

暗物质探测和无中微子双贝塔衰变实验

肖梦姣¹ 黄俊挺¹ 韩柯¹ 张园园² 刘江来^{2,1}

(1. 上海交通大学物理与天文学院 200030; 2. 上海交通大学李政道研究所 200030)

前言

暗物质和中微子普遍存在于宇宙中,对宇宙和星系的形成与演化起了主导作用,但目前我们对暗物质的本质和中微子的基本性质还所知甚少。暗物质最初是由天文学家为了解释天体的运动而提出来的。现代的宇宙学观测,特别是引力透镜效应、宇宙微波背景辐射的各向异性和大尺度结构等,更进一步明确了暗物质的存在。当前的标准宇宙学模型表明,暗物质通过引力相互作用直接影响了星系的形成以及星系在宇宙中的分布。然而,对于暗物质的其他性质,特别是粒子属性我们还一无所知。粒子物理学家倾向于认为,暗物质是由某种未知的新粒子组成的;除引力作用外,它与普通物质可能还存在其他非常微弱的相互作用。

在所有标准模型粒子中,中微子在宇宙中的数量仅次于光子,每秒钟约有 10^{15} 个中微子穿过我们的身体。中微子质量极轻,至少比电子轻一百万倍。由于仅参与弱相互作用,中微子与普通物质几乎不发生反应,却几乎见证了从宇宙起源到天体形成的各个过程。理论学家认为,中微子很可能是自身的反粒子。然而,只有观测到一种极其稀有的无中微子双贝塔衰变,方可确认该理论,进而有望解开为何现在的宇宙中几乎全部是正物质、不存在反物质的谜团。

鉴于暗物质碰撞信号和无中微子双贝塔衰变均属极其稀有事件,实验研究过程中均要求极致的本底控制,同时需要大体量的探测器以及复杂的信号探测与数据获取系统。因此,科研领域常提及的大科学装置成为探索这些事件的重要工具。本文

将简要概述国际上关于暗物质和无中微子双贝塔衰变的实验研究现状,并阐述我国科学家在该领域的研究积累和未来前沿规划。

一、暗物质

近百年的天文学观测表明,宇宙中存在大量看不见的物质——“暗物质”,其对宇宙和星系的形成与演化起了主导作用。基于宇宙中微波背景辐射各向异性观测和标准宇宙学模型,宇宙中暗物质约占全部物质总质量的85%。然而,迄今为止人们尚未在实验中明确探测到暗物质,我们对其本质还知之甚少。一种观点曾认为,产生于早期宇宙的原初黑洞,由于几乎不发光,很可能是暗物质的一部分。而粒子物理学家则更倾向于宇宙中有尚未被发现的新粒子或新相互作用。大量的新物理理论研究预言了一类质量在弱电破缺能区(~ 100 GeV)附近的暗物质粒子,即“弱相互作用重粒子”或WIMP(Weakly Interacting Massive Particle)。它的质量非常大,与普通物质之间只存在“类似于”标准模型中的弱相互作用和万有引力。这种新粒子恰好在早期宇宙适当的时刻热解耦,产生今天宇宙中观测到的暗物质密度,同时解决了粒子理论基本问题,这种“巧合”也被称为是“WIMP奇迹”,使得WIMP成为最受物理学家青睐的暗物质候选者之一。除了传统的WIMP暗物质候选粒子外,如果放松对暗物质质量和相互作用强度的“理论偏好”,质量为核子质量甚至更轻的暗物质也有可能性。此外,另外一大类有很强理论动机的暗物质理论就是所谓的轴子或类轴子,由Pecci、Quinn、Wilczek以及Weinberg在1977年为解决强相互作用中为何CP守

恒的问题而提出。

1. 新世纪暗物质“疑云”

进入新世纪以来,暗物质探测领域不时地为人们带来惊喜。这些惊喜源自空间和地下的实验,基于不同的探测机理、在不同的信号通道上均传出超出预期的信号。部分疑似暗物质信号后续实验已予以排除,然而另一些依然悬而未决,亟待进一步检验。

2010年前后,国际上数个地下实验观测到超出本底预期的信号,并被解释为20 GeV左右的暗物质信号。这些实验包括基于晶体探测器的DAMA-LIBRA实验(NaI晶体)和CRESST-II实验(CaWO₄晶体)、基于半导体探测技术的CDMS-Si实验(极低温Si半导体)和CoGENT实验(Ge半导体)。这一系列结果曾在国际范围内引起广泛关注,但后续实验很快排除了这些疑似事例。2020年,XENON1T实验发布了疑似超出本底预期的电子反冲事例的数据结果,并且该超出可以由太阳轴子解释。然而,近期XENON1T的升级实验XENONnT已排除这种太阳轴子解释的可能性。

在过去十余年间,除地下实验外,空间实验亦探测到了许多令人鼓舞的超出信号。然而,由于对天体物理本底的精确测量不足,这些超出的含义仍悬而未决。2011年,FERMI-LAT伽马射线望远镜观测到银河系中心的伽马射线在GeV波段有超出,该超出可以用~10 GeV暗物质的湮灭信号予以良好解释,但也可能源于附近天体源,如脉冲星。2013年,由华裔科学家丁肇中先生领导的AMS-02实验发布了精确的正电子比例观测结果,确认了PAMELA卫星于2009年观测到的正电子流强在几十GeV以上的明显超出。这些额外的正电子可能源于TeV量级暗物质的湮灭,但也可能是其他未知的天体源,如脉冲星或超新星爆发等加速的正电子。虽然墨西哥高海拔水切伦科夫天文台(HAWC)对Geminga和PSR B0656+14的观测显示,脉冲星周围的电子扩散系数远小于预期,很难产生主导AMS-02等实

验观测到的正电子超出,但是对该超出的暗物质解释也依然是众说纷纭。特别值得一提的是,我国2015年发射的暗物质探测卫星“悟空”精确测量了宇宙线电子(不区分正负电子)能谱,并在~TeV处观测到“拐折”以及在~1.4 TeV的疑似超出。对这些超出的解释强烈依赖于物理模型,目前来看仍有可能是暗物质的信号。

在光子和电子(包括正电子)能谱上的反常超出之外,AMS-02实验还观测到了反物质的超出。2016年,AMS-02首次发布了宇生反质子的测量结果。物理学家发现,在低能区(动能为几个GeV)超出宇宙线的本底,可以用20~80 GeV的暗物质信号来解释。引人注目的是,如果将AMS-02的低能反质子谱与FERMI-LAT观测到的银河系中心伽马射线谱进行联合分析,这些超出强烈地指向了~80 GeV的暗物质信号。虽然后来FERMI-LAT对白矮星系的观测未能发现与银心同样的超出,但多项研究表明,对白矮星系的观测结果仅能排除暗物质通过某些特定的通道($b\bar{b}$)衰变的可能性。因此,~80 GeV的暗物质产生银心GeV伽马超出和低能反质子超出依然在理论上站得住脚。更令人振奋的是,2018年AMS-02实验公布了其关于宇生反氦的观测结果,共发现了8个反氦事例(包括6个反氦-3和2个反氦-4)。虽然关于这些反氦事例的起源仍在进一步仔细论证中,但对于暗物质“猎手们”来讲无疑是极其鼓舞人心。

2. 国际暗物质探测大科学装置前沿

暗物质探测实验假设暗物质粒子同已知物质之间有一些除了引力之外的相互作用,从而可以通过直接、间接和实验室产生三种方式开展探测,原理见图1。目前暗物质探测实验在全世界范围内如火如荼地开展,国际竞争激烈。围绕国际上已投入运行的项目,本节将着重介绍与我国暗物质实验布局相关的国际暗物质探测大装置,主要集中在地下实验和空间实验两方面。

1985年,Edward Witten等提出将WIMP暗物质

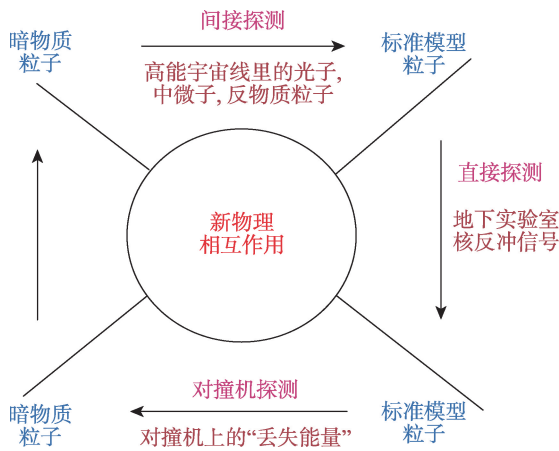


图1 暗物质多种实验探测方式的原理示意图

和原子核的碰撞信号作为“黄金探针”。此后,国际上大量的实验涌现,在国际各大深地实验室中(见),以多种探测手段搜寻 WIMP。经过近 30 年的发展,“两相型”液氙时间投影室(简称“液氙 TPC”, Time Projection Chamber)以其突出的探测性能、强大的本底甄别本领和优越的升级能力脱颖而出,成为当今世界上对暗物质,尤其是重质量暗物质探测最为灵敏的技术手段。在最新一轮的国际竞争中,液氙暗物质实验在全球范围内呈现“三足鼎立”态势,包括我国的 PandaX-4T(有效质量约 4 吨)、欧洲的 XENONnT(有效质量约 6 吨)和美国的 LZ(有效质量约 7 吨)。位于我国四川锦屏地下实验室的 PandaX-4T 实验率先完成建设,并于 2021 年发布 0.63 吨·年的试运行结果,取得了暗物质与核子的自旋无关散射截面最强的限制。一年后, XENONnT 和 LZ 几乎同

时发布了其首个暗物质研究结果,其中 LZ 实验对暗物质的限制略胜一筹。然而,理论预言的暗物质与核子相互作用仍有大约 2~3 个数量级的参数空间待搜寻。根据美国 P5 规划,作为第二代(G2)液氙探测器, XENONnT 和 LZ 将分别继续运行至约 2028 年;随后,双方将寻求欧洲与美国实验的合并升级,并已形成一个非正式合作框架(XLZD)。

与液氙 TPC 探测机理相同,还有一类实验利用液氙作为媒介探测暗物质。相比较氙,氙的原材料成本更低,并且其闪烁光中的快、慢两种光可以用于“脉冲形状鉴别”(Pulse Shape Discrimination);但是,自然氙中含有的宇生同位素氙-39 具有放射性,也给该类型实验带来了挑战。国际上几个著名的液氙实验,包括 DEAP-3600、DarkSide-50、MiniCLEAN 和 ARDM 于 2017 年组成了全球液氙暗物质合作组(the Global Argon Dark Matter Collaboration),正在建设 DarkSide-20k(20 吨液氙),预期 2026 年投入运行。

轻质量暗物质(质量低于核子质量)在过去十余年里也广受关注。这类暗物质探测的核心挑战在于如何突破传统暗物质探测中的动力学限制。目前,国际上主要有三种实验方法:1) 依靠探测器更低的阈值,提升对轻暗物质碰撞的灵敏度。例如,美国采用极低温量能器技术的 SuperCDMS 实验,跳频 CCD 技术的 SENSEI 和 DAMIC 实验,以及我国的 CDEX 点电极高纯锗实验。这类实验将探测器

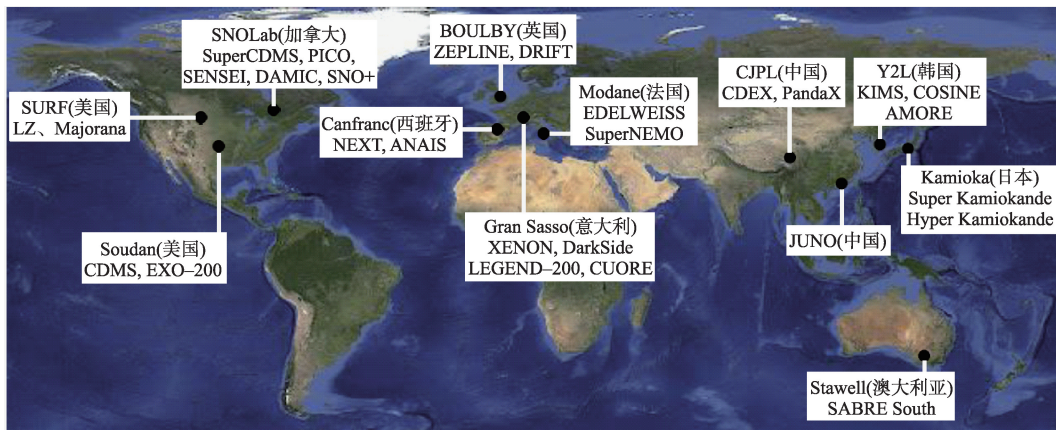


图2 世界各地代表性地下实验室和暗物质与中微子实验

阈值降至 100 eV,从而对 \sim GeV 的低质量暗物质探测更灵敏。近年来,利用各种量子传感器极低激发能特性的想法也开始流行;2) 采用原子中的电子作为散射靶,并且利用原子束缚态的效应提升对轻暗物质的灵敏度;3) 引入新的理论机制,例如对于每一种假设的相互作用,自然界均存在将暗物质加速的机制,从而绕开探测器阈值的限制。综合这些方法,暗物质直接探测实验可将探测灵敏区域扩展至低于 keV 质量区的“温暗物质”区间。

在空间实验方面,基于我国空间站的“高能宇宙辐射探测设施”(HERD)和“悟空”的下一代空间暗物质探测实验——甚大面积伽马射线空间望远镜(VLAST)对空间伽马射线的观测能力均将超过 FERMI-LAT,有望对银心的伽马超出进行检验。得益于美国宇航局(NASA)2022 年对国际空间站轨道的维护,AMS-02 实验预计将运行至 2032 年。同时,由 NASA 资助的高空气球实验(GAPS)将计划于 2024 年底在南极麦克默多科考站(McMurdo)升空。通过测量奇异核衰变产生的次级粒子来甄别反粒子,GAPS 对动能小于 250 MeV/核子的反核(反质子、反氦甚至反氦)具有较高灵敏度。GAPS 实验与 AMS-02 在能区上形成互补,通过不同的探测手段,有望对 AMS-02 观测到的低能质子超出和反氦事例进行有效检验,并在低能反氦这一全新的信号通道有所突破。

除 WIMP 暗物质外,国际上也有很多实验瞄准轴子暗物质。当前轴子探测实验主要基于强磁场下轴子与光子之间微弱的耦合作用。微波谐振腔(Haloscope)技术被应用于 ADMX 实验,其探测能区主要聚焦在 QCD 轴子附近(50 μ eV)。此外,非共振腔方案采用电磁感应效应、自旋进动效应、电介质效应等,在数十 μ eV 之外的轴子质量区间展开宽频搜寻。在更大的质量范围内(<1 eV),CERN 太阳望远镜(Helioscope)实验 CAST 以及其升级实验 IAXO 旨在寻找太阳轴子,而德国 DESY 的 ALPS-II 实验则利用激光穿墙技术(Light-Shining Through A Wall),在强磁场下使用强激光产生轴子,然后在“墙”的另

一端探测由轴子逆过程产生的光子。此外,国际上还有对人造光源或已知天体的各波段的高精度光谱、极化谱观测,以及自旋相关的第五种力的精确测量等研究。我国科学家通过天体物理数据对轴子有不少唯像学的研究,最近也开始通过超导共振腔对轴子开展实验寻找。同时,PandaX 和 CDEX 这些实验也可以利用极低本底探测器中的电子反冲信号开展对太阳轴子与电子耦合的搜寻。

二、中微子和无中微子双贝塔衰变

中微子是一种不带电荷的粒子,在标准模型中被认为是零质量。为了解释贝塔衰变电子能谱的连续性,中微子在 1930 年由 Pauli 首次提出。1956 年,Cowan 和 Reines 实验首次探测到反应堆放出的反电子中微子(1995 年诺贝尔奖)。随后不久,缪子中微子于 1962 年被 Lederman、Schwartz 和 Steinberger 领导的团队在布鲁克海文国家实验室用加速器打靶实验发现(1988 年诺贝尔奖)。2000 年,费米实验室的 DONUT 实验找到了最后一种已知的中微子,陶子中微子。这三种中微子就是我们常说的中微子的“味道”(Flavor)。太阳、核反应堆、大气层和超新星均是中微子的“生产基地”。其中,超新星爆发放出的中微子在 1987 年首次被探测到,与太阳中微子的发现共享了 2002 年诺贝尔奖。此外,宇宙大爆炸也产生了大量的中微子,它们携带了大爆炸后 1 秒时的信息,但目前还没有被实验直接捕捉到。

中微子有一个奇特的性质:在空间运动时味道会发生改变,即中微子振荡。比如说,缪子中微子在飞行过程中,有一定几率会变成陶子中微子。这种性质最早是超级神冈实验和 SNO 实验分别在 1998 年测大气中微子、2002 年测太阳中微子的时候发现的。这一系列发现直接证明了中微子具有非零质量,为此获得了 2015 年诺贝尔奖。中微子振荡和中微子质量的关系可以通过“反证法”来理解:零质量的粒子一定是以光速传播的,在这个极限运动的坐标系中,粒子的时间是停滞的,因此不可能出现不同味道中微子的转化! 中微子质量是第一个

超出粒子物理标准模型的确凿证据。我国的大科学装置也是中微子振荡研究的重要力量:2012年大亚湾实验通过反应堆中微子首次观察到了第三种中微子振荡模式,而三种中微子的质量顺序则是正在建设的江门中微子实验(JUNO)的最核心科学目标。

组成物质的基本粒子都有对应的反粒子,比如电子和正电子,它们电荷相反,但其他性质都一样。中微子不带电,是唯一可能是其自身反粒子的基本粒子,这个观点是1937年意大利物理学家马约拉纳(Majorana)提出的,现今这类粒子被统称为马约拉纳费米子。马约拉纳中微子由于能为中微子的微小质量提供完美解释,可能还和宇宙演化中的反物质消失之谜紧密相关,所以备受理论物理学家的青睐,但目前还没有被实验证实。

寻找马约拉纳中微子的黄金通道就是所谓的无中微子双贝塔衰变。贝塔衰变是原子核少数几种可能的衰变形式之一。在这个过程中,一个中子会变成一个质子,放出一个电子和一个反中微子,电子和反中微子都会带走一部分衰变能量。有一些原子核,单个贝塔衰变在能量上被禁止,但允许两个贝塔衰变同时发生,即(双中微子)双贝塔衰变,它在放出两个电子的同时,放出两个反中微子。该过程极其稀有,1935年被提出,直到1987年才首次被实验证实。更加奇妙的无中微子双贝塔衰变于1939年由Furry提出,简单来说,就是其中的一个反

中微子“变身”成了中微子,碰上了另一个反中微子后“正反相消”了,从而两个末态的电子就携带了衰变放出的所有能量(见图3)。这个实验信号就是一个单能峰,但至今还未被找到。同中微子振荡非常类似,这种现象可以看作是“正反中微子振荡”,也要求中微子具有非零的质量。反过来,对无中微子双贝塔衰变半衰期的实验限制,也可以用来限制中微子的质量特性,参数空间通常可以表现在所谓马约拉纳中微子质量和最轻中微子质量的两维空间(见后文图8)。

为了探寻无中微子双贝塔衰变,首先需具备大量可进行双贝塔衰变的同位素,并进行长期的测量。常用的同位素包括钙-48、锆-76、硒-82、钼-100、碲-130、氙-136等。除了少数自然丰度较高的同位素外,其余大部分需要进行富集。在过去几十年中,国际上已有多个实验利用不同同位素搜寻无中微子双贝塔衰变。对衰变末态的电子探测,实验手段丰富多样,可根据探测器信号主要分为光、热和电荷三类: 1) 热信号探测实验,如CUORE,通过探测晶格的振动(声子)来测量粒子能量; 2) 光信号探测实验,如KamLAND-Zen、SNO+、CANDLES等,通过光探测器捕捉带电粒子穿过液体或晶体闪烁体时放出的闪烁光,以测量粒子能量; 3) 电荷探测实验主要基于高纯锗探测器,如LEGEND,探测器为千克量级的二极管,带电粒子在其中产生电子-空穴对,可通

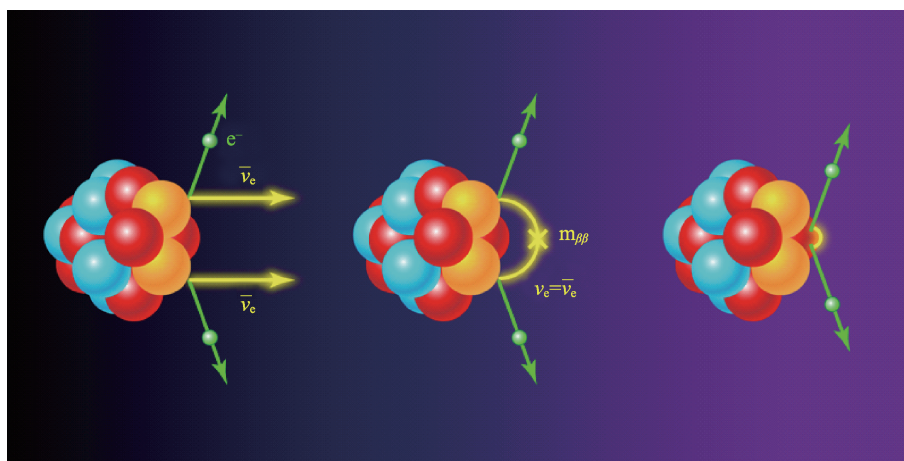


图3 无中微子双贝塔衰变示意图(上图源自 <https://physics.aps.org/articles/v11/30>)

过电极读出。有些实验具备多重信号探测能力,如 CUPID 和 AMoRE,既探测热信号,也探测光信号;基于液氙时间投影室的实验,如 EXO-200 和 nEXO,既探测电荷也探测光。根据双贝塔衰变同位素和探测器的关系,实验可以分为三类:1) 把探测器放在同位素源附近;2) 探测器本身由双贝塔衰变同位素富集而成,仅测粒子能量;3) 在第二类的基础上增加粒子径迹探测能力,用于鉴别粒子种类。

搜寻无中微子双贝塔衰变要求极低的放射性本底。本底来源主要包括宇宙线及其带来的放射性同位素、材料中的长寿命放射性同位素如铀和钍等、人造的同位素(主要由反应堆泄漏和地表核试验带来,如钴-60, 铯-137, 银-110m),以及各种来源的中微子。为避免宇宙线干扰,实验通常在地下实验室进行。全球主要地下实验室见图4,其中包括我国埋深最深、容积最大的锦屏地下实验室。

当前国际上对无中微子双贝塔衰变的搜寻主要由基于锗-76(GERDA)、碲-130(CUORE)和氙-136(EXO 和 KamLAND-ZEN)的实验主导。其中 KamLAND-ZEN 利用氙-136 对马约拉纳中微子有效质量的上限达到 $36\sim 156\text{ meV}/c^2$ 的国际最好水平。目前各国都在规划下一代更大体量的吨级富集同位素实验,包括 nEXO(美国为主)、KamLAND2-ZEN(日本)、LEGEND(欧美合作)、CUPID(欧美合作)等,将灵敏度瞄准在 $15\text{ meV}/c^2$,预期全面覆盖中微子质量反序对应的参数空间,如图8所示。美国核科学顾问委员会(NSAC)在《2023年核科学长期规划》中将建设吨级马约拉纳中微子实验(LEGEND, nEXO, CUPID)列为最重要优先级别。

三、我国在该领域的研究积累和未来规划

暗物质和中微子的马约拉纳属性均是理解宇宙组成、形成与演化的最根本的问题,重要性在国际科学界早有共识,也是美国和欧洲的粒子物理、核物理和天体物理领域规划中最高优先级的科学

研究之一。在过去的十多年中,依托位于四川大凉山地区的中国锦屏地下实验室国际埋深最深的实验条件,我国主导的 PandaX(Particle and Astrophysical Xenon Experiments)实验和 CDEX(China Dark Matter Experiment)实验已开展了十余年暗物质实验,产出多次国际领先的成果,并且在无中微子双贝塔衰变方面也都取得重要进展。目前,国家“十三五”重大科技基础设施之一——中国锦屏实验室二期已经投入运行,成为不仅是世界埋深最深,且规模最大的深地实验室。锦屏实验室二期具有8个独立的实验大厅,总容积约33万立方米,埋深约2400米岩石,并可以方便地通过隧道进出,为我国未来研究的发展提供了得天独厚的平台条件。

PandaX项目组成立于2009年,采用液氙TPC技术开展暗物质研究。其主要探测机理是基于暗物质与氙碰撞产生核反冲信号,而普通物质与氙反应则产生电子反冲信号,具体如图5所示:暗物质与氙原子碰撞并产生反冲信号,在探测器中以氙原子闪烁光和电离两种形式释放出能量。由于核反冲和电子反冲信号在闪烁光和电离信号上分配的能量比例不同,因此通过电离信号和闪烁光信号的比例可以有效区分暗物质和本底。液氙TPC技术提供暗物质与氙相互作用的“四维”信息(三维坐标和能量),具有强大的自屏蔽能力和升级能力,为 PandaX 开展丰富的暗物质和中微子研究提供了强有力的实验手段。

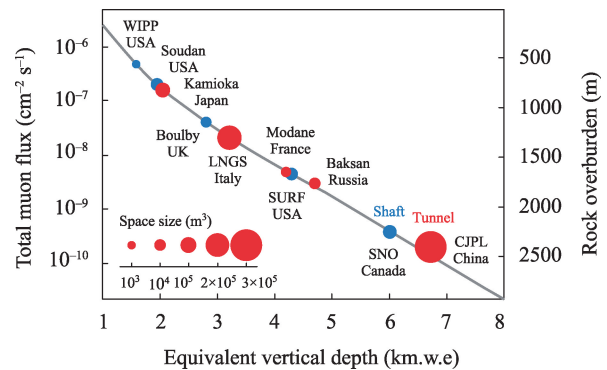


图4 世界各大深地实验室宇宙射线率、埋深和总体量(上图源自 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, Vol. 67: 231 (2017))

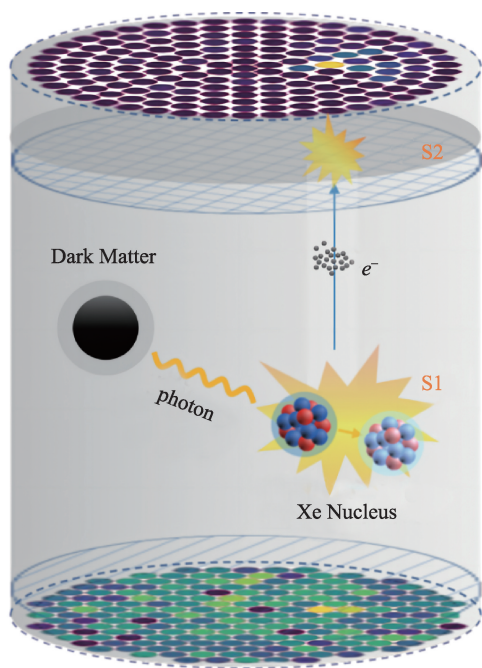


图5 两相型液氙TPC工作原理
(图源自 *Nature* 618, June 1 2023)

项目组完成的PandaX-I(120千克)和 PandaX-II (580 千克)已取得显著成果,正在开展 PandaX-4T (3.7吨)实验,代表性研究成果主要包括:1) PandaX-I 首个物理结果一举排除了国际上暗物质直接探测实验中出现的疑似信号;2) PandaX-II 和 PandaX-4T 取得对重质量 WIMP 与核子自旋无关散射的最强限制,三次刷新世界纪录,强烈排除了暗物质通过标准模型 Z 玻色子与普通物质相互作用的可能性;3) 对暗物质可能具有的电磁性质给出了最强限制,成果在 *Nature* 上发表。此外,合作组利用探测器中约 9% 的核同位素氙-136,发表了首个利用自然氙探测器寻找无中微子双贝塔衰变的实验结果和对双中微子双贝塔衰变的精确测量。

同 PandaX 实验类似,CDEX 也是通过测量暗物质与探测器靶标的原子核碰撞后产生的核反冲信号来直接探测暗物质,但侧重于低质量区域。

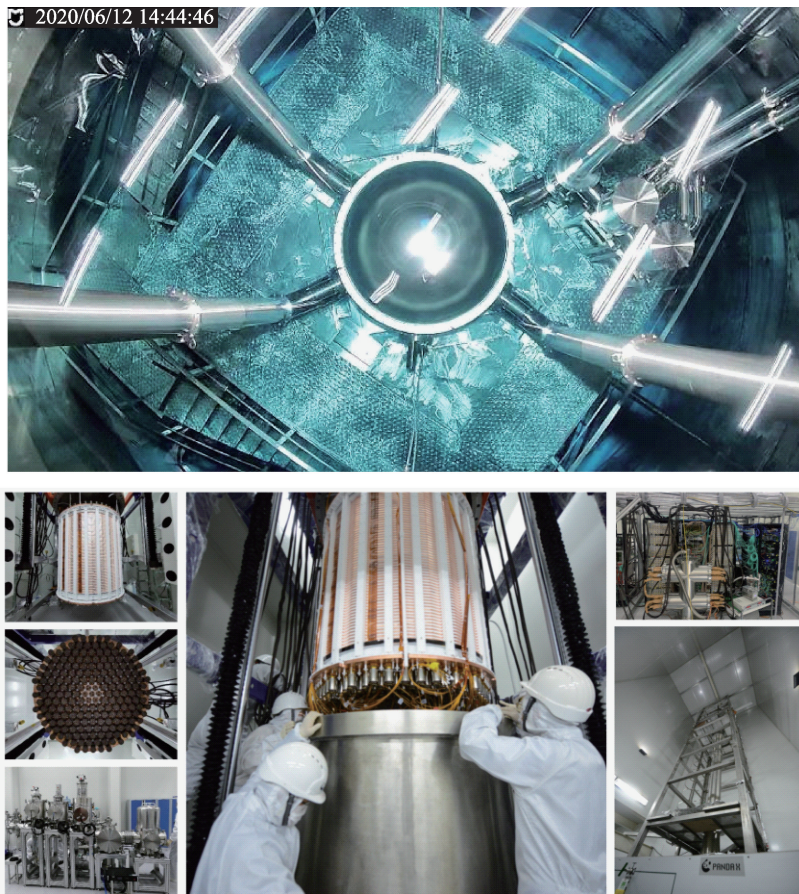


图6 位于中国锦屏地下实验室的 PandaX-4T 实验

CDEX 实验采用高纯锗技术路线。高纯锗是一种半导体材料,纯度非常高,因此探测器自身放射性水平很低;同时,作为一种半导体探测器,其平均电离能小,具有能量阈值低、分辨率高的优点,因此对低质量的暗物质具有更好的灵敏度。CDEX 实验主要依靠反符合甄别技术、体事例/表面事例甄别方法来区分暗物质和本底事例。合作组于 2010 年起,经历了 CDEX-1(1 千克高纯锗)、CDEX-10(10 千克高纯锗)阶段,对低质量暗物质(1~10 GeV)的探测达到国际先进水平,在国际顶级期刊发表了数个重要结果,包括其 1 千克级探测器排除了国际实验 CoGeNT 和 DAM-LIBRA 的暗物质信号,升级后的探测器 10 千克级探测器对 4~5 GeV 暗物质取得国际领先限制。此外,CDEX-1 也基于自然锗中约 7.8% 的锗-76 开展了对无中微子双贝塔衰变的搜寻。

此外,在无中微子双贝塔衰变上,我国科学家还提出了其他多种实验方案,包括 JUNO 实验升级(氙-136 或碲-130)、CUPID-China(钼-100)、NvDEx(硒-82),各具特色。其中 JUNO 升级方案计划在 2030 年左右反应堆中微子测量结束后,将氙-136 或碲-130 溶在液态闪烁体中,通过光信号测量其双贝塔衰变的能量,方法类似于日本正在运行的 KamLAND-Zen(氙-136)和加拿大的 SNO+(碲-130),但在探测器体量和能量分辨率上有显著优势。CUPID-China 计划采用 CUPID 低温晶体,并研发新型声子测量技术;NvDEx 则采用气体时间投影室配合新型的电荷读出装置,同时测量能量和粒子径迹。

应当看到,暗物质和无中微子贝塔衰变的实验搜寻都追求极致的本底控制,且探测手段也颇为相似。主要区别在于两者信号的能区不同,暗物质的反冲能是 keV 量级,而无中微子贝塔衰变能量是在 MeV 量级。另外,马约拉纳中微子实验需要富集大量同位素。另一方面,依托我国锦屏极深地下实验室的优势,PandaX 和 CDEX 的未来实验则旨在打造“一机两用”的探测器,即一个探测器可同时对暗物质和马约拉纳中微子进行探测。在 PandaX-4T 实验运行的同时,PandaX 合作组已开始规划下一代数

十吨级液氙 TPC,即 PandaX-xT 实验,旨在提升暗物质直接探测灵敏度,同时利用自然氙中约 9% 丰度的氙-136 对无中微子双贝塔衰变做出精确测量。CDEX 合作组当前正建设 CDEX-300v(300 千克级富集锗-76 探测器)并以吨级探测器(CDEX-1T)为终极目标,同时对锗-76 无中微子双贝塔衰变和轻暗物质进行搜寻。

我国在暗物质探测和无中微子双贝塔衰变测量领域已取得重要进展。上述基于大科学装置的“中国计划”将为我国暗物质探测和中微子物理研究突破提供激动人心的契机,有望在未来 15 年左右实现以下科学目标:

1. 将暗物质探测的灵敏度较当前实验提升两个数量级,对 WIMP 模型做出决定性判断,如图 7 左所示。

2. 搜寻无中微子双贝塔衰变,对马约拉纳中微子有效质量给出最强的限制,全面覆盖中微子质量反序对应的参数空间,如图 8 右所示;

3. 探测太阳中微子、大气中微子等天体中微子及其他稀有信号:极致的暗物质探测器将可以探测到来自太阳和大气中微子与原子核碰撞的信号(所谓的“中微子地板”,见图 7),从而开展各种前沿的中微子物理和新物理研究。

四、结语

对于暗物质的探测以及中微子马约拉纳属性的判断,将为人类进一步从根本上理解宇宙的起源和演化以及物质深层次结构打开新的大门。应该看到,国际上对这些问题已经开展了近百年的探索,也一直期望实验上的突破,我国如果希望在这方面取得突破,必须踏踏实实地长期积累。经过过去十余年的发展,我国在中微子和暗物质实验领域取得了长足的发展,已经有数个具有独特优势的实验,实现了能够与国际同行同台竞技的水平,锦屏深地实验室更是为我国创造了绝佳的研究平台。我国科学家应当基于自身的优势,长期坚持,抓住科学突破的可能契机,为我国抢占未来科技竞争制高点。

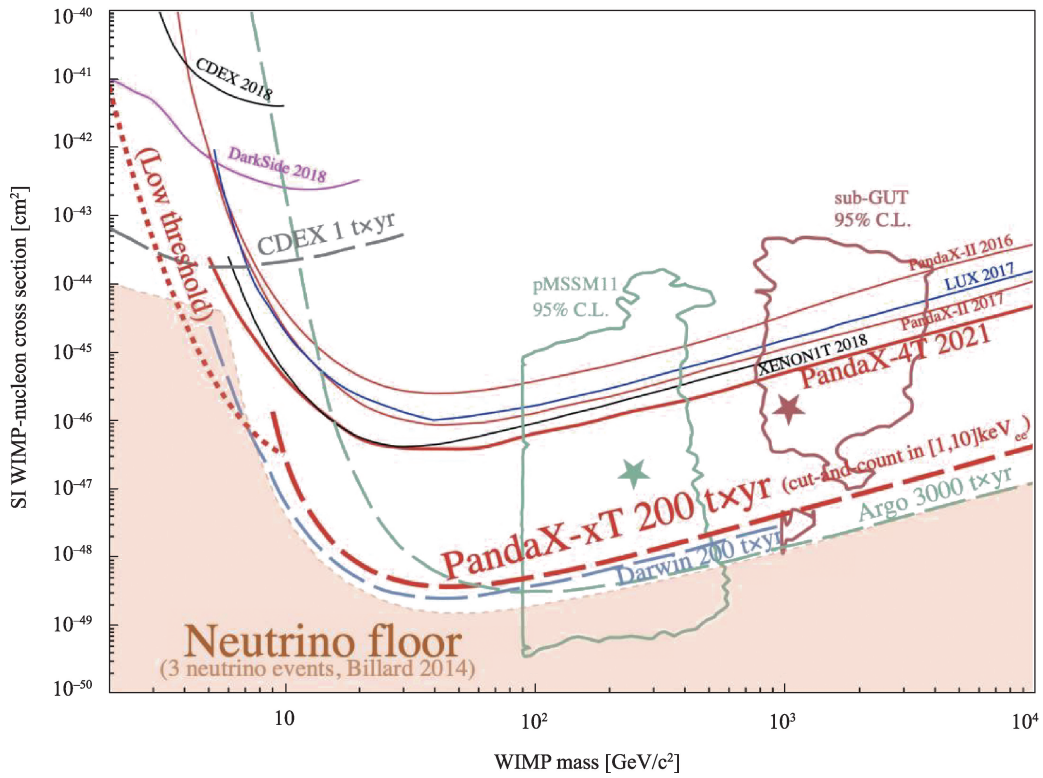


图7 未来PandaX-xT在200吨·年的曝光量下和CDEX-1T在1吨·年的曝光量下对WIMP-核子反应截面的预期灵敏度。国际当前有代表性的一些实验的排除上限见图例，两个圈的区域为超对称理论预言的WIMP暗物质可能的参数空间。粉色区域代表中微子地板

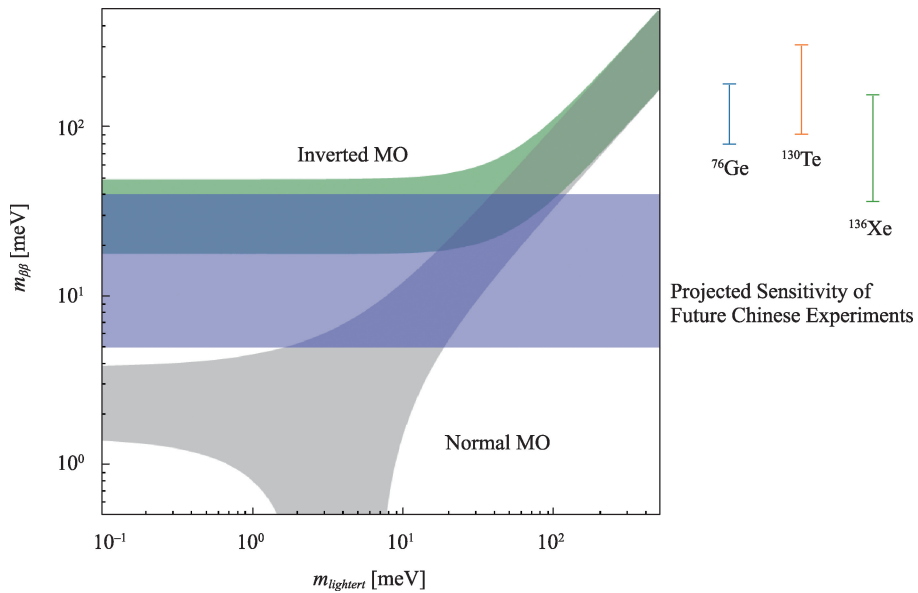


图8 未来国际无中微子双贝塔衰变实验在马约拉纳中微子质量和最轻中微子质量二维空间的预期的灵敏度，浅绿和灰色区域分别对应中微子质量反序和正序的可能的参数空间。右边三个线段分别代表目前国际上的GERDA(锗-76)、CUORE(碲-130)和KamLAND-Zen(氙-136)实验的灵敏度，线段长度来源于核物理方面的不确定性。下一代我国PandaX-xT、CDEX-1T和JUNO升级的预期灵敏度由浅紫色区域示意