

极深地下探秘宇宙的“熊猫X”实验

张园园 刘江来[†]

(上海交通大学物理与天文学院 李政道研究所 上海 200240)

2021-09-07 收到

[†] email: jianglai.liu@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20211002

Exploring the universe with the deep underground “PandaX”

ZHANG Yuan-Yuan LIU Jiang-Lai[†]

(Tsung-Dao Lee Institute, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

摘要 近百年的天文学观测表明宇宙中有大量看不见的“暗物质”存在，但是我们对暗物质的本质却所知甚少。宇宙中也充斥着一种很像暗物质的“幽灵粒子”——中微子，它们的身上也有着众多未解之谜。对暗物质和中微子研究的突破很可能带来下一次物理学的革命。国际上最深的、位于四川凉山州的中国锦屏地下实验室为这样的实验研究提供了得天独厚的场所。过去的20年，液氙探测技术的发展使之成为了探测暗物质、研究中微子性质的核心手段之一。文章主要介绍了暗物质与中微子的未解之谜、液氙探测技术的发展、国内外一些液氙实验的发展态势以及我国液氙探测暗物质“熊猫X”实验的现状和未来。

关键词 暗物质，中微子，液氙探测器，“熊猫X”

Abstract Astronomical observations over the past hundred years show that there is a large amount of invisible “dark matter” in the universe, but we know little about its essence. The universe is also full of neutrinos, “ghost particles” much like dark matter, and they also contain many unsolved mysteries. Breakthroughs in the study of dark matter and neutrinos are likely to bring the next revolution in physics. The China Jinping Underground Laboratory, the deepest lab in the world, is located in Liangshan prefecture, Sichuan province, and provides a unique place for such experimental research. In the past twenty years, the development of liquid xenon detection technology has made it one of the core means to detect dark matter and study the properties of neutrinos. This paper introduces the unsolved mystery of dark matter and neutrinos, and describes the development of liquid xenon detection technology, related experiments at home and abroad, the current status and the future of “PandaX”, a liquid xenon observatory in China.

Keywords dark matter, neutrino, liquid xenon detector, “PandaX”

1 引言

物理学主宰着自然界从“极小”到“极大”最基本的规律，微观至最基本的构成单元——基本粒子，宏观至整个宇宙。随着20世纪宇宙“大爆炸”理论和粒子物理标准模型的建立，科学家

逐渐发现了“极小”的基本粒子和“极大”的宇宙之间千丝万缕联系中的冰山一角。这方面研究——物理宇宙学——的开创者之一 James Peebles 也因此获得了2019年诺贝尔物理学奖。

但现代宇宙学观测也对目前的物质科学理论提出了严峻挑战。从对早期宇宙遗留的微波背景辐射的精确测量，到宇宙大尺度结构的巡天观

测,到通过引力透镜测量星系结构质量的分布,再到星系旋转曲线的测量等,都得出了一个共同的结论——在我们的宇宙中,普遍存在一种看不见的暗物质,主导了宇宙和星系的形成和演化。但我们并不知道它们为什么存在于宇宙中?它们存在的基本形式到底是什么?是否由标准模型中的基本粒子组成?另一个巨大谜团是当前的宇宙几乎完全由正物质组成,可是宇宙早期的正反物质应当是成对产生(pair production)的,究竟是什么机制导致了反物质的消失?我们已知的粒子和相互作用机制对这些问题无法给出解释!

从理论的角度来看,尽管粒子物理标准模型取得了巨大成功,但是标准模型仍存在缺陷,比如无法自然地解释希格斯粒子质量如此之小,也无法解释不同费米子间质量的巨大差异等。理论学家普遍认为存在超出粒子物理标准模型的新理论。自20世纪下半叶起,理论学家就发展了例如时空超对称、额外维度等新物理模型,弥补标准模型的不足。很多这类理论都预测暗物质是一种新的基本粒子,质量大约在电弱对称性破缺的能区(百 GeV/c^2 至数个 TeV/c^2 量级,类比一个质子质量约为 $0.938\text{ GeV}/c^2$),并且与普通物质有微弱的微观相互作用。这类暗物质粒子也被统称为“弱相互作用重粒子”(weakly interacting massive particles,简称WIMPs)。新物理模型中的WIMPs和普通物质的微弱相互作用,恰好可以使它们在早期宇宙脱离热平衡,产生今天宇宙中观测到的暗物质密度!这样“一石二鸟”解决粒子理论和宇宙学基本问题的“巧合”,也被称为是“WIMPs奇迹”^[1],赋予了WIMPs极强的科学吸引力。1985年,Witten和Goodman首次提出,在深地极低本底实验室通过高灵敏度探测器来搜寻WIMPs与原子核碰撞的反冲信号便可以“直接探测”WIMPs^[2]。这个看似简单的探测原理一直在激励着全球许多实验对暗物质粒子开展探测。国际上空间站的暗物质间接探测也非常活跃。间接探测是指对宇宙中暗物质粒子湮灭产生的稳定的末态粒子进行探测从而实现暗物质粒子的寻找和研究。实验通常在太空中进行,可以显著减少地球大气层的干扰,例如丁肇中先生领导的阿尔法磁谱仪AMS-02实验^[3]和我

国的“悟空”(DAMPE)暗物质卫星^[4],它们都在TeV能区的高能(正)电子谱中观察到异常,或许和银河系中WIMPs湮灭信号有关联。

中微子是标准模型中和暗物质性质最为相似的“幽灵粒子”。1998—2002年间,日本超级神冈^[5]和加拿大SNO地下实验^[6]分别利用大气中微子和太阳中微子,发现“中微子振荡”从而证实中微子有微小质量,获得了2015年的诺贝尔物理学奖。我国的大亚湾实验也于2012年在国际上率先发现了第三种中微子振荡模式。中微子质量非常轻,不足以成为暗物质候选者,但中微子或许同宇宙中正反物质的不对称性紧密联系。1937年意大利物理学家马约拉纳提出中微子可能是自身的反粒子,即马约拉纳费米子。此后的研究表明,通过所谓的“跷跷板机制”^[7],马约拉纳中微子可以为中微子的微小质量提供完美解释;而早期宇宙中非对称的正反(右手)马约拉纳中微子也可以解释宇宙演化中的反物质消失之谜^[8]。1939年,温德尔·福瑞便提出特定原子核中两个中子同时发生贝塔衰变,但衰变末态中没有中微子的过程——即无中微子双贝塔衰变(neutrino-less double beta decay, NLDBD)——是马约拉纳中微子存在的判据,但这种极其稀有的衰变对探测器本底要求极高,科学家至今还未在地下实验室中找到实验证据。

对于暗物质的探测以及中微子马约拉纳属性的判断,将为人类进一步认识物质世界及其起源和演化打开新的大门。科学家们已经花费了多年时间苦苦寻找暗物质与无中微子双贝塔衰变的过程,迄今为止,依然没有发现确凿信号。但是实验物理学家从未停止追寻的脚步,试图采用多种方式探测暗物质和测量多种同位素的NLDBD信号,不断压低本底,提高探测器的探测灵敏度。下面本文将主要介绍液氙探测实验技术,并介绍我国以暗物质探测和无中微子双贝塔衰变信号测量为主要目标的液氙探测实验——PandaX的发展与未来规划。

2 氙探测器

基于氙(Xe)这种惰性气体的探测器由1968年诺贝尔物理学奖获得者Luis Walter Alvarez发明。氙

的原子序数是54，其平均摩尔质量为131.3 g/mol。氙气在空气中的含量低于0.1 ppm(1 ppm=0.0001%)，商业生产中通过空气分离和进一步的低温精馏技术获得高纯氙气，并通过制冷机或者液氮制冷冷却到-100°C，形成密度约为3 g/cm³的液氙。液氙的高密度使得伽马射线在液氙中具有较强的衰减性(100 keV的伽马射线在液氙中的衰减长度约为0.25 cm)。

在过去的20年中，随着气体液化提纯技术的飞速发展，大型液氙探测器逐渐成为国际上搜寻暗物质和马约拉纳中微子的最前沿探测手段之一。2008年起，意大利的XENON实验合作组首次利用液氙探测器，验证了该技术对暗物质探测的能力和潜力^[9]。此后的10多年中，液氙探测器成为对100 GeV—10 TeV的大质量WIMPs区域探测的国际上最为领先的探测技术。目前，欧洲的XENON^[10]、美国的LUX^[11](Large Underground Xenon Experiment)和我国的PandaX实验^[12, 13]形成激烈竞争态势。巧合的是，氙的天然同位素氙-136(天然丰度8.9%)可以发生双贝塔衰变成为钡-136，从而是NLDBD和马约拉纳中微子的理想探针。国际上基于氙-136的探测实验包括美国的EXO-200(Enriched Xenon Observatory)实验^[14]和日本的KamLAND-ZEN实验(氙溶于液体闪烁体中)^[15]，它们在探测灵敏度上也是交替领先。

在基于液氙的暗物质探测中，氙原子核质量由于与WIMP粒子的质量相匹配^[16, 17]，可以实现较大效率的能量沉积。“黄金道”的信号一般指的是弹性散射后原子核反冲的信号。近年来也有相当的理论家关注暗物质和壳层电子散射后的信号^[18]。而探测器本底主要是由外界的伽马射线在探测器中踢出的电子(例如发生康普顿散射)产生的电子反冲信号，如图1所示。这类探测器也被称为气液两相型氙时间投影室(time projection chamber, TPC)，它们具有优异的靶质量以及对能量和3D位置的重建能力。如图2所示，探测器的几何结构一般为圆柱形，易于安装和调试。当

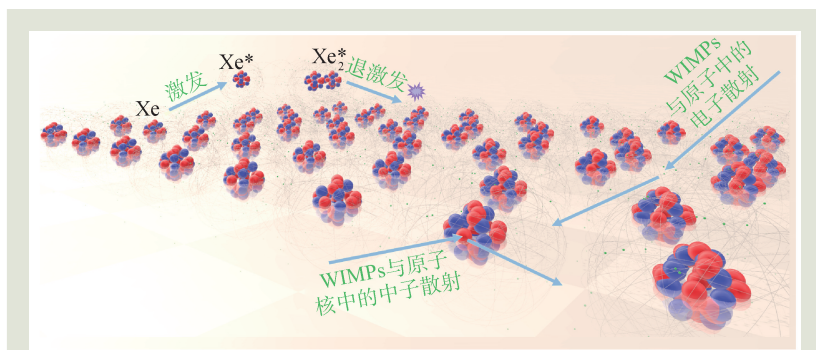


图1 暗物质与氙原子核相互作用过程示意图

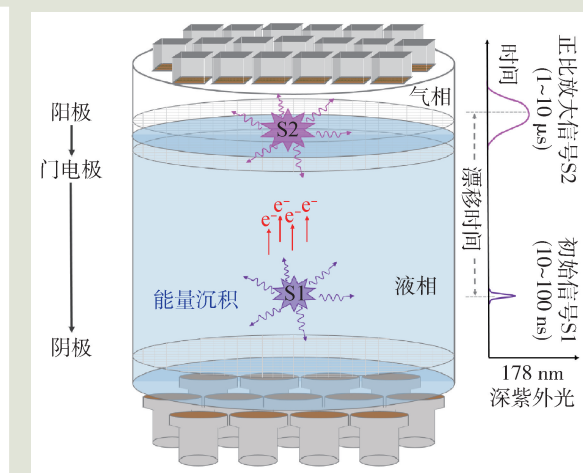


图2 气液两相氙探测器工作原理简图^[9]

入射粒子与探测器中的氙原子发生碰撞后，以氙激发态和电子离子对的形式沉积能量。其中，激发态氙原子与周围的氙原子通过热运动发生碰撞，产生氙的二聚态分子形式。这些氙的二聚态会在几十纳秒内退激发，产生波长为178 nm的紫外闪烁光，通常被称为S1^[20, 21]。另一方面，能量沉积中产生的氙离子有一定的概率与周围的非束缚态电子重结合(recombination)，也会贡献给S1。S1会被位于探测器两端的光电倍增管(photo-multipliers, PMTs)探测到。探测器内通常有三重电极结构，从下到上依次是阴极、门电极以及阳极。这样的电极设置是为了探测能量沉积过程中和光子同时产生的电离电子。在漂移区域(阴极与门电极之间，为探测灵敏区域)，电离电子在电场的作用下向着阳极的方向移动。液氙液位位于阳极与门电极之间，此区域有较强的电场(10 kV/cm)用来从液氙里提拉出电子，电子在气氙中加速产生二次的发光，并被PMTs探测到，构成次级正

比放大信号(S2)。

S1 与 S2 同时携带反冲能量的信息。同时, TPC 是一个有着高灵敏位置重建能力的探测技术: S1、S2 在时间上的差异为电离电子漂移时间, 隐含事例位置的在漂移方向的信息; 而 S2 在顶部 PMT 上的分布可以重建出事例发生的水平位置。高精度的位置重建使探测器具备了“自屏蔽”的能力。此外, 同时探测 S1 和 S2 具有很强的本底辨别能力: 暗物质信号产生的核反冲与伽马本底产生的电子反冲相比, 将会产生更大的电离密度从而导致更大的重结合概率, 因此会有较小的 S2/S1 比例。图 3 展示了 PandaX-4T 实验测得的电子反冲和核反冲不同的信号响应。

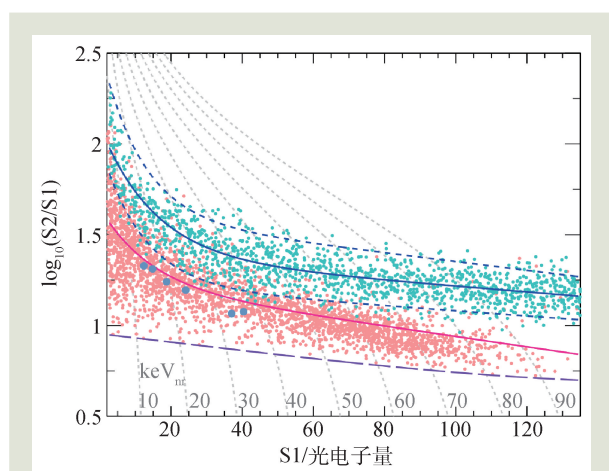


图 3 两相液氙探测器中, 刻度事例在 $\text{Log}_{10}(\text{S2/S1})$ 对 S1 信号空间上的分布。蓝点为电子反冲事例, 红点为核子反冲事例。可以看出, 两部分信号相互分离, 说明 S2/S1 的比值对两种反冲信号有较强的鉴别能力^[23]



图 4 PandaX-II 实验探测器。从外到内依次为铅、塑料材料的聚乙烯和高纯铜。高纯铜内部不锈钢容器中盛放的是用于探测暗物质的氙^[23]

如图 4 所示, 暗物质探测实验中, 除了液氙本身的自屏蔽效应外, 为了阻挡探测器外围的放射性物质进入探测器中心区域, 一般会在探测器周围包裹上屏蔽装置。例如, 在 PandaX 实验中, 我们在探测器的外围搭建了常用的铅、铜和聚乙烯组成的被动屏蔽体。来自探测器外围的放射性本底主要分为两类: 中子本底和伽马本底。由于富含氢元素, 聚乙烯是很好的中子屏蔽材料。而对于伽马本底, 一般来讲, 越致密的物质, 其屏蔽效果越好, 故而选用铅和铜。

3 PandaX 实验发展与现状

PandaX, 其全称为 Particle and Astrophysical Xenon Experiments, 合作组成立于 2009 年, 近 10 年来蓬勃发展, 目前具有 70 多位来自于 4 个国家十几个单位的合作者。顾名思义, 该实验是采用氙探测器开展粒子与天体物理的交叉研究——即暗物质和中微子研究。实验基地位于由雅砻江水电和清华大学共同开发的四川凉山锦屏地下实验室。锦屏地下实验室是世界上埋藏最深的地下实验室, 其上方的 2400 m 厚的岩石层能够保证深地实验室中的宇宙射线背景信号降低到极低的水平 (1 个缪子/平方米/周); 周围岩石为大理石, 放射性较低, 自然条件非常优越。实验室里目前有清华大学主导的基于高纯锗 CDEX 实验和上海交通大学牵头的 PandaX 液氙实验, 两个实验的技术路线高度互补。在过去的 10 年中, PandaX 合作组完成了两代暗物质实验, 取得了跨越性的进展(图 5)。

第一代 120 公斤级 PandaX-I 实验一举排除了多个国际实验发现的疑似暗物质信号^[24], 被 *Science* 杂志专题报道。2010 年前后, 国际上有数个实验, 包括欧洲的 DAMA/LIBRA 和 CRESST-II 以及美国的 CoGeNT 和 CDMS-II-Si, 都宣称在轻质量区间发现了疑似暗物质事例的超出。PandaX-I 实验有更高的灵敏度, 运行后却未发现疑似信号。那如何定量的理解这个“零结果”呢? 可以做个类比, 假设你用望远镜看一个遥远的区域, 当相机曝光很长时间之后, 没有看到星星, 并不能说黑色区域没有星星, 只能说根据这么长时间

的曝光量和望远镜的能力，即使那边有星星，这些星星的亮度一定低于某一个值。与此同理，PandaX-I实验没有看到暗物质信号，不说明没有暗物质，但可以对暗物质和普通物质碰撞的几率或者相互作用的强度设一个上限。图6中的纵轴是WIMPs与核子的散射截面，即相互作用强度，横轴是暗物质的质量，红线以上的区域被排除。图中也包括了上述多个国际上实验曾发现的暗物质疑似信号区域，PandaX-I的实验结果一举将它们排除。

第二代580公斤级PandaX-II实验，在同美国、欧洲实验的激烈竞争中，两度取得暗物质和核子相互作用国际领先的限制，发表《物理评论快报》文章6篇^[14, 15, 25-28]，他引1500余次，并且入选2016年度《科技导报》十大科学进展和2017年度美国物理学会亮点。图7给出了2016年《物理评论快报》中PandaX-II低本底运行首个80天暗物质探测结果，这是当时世界上正式发表的灵敏度最高、曝光量最大的液氙暗物质探测结果，对暗物质粒子的性质作出了最强的限制，可以看出，这个结果比美国LUX的探测结果在大质量区提升了近3倍。此外，相比于PandaX-I，最低排除点从 $1.01 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 @ 44.7 \text{ GeV}/c^2$ 降低至 $2.5 \times 10^{-46} \text{ cm}^2 @ 40 \text{ GeV}/c^2$ ，对于散射截面的限制增强了将近两个数量级。

PandaX-II也于2019年首次利用液态自然氙探测器中的氙-136寻找NLDBD^[29]，尽管结果相比EXO-200和KamLAND-ZEN还有差距，却是国际上首次利用液氙暗物质探测器寻找马约拉纳中微子，显示了未来更大规模的液氙实验开展多物理目标研究的强大潜力。

2018年，XENON1T实验最新结果公布，实验数据在原子核反冲的信号区间略有超出，尽管数据同纯本底涨落仍然在1—2个标准方差内一致(22%置信度)^[12]；2020年6月，XENON1T合作组公布了低能电子反冲的数据，也发现了能谱上的疑似超出，可以被解释为太阳轴子或中微子反常磁矩^[30]，引起了学界的广泛关注。暗物质或处在被发现的边缘！



图5 左侧为PandaX-I, 120 kg液氙探测器(2009—2014), 高约15 cm, 直径60 cm; 右侧为PandaX-II, 580 kg液氙探测器(2014—2019), 高约60 cm, 直径约65 cm^[23]

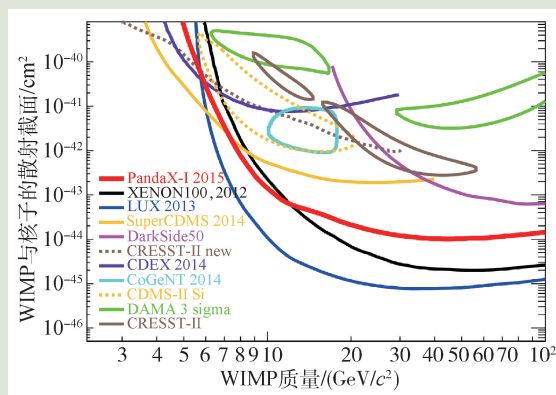


图6 PandaX-I实验全曝光量数据得到的90%置信水平下, 不同质量的WIMPs粒子与核子的自旋不相关散射截面图(红色实线)。横轴是暗物质粒子的未知质量, 纵轴是暗物质粒子与核子的碰撞截面。此外, 图中给出了世界上其他实验的同期结果^[24]

我国的科学家也在和时间赛跑。锦屏地下实验室二期建设通过“十三五”国家重大科技基础设施建设项目正式立项，建成后将成为国际上规模最大的深地实验室。在科技部和基金委的支持下，PandaX合作组正在中国锦屏地下实验室二期B2实验厅开展下一代的4吨级PandaX-4T实验的研究工作。PandaX-4T体量的升级带来更大的自屏蔽效应，进一步降低了外来的放射性本底，低本底、低阈值以及高精度能量和位置重建使其在马约拉纳中微子和天体中微子的研究中具有独特的优势。2020年11月起，PandaX-4T实验开始试运行。图8给出了根据95天试运行数据发表的首个结果，再一次将国际上对暗物质的限制提升了30%。虽然目前理论学家预测的暗物质有可能存在的区间中有很大部分区域已经被排除，但是还存在着更广阔的空间等待人类去扫描。

而今, 美国的 LZ(7吨)实验和欧洲的 XENO-NnT(6吨)实验也在紧锣密鼓的进行中^[31]。为了能够抓住发现暗物质的契机, 在进行 PandaX-4T 实验的同时, 合作组也在筹划下一代更灵敏的实验, 希望可以触及来自于太阳和大气中微子带来的所谓“中微子地板”(图8中微子相干散射淡灰色区域上方的边界线就是“中微子地板”), 对 WIMP 模型做出决定性判断。下一代 PandaX 实验的规划是建设一个数十吨级可以逐步升级的探测

器。它也将开展多个物理目标的研究: 30吨的天然氙中将有2.7吨有效质量的氙-136, 加上液氙探测器高灵敏度的性能和对本底的“自屏蔽”抑制, 可以以极高灵敏度开展 NLDBD 的研究寻找有效质量至 $15 \text{ meV}/c^2$ 的马约拉纳中微子; 它也可以测量和研究来自于太阳、大气层和古老超新星爆发产生的中微子。

全球氙气年产量为60—80吨, 中国产能占比高达三分之一, 其中我国宝武集团氙气的产能占全国总产量的72%, 高纯氙气生产工艺技术水平处于国内领先、国际先进位置, 这使我国在氙气来源方面具有强大的优势。PandaX 实验也计划实现大规模自然氙的同位素分离技术, 一旦有所发现, 将通过分离后的氙同位素确定暗物质同原子核作用是否存在自旋相关性、或确认马约拉纳中微子信号。

4 总结与展望

在过去的十多年中, 基于液氙探测器的一系列实验与测量结果不断涌现, 共同推进了人类对宇宙本源问题的探索。我国的 PandaX 实验, 自2009年启动, 从无到有完成了 PandaX-I、PandaX-II 和 PandaX-4T 三代液氙探测器的建设, 在获得具有国际水平测量成果的同时, 也显示了利用更大规模液氙实验开展多物理目标研究的强大潜力。“路漫漫其修远兮, 吾将上下而求索”, 我国如果成功在锦屏开展下一代数十吨级的液氙探测实验, 将可以在粒子物理和天体物理的交叉领域开展多项引领性的实验研究, 实现: (1)将暗物质探测的灵敏度推进至“中微子地板”, 对 WIMP 模型做出决定性判断; (2)通过搜寻探测器中氙-136同位素的无中微子双贝塔衰变, 对马约拉纳中微子有效质量测量提高至 15 meV 的灵敏度; (3)以极高灵敏度探测多种天体中微子。这些研究会使我国科学家有机会在宇宙最深层次问题的探索上取得突破, 大幅度提升我国本领域的研究队伍水平和尖端技术攻关的能力, 甚至给我们带来完全出乎意料的科学发现。

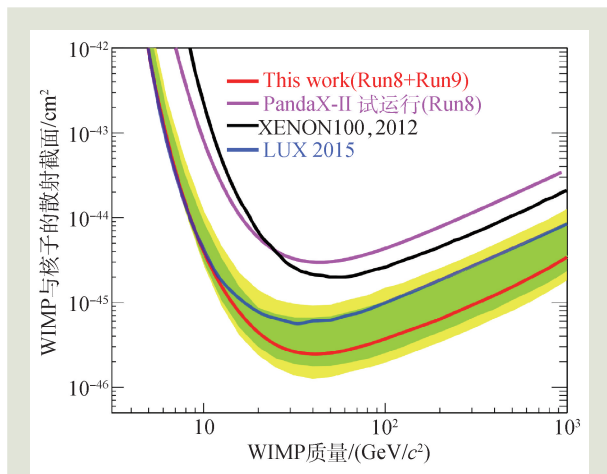


图7 PandaX-II 实验全曝光量数据得到的90%置信水平下, 不同质量的WIMPs粒子与核子的自旋不相关散射截面图(红色实线)。图中的蓝线是2015年美国LUX合作组发表的探测结果, 红线是PandaX-II合作组实验当时所达到的最新世界记录^[14]

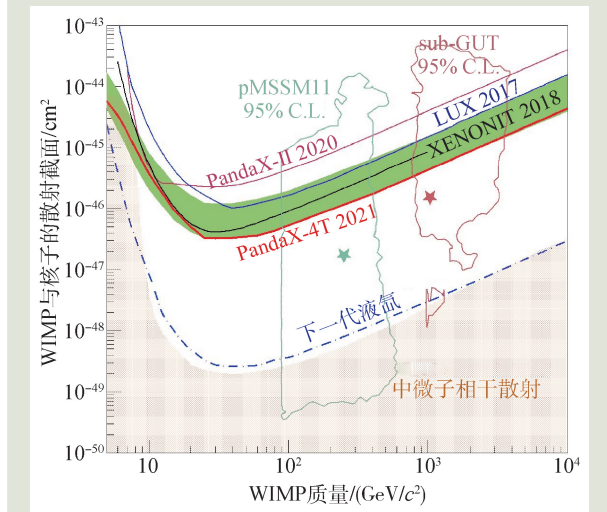


图8 WIMP与原子核弹性散射截面和WIMP质量的关系图。图中对比了PandaX-4T最新成果以及PandaX-II 2020、LUX 2017和XENON1T 2018的探测结果

参考文献

- [1] Kolb E W, Turner M S. The Early Universe. Addison-Wesley Publishing Company, 1988
- [2] Goodman M W, Witten E. Phys. Rev. D, 1985, 31: 3059
- [3] Aguilar M, Alberti G, Alpat B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 141102
- [4] Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R *et al.* Nature, 2017, 552: 63
- [5] Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 1562
- [6] Ahmad Q R, Allen R C, Andersen T C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 011301
- [7] Yanagida T. Prog. Theor. Phys., 1980, 64: 1103
- [8] Fukugita M, Yanagida T. Phys. Lett. B, 1986, 174 (1): 45
- [9] Angle J, Aprile E, Arneodo F *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 021303
- [10] Aprile E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 111302
- [11] Akerib D S, Alsum S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 021303
- [12] Tan A, Xiao M, Cui X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117: 121303
- [13] Cui X, Abdurkerim A, Chen W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 181302
- [14] Auger M, Auty D J, Barbeau P S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 109: 032505
- [15] Gando A, Gando Y, Hanakago H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 062502
- [16] Buchmueller O, Cavanaugh R, Colling D *et al.* The European Physical Journal C, 2011, 71: 1634
- [17] Trotta R, Feroz F, Hobson M *et al.* Journal of High Energy Physics, 2008, 12 (12): 1263
- [18] Bernabei R, Belli P, Montecchia F *et al.* Phys. Rev. D, 2007, 77 (2): 145
- [19] 肖梦姣. 利用 PandaX 一期的探测器寻找低质量的暗物质. 上海交通大学, 2016
- [20] Kubota S, Hishida M, Raun J. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1978, 11 (12): 2645
- [21] Hitachi A, Takahashi T, Funayama N *et al.* Phys. Rev. B, 1983, 27(9): 5279
- [22] Meng Y, Wang Z, Tao Y *et al.* 2021, arXiv: 2107.13438
- [23] PandaX Photos. <https://photos.pandax.sjtu.edu.cn/>
- [24] Xiao X, Chen X, Tan A *et al.* Phys. Rev. D, 2015, 92: 052004
- [25] Cheng C, Xie P, Abdurkerim A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126 (21): 211803
- [26] Ren X, Zhao L, Abdurkerim A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 021304
- [27] Fu C, Zhou X, Chen X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 181806
- [28] Fu C, Cui X, Zhou X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 071301
- [29] Ni K, Lai Y, Abdurkerim A *et al.* Chinese Physics C, 2019, 43 (11): 113001
- [30] Aprile E, Aalbers J, Agostini F *et al.* Phys. Rev. D, 2020, 102 (7): 072004
- [31] Lafontaine C, Tallman B, Ellis S *et al.* Universe, 2021, 7 (8): 270



卓凌机电
FOR VACUUM · FOR CRYOGENICS

一站式真空低温设备 及应用方案



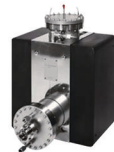
离子泵 吸气泵



VAT角阀



普发分子泵



安捷伦
离子泵



VACGEN
位移台



VACGEN
微漏阀



VAT插板阀



普发质谱仪



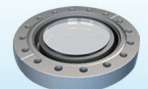
住友
低温泵



住友
制冷机



TORR SCIENTIFIC LTD



TSL视窗



标准件



腔体

www.zlvacuum.com

更多产品和联系方式可查看



联系人
刘鑫

量子测控解决方案

新品上市 震撼来临

任意波形发生器 AWG4100



4个独立方波输出通道



采样率高达1.2 GSa/s



高达16 bit垂直分辨率



存储深度高达512 MSa/ch



锁相放大器 LIA001M



DC~1 MHz解调频率



100 MSa/s、16 bit ADC采样



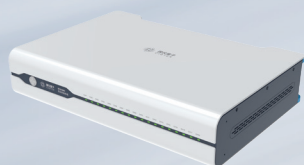
电流和差分电压输入



支持内部参考、外部参考、双参考模式锁相解调



分数谐波和多次谐波检测



同步控制系统SCS1800



时间数字转换器TDC1610



数据采集卡DAQ2100



数字延时脉冲发生器ASG8000

