

“基于地下实验室的核天体物理前沿研讨会”会议纪要

在国家自然科学基金委员会的核天体物理创新群体基金和科技部 973 项目支持下,我国核天体物理取得了长足的发展,形成了研究院所联合,理论、实验和观测结合的创新研究群体。在核天体物理直接测量方面,创新研究群体通过国内外合作研究开展了若干核天体物理关键反应的直接测量工作,并直接参与了目前世界上唯一地下核天体物理实验室 LUNA 的升级计划。在开展地下实验室直接测量方面创新研究群体已经积累了丰富的经验,具有良好的研究基础。锦屏山地下实验室岩层覆盖超过 2500 米(等效水深 7000 米),而且周围岩石结构为大理石自身放射性本底极低,是目前世界上深度最深、条件最好的地下实验室。目前锦屏实验室二期规划 8 个新的实验洞(长 50 米,宽 12 米,高 12 米),计划于 2015 年初完成挖掘工作。通过与锦屏实验室负责方清华大学协商,达成初步协议其中一个实验洞交由核天体物理创新研究群体建立核天体物理地下实验室。核工业集团公司对地下核天体物理实验室的工作也非常支持,已经先期投入了 300 万元经费,用于实验室的支撑防护等基础设施的建设工作。

在此背景下,我们于 2013 年 8 月 21 到 23 日,在四川西昌召开了“基于地下实验室的核天体物理前沿”研讨会,会议经费由中国原子能科学研究院核天体物理创新群体和 973 项目资助。会议目标是集中国内优势单位力量,对建立锦屏山地下核天体物理实验室的整体方案和科学目标展开讨论,在此基础上凝练物理目标,形成共同申请国家项目的计划,为将来成立联合国家实验室打下基础。中国原子能院、清华大学、北京大学、上海交通大学、中科院近代物理研究所、国家天文台、北京航空航天大学、深圳大学等单位的专家参加了会议,会议还邀请了科技部、基金委及核工业总公司的相关领导。

会议按日程于 8 月 21 到 23 日如期召开。会议第一天，就相关问题进行了学术报告。报告内容包括：核天体物理的前沿问题、地下核天体物理实验室的重要意义、锦屏山地下实验室的介绍、目前锦屏山地下实验室开展的科学研究以及建立锦屏山地下核天体物理实验室的初步规划。会议期间参会领导发表了讲话，与会代表进行了合影留念。会议第二天，参会代表参观了锦屏山地下实验室。会议第三天，就开展地下核天体物理实验的重要意义、整体规划、近期工作目标及合作框架大家展开了讨论。

会议具体进程记录如下：

1) 8 月 21 日学术报告

北京大学叶沿林教授做了题为“远离稳定线核的衰变研究”的报告。

原子能院孙汉诚研究员做了题为“双贝塔衰变研究”的报告。

上海交通大学赵力做了题为“Status and Plans of the PandaX Experiment at CJPL”的报告。

原子能院柳卫平研究员做了题为“我国地下核天体物理实验 JUNA 研究建议”的报告。

清华大学岳骞教授做了题为“中国锦屏地下实验室建设进展和开展的物理研究”的报告。

原子能院连钢副研究员做了题为“锦屏山地下核天体物理实验室初步规划”的报告。

中科院近物所何建军研究员做了题为“深地核天体物理”的报告。

2) 8 月 22 日参观锦屏山地下实验室

首先介绍一下锦屏山地下实验室的地理位置和建设背景。二滩水电开发有限

公司负责修建的锦屏二级水电站利用雅砻江大河湾天然落差,裁弯取直进行引水发电。该工程开挖了四条通水隧洞和一条排水隧道贯穿锦屏山,同时为了施工方便还开挖了两条长 17.5 公里的交通隧道,锦屏地下实验室就利用其中一条交通隧道侧向开凿而成。锦屏山最高峰海拔 4193 米,实验室位置岩层覆盖超过 2500 米(等效水深 7000 米)。二滩水电开发有限公司是国家授权的雅砻江水能开发的业主单位,公司十分支持利用锦屏二级水电站工程的便利条件开展深地实验室的建设工作。2009 年 5 月清华大学与二滩水电开发有限公司达成战略合作协议,共同开发锦屏地下实验室。2010 年实验室完成土建和装修工作,其主实验厅容积约 4000 m³(长 40 米,宽 6.5 米,高 6.5 米)。2010 年 12 月 12 日锦屏地下实验室正式挂牌启用,由清华大学与二滩水电开发有限公司组成的“中国锦屏极深地下实验室管理委员会”负责实验室的运行管理工作。

锦屏地下实验室位于四川省凉山彝族自治州西昌以西三县交界处,距离西昌 2.5 小时车程。参会代表参观了目前在锦屏地下实验室运行的两个暗物质探测实验项目:清华大学的 CDEX (China Darkmatter EXperiment) 项目和上海交通大学的 PandaX (Particle AND Astroparticle Xenon detector) 项目。

清华大学的 CDEX 项目用高纯锗晶体作为靶材料及探测单元,通过收集暗物质粒子在高纯锗晶体中引起核反冲所产生的电子-空穴对的电脉冲信号而鉴别暗物质粒子。高纯锗探测器的优势在于具有很好的能量分辨并且阈能可以降到很低,CDEX 项目探测目标是相对较轻质量的暗物质。目前 CDEX 正在运行,所使用探测单元为 1 公斤高纯锗晶体,其二期 10 公斤高纯锗晶体正在地面实验室进行测试。

上海交通大学的 PandaX 项目采用高纯度的氙作为靶材料,处于气液两相的

氙可以对暗物质引起核反冲所产生的光信号和电离信号同时探测,进而通过两个信号的符合去除本底。PandaX 项目探测目标是相对较重质量的暗物质。PandaX 项目处于调试阶段,目前使用 25 公斤高纯度氙,未来计划建立 300 公斤高纯氙的探测单元。

除了参观清华大学和上海交通大学的暗物质实验项目外,重点了解了锦屏地下实验室的基础建设工程。地下实验室基础建设的难度和重要性给大家留下了很深的印象。实验室支撑防护、防水处理、通风、水、电、通信等在地面实验室无需考虑的问题在地下都成为实验室建设的关键,甚至直接影响到实验测量的成败。而在进行这些基础建设的同时,还要保证不带来额外的本底。以通风为例,实验室处于长 17 公里隧道的中部,对各个方向的宇宙线都有很好的屏蔽效果,但是这也带来了通风的问题。目前实验室通风采用从隧道口使用大功率鼓风机常压状态下通过专门的管道向实验室送风的方法,未来的更大容积的实验室需采用高压送风并且需要更多的通风管道。

2) 8 月 23 日会议讨论

与会人员就锦屏山地下核天体物理实验室计划展开了充分的讨论。具体讨论内容总结如下:

I. 项目意义

大家首先充分肯定了开展地下核天体物理研究的重要意义。核天体物理中一些涉及到天体演化进程、元素丰度分布的重要反应,例如被誉为“核天体物理圣杯”的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应,在地面上穷尽各种实验技术依然无法将直接测量的能区推进到天体物理感兴趣的能量范围,必须进行地下实验的研究。国家天文台的同志也从天文学的角度强调了一些关键核反应对天体演化的重要影响。

II. 机遇与挑战

通过会议报告和实验室参观，大家确认了锦屏山实验室的三大优势：世界上最深（岩层覆盖 2500 米，等效水深 7000 米）；周围岩石环境本底极低；通过水平隧道进入便于施工。无疑我们有条件在锦屏山建设世界上条件最好的地下核天体物理实验室。二滩水电开发有限公司对于开展地下实验室科学研究给予了大力支持，承担了实验洞开凿、基础建设的大部分费用，如果我们独立选址进行深地实验室建设从财力、物力和人力的角度都是难以承受的。更为有利的是，对于实验室的支撑防护等基础建设工作，核工业集团公司已经先期支持了 300 万元。同时由于资金限制国外同类计划基本处于停滞状态，而目前唯一的地下核天体物理实验室 LUNA 升级计划亦进展缓慢。因此从实验室建设条件和未来可行的研究成果讲我们都遇到了难得的机遇。

而通过实验室的实地参考大家也充分体会到了地下实验室建设的难度和工作条件的艰苦，我们必需做好长期艰苦工作的准备。

III. 实验室建设规划

对报告中提出的三期建设方案（1.实验室基础建设；2.加速器、束流线、实验靶和探测器设计加工；3.设备进洞调试并开始实验测量）大家基本同意，在此基础上建议：

1. 将规划内容更加具体化，列出详细的可行方案。
2. 实验室建设可分阶段而行，目前的重点是完成基础建设工作，因为地下实验室特殊性，对于实验室支撑、防水、通风、水、电、通信等问题要仔细考虑，尤其是建设加速器涉及到高压问题，对实验室中的通风干燥和接地问题提出了更高的要求。

3. 先期可开展本底测量等小规模试验。进而逐步完善地下实验条件，包括对洞体的屏蔽和对探测器的屏蔽；掌握地下实验的规律，为今后的测量做好准备工作。

4. 针对地下实验的科学目标和实验特点，对加速器等关键设备要提出严格的技术指标，不能因为实验设备而限制了锦屏地下实验室优势的发挥。同时在加速器等大型实验设备的设计中，要充分考虑实验室的空间和开口大小，方便今后设备进洞和安装调试。

IV. 科学目标

在地下实验室建立 MV 量级加速器主要目标是恒星演化过程中氦燃烧阶段重要核反应的直接测量。其中包括核天体物理中最重要的核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应，以及 ^{12}C 、 ^{14}N ， ^{15}N ， ^{18}O 的 (α, γ) 反应的直接测量。其他还有 s 过程两个重要的中子源 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 、 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的直接测量；碳燃烧阶段关键反应 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 的直接测量；AGB 星和超新星爆发中 Ne、Na、Mg、Al 等元素合成的一系列 (p, α) 、 (p, γ) 反应的直接测量。

讨论中大家充分肯定了这些核反应的重要意义，建议对于每个反应的实验测量都要制定周密的实验方案，充分考虑实验中的能量精度、探测效率和计数率、本底水平等因素影响。理论工作者提出实验室的筹备过程中可以理论先行，通过分析计算定量确定各个反应对天体演化进程的影响，从而制定未来实验的优先顺序。

V. 项目实施方案

参会的管理人员从项目的管理的角度给出建议：项目实施过程中要做好人、财、

物的合理计划与分配。项目可分期进行，每一阶段都要有明确的计划与目标。

大家建议尽快成立关于地下核天体实验室的筹备会，负责实验室建设的前期工作。讨论中也提到了项目实施中要适时引入国际合作机制，在我方建设关键实验设备掌握全局主动的前提下，积极引入国际合作机制，以加快实验室建设进程并扩大国际影响。

科技部与基金委的领导首先表达了对实验工作者的钦佩，通过会议报告和实地参观，切身体会到了建立地下实验室和开展实验测量工作的艰辛。从项目申请的角度提出了以下建议：

1. 进一步凝练项目的科学目标，要有亮点。可参考大亚湾中微子科学项目。
2. 要规划好项目的远期和近期目标，制订具体的可行性方案。
3. 可从其他经费渠道获取先期支持，首先完成实验室的基础建设工作。后期的经费申请可参考南极望远镜项目。

根据大家的意见与建议，就建设锦屏山地下实验室的当前任务总结如下：

1. 成立锦屏地下核天体物理实验室筹备委员会负责实验室整体规划，定期召开研讨会讨论项目进展和明确下步工作分工。
2. 充分利用好核工业集团公司支持的 300 万资金，做好实验室基础建设工作。要根据加速器实验的特点做好各项基础设施建设的周密计划，同时与锦屏实验室保持密切联系协调工作进度。
3. 对计划开展的实验测量进行详细的理论分析和模拟计算，根据实验的重要性和难易程度确定实验的顺序，并在此基础上进一步凝练项目的科学目标，开始准备基金申请工作。

总结：

核天体物理是核物理与天体物理的交叉学科，应用核物理知识解释恒星中能量的产生和元素的合成及其对恒星结构和演化的影响。核天体物理一直处于物理学研究的前沿领域，目前已经有 16 项与核天体物理有关的诺贝尔物理学奖。发展到今天核天体物理中仍然有很多问题我们没有很好的理解。欧美国家长期以来一直把核天体物理作为最重要的基础研究课题之一，美国国家科学院设立的关于宇宙物理学的委员会在 2003 年总结了新世纪的 11 个重大科学问题，其中三个就与核天体物理密切相关：

(1)中微子的质量是多少，它们是如何影响宇宙的演化的？

(2)超高温度和密度下有什么新的物质状态？

(3)从铁到铀这些重元素是怎样制造出来的？

核天体物理中这些重要问题和一些关键核反应的直接测量是息息相关的，然而在天体物理感兴趣能区核反应截面非常之低，地面上进行的实验测量中效应完全湮灭在宇宙线的本底之下，只有依靠深地实验室对宇宙线很好的屏蔽才能完成此类实验测量工作。因此开展地下实验室测量对核天体物理具有重要的意义。

二滩水电开发有限公司在锦屏二级水电工程的施工中，对于建立深地实验室开展科学研究给予了大力支持，开创了商业项目和科学研究相结合的新模式。而且核工业集团公司已经先期投入了 300 万元用于支持锦屏地下核天体物理实验室的基础建设。锦屏山地下实验室不仅深度居世界之首而且周围岩石自身放射性本底极低，是目前世界上条件最好的深地实验室。锦屏实验室二期将新开凿超过 10 万立方米的实验洞，为核天体物理地下实验室提供了充足的空间。核天体物

理创新研究群体集中了国内核天体物理领域的优势力量 ,通过国内外合作研究已经开展了若干核天体物理关键反应的直接测量工作 ,尤其是直接参与了目前世界上唯一地下核天体物理实验室 LUNA 的升级计划 , 为开展地下实验研究积累了丰富的经验。综上 ,现在是建立锦屏山地下核天体物理实验室难得的机遇 ,可谓天时、地利、人和。

由于众所周知的经济问题 ,国际上其他地下实验室项目基本处于停滞状态 ,而目前世界上唯一地下实验室 LUNA 的升级计划亦进展缓慢。如果抓住机遇 ,我们有望建成世界上第一个拥有MV加速器的地下核天体物理实验室 ,加之锦屏山绝佳的地质条件 ,有望取得核天体物理领域具有突破性的原创性研究成果。