
课题编号：2023YFA1606204

密级：公开

国家重点研发计划课题中期 执行情况报告

课题名称：面向下一代液氙实验的极低本底控制技术研发

所属项目：基于 PandaX-4T 的物理和关键技术研究

所属专项：大科学装置前沿研究

项目牵头承担单位：上海交通大学

课题承担单位：北京大学

课题负责人：王思广

课题管理专业机构：科学技术部

执行期限：2023 年 12 月 至 2027 年 11 月

中华人民共和国科学技术部

2025 年 11 月 18 日

编报要求

一、内容说明

项目中期执行情况报告着重从组织实施角度，围绕项目任务书的内容报告项目中期重要进展情况，具体包括项目的总体目标及考核指标实现程度，一体化组织实施及管理运行情况，人员、资金等支撑条件落实情况，项目和各课题经费使用情况等，并报告中期执行过程中的重大事项及突出进展。

二、格式要求

文字简练；报告的密级一般与任务书规定的密级相同；报告文本统一用 A4 幅面纸，文字内容一律通过“国家科技管理信息系统公共服务平台”在线填报；报告文本第一次出现外文名称时要写清全称和缩写，再出现时可以使用缩写。

三、编制程序及时间要求

项目中期检查前，由项目牵头单位组织项目参与单位编制项目中期执行情况报告，经项目负责人及项目牵头单位审核后，按照填报项目任务书时的用户名和密码，登陆国家科技管理信息系统公共服务平台 (<http://service.most.gov.cn/>) 在线填写，并由单位管理员审核提交专业机构审核确认。填报完毕后，打印装订，由项目负责人签字，项目牵头单位盖章后，报送专业机构。

涉密项目中期执行情况报告不得在线填写，请在国家科技管理信息系统公共服务平台下载文档模板，并按照保密规定进行填写、打印及报送。

编写大纲

【注：请以项目为整体进行总结，勿单纯罗列课题成果】

一、总体进展情况

1.项目中期总体进展情况

对照项目任务书的计划目标和各项主要指标要求，简要阐明项目中期进展情况；对照项目主要研究内容中拟解决的关键科学问题、关键技术问题，简述研究进展情况；评述项目中期任务的实施进展状态。

对照项目任务书的总体目标与指标要求，项目在中期已取得实质性进展，主要关键指标均达到或接近预期。围绕下一代液氙实验所需的极低本底控制关键技术，本项目从材料放射性抑制、痕量放射性同位素测量方法、以及液氙中氚的工程化去除等方面实现重要突破，解决暗物质和中微子等稀有衰变实验中的本底问题。

在低本底材料方向，项目建立了从样品制备、超痕量测量到材料筛选的完整技术体系，显著提升了铜中 U/Th 测量的灵敏度与流程可靠性，并完成了关键结构材料的前期筛选与大批量采购，为后续探测器建造奠定基础。

在惰性放射性同位素测量方向，针对氚与氡的极低含量检测难题，项目通过系统集成与方法创新提升了氚/氙摩尔比与氡析出速率测量的灵敏度，已满足或接近任务书终期指标，形成可用于大规模液氙实验的高可靠监测能力。

在氚去除关键技术方面，项目成功实现了低温精馏系统与大型液氙探测器的工程化耦合，并在实际运行环境中稳定运行，将氚化甲烷浓度压低至目标要求以下，验证了该技术体系在未来更大规模实验中的可行性与可复制性。

总体而言，项目的组织实施顺畅，各课题协同推进，关键技术路线正确，中期任务完成进度良好，研究成果已经对 PandaX-4T 实验产生直接支撑作用，并为下一代更大规模液氙实验提供了坚实的技术基础。后续工作将重点面向技术体系的进一步优化与长期稳定性验证，确保实现项目终期目标。

2.项目调整情况

如项目出现超前/迟滞、技术路线变更、项目团队（单位、人员）和任务调整等情况，请详细说明原因、措施及履行相关审批管理制度的情况。

课题四无调整。

二、取得的重要进展及成果

1.项目中期重要进展及成果

简要介绍项目研究工作的重要进展、阶段性成果（一般不超过 3 项）及前景。

课题研究工作取得了一些进展，其中以下三项阶段性成果描述如下：

成果一：极低本底铜材料筛选方法与材料的选择结果：

本研究在铜中铀、钍超痕量测量方法取得一些进展，并据此筛选、确认并采购了关键结构材料——超高纯铜，为极低本底探测器的建造提供了材料准备和预演。

方法学创新——密封湿室技术：为解决极低含量测量中环境粉尘污染这一关键技术难题，课题组创新性地设计了“密封湿室”装置。该装置通过在溶铜期间创造一个局部的洁净湿环境，显著降低了长达数天的样品制备过程中的本底干扰。

方法学创新——树脂法流程革新：课题组取得了一项关键科学发现：经过 ETADS (*Ethylenediamine Tetraacetic Acid Disodium Salt*, 乙二胺四乙酸二钠) 处理的 UTEVA 树脂对硝酸铜溶液中的铀和钍具有高吸附率。这一发现打破了传统树脂法（需联合使用 TEVA 和 UTEVA 两种树脂）的复杂流程，实现了单种树脂即可完成对铀和钍的高效富集，大大简化了操作，减少了流程污染。

阶段性成果：基于上述方法创新，课题组确认了奥鲁比斯高纯铜的放射性含量优于 $10E-12$ g/g，并已完成 1230 公斤的采购。

成果二：氪、氡痕量测量灵敏度显著提升

氪测量灵敏度突破：针对氪信号极微弱的关键技术难题，课题组为锦屏地下实验室的测量系统增加了一套冷头式氪富集系统。该系统能够对样品中的氪进行 5-7 倍的富集，从而放大检测信号。

氡测量装置集成化：通过抛光，酸洗钝化，电解抛光等表面处理方法改进放氡率，提升灵敏度，同时研制出新一代高集成度的氡探测器 (Portable1/2)，其操作友好性和稳定性远超上一代设备，能够满足大型实验现场多场景、高灵敏度的测量需求。

当前，氪/氙摩尔比测量灵敏度已达 $1.1E-12$ ，接近终期指标($1E-12$)；当前课题组拥有多套氡的测量仪器，其中氡气测量灵敏度最优值达 0.03 ± 0.01 mBq，达到项目终期指标 (0.05 mBq)。

成果三：液氙中氚本底去除技术完成工程验证，实现指标要求

本成果成功压低了液氙探测器中一本底来源——氚化甲烷，并通过大型工程实践验证了去除技术的可行性与有效性。

精馏技术工程化应用：课题组的核心创新在于将 PandaX-4T 实验的低温精馏塔成功耦合入正在运行的探测器系统中，实现了对 6 吨液氙的在线、循环纯化。

阶段性成果：通过精馏纯化，成功将液氙中的氚化甲烷浓度从 $29.5 \mu \text{Bq}/\text{吨}$ 降低至 $4.83 \mu \text{Bq}/\text{吨}$ ，圆满达成了课题终期指标 ($5 \mu \text{Bq}/\text{吨}$)。该成果已发表于 NIMA，有效提升暗物质能区的探测灵敏度。

基于当前取得的重要进展，课题四的研究工作直接支撑下一代大型实验：本课题发展的全套极低本底技术（材料、测量、纯化）将直接应用于我国主导的下一代更大规模的液氙暗物质探测实验。所采购的高纯铜将用于建造辐射本底更低的探测器核心容器，高灵敏度的氚、氡测量技术将用于实时监控原料和实验系统的纯度，而成熟的氚去除技术将确保实验的本底水平达到物理目标要求。

课题发现的 ETADS 处理的 UTEVA 树脂测量法、TEVA 树脂净化硫酸铜工艺不仅具有科学价值，更具备转化为工业应用的潜力。未来可推动其成为高纯材料检测的重要方法，实现基础研究成果的转化。

2. 预期社会效益

重点阐明对学科/行业产生的影响，对社会民生、生态环境、国家安全等的作用，以及研究成果的合作交流、转移转化和示范推广情况，人才、专利、技术标准战略在项目中的实施情况等。

项目研发的极低本底控制技术将提供材料选择、气体纯化、氚去除等多方面的技术支持，以降低实验装置的本底水平，这将为未来的液氚实验提供更高的信噪比，有助于研究更加稀有的物理过程。项目开发的降低辐射本底和改进气体纯化等技术，也对降低环境中的放射性污染风险有指导意义，从而对环境保护产生积极影响。

专利申请中：低本底实验要求建造探测器材料含有放射性核素应尽可能少。铜是重要的建造材料，低本底铜的制造对于探测器建造至关重要。高纯铜的获取通常通过电解方法，常用的电解液是硫酸铜。硫酸铜中铀、钍核素的含量是低本底铜的重要指标。怎么去取硫酸铜中铀、钍核素是一难题。在完成本课题的过程中，发现了 TEVA 树脂用于硫酸铜溶液中铀、钍元素的去除的有效性。TEVA 树脂本来是用吸附钍的，为了对铀进行吸附特生产了 UTEVA 树脂。但这都常用于硝酸体系，对于硫酸体系没见报道。本工作研究发现 TEVA 树脂对于硫酸铜中的铀、钍有非常优秀的表现，特别是对于铀的吸附能力比钍优秀且对于两者都显著比 UTEVA 优秀。故提出了专利申请，并于 2024 年 10 月 29 日公布。与江西铜厂进行了相关技术的交流及未来合作的可能性。

低温精馏系统不但为暗物质探测器的获得超低本底奠定基础，在社会层面，系统对高校和企业开放，结合理论知识对公众开放参观并进行讲解，允许在科学停止运行期间根据企业需要进行定制运行；低温精馏所获得的超高纯氚不但用于暗物质探测器运行，也提供给中科院理化所用于氚三相点及其他物理性质的精确测量。与此同时，超高纯低温精馏的成果可应用在半导体电子工业中，为影响半导体器件成品率和可靠性的超高纯电子气体的获取提供技术支持，冲破国外对此的技术壁垒，促进超高纯电子气的

国产化进程。既解决了暗物质探测研究遇到的瓶颈难题，也促进了电子工业、低温工程和化学工业等领域的发展，具有产业化意义。

人才培养：

培养了 2 名博士(钱志成、罗棱尹)， 2 名硕士(侯钰、吴渊)， 6 名本科生(王好、吴粮宇、高智星、运有辉、张智轩、刘吴俊哲)。

发表文章：

- [1]Design and experimental application of a radon diffusion chamber for determining diffusion coefficients in membrane materials, 2025 JINST 20 P03031
- [2]A novel low-background photomultiplier tube developed for xenon based detectors, NIM-A 1073 (2025) 170290
- [3]Position reconstruction and surface background model for the PandaX-4T detector, NIM-A 1077 (2025) 170548
- [4]Development of high-sensitivity radon emanation measurement systems with surface treatment optimization, NIM-A 1080 (2025) 170771
- [5]Tritiated methane reduction in the PandaX-4T experiment via purge and cryogenic distillation processes, NIM-A 1083 (2025) 171128

三、项目人员及经费投入使用情况

1.人员及经费投入使用情况

对照项目任务书阐述项目及课题资金（包括专项经费、自筹经费等）到位情况、项目资金单独核算情况、预算调剂情况、支出情况和经费使用监督管理情况、人员投入情况等。

课题四预算总经费 425 万，到账经费 206.2 万，其中上海交通大学到账经费 133.4 万，北大到账经费 72.8 万，无自筹经费。

累积支出：108.05 万，执行率：52.40%。

前后共 17 人作为骨干参与：王思广、刘江来、孟月、巨永林、王舟、吴渊、高智星、罗棱尹、刘吴俊哲、吴粮宇、王好、候钰、陆聪聪、徐艺凡、钱志成、运有辉、张智轩。累积 13 人年。

2. 项目经费拨付情况

项目牵头单位向课题承担单位、课题承担单位向课题参与单位拨付中央财政资金情况。

课题四预算总经费 425 万。2024 年 5 月 9 日上海交通大学向北京大学拨款 206.2 万，2024 年 5 月 17 日北京大学向上海交通大学拨款 133.4 万给上海交通大学。

3. 人员及经费实际调整情况

如出现经费未及时到位、停拨、迟拨等特殊情况，请详细说明原因、措施、履行相关审批管理制度以及整改等情况。

无

四、项目配套支撑条件情况

阐述各主要研究任务的配套支撑条件落实及调整变化情况。如有调整变化，请说明调整变化对完成项目目标的影响和作用。

本子课题以北京大学为牵头单位，承担铜中铀-238、钍-232 含量测

量技术研发工作；上海交通大学为本子课题的参与单位，承担惰性放射性同位素氚气和氡气测量及氚中氚含量的降低工作。采用课题负责人制度，参与单位向子课题负责人提交工作进展相关文档和报告，子课题负责人向课题负责人汇报方案和进展。课题负责人定期向项目合作组报告工作进度。同时，项目运行会执行评审制度，将要求相关专家对项目方案进行评审把关。

无调整。

五、项目组织实施管理工作

1. 项目组织管理情况

阐述项目按照一体化组织实施的要求，内部管理机构和管理制度建立、运行情况和效果，以及项目牵头单位组织课题间交流、检查评估等方面的管理情况。

该项目由上海交通大学主导，依据现行国家重点研发计划项目和经费管理办法，对项目及其各个课题进行监督和管理。项目负责人将及时向相关方汇报项目和课题的进展情况。同时，项目将设立项目工作小组，由项目负责人、课题负责人和核心成员组成，并与外部专家监管小组密切合作，积极配合专家小组的工作。

北京大学及上海交大就负责的相关研究领域积累了一定的研究经验及技术设备，在项目组的监督、管理、支持下能够顺利完成承担的研究内容，达到既定研究目标。

2. 项目间协作情况

阐述项目参与重点专项的相关管理活动，项目间资源与数据共享、协作研发以及成果转化应用情况等。

北大 ICPMS 全天候服务于 PandaX 的测量需要。上海交通大学关于精馏系统对于实验中液氙的氪、氩、氙去除服务于整个实验室。新的本底控制技术可以反馈给 PandaX-4T 实验，开展探测器建造材料的逐步升级，进一步提升对暗物质和中微子性质的探测能力。另一方面，课题 3 在研制大面积高分辨光子探测技术中，需要严格控制本底。其中新型低本底光电管、光电管信号导出等元器件和信号线等的放射性和放氢量需要课题 4 的技术来进行检测和筛选。

3. 组织实施风险及应对情况

阐述项目在组织实施过程中，面对外部政策、组织管理、研发变化和知识产权等方面的风险以及应对措施。

目前并没遇到类似风险。

六、项目组织实施中的重大问题及建议

无

七、任务书中有特殊约定或其他需要说明的事项

无

八、专业机构要求提交的其他材料

无