工程正在进行之中。

PandaX项目的升级装置, 将安装在CJPL二期工程的新的实验空间中。PandaX升级计划, 如图4所示。其主体是一个超大的水屏蔽系统, 探测器将浸没在水中, 从而大大降低来自于周围岩石的放射性本底。水屏蔽系统主体是长25 m, 宽、深各13 m的水池。通过净水系统和氦气控制系统, 预期控制水中铀等主要放射性物质水平在 10^{-14} g/g, 氡放射性水平在1 mBq/m³左右。锦屏山2400 m岩石和这个超纯水池的共同屏蔽作用, 为极稀有事件探测器提供了理想的探测环境。

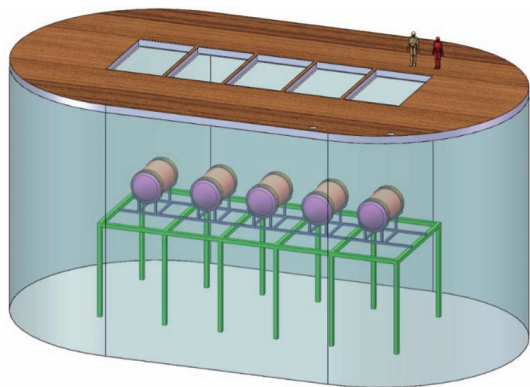


图4 (在线彩图) PandaX升级计划中的水屏蔽示意图

在水屏蔽体中央, 将放置两种探测器, 一种是PandaX一期和二期探测器的升级版本, 即PandaX四期。PandaX四期与前面两期比较, 有如下方面的提高: 首先, 它是一个吨级规模的两相型液氙探测器, 更大的氙的体积不但可以增加WIMP和氙的相互作用机会, 同时也可以因氙的自屏蔽效应, 降低本底干扰。其次由于水屏蔽体的采用, 放射性本底屏蔽性能也得到了大大提高。再次, 将采用更低放射性本底的材料, 包括不锈钢、聚四氟乙烯、无氧铜等, 这些材料的采用可以提高探测灵敏度下限。此外, 还将通过提高优化精馏塔的性能, 进一步压低氙中的氡, 提高至目前水平的1/10~1/50倍以下, 即小于Kr/Xe<1 ppt g/g。通过上述努力, 希望能把暗物质探测灵敏度提高至接近甚至超过中微子本底极限, 使得PandaX-IV继续成为在国际上有竞争力的氙暗物质探测装置。与其它暗物质氙暗物质探测项目, 如Xenon1T^[15]和LZ^[16]相比, 我们预期在本底控制方面有一定的竞争优势。PandaX四期有望在2018年完成各部件的研发, 在2019年进入CJPL现场进行安装与调试的工作。

无中微子双贝塔衰变(Neutrinoless Double Beta Decay, 0νBB)的存在与否对中微子质量, 轻子数守恒等重大基础科学问题有重要的判据意义。PandaX三期将计划利用新型的¹³⁶Xe高压气体时间投影室(HP-TPC)来研究0νBB问题。利用微气体探测器(Micromegas)作为HP-TPC两端的位置灵敏探测器, 实现对事件位置的重建。因此, 对双贝塔事件的鉴别, 不单可以从能量上, 也可以从粒子轨迹上加以判别, 大大提高了粒子鉴别能力。同时10大气压的高压气体, 可使得能量分辨有望达到1%以下, 能量分辨也比液氙有重大提高。长期计划建造大小为200 kg的探测器模块, 模块化的设计也将是后期升级至吨级变得较为容易。

4 总结

PandaX项目是位于CJPL的大型氙暗物质及其它极稀有事件物理探测项目。已经顺利实施了有效区体积约120 kg氙的一期计划, 有效区体积约500 kg的二期探测正在运行中。由于锦屏山得天独厚的自然条件, 是目前世界上最深的地下实验室, 更大规模的CJPL二期建设正在进行之中。PandaX正在计划在新的实验空间中进行三期和四期建设, 即研发吨级氙暗物质探测器, 和探测¹³⁶Xe同位素的无中微子双贝塔衰变。与世界上其它运行中, 或计划中的液氙实验相比(如LZ, Xenon1T等), 无论是在放射性本底控制, 还是在探测

器规模上, 都具有较大的竞争优势。

致谢 项目得到了上海交通大学 985 三期, 国家自然科学基金(批准号 11375114, 11435008, 11455001, 11505112, 11525522), 科技部(批准号 2016YFA0400301)等机构的支持, 在此表示衷心感谢。我们也对 CJPL 管理委员会、雅砻江水电公司对本项目的大力支持表示由衷的感谢!

参考文献:

- [1] BERTONE G, HOOPER D, SILK J. *Phys Rept*, 2005, **405**: 279.
- [2] FREEDMAN W L, TURNER M S. *Phys Rev*, 2003, **75**: 1433.
- [3] AKIMOV D. *Nucl. Instr Meth A*, 2011, **628**: 50.
- [4] CDMS II Collaboration. *Science*, 2010, **327**: 1619.
- [5] CAO Xiguang, CHEN Xun, CHEN Yunhua, *et al.* *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2014, **57**: 1476.
- [6] XIAO Mengjiao, XIAO Xiang, ZHAO Li, *et al.* *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2014, **57**: 2024.
- [7] APRILE E, ALFONSI M, ARISAKA K, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2012, **109**: 181301.
- [8] AKERIB D S, ALSUM S, ARAÚJO H M, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2017, **118**: 021303.
- [9] TAN Andi, XIAO Mengjiao, CUI Xiangyi, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2016, **117**: 121303.
- [10] FU Changbo, CUI Xiangyi, ZHOU Xiaopeng, *et al.* (PandaX Collaboration), *Phys Rev Lett*, 2017, **118**: 071301.
- [11] KANG K J, CHENG J P, CHEN Y H, *et al.* 2010 J Phys: Conf. Ser, 2010, **203**: 012028.
- [12] TAN Andi, XIAO Xiang, CUI Xiangyi, *et al.* *Phys Rev D*, 2016, **93**: 122009.
- [13] APRILE E, ALFONSI M, ARISAKA K, *et al.* (XENON100), *Phys Rev Lett*, 2013, **111**: 021301.
- [14] AKERIB D S, ARAÚJO H M, BAI X, *et al.* (LUX Collaboration), *Phys Rev Lett*, 2016, **116**: 161301.
- [15] APRILE E, AALBERSB J, AGOSTINI F, *et al.* *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016, **2016**: 027.
- [16] MOUNT B J. arXiv: 1703.09144.

Progress and Prospect of PandaX Experiment

FU Changbo¹, CHEN Xun¹, CHEN Yunhua², CUI Xiangyi¹, FANG Deqing³, Karl Giboni¹, Franco Giuliani¹,
HAN Ke¹, JI Xiangdong^{1,4,5,†}, JU Yonglin⁶, LIU Jianglai¹, MA Yugang³, MAO Yajun⁵, REN Xiangxiang¹,
TAN Andi⁴, WANG Hongwei³, WANG Meng⁷, WANG Qihong³, WANG Siguang⁵, WU Shiyong²,
XIAO Mengjiao¹, XIE Pengwei¹, YANG Yong¹, ZHANG Hongguang¹, ZHANG Tao¹,
ZHAO Li¹, ZHOU Ning¹, ZHOU Xiaopeng⁵,
(PandaX-II Collaboration)

- (1. INPAC and Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Laboratory for Particle Physics and Cosmology, Shanghai 200240, China;
2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., 288 Shuanglin Road, Chengdu 610051, China;
3. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 201800 Shanghai, China;
4. Department of Physics, University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA;
5. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;
6. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
7. School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: PandaX is a xenon-based dark matter and other rare events searching project located at China JinPing underground Laboratory (CJPL), Sichuan province, China. Dual phases, liquid and gas phase of xenon are used in the detector. Particles, including Weak Interaction Massive Particles (WIMPs) or axions *etc.*, may induce scintillating signals in both liquid (S1 signal) and gas (S2 signal) phases, and then are identified by analyzing the ratio of S1 and S2. The PandaX had completed its first stage, the 120 kg in fiducial volume, and now is running in its stage II with fiducial volume of 500 kg. The running results show that the WIMP-matter cross section detecting sensitivity of about $2.97 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ (90% C.L.) has been achieved at a WIMP mass of 44.7 GeV/ c^2 , and no WIMP candidates are identified. The upgrading plan of the PandaX is discussed, which include to build a larger Time project chamber (TPC) of about 4 tons, a water tank for radiation shielding, and the plan of ^{136}Xe double beta decay studies.

Key words: dark matter; PandaX; liquid xenon detector

Received date: 3 Mar. 2017; **Revised date:** 6 Jun. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11375114, 11435008, 11455001, 11505112, 11525522);
Program of Ministry of Sci.&Tech. of China (11DZ2260700)

† **Corresponding author:** JI Xiangdong, E-mail: xdji@sjtu.edu.cn