

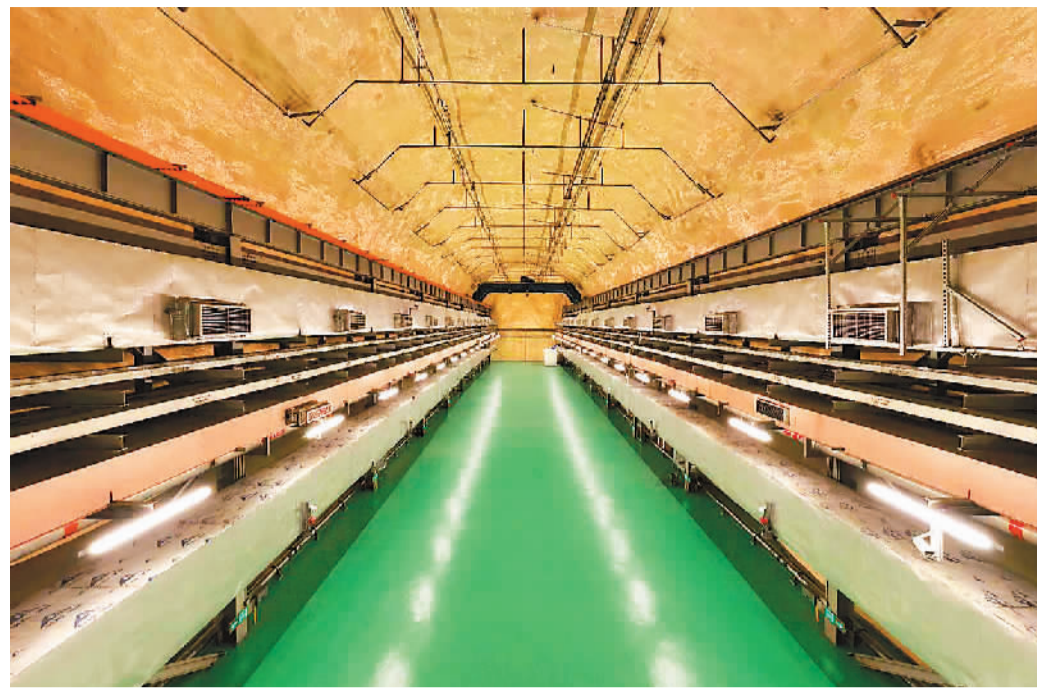
探访世界最深、最大的极深地下实验室——

在2400米深地“追光”

本报记者 赵昊

近期，中国锦屏地下实验室二期极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施土建公用工程完工，具备实验条件。首批来自清华大学、上海交通大学、中国原子能科学研究院等高校和科研院所的10个实验项目组进驻开展科学实验。

这座世界最深、最大的极深地下实验室如何建成？对于科技创新具有什么意义？本报记者进行了采访。



▲ 中国锦屏地下实验室二期锦屏大设施A2实验厅。

打造理想环境

锦屏山位于四川省凉山彝族自治州，发源于青藏高原的雅砻江沿着锦屏山蜿蜒流淌。这里地势陡峭，蕴藏着丰富的水能资源，相继建成两座世界级水电站（国投集团雅砻江公司锦屏一级、锦屏二级水电工程项目）。长达17.5公里、垂直岩石覆盖约2400米的锦屏山隧道穿山而过，连接两座水电站，这也正是中国锦屏地下实验室的开端。

本世纪初，清华大学工程物理系团队开始暗物质实验研究。暗物质，通俗地讲就是那些既不发光、也不吸收和反射光的物质。到目前为止，暗物质存在的多个科学证据都是由天文观测给出的。根据天文观测数据和研究成果，暗物质质量约占宇宙物质总质量的85%，分布在宇宙的各个角落。

遗憾的是，目前人类并没有真正探测到暗物质。“暗物质研究被认为是21世纪最重大的前沿物理问题之一，暗物质被喻为‘笼罩在21世纪物理学天空中的乌云’。探索暗物质，相当于在乌云中寻找一束光。”清华大学工程物理系教授、CDEX暗物质实验负责人岳嵩对记者说。

工欲善其事，必先利其器。一个理想的研究环境，对开展暗物质实验研究至关重要。地面充斥着大量的宇宙射线，一个手掌差不多大的空间，每秒就有两个宇宙射线穿过。若是在地上开展暗物质、中微子探测实验，探测器接收到的信号会淹没在宇宙射线的信号中，研究人员无法分辨。

“这就好比在一个非常嘈杂的足球场，要听到一根针掉到地上的声音。”岳嵩说。

为了最大程度屏蔽干扰，开展暗物质等前沿物理问题的研究需要在地下实验室进行。然而，在很长一段时间里，由于国内缺乏相关设施，清华大学科研团队只能租用韩国襄阳地下实验室的一个拐角。该实验室岩石覆盖厚度约为700米，供中国科研团队的使用面积大约只有1平方米。

在国外开展研究时，清华大学科研团队也在国内寻找合适的实验场所。团队成员曾前往东北和北京的煤矿、秦岭隧道、河北的金矿等实地考察，结果均不理想。

一筹莫展之际，转机出现了：2008年8月8日，岳嵩偶然在电视上看到一条新闻：锦屏山隧道贯通了！

团队立马前往现场勘察，他们惊喜地发现，这里正是建设深地实验室的绝佳场所：隧道上方2400多米的岩石厚度可以屏蔽各种宇宙射线，而且周围的岩石是大理石，辐射也低。一旦建成，这里将拥有目前世界上探测暗物质最理想的研究环境。

当清华大学科研团队找上门来的时候，国投集团雅砻江流域水电开发有限公司的第一反应是疑惑。“大家从未听说过暗物质，觉得很玄乎。”雅砻江公司锦屏地下实验室管理局局长李名川说。

当时，锦屏水电站正处于建设高峰期，时间紧、任务重。同时开挖建设实验室，安全风险高，稍有不慎就会影响锦屏工程进度。但在详细了解实验的重大意义并经科学论证后，雅砻江公司毅然决定：开展合作，建设深地实验室！

创新建设工艺

2010年，体积约4000立方米的锦屏实验室一期建设完成。然而，更大的难题还在后面。

为满足暗物质探测器升级需求和其他科研项目对地

下空间的使用，清华大学和雅砻江公司开启实验室二期项目建设，把地下可用实验空间增加到30万立方米。从4000立方米到30万立方米，足足扩大75倍，项目团队要闯过重重关卡。

第一关是“设计关”。不同于普通工程，科学实验项目对工程建设要求更加极致。“防水抑氧工艺、建筑材料

障碍。“地下实验室空间有限，液氮汽化后体积膨胀，造成空气中含氧量降低，会危及生命。”项目运维团队成员尹永利介绍，锦屏建有全球最大的物理实验液氮恒温罐，承载1725立方米的液氮，用来开展更大规模的科研试验。在密闭洞室内确保氮气安全排放，是摆在项目运维团队面前的一个难题。

动对科学实验仪器没有产生影响。期间，科研团队在液氮暗物质探测实验上取得了多项成果，在《自然》杂志发表了暗物质研究文章，获得教育部自然科学一等奖。

建成后的锦屏地下实验室二期，拥有A、B、C、D 4个大厅，每个大厅130米长、14米宽、14米高。“如果说实验室一期是一个房间，实验室二期就是一个小区。”李名川说。

在实验室二期内进行的研究，早已不局限于暗物质。如今，清华大学中微子、生态环境部·北师大联合实验、华西医地医学、工信部电子五所等10个项目组进驻，既开展暗物质、中微子、核天体物理等最前沿课题实验，也在深地岩体力学、深地医学等方面进行研究。

当初埋藏在锦屏山下的一颗种子，如今已结出累累硕果。自2013年清华大学发布中国第一个自主暗物质研究成果以来，短短10余年间，清华大学牵头的CDEX实验组和上海交大牵头的PandaX实验组已发布30项国际领先的科研成果，助力中国暗物质研究从“跟跑”“并跑”到“交替领跑”。

成果不只在暗物质一个领域。2022年10月，进驻锦屏地下实验室的实验组对远古恒星钙丰度的研究成果在《自然》杂志发表，标志着中国核天体物理研究进入全球前列。截至目前，锦屏地下实验室各研究团队累计发表高水平论文120多篇，其中2篇发表在《自然》杂志上，培养了诸多青年科研人才。

“未来，国投集团雅砻江公司将同清华大学一道，邀请更多的实验团队入驻，将实验室打造成涵盖粒子物理、核天体物理、生命科学、岩石力学等多学科交叉的世界级深地科学平台。”李名川说。

（本版图片均由国投集团雅砻江公司提供）



▲ 位于中国锦屏地下实验室二期的JUNA深地核天体物理实验装置。

► 科研人员在中国锦屏地下实验室开展相关实验。

和机电设备低本底控制，这些都对设计提出严格要求。”建设团队成员李宏璧回忆说，临近施工节点，招标设计要求依然很难落地。

如果设计有差错，后续所有工作都失去意义。那段日子，建设团队看在眼里、急在心里。为了尽早攻克难题，团队成员常常深夜不眠，一手拿着规范文书，一手捻着水泥粉作对比。他们反复查阅文献资料、用各种仪器验证排除问题，多次召开专家咨询会、进行实地调研，最终才形成一份合适的方案。

把设计从图纸落到现实，还需要过“材料关”。“锦屏山隧道测得最大地应力达到113.87MPa，相当于1万米水压。难度不亚于在地球上最深的地方——马里亚纳海沟最深处挖一个洞室。”雅砻江公司锦屏地下实验室管理局总工程师申满斌说。

维持洞室稳定的惯做法，是用钢筋、混凝土沿着洞周边衬砌起来，但所有材料难免都有辐射。如何在保持稳定的同时，为实验室提供尽可能纯净的环境？必须“上新”更高标准的材料。

为此，建设团队一边建造一边研发，成功生产出低辐射的水泥、金刚砂、岩面等材料。“这些材料均为国际首创，最大程度控制了实验室的辐射。”申满斌说。

建造实验室，项目方还面临“看不见的敌人”——氡气。该物质会在天然岩体中缓慢释放，具有放射性，影响实验精度。如何控制氡气？建设团队创造性使用了10层材料，在11万平方米的洞室表面安装了“保护膜”。每一层材料都要经过多次研究、试验和反复讨论。“仅仅是防水抑氧工程中钢筋网取舍这道工序，我们就组织召开了9次讨论会议。”李宏璧说。

“安全关”无疑是锦屏地下实验室必须跨过的又一道

尹永利表示，接手项目后，他组织参建各方制定了10余项施工方案，带着专业通风设计单位现场踏勘，周密计算洞室环境换气量及风机布设点；同时，进行不间断的实验，实时检测整个实验室和辅助洞的含氧量。前前后后历经4年时间，团队才顺利完成项目。

“目前，项目还建成全球最大的聚乙烯屏蔽舱以及全球最长距离新风供气系统，有效解决了地下实验空间环境辐射精准控制难题，极大推动了深地工程建设技术的进步。”申满斌说。

结出累累硕果

在项目建设如火如荼开展之时，另一边，科研实验团队也没停下脚步。

“关于暗物质的研究，早一天进驻开展实验，就能早一天取得进步。”上海交通大学PandaX实验项目成员肖翔说，“实验项目进度一天都不能耽误，为此，我们团队提前申请开展工作。”

在工程施工与科学实验同步进行的情况下，还要保障科学实验不中断，这给项目建设者带来不小的挑战。为此，在施工过程中，建设团队创新工艺，分区域、分阶段进行施工。

“以爆破为例，如果我们采用传统方式，1到2天就能完成爆破。但为了不影响科研，我们花了3个月时间，采用特殊的‘静态碎石’方式，像保护古建筑一样，实施精细化爆破，不干扰科研实验进程。”李宏璧说。

“整个施工期间，我们的实验没有任何中断。”肖翔说，科研团队安放了震动监测仪器，数据表明，爆破震

延伸阅读

如何探测暗物质

20世纪30年代，瑞士天文学家弗里茨·兹威基通过大量天文学观测和推导，首次提出暗物质的猜想。

目前，学界主要通过三种方式寻找暗物质：

一是“上天”。所谓“上天”，是指在天文观测中捕捉暗物质湮灭或衰变的信号。例如中国发射的“悟空”号暗物质粒子探测卫星，是目前世界上观测能段范围最广、能量分辨率最优的暗物质粒子探测卫星。

二是“入地”。暗物质和普通物质的原子核碰撞后，会产生微弱信号，但这种信号不易捕捉。为最大限度屏蔽其他宇宙射线的干扰，此类探测实验常在地下深处进行。例如，中国锦屏地下实验室就在四川锦屏山地下约2400米处。

三是“人造”。这种寻找暗物质的方法是在实验室产生暗物质粒子。在暗物质粒子对撞实验中，可能会有尚未被发现的粒子产生出来，再结合直接或间接的探测手段，可以帮助确定对撞机中出现的粒子是否为暗物质。

（本报记者 吴雪聪整理）



锦屏山交通隧道东端。