

· 科学论坛 ·

深地前沿物理研究中的关键科学问题^{*}

程建平^{1,2} 柳卫平³ 岳 骞^{2**} 李会红⁴ 董国轩⁴
刘江来⁵ 何建军¹ 郭 冰³ 杨丽桃^{2**}

1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875
2. 清华大学工程物理系, 北京 100084
3. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413
4. 国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085
5. 上海交通大学物理与天文学学院, 上海 200240

[摘要] 基于中国锦屏地下实验室建设的国家“十三五”重大科技基础设施“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”因其世界岩石覆盖最深、可用空间最大、综合条件一流的独特条件为国内外科学家瞩目。在我国积极推动基础研究领域创新发展的大背景下, 研讨基于深地实验平台的前沿物理研究具有重要意义。本文基于国家自然科学基金委员会第268期双清论坛总结了深地前沿物理科学研究所面临的重大机遇和重大挑战, 回顾了我国深地前沿学科近年来所取得的主要进展和成就, 凝练了未来5~10年该领域涉及的重大关键科学问题与技术瓶颈, 探讨了相关前沿研究方向和科学基金资助战略。

[关键词] 深地物理; 锦屏深地实验室; 多学科平台; 基础研究

理解宇宙中物质的起源和演化问题是人类共同面临的重大前沿科学问题。当前人类在理解宇宙中微子和暗物质属性方面仍然面临巨大挑战。21世纪以来, 基于深地实验平台的中微子、暗物质、元素核合成等前沿物理实验和理论研究取得了一系列重要成果, 激励着科学家们在寻找超出粒子物理标准模型的新物理方面不断深入创新。

研讨深地前沿物理, 凝练重大科学问题, 可以进一步推动我国深地前沿科学与关键技术的快速发展。



程建平 北京师范大学党委书记, 清华大学双聘教授, 中国锦屏地下实验室主任。主要从事核科学与技术的研究。先后获国家技术发明奖一等奖, 国家科技进步奖(创新团队), 高等学校科学技术进步奖一等奖, 上海市科学技术奖一等奖, 北京市高等教育教学成果一等奖及中国发明专利金奖等多项荣誉。近5年来发表论文

120余篇, 获发明专利授权15项, 出版专著2部。



岳骞 清华大学工程物理系首席研究员, CDEX合作组共同协调人、实验组组长, 中国锦屏地下实验室物理科学部主任。国家杰出青年科学基金获得者, 国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项首席科学家。长期从事暗物质直接探测、无中微子双贝塔衰变、反应堆中微子和太阳中微子等稀有事例探测实验研究。作为负责人承担科技部首个“973”暗物质项目课题及多个国家自然科学基金面上项目。发表SCI论文100余篇。



杨丽桃 博士, 清华大学工程物理系助理研究员, CDEX合作组成员, 中国锦屏地下实验室团队成员。长年专注于基于高纯锗探测器技术的暗物质直接探测和无中微子双贝塔衰变实验研究。作为主要作者在 *Physics Review Letters* 等期刊发表多篇高水平学术论文。主持国家自然科学基金青年项目1项。

在此背景下, 2020年11月12—13日, 国家自然科学基金委员会数理科学部和政策局共同主办了主题

收稿日期: 2021-05-04; 修回日期: 2021-06-02

* 本文根据第268期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn; yanglt@mail.tsinghua.edu.cn

为“深地暗物质、中微子、核天体前沿物理”的第268期双清论坛,会议由清华大学承办。来自国内15所高校和科研院所的45名专家学者代表应邀出席。与会专家对深地前沿物理发展现状与趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了梳理,凝练出我国深地前沿物理需要解决的重要科学问题以及相应的发展路径和技术方案,并提出了我国深地前沿领域的国家自然科学基金资助战略。

1 深地前沿物理面临的重大机遇与挑战

地下实验室是开展粒子物理学、核物理学和天体物理学等领域一些重大基础性前沿课题研究的重要实验平台,建设和发展地下实验室对于一个国家的基础研究具有重要科学价值。中国锦屏地下实验室垂直岩石覆盖厚度为2400米,是世界上岩石覆盖最厚的地下实验室,具有岩石埋深大、宇宙线通量极低、岩石天然辐射本底低、交通便利、配套设施完善等优点^[1]。当前我国正在基于锦屏地下实验室建设“十三五”国家重大科技基础设施“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”。科学家在开展暗物质直接探测、无中微子双贝塔衰变、核天体物理、太阳和地球中微子等重大前沿物理问题研究时,可以充分利用中国锦屏地下实验室得天独厚的优越条件和国内团队的研究基础与优势,率先取得原创性的重大突破,形成重要的国家科技创新平台。

1.1 暗物质直接探测

根据近百年的天文学和宇宙学的研究,暗物质代表了宇宙中约85%的物质含量^[2]。但是由于它们与普通物质没有直接电磁相互作用,无法用通常的办法“看到”。从粒子物理理论的角度来看,暗物质的存在要求有超出粒子物理标准模型的新理论。自20世纪下半叶起,理论家就发展了例如时空超对称、额外维度等新物理模型来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至几个TeV量级),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”或Weakly Interacting Massive Particles(WIMP)。WIMP和普通物质的这种全新相互作用,恰好可以使它们在早期宇宙的适当时刻脱离热平衡,形成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“WIMP奇迹”,赋予了WIMP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WIMP和原子核碰撞的反冲信号便可以“直接探测”WIMP^[3]。这个看似简单的探测原理一直在激励全球许多实验家对暗物质粒子开展实验探测。尽管暗物质和普通物质直接碰撞的确凿证据目前还未被发现,但目前实验的灵敏度已经深入到了主流WIMP理论预言的区间。国际上空间的暗物质间接探测也非常活跃,丁肇中先生领导的AMS-02实验和我国的“悟空”(DAMPE)暗物质卫星都在TeV能区的高能(正)电子谱中观察到异常,或和银河系中WIMP湮灭信号有关联。

除了WIMP以外,理论上可能的暗物质候选者还很多,比如原初黑洞、惰性中微子、轴子及类轴子、超轻玻色子等。目前大量的观测和实验可以对这些模型的参数空间构成有力的限制^[4]。原初黑洞作为暗物质候选者受到引力透镜观测的强有力限制,其作为暗物质的主要成份的可能性已经基本被排除。惰性中微子是标准模型的最小扩展之一,目前的唯象学研究十分关注一些星系和星系团中疑似的3.5 keV X-射线线谱和惰性中微子衰变之间的关联。轴子是作为理解强相互作用CP对称性破缺而引入的轻粒子,实验探测主要集中在其与光子的耦合,目前只有很小一部分参数空间可以被实验方法探测。超轻玻色子暗物质对理解暗物质的小尺度结构问题有帮助。面对各式各样的暗物质,位于深地低本底环境下的高灵敏度粒子探测器有着很强的吸引力和生命力,开拓新颖的探测方法也具有重要的战略意义。

自2010年起,世界上岩石覆盖最深、宇宙线本底最低的锦屏一期实验室投入使用,成为开展暗物质直接探测的绝佳场所。依托锦屏一期实验室,我国基于高纯锗探测技术的CDEX实验^[5-7]和基于液氙探测技术的PandaX实验^[8,9]在过去的十年中均取得了有重要国际影响力的成果。目前,锦屏实验室二期的建设也通过“十三五”国家重大科技基础设施项目立项,为我国未来更灵敏的暗物质探测实验提供了机遇。

1.2 无中微子双贝塔衰变

无中微子双贝塔衰变($0\nu\beta\beta$)是当前国际上粒子物理与核物理领域的重要科学前沿,是可能突破粒子物理标准模型的研究方向之一。1930年,奥地利物理学家泡利为了解释贝塔衰变能谱连续问题而提出中微子假设。1935年,美国物理学家迈耶提出可能存在放射两个电子两个中微子的双贝塔衰变过程

($2\nu\beta\beta$)^[10]。1937 年,意大利物理学家马约拉纳预言中微子可能是一类中性费米子,其反粒子就是其自身。1939 年美国物理学家弗里指出,如果中微子的反粒子是其自身,即中微子是所谓的马约拉纳中微子,则一个原子核如果可以产生 $2\nu\beta\beta$ 过程,就同时也能产生 $0\nu\beta\beta$ 过程,即末态除了两个原子核外,只有两个电子而不产生中微子的双贝塔衰变过程^[11]。1956 年美国科学家莱因斯和柯恩在核反应堆实验中直接发现了中微子。随后的几十年,多个同位素的 $2\nu\beta\beta$ 过程被实验探测到。但迄今为止, $0\nu\beta\beta$ 过程仍然未被实验探测到^[12]。

对无中微子双贝塔衰变过程进行实验研究可以回答中微子物理的下列重要问题:轻子数是否不守恒;中微子的基本性质,即中微子是否为马约拉纳粒子;中微子的绝对质量标度;与中微子的马约拉纳属性相关的 CP 破坏相位等等^[13]。国际粒子物理与核物理领域高度重视无中微子双贝塔衰变的实验研究,过去 20 多年科学家对多种可能的无中微子双贝塔衰变实验技术开展了深入研究,取得了无中微子双贝塔衰变过程半衰期大于 10^{26} 年的实验结果。近年来,美国和欧洲等都已经把开展下一代无中微子双贝塔衰变实验研究列为优先发展的科学研究项目。

国际上无中微子双贝塔衰变实验研究竞争非常激烈,对于极低本底实验平台和实验技术要求也很高。2010 年投入运行的锦屏地下实验室为我国科学家开展无中微子双贝塔衰变实验提供了国际一流水平的实验平台。当前正在基于锦屏地下实验室建设的“十三五”国家重大科技基础设施为我国科学家快速开展具有国际竞争力的无中微子双贝塔衰变实验提供了一个非常好的基础和机会。近年来,国内科学家积极开展无中微子双贝塔衰变实验的关键技术研发和国际合作,已经建立了较好的研究基础。今后 3~5 年是中国物理领域基于锦屏地下实验室开展国际一流的大型无中微子双贝塔衰变实验的重要时间窗口。中国科学家应抓住当前锦屏地下实验室建设的良好机会,发挥锦屏地下实验室“得天独厚”的岩石覆盖深度优势,积极迎接挑战,力争在锦屏建立具有国际一流竞争力的无中微子双贝塔衰变前沿科学研究中心。

1.3 太阳中微子和地球中微子

(1) 太阳中微子物理。太阳是重要的“粒子-核-天体物理”实验场^[14]。太阳的供能过程是核聚变过程,一个是质子-质子(pp)聚变链,另一个是碳氮

氧(CNO)聚变循环;聚变产生的能量通过两种模式传播到太阳表面,在太阳内部是辐射过程,在太阳的外层,能量主要以对流的方式传播到太阳的表面;太阳各处处在引力和辐射压力形成的平衡态。在计算太阳演化模型过程中,还需要一些边界条件,比如原初星的氢、氦及各种金属元素的含量,目前的太阳半径、质量、亮度等等。在聚变截面方面,有国外的 LUNA 实验和我国的 JUNA 实验在进行中。在辐射不透明度测量方面最近有铁元素上的测量,在太阳各种参数的观测上有 NASA 的 Ulysses 实验,都在不断地加深我们对太阳的认识。

中微子是目前唯一可以直接研究太阳内部物理过程的手段。聚变过程或者聚变产生的核素都可能会有中微子产生,而且每个过程的中微子有自己的已知特征能谱,通过这些特征能谱的探测我们就可以解析出各种聚变过程,进而研究各种相关的物理。例如聚变产生的硼 $8(^8\text{B})$ 中微子是 ^8B 衰变成 ^8Be 时发射出来的,有确定的贝塔衰变的形式。各种中微子的绝对通量和比例关系可以揭示出太阳内部核心的聚变物理和环境信息。

太阳中微子的实验研究,导致了中微子振荡现象的发现,是粒子物理标准模型外的第一个新物理发现^[15]。目前的中微子振荡理论预期太阳产生的电子中微子只能以一定的存活概率保持电子中微子的形式到达地球,在低能区域($<1\text{ MeV}$)是以真空振荡(MNS)的形式发生,存活概率约为 50%,在高能区域($>10\text{ MeV}$)则以物质作用振荡(MNS+MSW)形式发生,存活概率约 30%,在中间区域有一个从 30%到 50%的平滑上升区域(upturn)。

(2) 太阳中微子实验问题。太阳金属丰度^[16, 17]和中微子振荡物质效应^[18]等问题正困扰着科学家们。日震学通过太阳震动模式观测可以推知太阳内部的声速,而结果反而与最新的太阳模型结果相悖。这里的原因可能是太阳的金属丰度假设、聚变截面、能量输运等等。如果金属丰度假设有问题,恒星的寿命可以有以亿年为单位的误差。

振荡物理的物质效应 upturn 现象还缺乏实验证据。在低能阶段,实验上只有带电流结果(CC),即电子中微子通量测量,总的中微子通量依赖于标准太阳模型的预期;在 2 MeV 以上只有 SNO 实验(加拿大)的一个总的中性流(NC)测量,还有其他的 CC 和弹性散射(ES)的实验结果;并且在 2 MeV 以上的 CC 和 ES 过程中,尤其是 SNO 和 SK(日本)的实验中并没有观测到 upturn 现象;太阳中微子在地

球上的物质效应也没有观测到。这引起了很多物理学家的关注,轻的惰性中微子,非标准模型的新的相互作用,都有可能出现。

未来的 MeV 区域国内外的中微子实验主要以 ES 过程为主,需要解谱才能够得到电子中微子能谱,中微子与核子的弹性散射可以用来探测中微子,但目前还不能解析出几 MeV 的中微子及它的能量。太阳中微子实验目前只解析出了 pp 聚变链,CNO 中微子有迹象,对金属丰度问题,upturn 问题都还没有真正的解决方案。

(3) 地球中微子物理和实验问题^[19]。这是中微子和地球科学的重要新兴交叉学科。地球中微子的预期依赖于地震学、地球化学、地球模型等等分支的研究,地壳中微子的预期本身就有一定的不确定性,地幔中微子则有更大的不确定性。目前实验上只有日本的 KamLAND 和意大利的 Borexino 实验有观测结果。未来国际上 SNO+ 实验可能有新的观测,我国的江门(JUNO)和锦屏可能实现地球中微子的观测。锦屏地区临近喜马拉雅山脉,是最厚的地壳区域,在地质上有很大的兴趣,锦屏中微子实验有重要的意义。

1.4 核天体物理

核过程不仅为恒星提供能量并驱动其演化,而且还是宇宙中除氢以外所有核素赖以合成的唯一机制,在原始大爆炸之后几分钟至恒星寿命终结之前的宇宙和天体演化过程中起着极为重要的作用。对于恒星平稳演化阶段相对低温环境中发生的热核反应,决定反应率的有效能区,即伽莫夫窗口,远低于库仑势垒,反应截面极小,直接测量十分困难。深地实验室能够极大地降低宇宙射线造成的干扰,提供本底极低的测量环境,有利于开展稀有核反应事件的精确测量。中国锦屏地下实验室覆盖岩层厚达 2 400 多米,居世界之首,宇宙射线通量比意大利格兰萨索实验室(Gran Sasso National Laboratory, LNGS)还要低大约两个数量级。锦屏深地实验室绝佳的极低本底实验条件将为实验核天体物理学家提供重大机遇,使人们有能力对恒星氢燃烧和氦燃烧过程中的一系列关键核反应进行直接测量。

(1) 恒星氢燃烧过程中关键核反应研究

根据宇宙大爆炸理论,我们的宇宙诞生于大约 138 亿年前的一次大爆炸,之后经过暴涨、冷却,在大约 3 分钟之后,温度降到 $\sim 10^9$ 开尔文(即 1 GK),自此开始了有效的原初较轻元素的合成。该过程持

续大约半个小时后,温度降低到大约 0.3 GK,这时核反应基本就熄灭了。在大爆炸原初核合成灰烬中,主要是大约 75% 的氢(^1H)以及大约 25% 的氦(^4He),还有几种极少量的轻核素(只占 0.001%),即 ^2H 、 ^3He 、 ^6Li 和 ^7Li ^[20]。在恒星的演化过程中,正是这些氢和氦元素的燃烧产生了宇宙中直到铁元素等的重元素。

氢燃烧主要包括平稳氢燃烧和爆发性氢燃烧两种。前者主要发生在主序星核心的氢燃烧或称为聚变反应,以及 AGB 星等的氢燃烧壳层等天体环境下,温度相对较低(< 0.2 GK),对应的反应能量也比较低(大致在几百 keV 以下),反应截面很小,通常情况下需要在地下实验室条件下才能够直接测量;后者主要发生在新星、X 射线暴、超新星以及中子星并合等爆发性事件中,温度相对较高(0.2~5 GK),对应的反应能量相对较高,反应截面较大,通常情况下在地面实验室条件下就能够直接测量,但是有些核反应的精确测量也需要地下的低本底环境。目前,对于这两种氢燃烧过程,还有许多重要的科学问题需要解决。在平稳氢燃烧过程中,前沿热点包括太阳中微子和金属丰度问题,以及 AGB 星中氟超丰问题;在爆发性氢燃烧过程中,前沿热点包括伽马射线天文学 ^{26}Al 和 ^7Be 疑难问题,以及宇宙大爆炸原初丰度问题等等。为了解决上述科学问题,所要研究的重要核反应主要包括: $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$, $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$, $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$, $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$, $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 以及 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 等。目前,在天体物理感兴趣的伽莫夫能区,这些核反应的截面数据基本都是空白,或者已有实验数据误差非常大,无法满足天体模型的精度要求。因此,在伽莫夫能区直接精确测量这些关键核反应的截面具有非常重要的科学意义。

(2) 恒星氦燃烧过程中关键核反应研究

氦,即 ^4He 或 α 粒子,是宇宙中丰度仅次于氢的元素,因此由 α 粒子引起的反应,例如, (α, γ) , (α, n) 和 (α, p) 在恒星氦燃烧过程中起着至关重要的作用^[21]。类似于质子诱发的核反应,上述 α 粒子参与的核反应的伽莫夫窗口也远低于库仑势垒,反应截面极小,导致在地面实验室中反应事件远少于本底,直接测量十分困难。目前,大部分反应截面是利用高能区数据向伽莫夫窗口外推得到的,而由于在低能区可能存在未知共振,使得这种外推带有很大的不确定性,甚至可能引入数量级的偏差。JUNA 团队研发的国际地下实验室中最强流的加速

器,有望将这些氦燃烧过程中的核反应直接测量到伽莫夫窗口。这里涉及到的重要核反应主要包括: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 以及 $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}$ 和 $^{15}\text{N}(\alpha, \gamma)^{19}\text{F}$ 等。

事实上,即使在锦屏深地绝佳的本底条件下,对于反应截面极小的一些关键核反应,其直接测量也是非常困难的,将面临着巨大的挑战。在未来的 5~10 年,科研人员建议挑战三个极其重要的核反应在伽莫夫能区的反应截面精确测量:一个是 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应,第二个是 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应,第三个是 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ 反应。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在所有大于 0.55 个太阳质量恒星的演化中都起着关键作用,其反应截面对上至铁的中等质量核素的合成和大质量恒星后期的演化进程有决定性的影响,被誉为核天体物理的“圣杯”反应^[22]。 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 是 s 过程合成重元素的重要中子源反应,该反应对理解质量数小于 90 的重元素起源具有极为重要的意义。 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ 反应在太阳中微子和金属丰度问题、伽马射线天文学 ^7Be 疑难问题以及宇宙大爆炸原初丰度问题等方面都具有非常重要意义。这三个反应在天体物理感兴趣的伽莫夫能区的反应截面极小(大约在飞靶量级),迄今尚无直接测量的实验数据。直接测量这三个核反应面临着诸多实验挑战,如较长的加速器运行时间,可能一年甚至更久;非常强的束流(在 10 mA 量级)和能够承受强流轰击的稳定靶子;以及使用无窗气体靶和比较昂贵的 ^3He 气体等。

1.5 极低本底技术

极低本底技术关系到暗物质直接探测、无中微子双贝塔衰变、极低截面核天体反应等实验的极限。为了提高这些实验的灵敏度,实验中的本底需要尽可能地降低。降低本底的方法主要包括:建立完善的外部屏蔽、降低材料中的放射性、通过甄别技术剔除部分干扰事例^[23]。综合目前的几类实验,大部分都需要采用极低本底技术筛选低放射性的材料^[24]。除此之外,对材料放射性的分析也有助于建立完善的本底模型,这对实验信号的分析是非常关键的。此外,依托极深地下极低本底前沿物理实验室,开展环境超低水平放射性核素的测量,为核设施流出物指纹特征、境外核试验对我国环境影响的途径等方向的核安全辐射监测研究提供高水平和高质量的科学支撑,建立极低辐射本底条件下环境水平 X、 γ 射线国家计量标准装置,开展极微量辐射本底条件下的放射性核素活度计量方法研究,建立纳贝~微贝

量级的 α 、 β 与 γ 核素国家标准装置,发展标准物质,建立相应的计量溯源能力,在微量放射性核素分析领域达到国际领先水平。

2 深地前沿物理研究主要进展

2.1 暗物质直接探测

暗物质直接探测方面的进展可以大致按照暗物质质量 $10\text{ GeV}/c^2$ 为界分为轻质量和大质量两个主流方向。

在轻质量暗物质区域,以固体低温探测器和电荷耦合器件技术为代表的暗物质直接探测实验近年来发展迅速,向更低阈值、更低本底和更大探测器质量不断冲刺。固体低温探测器方面主要包括基于锗(SuperCDMS、Edelweiss)、硅(SuperCDMS)及钨酸钙(CRESST)的低温($\sim\text{mK}$)量热器实验^[25-27]以及使用点电极高纯锗电离探测器的我国 CDEX 实验^[5-7]。其中,SuperCDMS 和 Edelweiss 实验一方面发展基于声子与电荷双相读出技术以提升本底甄别能力,另一方面发展声子放大技术以尽可能降低探测器能量阈值,未来 3~5 年计划运行质量为十几公斤量级的探测器系统;CRESST 实验则聚焦于发展闪烁光与声子双相探测器技术,主要工作聚焦在增加现有探测器有效质量和研制基于 Li_2MO_4 等其他类型晶体的探测器技术上。未来希望将探测器规模升级到 2 公斤左右,在更低阈值、更低本底下开展暗物质直接探测。我国的 CDEX 实验采用点电极高纯锗单相电离信号读出探测器,致力于发展高纯锗探测器和低本底实验技术,目前运行的 CDEX-10 实验在 WIMP、轴子和暗光子等暗物质候选粒子探测方面取得一系列国际先进成果^[5-7]。下一步,CDEX 实验将依托 CJPL-II 大型液氮恒温器开展几十公斤到百公斤量级实验,希望通过自主研发探测器、电子学和低本底材料,实现实验本底降低约 100 倍的目标。

近年来,使用电荷耦合器件(CCD)技术在降低阈值方面有很快的进展。采取该方案的主要有 DAMIC 和 SENSEI 实验^[28, 29],二者下阶段都会采用 Skipper 读出技术,在亚电子噪声的极低阈值下开展探测实验,主要工作重点在增大单体 CCD 有效质量、进一步降低实验本底和提升整体探测器规模上。美国相关 CCD 研究团队已经组成 Oscura 合作组,希望未来在 SENSEI($100\text{ g}\cdot\text{yr}$)和 DAMIC-M($1\text{ kg}\cdot\text{yr}$)基础上发展 10 kg 量级的 Skipper CCD 实验。

对大质量暗物质的探测,过去十年中液氙实验成为最灵敏的探测技术^[30, 31]。我国的 PandaX 实验在 2016 年和 2017 年取得了大质量暗物质世界最强的限制^[8, 9],并首次利用液态自然氙探测器开展了马约拉纳中微子的寻找^[32]。最近,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)。非常有意思的是,2020 年 6 月,XENON1T 合作组公布了低能电子反冲的数据^[33],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,引起了学界的广泛关注。这一系列成果强烈揭示了液氙这种大体量、高灵敏度探测器对于极稀有事例的探测潜力。

目前国际上正在建造第二代数吨级液氙实验,包括中国 PandaX-4T、欧洲 XENONnT 和美国 LZ,均在今年或明年正式取数。PandaX-4T 实验积累 6 吨·年的曝光量可以将当前暗物质探测灵敏度提高 1 个数量级。除了暗物质探测外,数吨级液氙实验还可以用于马约拉纳中微子和天体中微子的探测。面向中长期规划,我国的 PandaX 实验组正在筹划下一代几十吨级的液氙实验(PandaX-xT),计划通过 200 吨·年的曝光量将探测灵敏度推进到所谓的“中微子地板”(即太阳和大气中微子与原子核散射的本底信号使得暗物质和本底无法区分)。实验团队已率先启动了新一代探测器关键技术的研发工作。PandaX 将同时开展大规模精馏塔富集氙同位素的研究——一旦 PandaX-xT 发现 WIMP 的迹象,将通过分离氙 131 和氙 132,对暗物质-普通物质作用是否具有自旋相关性开展引领性研究。中国宝武集团氙气产能丰富,将在氙气长期稳定供应上体现出制度优势。国际上和 PandaX-xT 规模类似的还有欧洲的 DARWIN 50 吨级液氙实验的规划^[34]。为了实现我国液氙暗物质实验从国际“并跑”到“领跑”,需要国家层面上的长期稳定支持,并适时变国际竞争为国际合作,发起国际大科学合作计划。

和液氙探测器类似,液氙作为一种探测介质也被应用在深地暗物质直接探测实验中,其主要的探测器形式有单相液体探测器和两相时间投影室(Time Projection Chamber,TPC)。DarkSide-50 实验利用两相氙 TPC 获得了世界上首个零本底暗物质探测实验结果^[35]。目前,全世界使用氙进行暗物质探测的学术机构和学者联合,成立了 Global Argon Dark Matter Collaboration(GADMC),致力

于共同利用液氙探测技术将暗物质探测上限压低至“中微子地板”。DarkSide-20k 是 GADMC 的下一代实验,将使用约 50 吨的地下贫氙作为探测器的有效介质。GADMC 长期计划是将建造一个拥有约 300 吨有效质量的液氙探测器 ARGO^[36],作为能够最终达到“中微子地板”极限的暗物质探测实验。中国科学院高能物理研究所自 2011 年起加入 DarkSide-50 实验并在软件和硬件方面均做出了重要贡献,目前在 DarkSide-20k 实验中承担 TPC 设计、veto 掺钷有机玻璃生产等任务^[36]。作为 GADMC 的成员,我国预计未来有能力在锦屏地下实验室建造针对于 1~100 GeV/c² 质量段的暗物质直接探测实验装置。

2.2 无中微子双贝塔衰变

目前国际上正在运行的无中微子双贝塔衰变实验主要在美国、意大利、日本和法国的地下实验室中进行。当前正在运行、且具有相当规模的有效同位素的无中微子双贝塔衰变实验主要有 GERDA、Majorana Demonstrator、CUORE、KamLAND-Zen、EXO-200 等,采用的技术主要包括高纯锗探测器技术、晶体量热器技术、液闪探测器技术、液氙探测器技术及高压气体时间投影室等。无中微子双贝塔衰变实验方面的国际研究进展与我国的研究基础情况如下:

(1) 富集高纯锗探测器技术

高纯锗探测器具有极低本底、超高能量分辨率、容易实现阵列化、靶源同体、目标同位素易富集等优势。高纯锗实验给出了目前国际无中微子双贝塔衰变实验最好的能量分辨率、最低的本底水平和最长的半衰期下限,使得高纯锗探测器技术成为无中微子双贝塔衰变实验领域最具竞争力的方案之一。

目前国际上正在运行的⁷⁶Ge 无中微子双贝塔衰变实验包括欧洲 GERDA^[37]、美国 MAJORANA^[38]和我国 CDEX^[39]。GERDA 合作组主体采用宽能量阈高纯锗探测器技术,在意大利 LNGS 地下实验室建立了靶质量约 40 kg、⁷⁶Ge 富集度大于 86%,能量分辨率达 2.6 keV@2039keV 的实验系统,两个实验阶段的累计曝光量达到 127.2 kg·yr,实验本底超出预期,低至 5.2×10^{-4} cts/keV/kg/yr,给出的⁷⁶Ge 无中微子双贝塔衰变半衰期下限为 1.8×10^{26} yr^[37]。MAJORANA 采用点电极高纯锗探测器技术,在美国 Sanford 地下实验室(SURF)建立了约 30 kg、⁷⁶Ge 富集度大于 86%且能量分辨率达到 2.5 keV@2039keV 的实验系统,曝光量达到 26 kg·yr,给出

的半衰期下限为 2.7×10^{25} yr^[38]。CDEX 合作组利用天然锗制成的点电极高纯锗探测器, 给出了我国首个 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验结果^[39]。

当前, LEGEND 合作组联合世界上 50 多所大学和研究机构的 250 多位研究人员, 正在开展下一代吨级富集 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验研究^[40]。第一阶段实验 LEGEND-200 是在意大利 LNGS 地下实验室建设 200 kg 的富集 ^{76}Ge 的高纯锗实验系统, 预计 2021 年开始运行取数。第二阶段实验 LEGEND-1000 拟建设吨级的富集 ^{76}Ge 的高纯锗实验系统, 本底水平预计达到 0.1 cts/FWHM/ton/yr, 实现约 10 meV 的有效中微子质量探测灵敏度, 具备确定中微子质量顺序的能力。目前 LEGEND-1000 实验地点未定, 实验方案未定。考虑到极低的宇宙线本底要求, 未来将会选择在中国 CJPL 或者加拿大 SNOLAB 开展实验。我国具有核心探测器技术、同位素富集技术、阵列实验系统及屏蔽方案、极深地下极低本底实验平台等方面的雄厚基础, 希望通过深度参与 LEGEND 国际合作, 吸引 LEGEND-1000 实验落户中国锦屏, 进一步推动中国锦屏地下实验室成为国际前沿研究高地。

CDEX 合作组希望能够得到国内同行和相关部門支持, 在锦屏地下实验室开展 300 kg 的 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验, 5 年内可以给出具有国际竞争力的物理结果。同时开展液氮/液氩环境对比研究, 对基于 CJPL-II 的吨级实验方案进行技术验证, 吸引未来吨级 ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 实验在锦屏进行。

(2) 液氩探测器技术

美国 EXO 实验采用液氩时间投影室技术寻找 ^{136}Xe 核素的 $0\nu\beta\beta$ 衰变。其 200 公斤的原型探测器 EXO-200 已经结束运行, $0\nu\beta\beta$ 半衰期灵敏度为 5×10^{25} yr^[41]。EXO-200 的下一代实验 nEXO, 计划使用 5 吨富集液氩 (^{136}Xe 占 90%), 能量分辨率提高至 1%, 继续降低本底使得中心区域的本底达到 0.1 cts/FWHM/ton/yr, 运行 10 年的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期灵敏度达到 9.2×10^{27} yr^[42]。

我国 PandaX-II 实验组于 2019 年首次利用液氩暗物质探测数据开展了无中微子双贝塔衰变的研究^[32]。国际上 XENON1T 合作组在 2.4 MeV 能量区间取得了 <1% 的能量分辨率, 展现了液氩时间投影室在 MeV 区间的良好性能^[43]。

PandaX-4T 实验正在对 MeV 能区的能量分辨率与本底开展细致研究, 寻找 ^{136}Xe 的无中微子双贝塔衰变, 预期灵敏度将达到 EXO-200 水平。同

暗物质研究结合, PandaX 实验组的远期目标是研制 PandaX-xT 这一几十吨级的多物理目标探测器, 充分利用极低本底技术和液氩强大的自屏蔽能力, 提高探测器灵敏度至国际领先水平。PandaX 将把自研的精馏提纯技术应用于同位素富集, 通过多级精馏塔级联, 实现对 ^{136}Xe 核素 50% 至 90% 的富集。PandaX 将持续推进高压气体氩时间投影室的研发工作, 利用粒子径迹有效地去除本底, 提高信号鉴别效率。一旦 PandaX-xT 无中微子双贝塔研究发现疑似信号, 将研制专有富集氩探测器进一步确认。

(3) 极低温晶体量热器技术

低温晶体量热器是推进新一代 $0\nu\beta\beta$ 实验的重要技术方案之一。其突出优势是能量分辨率高, 同时可以利用具有较大 $Q_{\beta\beta}$ 值的不同核素组成的晶体来验证实验结果。CUPID 技术是基于意大利目前运行的 CUORE 实验^[44, 45] 的进一步创新, 通过同时读出衰变粒子引发的光信号与热信号 (声子), 有效分辨 γ/β 和 α 粒子, 压低本底水平, 极大提升实验灵敏度^[46]。

目前, 由复旦大学、中国科学技术大学、清华大学、北京师范大学、上海硅酸盐研究所、上海应用物理研究所、上海交通大学、宁波大学等单位组成的 CUPID-China 合作组, 正在发展基于 Li_2MoO_4 (LMO) 晶体的新一代低温晶体量热器实验技术, 开展 $0\nu\beta\beta$ 实验研究。 ^{100}Mo 的 $Q_{\beta\beta}$ 值 (3 034 keV) 远大于大部分天然放射本底, LMO 晶体性能优越。合作组计划在未来 5 年内完成十公斤量级 CUPID 原型机实验, 包括: 1) 在锦屏地下实验室建立低温低本底实验平台, 实现 10 mK 低温稳定运行; 2) 优化屏蔽系统设计, 压低环境放射性本底贡献; 3) 优化信号读出系统, 提高光采集效率和光/热信号鉴别粒子能力, 将 α 本底压低两个数量级; 4) 发挥国内超纯晶体制备核心技术优势, 利用富集同位素原料生长高纯度的 LMO 晶体。实验预期在 ^{100}Mo $Q_{\beta\beta}$ 值区间达到低于 10^{-3} cts/keV/kg/yr 的国际领先本底水平, 并取得优于 10 keV 的能量分辨。未来计划建设和运行吨级的大型无中微子双贝塔衰变实验。

(4) 液闪探测器技术

用液闪技术寻找 $0\nu\beta\beta$ 的核心是在液闪中掺杂双贝塔衰变核素, 并保持极低本底。日本 KamLAND-Zen^[47] 和加拿大 SNO+ 分别使用了掺 ^{136}Xe 和 ^{130}Te 技术。

KamLAND-Zen 的前身是研究反应堆中微子振

荡的 KamLAND 实验,主体是 1 千吨液闪探测器。KamLAND-Zen 在中心区域用极干净的直径 1.9 米、厚 25 微米的球形透明尼龙袋装载掺¹³⁶Xe 液闪,Xe 质量为 745 公斤,¹³⁶Xe 富集度 91%,2019 年 1 月开始运行,目标是灵敏度达到 5×10^{26} yr。其下一代实验计划 KamLAND2-Zen 计划将 Xe 质量提高至 1 吨以上,将能量分辨率提高 1 倍,运行 5 年的灵敏度达到 2×10^{27} yr。

SNO+ 实验前身是发现了太阳中微子振荡的 SNO 实验。探测器主体为直径 12 米的有机玻璃球,SNO+ 将在球内充满 780 吨掺 Te 液闪,¹³⁰Te 天然丰度 34%。Te 的掺杂是通过将碲酸和丁二醇合成为能稳定溶于液闪的有机金属化合物,并加入 DDA 作为稳定剂。SNO+ 第一阶段将掺杂 0.5% Te,实验运行 3 年,灵敏度预期达到 2×10^{26} yr。SNO+ 第二阶段将 Te 含量提高至 2.5%,实验运行 4 年的灵敏度预期达到 10^{27} yr。

JUNO 实验拥有超大的液闪体积,能容纳更多双贝塔衰变核素,并且探测器在能量分辨率上做了特殊优化。JUNO 实验完成中微子质量顺序测量首批重大成果后,将适时升级改造,建成世界上最大最优的无中微子双贝塔衰变实验。在液闪中掺¹³⁶Xe 或¹³⁰Te 都是可能的选项^[48],已开展相关预研,预期在 5~10 年内确定方案,力争 2030 年左右实施。

(5) 高压气时间投影室

高压气体时间投影室具有独特的径迹重建能力,并有较好的能量分辨率和可扩展性,有潜力在吨量级上实现接近零本底。目前采用这个方案的实验有 NEXT、PandaX-II I、NuDEx 等。国内 PandaX-II I 实验在科技部经费支持下,建立了原型探测器,利用 Micromegas 实现高精细度的径迹重建,百公斤级探测器近期将开始组装^[49, 50]。NuDEx 合作组使用 Topmetal 硅像素芯片对离子漂移信号的探测读出^[51],预期具有很好的能量分辨率和径迹空间分辨率。

未来 5 年,PandaX-III 实验将利用百公斤探测器寻找¹³⁶Xe 的无中微子双贝塔衰变,实验验证径迹重建、径迹识别等气体探测器的优势,并研究高精度径迹识别对于无中微子双贝塔衰变的直接影响。NuDEx 进一步发展基于 Topmetal 等技术,包括减少芯片的电子学噪声、完善芯片功能、大面积组网读

出技术、放射性本底控制。

该方向的长期目标(15 年)是在国内开展吨量级高压气体时间投影室无中微子双贝塔衰变实验。PandaX-III 将持续关注探测器的本底控制技术,并开发气体探测器技术用于低本底材料的筛选。NuDEx 的 Topmetal 技术形成成熟的应用,可以应用于其他的科学实验或工业生产。

2.3 太阳中微子和地球中微子

锦屏中微子实验希望在锦屏以一个百吨级实验做出一定的物理突破,达到世界领先^[52]。

该实验以氯化锂(LiCl)为实验靶^[53]。电子中微子在⁷Li 上的 CC 反应为: $\nu_e + {}^7\text{Li} \rightarrow e^- + {}^7\text{Be}$ 。过程末态电子能量与中微子能量有一一对应关系,不需要解谱就能研究 upturn 问题,极大地提高了信噪比。CC 过程发射的电子,基于 Fermi 或 Gamow-Teller 跃迁,最终有较均匀的角分布,可以和 ES 过程利用太阳角区分。中微子在⁷Li 上的俘获截面很大,对于太阳的⁸B 中微子,总的截面达到 $3.5 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$,而中微子在电子上的散射截面是 $0.061 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$,并且也远远超过其他的同位素。

反电子中微子在质子上的反贝塔衰变释放出 e^+ 和 n,中子可以在³⁵Cl 上俘获,释放出总能量为 8.6 MeV 的几个伽马,形成快慢符合信号,使地球中微子的探测也成为可能。

⁷Li 同位素的自然丰度是 92.4%,³⁵Cl 的自然丰度为 75.8%,不需要同位素富集就可以大量获得。LiCl 的水溶性非常好,常温可以达到 85 g LiCl/100 g 的水平。另外⁷Li 的原子序数只有 7,意味着溶解同样质量的盐,获得⁷Li 摩尔数更高。LiCl 为常见的化合物,价格低。这些性质显示出 LiCl 适合实验。

锦屏中微子实验合作组试制了新型的高含 LiCl 的水基 Cherenkov 液闪,期待能够有效地鉴别出⁷Li 过程的 CC 末态电子和 ES 过程的末态电子。并且探索了利用重结晶方法去除 LiCl 中放射性杂质的方案,有初步效果。并考虑了锦屏的深地优势,对 upturn 的主要信号能区做了探测器的优化。

理论预期锦屏百吨级中微子实验在 5~10 年内可以首次达成 4 MeV 以上⁸B 中微子微分能谱的探测;解决 upturn 的实验测量问题,预期能以大于 3σ 的能力排除 downturn 现象;首次实现喜马拉雅山壳中微子的探测。

2.4 核天体物理

中国原子能科学研究院牵头的基金委重大项目 JUNA“基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究”于 2015 年启动。在此重大项目中, 主要研究 4 个重要的核天体反应^[54]: 课题 1—“圣杯”反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$; 课题 2—AGB 星中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$; 课题 3—AGB 星氟超丰相关反应 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$; 课题 4—伽马射线天文学 ^{26}Al 之谜相关反应 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$; 以及一个平台建设课题。此外, 研究人员也已提出直接测量大质量恒星中子源反应 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 和碳氮氧循环关键反应 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 的实验计划。JUNA 项目旨在将这 6 个反应的截面测量推进到天体物理感兴趣的极低伽莫夫能区。目前, 所有地面测试和各项准备工作均已就绪, 计划 2021 年初在锦屏开展正式实验测量工作。得益于锦屏绝佳的极低本底环境, 强流 400 kV 加速器以及高效的探测器阵列, 预期可以取得重大的原创性研究成果。

2.5 极低本底技术

中国锦屏地下实验室 2010 年建成后, 清华大学团队即开始开展超低本底测量装置的研制工作, 目前已经建成 3 套国内超低本底伽马谱仪(GeTHU), 其中 GeTHU-I 超低本底谱仪的积分本底计数率为 0.24 cpm, 比地面最好的反宇宙线谱仪的本底水平低了 10 倍, 探测限 <1.0 mBq/kg(测量时间 3 天), 达到了国际地下实验室同类测量装置先进水平, 是目前国内最灵敏的低本底高纯锗伽马谱仪^[55]。该谱仪先后为 CDEX、PandaX、大亚湾中微子实验、江门中微子实验提供材料测试、筛选服务, 提升了国内低本底伽马能谱测量能力^[56]。

为了解宇宙射线活化铜产生的宇生放射性核素, 清华大学做了宇宙线照射实验。首先选择同一批次、在地下实验室已放置了 3~4 年的铜砖, 利用低本底谱仪 GeTHU 对其放射性进行测量, 判定其内的宇生放射性核素几乎衰减完; 然后把这些铜砖拿到锦屏山外面, 用宇宙射线再次照射长达 300 天。实验发现随着照射时间增加, 铜砖内的宇生放射性核素活度越来越大。因此, 为了减少铜宇生放射性核素的底, 必须要在地下开展电解铜制备工作。目前, 已经自主设计、研制完成了面向地下超纯电解铜制备的原型装置样机, 针对样机性能、电解工艺参数设置等关键技术环节开展了一系列实验测试工作, 在地面制备出了第一批电解铜样品。

3 未来 5~10 年深地前沿物理发展目标及资助重点

3.1 发展目标

理解宇宙中物质的起源和演化问题是当代物理学中最重要的问题之一。当前描述微观物质世界基本组元及其相互作用的粒子物理标准模型取得了极大的成功, 但我们在理解宇宙中微子属性、暗物质属性、元素起源等方面仍然面临巨大挑战。研究这些问题的重要手段之一就是深地极低宇宙线本底环境下的稀有事例探测, 包括中微子性质相关研究、暗物质直接探测、核天体物理实验等。

我国正在开展的基于中国锦屏地下实验室二期建设的“十三五”国家重大科技基础设施“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”项目, 将为我国和世界科学家提供一个世界最深岩石覆盖、最大可用空间、最低宇宙线本底环境的“得天独厚”的深地实验平台。过去十年, 在中国锦屏地下实验室一期试验平台的支持下, 我国科学家在暗物质直接探测实验方面已经实现了从“无”到“有”, 并取得了当前国际“并跑”的局面。在中微子研究与核天体物理研究方面, 取得了很好的技术进展和物理成果。经过多年的实验和实践, 我国已经培养出一支长期从事深地前沿实验研究、具有国际竞争力的优秀的国内研究队伍。

基于我国的深地实验平台优势、良好的探测技术基础和优秀的研究队伍, 支持中国科学家开展前瞻性的深地前沿研究, 通过无中微子双贝塔衰变、暗物质直接探测实验和核天体物理实验等, 研究轻子数破缺过程、确定中微子质量次序、探索宇宙正反物质不对称机制、暗物质属性、核素起源和演化性等, 聚焦领域重大前沿科学问题, 取得突破性的进展。同时, 凝聚国际一流人才, 培养国际水平的前沿研究队伍, 将锦屏地下实验室建设成为深地方向国际高地, 推动我国粒子物理与核物理相关学科未来引领世界。

3.2 资助重点

本次双清论坛与会专家经过深入研讨, 凝练了我国深地前沿物理重大关键科学问题, 并建议未来 5~10 年应着重围绕以下 5 个领域, 通过多学科交叉开展重大原创性研究。

3.2.1 暗物质直接探测

对于“弱相互作用重粒子”暗物质, 国际上中长期规划对直接探测暗物质至所谓的“中微子地板”有

很强的共识。在锦屏实验室布局一至两个旗舰性的、有国际参与度的引领性的实验,具有重要的科学意义。对于各类其他暗物质候选者、地下实验通用关键技术(比如极低本底技术)以及具有战略前瞻性的技术,应在国内布局长期、稳定的研发工作,使得我国未来在这些方面取得国际引领性的地位。另外,理论和实验应当更加紧密的结合,寻求物理新思想、新方法上的突破。

3.2.2 无中微子双贝塔衰变

在国家自然科学基金委员会支持下,通过自主研发和国际合作的方式,尽快开展基于锦屏地下实验室的无中微子双贝塔衰变实验关键技术预研,包括高纯锗阵列方案、液氙探测技术、低温晶体量能器技术、高压时间投影室技术以及大体积液闪探测技术等,以及相关核理论研究,如无中微子双贝塔衰变的发生机制,原子核矩阵元的高精度计算等^[57, 58]。通过两三年的预研,择优选取两种具备很强国际竞争力的中微子双贝塔衰变实验技术,其中微子质量探测能力具备达到 10 meV 甚至 1 meV 水平的灵敏度。随后联合国内外无中微子双贝塔衰变实验研究领域的科学家,利用锦屏地下实验室国际一流极低本底实验平台的优势,建立大规模的理论和实验紧密结合的研究团队,在基金委的支持下,开展具备国际引领能力的无中微子双贝塔衰变实验研究。

3.2.3 太阳中微子和地球中微子

太阳中微子实验是重要的“粒子—核—天体物理”实验场,在中微子振荡物理、太阳物理方面仍有很多重要的未解之谜。地球中微子是一个新的交叉研究领域。锦屏中微子实验采用新的实验技术,期待可以利用小型百吨级 LiCl 探测器,基于锦屏地下实验室的独特深地优势和地理优势,在中微子振荡现象和喜马拉雅山地球中微子研究方向有重要发现,并且可以探索惰性中微子和非标准模型新物理,取得世界领先。

3.2.4 核天体物理

锦屏核天体物理 JUNA 项目 I 期的 400 kV 强流加速器装置只能加速氢和氦束流,因此,未来 5~10 年内我国深地核天体物理实验的重点方向是对恒星氢燃烧和氦燃烧中的一系列关键核反应进行深地直接测量,解决一系列重要的科学问题,例如:太阳中微子和金属丰度问题、AGB 星氟超丰问题、伽马射线天文学²⁶Al 来源之谜、宇宙大爆炸原初核合成问题、宇宙超铁重元素起源问题、“圣杯”反应、

AGB 星慢中子俘获 s 过程中子源问题以及其他重要氦燃烧反应,等等。JUNA 项目 II 期将计划安装一个 4 MV 强流重粒子加速器。物理目标将主要聚焦恒星氢燃烧、碳燃烧以及氧燃烧过程中的关键核反应。在未来的 20 年内,JUNA 项目计划完成天体关键核反应的深地直接测量,并最终建立我国核天体物理反应率的基准数据库。

3.2.5 极低本底技术

基于国家重大科技基础设施“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”项目,建设极低本底微贝克每公斤量级分析平台,开展痕量长寿命放射性核素质谱分析方法研究,探索不同介质中氦的析出与输运规律,掌握关键材料地下制备工艺参数,是未来极低本底技术研究的重点。同时,未来作为深地实验平台在开展深地辐射生物学等多个学科研究的过程中,实验室可以提供辐射源的粒子种类和能谱等方面的高精度测量工作,为多学科开展前沿研究提供技术基础。

4 结 语

深地前沿研究是粒子物理学、粒子天体物理、核物理学和宇宙学等领域的重大前沿方向。相对于加速器物理而言,深地物理依托极深地下实验平台,开展暗物质直接探测、中微子实验、核天体物理实验等前沿科学问题的研究,同时为了有效支撑前沿科学研究,也利用超低宇宙线辐射环境开展超低本底探测技术和超纯材料制备技术研发等。正在基于锦屏地下实验室建设的“十三五”国家重大科技基础设施“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”将为我国科学家和国际同行提供垂直岩石覆盖最厚、可用空间最大、综合条件国际一流的实验条件。基金委在我国深地科学发展进入关键时期,组织“双清论坛”活动,对我国暗物质、中微子、核天体物理、极低本底实验技术等领域的发展现状进行梳理,对未来五到二十年的发展前景进行了深入研讨。针对国际深地前沿研究发展态势,提出了未来五到十年我国深地前沿科学发展目标和资助重点。

参 考 文 献

- [1] Cheng JP, Kang KJ, Li JM, et al. The China Jinping Underground Laboratory and its early science. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2017, 67: 231—251.

- [2] Collaboration P, Ade PAR, Aghanim N, et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astronomy and Astrophysics*, 2013, 571: A16.
- [3] Goodman MW, Witten E. Detectability of certain dark matter candidates. *Physical Review D*, 1985, 31(12): 3059—3063.
- [4] Tanabashi M, Hagiwara K, Hikasa K, et al. Review of particle physics. *Physical Review D*, 2018, 98(3): 030001.
- [5] Jiang H, Jia LP, Yue Q, et al. limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg \times day data of the CDEX-10 experiment. *Physical review letters*, 2018, 120(24): 241301.
- [6] Yang LT, Li HB, Yue Q, et al. Search for light weakly-interacting-massive-particle dark matter by annual modulation analysis with a point-contact germanium detector at the China Jinping Underground Laboratory. *Physical Review Letters*, 2019, 123(22): 221301.
- [7] Liu ZZ, Yue Q, Yang LT, et al. Constraints on spin-independent nucleus scattering with sub-GeV weakly interacting massive particle dark matter from the CDEX-1B experiment at the China Jinping Underground Laboratory. *Physical Review Letters*, 2019, 123(16):161301.
- [8] Tan AD, Xiao MJ, Cui XY, et al. Dark matter results from first 98.7 days of data from the PandaX-II experiment. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12): 121303.
- [9] Cui X, Abdurkerim A, Chen W, et al. Dark matter results from 54-ton-day exposure of PandaX-II experiment. *Physical Review Letters*, 2017, 119(18): 181302.
- [10] Goeppert-Mayer M. Double beta-disintegration. *Physical Review*, 1935, 48(6): 512—516.
- [11] Furry WH. On transition probabilities in double beta-disintegration. *Physical Review*, 1939, 56(12): 1184—1193.
- [12] Dolinski MJ, Poon AWP, Rodejohann W. Neutrinoless double-beta decay: status and prospects. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2019, 69: 219—251.
- [13] 张焕乔. 无中微子双贝塔衰变实验. 北京: 科学出版社, 2020: 1—37.
- [14] Bahcall JN. Neutrino astrophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [15] Haxton WC. Neutrino physics: What makes the Sun shine. *Nature*, 2014, 512: 378—380.
- [16] Serenelli AM, Basu S, Ferguson JW, et al. New solar composition; the problem with solar models revisited. *The Astrophysical Journal*, 2009, 705: L123—L127.
- [17] Serenelli AM, Haxton WC, Pena-Garay C, et al. Solar models with accretion. I. Application to the solar abundance problem. *The Astrophysical Journal*, 2011, 743(1): 24.
- [18] de Holanda PC, Smirnov AY. Homestake result, sterile neutrinos and low-energy solar neutrino experiments. *Physical Review D*, 2004, 69(11): 113002.
- [19] Sramek O, Roskovec B, Wimperfurth S, et al. Revealing the Earth's mantle from the tallest mountains using the Jinping Neutrino Experiment. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33034.
- [20] Cyburt RH, Fields BD, Olive KA, et al. Big bang nucleosynthesis: 2015. *Review of Modern Physics*, 2016, 88(1): 015004.
- [21] Shen YP, Guo B, Liu WP. Alpha-cluster transfer reactions: A tool for understanding stellar helium burning. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2021, 119: 103857.
- [22] deBoer RJ, Gorres J, Wiescher M, et al. The $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction and its implications for stellar helium burning. *Review of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035007.
- [23] Hult M. Low-level gamma-ray spectrometry using Ge-detectors. *Metrologia*, 2007, 44(4): S87—S94.
- [24] Abgrall N, Arnquist IJ, Avignone FT, et al. The Majorana Demonstrator radioassay program. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 828: 22—36.
- [25] Agnese R, Anderson AJ, Asai M, et al. Search for low-mass weakly interacting massive particles using voltage-assisted calorimetric ionization detection in the SuperCDMS experiment. *Physical Review Letters*, 2014, 112(4): 041302.
- [26] Armengaud E, Augier C, Benoit A, et al. A search for low-mass WIMPs with EDELWEISS-II heat-and-ionization detectors. *Physical Review D*, 2012, 86(5): 051701.
- [27] Abdelhameed AH, Angloher H, Bauer P, et al. First results from the CRESST-III low-mass dark matter program. *Physical Review D*, 2019, 100(10): 102002.
- [28] Aguilar-Arevalo A, Amidei D, Baxter D, et al. Constraints on light dark matter particles interacting with electrons from DAMIC at SNOLAB. *Physical Review Letters*, 2019, 123(18): 181802.
- [29] Abramoff O, Barak L, Bloch IM, et al. SENSEI: direct-detection constraints on sub-GeV dark matter from a shallow underground run using a prototype skipper-CCD. *Physical Review Letters*, 2019, 122(16): 161801.
- [30] Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Dark matter search results from a one ton-year exposure of XENON1T. *Physical Review Letters*, 2018, 121(11): 111302.

- [31] Akerib DS, Alsum S, Araújo HM, et al. Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure. *Physical Review Letters*, 2017, 118(2): 021303.
- [32] Ni KX, Lai YH, Abdurkerim A, et al. Searching for neutrino-less double beta decay of ^{136}Xe with PandaX-II liquid xenon detector. *Chinese Physics C*, 2019, 43(11): 113001.
- [33] Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Excess electronic recoil events in XENON1T. *Physical Review D*, 2020, 102(7): 072004.
- [34] Aalbers J, Agostini F, Alfonsi M, et al. DARWIN: towards the ultimate dark matter detector. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016, 11: 017.
- [35] Agnes P, Albuquerque IFM, Alexander T, et al. Low-mass dark matter search with the DarkSide-50 experiment. *Physical Review Letters*, 2018, 121(8): 081307.
- [36] Aalseth CE, Acerbi F, Agnes P, et al. DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS. *The European Physical Journal Plus*, 2018, 133: 131.
- [37] Agostini M, Bakalyarov AM, Balata M, et al. Probing Majorana neutrinos with double- β decay. *Science*, 2019, 365: 1445—1448.
- [38] Aalseth CE, Abgrall N, Aguayo E, et al. Search for neutrinoless double- β decay in ^{76}Ge with the Majorana Demonstrator. *Physical Review Letters*, 2018, 120(13): 132502.
- [39] Wang L, Yue Q, Kang KJ, et al. First results on ^{76}Ge neutrinoless double beta decay from CDEX-1 experiment. *Science China Physics Mechanics and Astronomy*, 2017, 60(7): 071011.
- [40] Abgrall N, Abramov A, Abrosimov N, et al. The large enriched germanium experiment for neutrinoless double beta decay (LEGEND). *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1894(1): 020027.
- [41] Anton G, Badhrees I, Beck D, et al. Search for neutrinoless double- β decay with the complete EXO-200 dataset. *Physical Review Letters*, 2019, 123(16): 161802.
- [42] Albert JB, Anton G, Arnquist IJ, et al. Sensitivity and discovery potential of nEXO to neutrinoless double beta decay. *Physical Review C*, 2018, 97(6): 065503.
- [43] Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Energy resolution and linearity of XENON1T in the MeV energy range. *The European Physical Journal C*, 2020, 80(8): 785.
- [44] Alduino C, Alfonso K, Andreotti E, et al. First results from CUORE: A search for lepton number violation via $0\nu\beta\beta$ decay of ^{130}Te . *Physical Review Letters*, 2018, 120(13): 132501.
- [45] Adams DQ, Alduino C, Alfonso K, et al. Improved limit on neutrinoless double-beta decay in ^{130}Te with CUORE. *Physical Review Letters*, 2020, 124(12): 122501.
- [46] Armengaud E, Augier C, Barabash AS, et al. The CUPID-Mo experiment for neutrinoless double-beta decay: performance and prospects. *The European Physical Journal C*, 2020, 80: 44.
- [47] Gando A, Gando Y, Hachiya T, et al. Search for Majorana neutrinos near the inverted mass hierarchy region with KamLAND-Zen. *Physical Review Letters*, 2016, 117(8): 082503.
- [48] Zhao J, Wen LJ, Wang YF, et al. Physics potential of searching for $0\nu\beta\beta$ decays in JUNO. *Chinese Physics C*, 2017, 41(5): 053001.
- [49] Lin H, Calvet D, Chen L, et al. Design and commissioning of a 600 L time projection chamber with microbulk micromegas. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13: P06012.
- [50] Chen X, Fu CB, Galan J, et al. PandaX-II: Searching for neutrinoless double beta decay with high pressure ^{136}Xe gas time projection chambers. *Science China- Physics Mechanics and Astronomy*, 2017, 60(6): 061011.
- [51] An MM, Chen CF, Gao CS, et al. A low-noise CMOS pixel direct charge sensor, topmetal-II⁻. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 810: 144—150.
- [52] Beacom JF, Chen SM, Cheng JP, et al. Physics prospects of the Jinping neutrino experiment. *Chinese Physics C*, 2017, 41(2): 023002.
- [53] Haxton WC, Salty water Cherenkov detectors for solar neutrinos. *Physical Review Letters*, 1996, 76(10): 1562—1565.
- [54] Liu WP, Li ZH, He JJ, et al. Progress of Jinping underground laboratory for nuclear astrophysics (JUNA). *Science China Physics Mechanics and Astronomy*, 2016, 59(4): 642001.
- [55] Zeng Z, Mi YH, Ma H, et al. The characteristics of a low background germanium gamma ray spectrometer at China JinPing underground laboratory. *Applied Radiation and Isotopes*, 2014, 91: 165—170.

- [56] Hussain G, Zeng Z, Yao CF, et al. Assay of low-background stainless steel by smelting for the neutrino experiment at Jinping. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2018, 881: 65—71.
- [57] Meng J, Song LS, Yao JM. Nuclear matrix elements for neutrinoless double-beta decay in covariant density functional theory. *International Journal of Modern Physics E*, 2017, 26: 1740020.
- [58] Song LS, Yao JM, Ring P, et al. Relativistic description of nuclear matrix elements in neutrinoless double- β decay. *Physical Review C*, 2014, 90(5): 054309.

Key Scientific Issues in the Research of Deep Underground Frontier Physics

Cheng Jianping^{1,2} Liu Weiping³ Yue Qian^{2*} Li Huihong⁴ Dong Guoxuan⁴
Liu Jianglei⁵ He Jianjun¹ Guo Bing³ Yang Litao^{2*}

1. *College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875*

2. *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084*

3. *Institute of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*

4. *Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

5. *School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240*

Abstract The Deep Underground and ultra-low Radiation background Facility for frontier physics experiments (DURF) is one of the National Major Science & Technology infrastructure projects for the 13th Five-year Plan based on the China Jinping Underground Laboratory. Due to its unique conditions of the world's deepest rock coverage, the largest available space, and first-class comprehensive conditions, it has attracted the attention of scientists at home and abroad. In the context of our country's active promotion of innovative development in the field of basic research, it is of great significance to discuss frontier physics research based on the deep ground experimental platform. Based on the 268th Shuangqing Forum of National Natural Science Foundation of China (NSFC), this article summarizes the major opportunities and challenges faced by the deep underground frontier physics research, reviews the main progress and achievements of our country's Deep Frontier physics in recent years. The major key scientific issues and technical challenges involved in this field in the next 5~10 years are also presented. Moreover, the directions on relevant deep frontier physics research and the funding strategies of NSFC are discussed.

Keywords deep underground physics; China Jinping Underground Laboratory; interdisciplinary; basic research

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Author, Email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn; yanglt@mail.tsinghua.edu.cn