

PandaX暗物质探测实验*

谌 勋[†] 季向东 刘江来^{††}

(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)

2015-09-18收到

[†] email: chenxun@sjtu.edu.cn

^{††} email: jianglai.liu@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20151104

The PandaX quest for dark matter

CHEN Xun[†] JI Xiang-Dong LIU Jiang-Lai^{††}

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

摘要 PandaX是一个位于四川锦屏地下实验室的大型粒子与天体物理稀有事件探测实验装置。PandaX的一期和二期实验利用二相型氙时间投影室技术来直接探测弱相互作用暗物质粒子。PandaX一期实验已经完成,它使用了120 kg氙以检验以往其他实验所发现的疑似信号,其结果在标准假设下否定了这些疑似信号。PandaX二期升级了探测器,使用了500 kg的氙,预期在2015年晚些时候正式开始数据采集以寻找暗物质,将有望拓展暗物质探测的极限。

关键词 暗物质, 氙探测器, 时间投影室

Abstract Located in the Sichuan Jingping underground laboratory, PandaX is a large scale xenon time projection chamber for the detection of rare events in particle physics and astrophysics. The dual-phase xenon chamber is used in the first and second stages to detect the weakly interacting massive particles (WIMPs) directly. The first stage PandaX-I used 120 kg of xenon to confirm the possible WIMPs signals reported in other experiments, but did not see any conclusive signal. The second stage is now undergoing shakedown tests, with the detector upgraded to contain 500 kg of xenon. PandaX-II will start taking data in 2015, and is expected to extend the current limits of dark matter detection.

Keywords dark matter, xenon detector, time projection chamber

1 引言

暗物质的研究是当代基础物理学最前沿的方向之一。天体物理和宇宙学的研究表明,暗物质在包括我们的银河系在内的宇宙中大量存在,地球随着太阳系一起在暗物质构成的晕里面穿行^[1]。然而,目前关于微观世界的最成功的理论——粒子物理标准模型却没有给暗物质的微观本

质提供解释。超出粒子物理标准模型的新理论给出了暗物质的候选者,其中弱相互作用大质量粒子(weakly interactive massive particles, WIMPs)最为流行^[2]。理论预言的WIMPs质量很可能在10—1000 GeV/ c^2 范围内,并与夸克和轻子存在某种弱相互作用。如果WIMPs是银河系内的暗物质的主要组成部分的话,那么它会有微小的几率和原子核发生碰撞,产生核反冲。反冲的原子核获得部分能量,并能产生可供探测的信号。但是这种碰撞发生的概率非常低,所产生的信号很容易被淹没在大量的本底环境中,从而无法辨识出来。只

*国家自然科学基金(批准号:11055003,11435008)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB833005)、上海市人民政府科技办公室(批准号:11DZ2260700)、上海交通大学985三期资助项目

有通过极低本底的实验环境(通常是能够有效屏蔽宇宙射线辐射的地下实验室)情况下,精心设计的探测器才能有希望辨识出这些信号。中国锦屏地下实验室^[3]是目前世界上最深的地下实验室,其上方的2400 m岩石能够让进入实验室的宇宙射线降低到极低的水平。PandaX就是一个位于锦屏地下实验室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。其一期和二期都利用了二相型氙时间投影室(time projection chamber, TPC)技术来直接探测WIMPs。

氙是一种优秀的暗物质直接探测介质^[4]。在液氙里面,核反冲的能量能以光子和电离的电子等形式释放出来,从而可以进行探测。由于暗物质与原子核相互作用的概率正比于原子量平方,氙的平均原子量高达131.3,这意味着氙里面会有较高的暗物质碰撞事例率。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,这意味着其内部的能量沉积能够产生较强的可供探测的闪烁光信号和电离电子信号。此外,氙没有长寿命的放射性同位素,而且容易进行提纯,这意味着氙本身的本底能够被保持在很低的水平。液氙具有很高的辐射阻止能,来自外界的大部分伽马本底能够被阻挡在液氙的外层,产生所谓的“自屏蔽”效应,使得我们可能在中间更“干净”的区域来寻找暗物质信号。此外,液氙探测器很容易扩展,可通过增加靶物质的质量来提高单位时间内的事例率,从而提高探测的灵敏度。液氙不需要复杂的制冷系统,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,由常规的制冷系统即可完成液氙状态的维持。参考文献[4]对液氙在暗物质探测中的应用给出了较为全面的总结。

使用液氙作为探测介质的XENON100^[5]和LUX^[6]暗物质直接探测实验至今没有找到暗物质,但是在很大的暗物质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^[7, 8]。

PandaX探测器位于锦屏地下实验室一期实验大厅内。实验室内 μ 子的流量相当于62事例/($\text{m}^2 \cdot \text{年}$)^[9],它们于探测器、岩石和混凝土中所产生的中子在探测器里形成的本底可以忽略。Pan-

daX-I是PandaX暗物质探测的第一步,其主要目标是检验由国际上其他实验组所报告的质量在10 GeV/ c^2 附近的轻暗物质信号^[10]。它得到了上海交通大学、北京大学、山东大学、国家科技部和国家自然科学基金委员会的支持。PandaX-I的附属设施,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,这样的设计加快了实验进度并节约了成本。在过去的几年时间内,PandaX-I完成了设计和探测器建造,并加入了WIMPs搜寻的竞争当中。PandaX-I探测器的探测器内部使用了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,没有找到暗物质,对国际上其他实验所发现的疑似暗物质信号提出了强烈质疑^[11],引起了国际同行的广泛关注。2014年10月底,PandaX-I停止运行,并开始进行探测器升级。PandaX-I的完整数据分析结果于今年5月正式发布,该结果在多方面改进了数据分析方法,并确认了首批数据分析结果的正确性^[12]。PandaX-I在低质量暗物质区域达到了同类型实验中最高的探测灵敏度。

PandaX合作组从一期实验的成功运行中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升级后的PandaX-II。PandaX-II位于PandaX-I的同样的位置,并沿用了PandaX-I的附属设施(屏蔽体、低温和气体处理系统),其TPC能够容纳500 kg的氙。PandaX-II在今年年底之前将开始正式运行。

随着锦屏实验室二期(CJPL-II)^[13]的修建,PandaX可能在将来建设20—30吨氙的终极暗物质探测器,以期望对暗物质的本质给出一个确定的回答。

2 二相型氙探测技术

近年来大部分的液氙暗物质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, LUX及

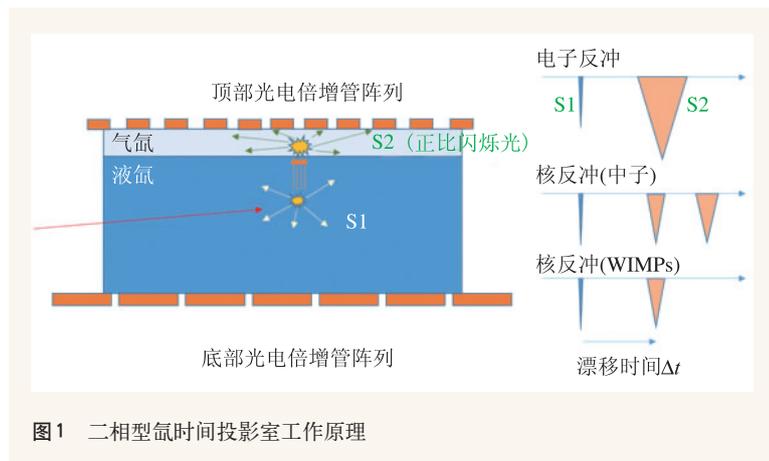
PandaX-I, 即将运行的 PandaX-II 和建设中的 XENON1T^[14], 未来的 LZ 实验^[15]也将采用该技术。这种技术大约在十年前首先由 XENON10^[16]和 ZEPHYRUS^[17]实验所研发, 其基本工作原理如图 1 所示。在探测器上下各有一个光电倍增管(PMT)阵列, 用于探测闪烁光信号。探测器内部的氙分为液相(下)和气相(上)两部分, 并施加了一个方向向下的电场。电场在两部分的氙中各自基本是均匀的。放射性本底在液氙里面发生核反冲或者电子反冲所转移的能量, 产生激发态的氙原子和电离的电子-离子对, 部分电子-离子对会重结合而产生额外的激发态原子。激发态的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。逃逸的电子在电场作用下以恒定速度向探测器上方漂移, 在气液分界面处被强电场攫取到气氙中, 并在气氙里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。电子在液氙中漂移的速度大约是 mm/ μ s 的量级, 因此探测器接收到 S2 和 S1 信号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 信号能够用来重建碰撞事件在水平方向上的位置。运用二相型氙探测器所重建出碰撞事件的三维空间位置的分辨率能达到毫米量级, 从而能够通过选取液氙内部基准区域内的事例来进行物理探测, 排除掉外面本底较高区域内的事例。由于在核反冲事件中, 电离的电子发生

重结合的概率大于电子反冲事件中的概率, 这意味着产生的电子较少而光子较多。和电子反冲相比, 核反冲事件里 S2 信号与 S1 信号的比值更小, 这个性质可以用于分辨电子反冲和核反冲。中子本底也会在探测器中产生核反冲事例。但是由于中子在液氙中的平均自由程较小(10—20 cm 量级), 大部分中子会散射多次, 形成多个 S2 信号, 来源于 WIMPs 的事例通常仅有一个 S2 信号, 这个性质可以用来排除部分中子本底。此外, 大部分的中子被探测器外部的屏蔽体阻挡在外。在 PandaX 中, 我们使用了较厚的聚乙烯来屏蔽外部的中子。

3 PandaX 的基础设施

PandaX 的屏蔽体用于屏蔽实验室的岩石及混凝土中由 ^{238}U , ^{232}Th 及其衰变产物所产生的伽马射线和中子, 设计目标是使得每年从外界进入探测器的中子数目少于一个。屏蔽体外观呈八棱柱形状(见图 2), 宽度 316 cm, 高度 368 cm。内部有一个高 175 cm、直径 124 cm 的圆柱形空间。屏蔽体从外到内由 40 cm 厚的聚乙烯、20 cm 厚的铅、20 cm 厚的聚乙烯以及 5 cm 厚的铜组成, 最内层是柱状的厚度为 5 cm 的高纯无氧铜罐, 其内部抽成真空, 用于放置不锈钢的内罐(包括 TPC)。整个屏蔽体的重量达到了 93 吨。屏蔽体的顶盖部分可以方便地移开, 以便于进行探测器的安装和系统维护操作。

PandaX 正式运行时需要保持大约 -100°C 的低温, 同时, 由于使用的容器以及探测器和氙接触的部分会释放杂质气体到液氙当中, 这会引入放射性本底, 并导致电子信号收集效率的下降, 因此, 需要连续不断地将液氙抽出并让其通过气体纯化器来除去杂质, 再重新注入探测器中。为此, 我们设计制造了 PandaX 的低温和气体处理系统。这套系统起初就为吨量级实验所设计, 它能够安全、稳定、高效地完成制冷、气体循环和提纯。



PandaX-I及PandaX-II的探测器被放置在双层的低温绝热容器里。绝热内罐使用低本底不锈钢制作。绝热外罐由高纯无氧铜制作而成，厚度为5 cm。低温系统是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，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如图3所示。这套系统还专门考虑了系统失效时的处理方式，例如在内部气压过高时通过注入液氮给系统降温，从而降低内部压强，此外还使用了爆破阀门，保证了系统和PMT的安全性。

4 PandaX-I

由于PandaX-I的一个重要作用是进行技术验证，因此探测器并不大。为了得到更加有价值的物理结果，设计的时候考虑了应用液氙在低质量暗物质区域进行高灵敏度探测的可能性。由于低质量暗物质的散射能量较小，因此探测器的能量探测阈值需要尽可能低。PandaX-I的TPC被设计成圆饼状(同类实验XENON100及LUX的TPC都是圆柱状)，其直径为60 cm，电子漂移长度仅15 cm，通过提高光子收集效率来降低探测能量的阈值，从而达到提高暗物质探测的灵敏度的目的。PandaX-I的TPC示意图及照片见图4。

TPC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氙中施加的电场足够均匀，并反射碰撞事件中产生的光子，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TPC内部的氙里面产生了向下的电场。

PandaX-I的顶部PMT阵列由143个滨松公司的低本底1英寸PMT构成，底部PMT阵列则包

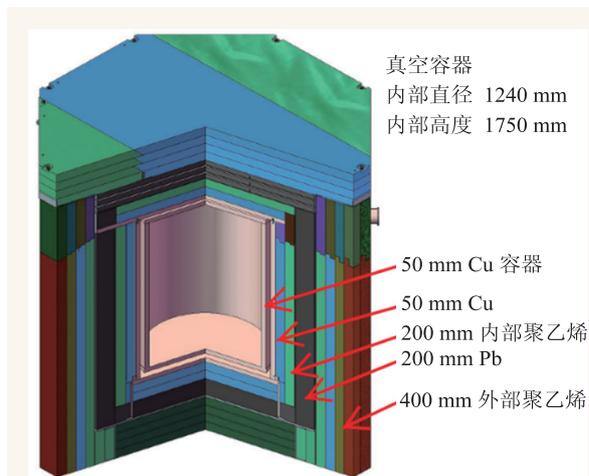


图2 PandaX的屏蔽体设计示意图



图3 PandaX的制冷和气体循环系统示意图。倾斜的管道是制冷总线，上面的不锈钢罐体里是不同的功能模块

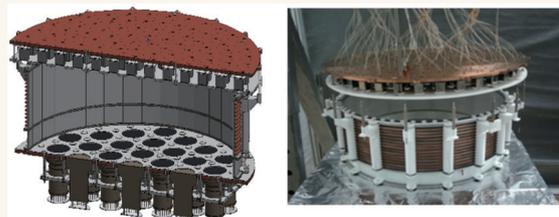


图4 PandaX-I的TPC示意图及实物照片。顶部PMT接上了供电及信号读出线缆

括了37个高量子效率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，阳极接地，栅极接电压-5 kV，阴极接电压-15 kV，从而在15 cm的液氙漂移区内部产生了667 V/cm的漂移电场。

PandaX合作组于2014年8月发布了首批实验结果，该结果基于17.4天的有效时间内利用37 kg

基准质量液氙进行暗物质探测的数据。发布的结果表明没有观测到暗物质候选事例。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 $3.7 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ 在暗物质质量为 $49 \text{ GeV}/c^2$ 处达到。在 90% 的置信区间上, 这个结果在标准天文学的暗物质模型下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^[18], CoGeNT^[19], CRESST^[20] 和 CDMS II-Si^[21]。与同类型的 XENON100 实验结果相比, PandaX 的结果和 XENON100 第一批的结果相近, 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。该结果受到了国际上的广泛关注, *Science* 杂志以《中国科学家在暗物质研究中迎头赶上》的标题报道了 PandaX 的结果^[22]。

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, 采用了基于蒙特卡罗模拟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。新数据集里的一部分 PMT 因不稳定而被禁用, 同时改进了基线计算方法, 使得新的分析所得到的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(以下简称千电子伏), 低于首次结果的 7.3 光电子/千电子伏, 但依然高于 XENON100 的 3.9 光电子/千电子伏。在 PandaX-I 运行的全部时间内, S1 信号在位于 2 到 30 个光电子之间找到了 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的特征, 只有 7 个事例位于中子刻度的核反冲数据中线之下, 即搜寻窗口中。根据蒙特卡罗模拟和对 S1/S2 信号偶然符合的研究, 在这个区域面的本底预期值为 6.9 个事例, 因此 PandaX-I 最终没有观察到本底之上的明显超出。PandaX-I 在国际上所有的液氙实验中, 对于低于 $5.5 \text{ GeV}/c^2$ 的暗物质质量区间给出了最好的结果, 而在高于 $7 \text{ GeV}/c^2$ 的暗物质质量区间内, PandaX-I 的结果好于目前基于锗探测器的最精确实验 SuperCDMS^[23]。

5 PandaX-II

PandaX-II 利用了 PandaX-I 的大部分基础设施, 这使得 PandaX-II 的建造过程异常迅速。在 PandaX-II 中, 绝热容器内罐选取了更低本底的不锈钢重新制作。PandaX-II 具有更大的 TPC, 其直径略大于 60 cm, 电子漂移长度达到了 60 cm, 从而能够容纳 500 kg 的液氙。

PandaX-II 的顶部和底部 PMT 阵列都各自使用了 55 个 3 英寸 PMT 去探测 TPC 内部的信号, 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, 能够排除掉在 TPC 外部和内部发生多次散射的本底。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 TPC 内部。PandaX-II 的探测器示意图如图 5 所示。

PandaX-II 目前已经完成了安装并正在进行测试, 预期在 2015 年年底前正式开始运行, 并连续工作一年时间。PandaX-II 的基准质量可能达到

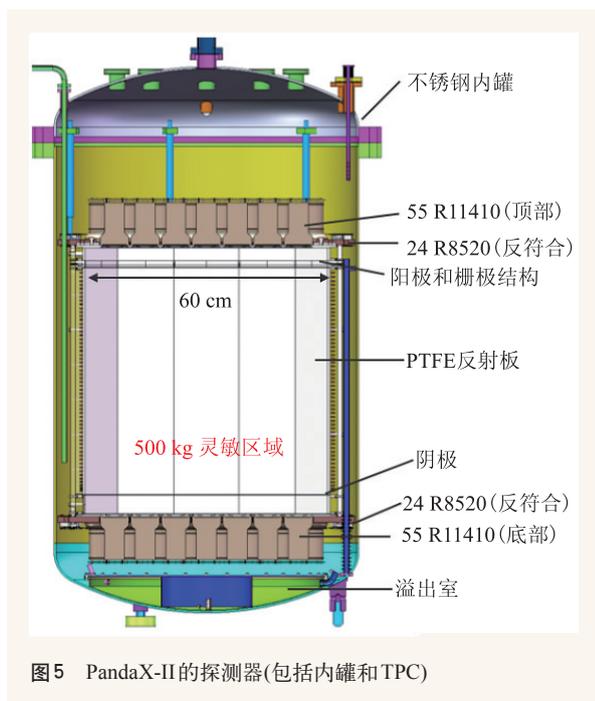


图5 PandaX-II的探测器(包括内罐和TPC)

300 kg, 我们期待其能够将目前 PandaX-I 的暗物质探测灵敏度再推进两个数量级。这个灵敏度能够使得 PandaX-II 探索目前其他实验尚未达到的 WIMPs 参数空间。

6 总结和展望

中国锦屏地下实验场址的开发, 建立了大型的暗物质实验室, 这为我国提供了一个加入

国际暗物质直接实验竞争的良好机会。PandaX 合作组采用液氙技术进行暗物质直接探测, 在过去的几年内, 从无到有完成了探测器的建设和运行, 并发布了第一期的暗物质探测结果, 得到了 *Science* 杂志的重点报道。合作组在一期的工作中积累了大量的经验, 并运用到正在进行的二期实验中。二期实验探测器里面使用 500 kg 的液氙工作介质, 在目前的实验还未探测到的区域进行暗物质的寻找。

参考文献

- [1] Bertone G, Hooper D, Silk J. *Phys. Rept.*, 2005, 405:279
- [2] Jungman G, Kamionkowski M, Griest K. *Phys. Rept.*, 1996, 267:195
- [3] Kang K, Cheng J, Chen Y *et al.* *J. Phys. Conf. Ser.*, 2010, 203:012028
- [4] Aprile E, Doke T. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82:2053
- [5] Angle J, Aprile E, Arneodo F *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100:021303
- [6] Akerib D S, Bai X, Bedikian S *et al.* *Nucl. Instrum. Meth.*, 2013, A704:111
- [7] Aprile E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111:021301
- [8] Akerib D S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:091303
- [9] Wu Y, Hao X, Yue Q *et al.* *Chin. Phys. C*, 2013, 37(8):086001
- [10] Cao X, Chen X, Chen Y. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2014, 57:1476
- [11] Xiao M, Xiao X, Zhao L *et al.* *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2014, 57:2024
- [12] Xiao X, Chen X, Tan A *et al.* arXiv: 1505.00771, accepted by *Phys. Rev. D*
- [13] Li J, Ji X, Haxton W *et al.* *Phys. Procedia*, 2015, 61:576
- [14] Davide F. *EPJ Web Conf.*, 2015, 95:04019
- [15] Akerib D S *et al.* arXiv:1509.02910
- [16] Angle J, Aprile E, Arneodo F *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100:021303
- [17] Alner G, Araujo H, Bewick A *et al.* *Phys. Lett. B*, 2007, 653:161
- [18] Bernabei R *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2008, 56:333; *Eur. Phys. J. C*, 2010, 67:39; *Eur. Phys. J. C*, 2013, 73:2648
- [19] Aalseth C E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 106:131301; *Phys. Rev. D*, 2013, 88:012002
- [20] Angloher G *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2012, 72:1791; *Eur. Phys. J. C*, 2014, 74:3184
- [21] Agnese R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111:251301
- [22] <http://news.sciencemag.org/physics/2014/08/chinese-team-catch-hunt-dark-matter>
- [23] Agnese R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:241302

更正声明

2015 年第 9 期《物理》刊登了“南大物理百年专题”。在《南京大学凝聚态物理学科》一文第 602 页右栏第 8 行, 作者误将“程光煦”写成了“程光熙”(网刊已修正)。在此, 我们向广大读者表示诚挚歉意。

《物理》编辑部
2015 年 11 月 3 日