

· 学科进展与展望 ·

深地科学实验的发展现状及 我国发展战略的思考

陈和生*

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

[摘要] 深地科学实验涉及粒子物理、核物理、天体物理、生命科学、地球科学和深部岩体力学等多个学科的重大前沿领域。深部地下科学与工程实验室是进行这些研究的重要的基础设施和研究平台,并促进学科间的交叉和融合。深地实验室可提供许多精确实验要求的极低宇宙线本底环境和极低背景噪声环境,以及地下工程、深地资源开发等领域研究要求的高地应力、高地温、高渗透压等深地极端条件的环境。近年来国际上深地实验室的发展十分迅速,并不断向越来越深的地下发展。我国四川省的锦屏山隧道群具有得天独厚的地理优势,是建设大型深地科学与工程实验室的理想场所。我们应当抓住这一重大历史机遇,科学规划,分步实施,建设国家深地科学与工程实验室,并在条件成熟时向国际开放,争取实现我国深地科学与工程技术研究的一次飞跃。

[关键词] 深地科学,暗物质,粒子物理,地球物理,岩体力学,核天体物理,锦屏山

1 深部地下实验室是发展前沿科学实验研究的平台

40年前,美国物理学家 Frederick Reines 和核化学家 Raymond Davis Jr. 在美国 Homestake 1500 米深的废弃金矿井进行探测来自太阳的中微子地下实验,发现了太阳中微子缺失现象,实验持续了 30 年。日本物理学家小柴昌俊在神冈的深地实验发现了中微子震荡和超新星 1987A 发射的中微子。这两项成果获得了 2002 年诺贝尔物理学奖。至今,因地下实验在物理学与天体物理学领域共获得了 3 项诺贝尔奖,拓展了人们对宇宙的认识。深地实验的魅力在于其能够极大地屏蔽宇宙线造成的背景,提供极低本底的测量环境,有利于微弱信号的精确测量和研究,获得原创性的科研成果。

1.1 暗物质的直接探测及粒子物理其他前沿课题

暗物质的本质和暗物质的直接探测实验、中微子的质量和双 β 衰变实验、质子寿命与质子衰变等都是粒子物理前沿领域的重大研究课题,都需要深地低本底环境。

暗物质是构成宇宙的重要组成部分,1933 年瑞士天文学家 Fritz Zwicky 第一次提出了有暗物质存在的概念。70 多年来,天文学家通过许多方法确认了暗物质的存在。最新的研究成果表明,物理学至今所了解的物质只占宇宙总能量密度的 4%,而暗物质占了 23%,暗能量占了 73%。暗物质电中性,成团存在,不参与任何电磁相互作用。它们超出普通物质 6 倍的总质量产生的引力形成了当今宇宙可观测到的普通物质所构成的星系、星系团、超星系团的大尺度结构,因此,暗物质应该是与宇宙共生的。但是暗物质究竟是什么,怎样探测以得到证实,至今还不清楚,需要粒子物理学家来回答。因此,这一问题在国际上被称作是笼罩 21 世纪初现代物理学的两朵“乌云”之一,在美国国家研究委员会及多个科学组织多年的报告中列出的重大基础科学问题中都位列首位。

粒子物理学家认为,非重子暗物质可能是宇宙演化早期遗留下来的稳定的只参与弱相互作用的粒子,对于这些粒子的可能形态有众多的理论模型预言,预言的暗物质粒子也有多种。比较多的实验是寻找弱相互作用重质量粒子(WIMP)。探测方法分直接探测

* 中国科学院院士。

本文于 2010 年 1 月 15 日收到。

和间接探测两类,前者利用空间探测器测量暗物质粒子湮灭的产物,后者是在深地下测量暗物质粒子与探测器物质发生弹性碰撞后的反冲原子核。现在全世界有20多个实验组在进行直接探测研究,已经有数十年的历史,使用的探测器主体有闪烁晶体、高纯锗半导体探测器和液态惰性气体探测器等,探测器的规模用主探测器的重量表示。直接探测的主要困难在于暗物质粒子与物质发生相互作用的截面非常小,因而信号很弱,难于探测到,只有在十分“干净”的深地下,才有可能把其他可能产生信号的本底排除。以液态惰性气体探测器为例,当前在意大利 Gran Sasso 国家实验室(1400米深)正在运行百公斤量级的探测器,而探测灵敏度要提高两个数量级,探测器必须达到吨级,而且必须放到更深的地下。

近年来,我国科学家参加的两个国际合作实验ATIC(高空科学气球)和DAMA(深地),都发表了引起国际同行高度重视的结果,加速了国际暗物质探测的实验进程和理论研究。国际上还有许多实验组正处在从预先研究转向立项研制的阶段,对暗物质的研究正将掀起新一轮的高潮。

1.2 核天体物理与深地核作用截面测量

核天体物理是核物理与天体物理的交叉学科,应用核物理的知识和规律阐释恒星中核过程产生的能量及其对恒星结构和演化的影响,原子核反应截面的直接测量、原子核质量及衰变的精确测量等,是核天体物理研究的最前沿,包括研究和测量在新星、X射线暴及超新星等爆炸性天体环境下的核反应,或者在太阳、红巨星等静态天体环境下发生的核反应等。我国的科学工作者提出了未来在我国进行地下核天体物理实验研究的构想,科学目标主要针对与天体中氢、氦燃烧以及新星、超新星爆发等过程相关的一些关键核反应。

1.3 引力波探测

引力波是以波动形式和有限速度传播的引力场。按照广义相对论,加速运动的质量会产生引力波,但是由于引力波的探测十分困难,至今未能得到证实。引力波探测不仅可以验证爱因斯坦的广义相对论,而且可以为用引力波研究宇宙开辟新的途径。利用原子干涉仪测量引力甚至引力波可望获得比国际上现有基于激光干涉的测量(如LIGO等)更高的探测灵敏度。深部地下实验室可以为原子干涉精密引力测量提供独一无二的振动噪声隔离、均匀引力梯度场和恒定温度等优越环境。

1.4 深部地球物理研究

深部地球物理研究的科学前沿问题包括地球深

内部动力学过程的微弱信号观测、地震灾害的监测与防治的需求、地震机理和预测研究以及深部形变和背景噪声环境的监测等基础研究和应用基础方面的课题。地球物理观测很多都放到隧道中进行,因为那里干扰的背景噪声小,但2000多米深的隧道不常见,对于地球物理观测也是一个很新的课题,以前的研究主要靠地面观测,再采取反演的办法来得到结果。如果能在噪声背景极低的地下布设高精度观测仪器,则能够大大提高我们对于地球构造和演化的认识,研究意义重大。

1.5 深部岩体力学研究

深部强压缩岩体力学是科学前沿。强压缩会产生微裂纹、微缺陷,导致连续介质力学的解释不适用,需要引入新的变量,引进动力学效应,同时要调整数学框架。深部岩体力学研究中有四大需要突破的基础性关键问题,包括:深部岩体结构与地应力特征及其对灾害的控制作用,高应力开挖强卸荷作用下裂隙岩体和围岩力学行为的演化规律,深部重大工程灾害的孕育演化和灾变全过程的动力学机制,深部重大工程灾害孕育演化过程的时空预测和动态调控,等等。这些问题都具有重大工程应用价值。

2 建设深部地下实验室是解决深部工程与环境安全等关键难题的必要途径

深部地下工程、深部资源开采和环境安全、深部环境利用与保护都是我国未来20—50年经济建设的重要需求。近年来,我国为解决国民经济快速发展的需要,深部地下工程日益增多,例如,锦屏二级水电站深地隧道群,引水隧洞4条,直径13米,长16.67公里,最大主应力70兆帕;西线的南水北调工程,一期工程包括了244公里隧洞,最长的一条73公里,最大埋深1100米;类似于滇藏线、川藏线等具有世界级难度的铁路工程,隧道建设的年增长150公里。这些重大工程由于受地形条件限制,例如高山峡谷地区深埋500—3000米的大跨度、高边墙的大型地下洞室群和多洞室长距离并行的长大隧道等,在形式上表现为深部工程。此外,深部资源的开采与安全,随着浅部资源的日益减少,目前资源开采工程已逐渐由浅部转向深部,近年以沈阳采屯等为代表的—大批煤矿,其开采深度均超过1000米;在今后10—20年内金属矿山将进入1000—2000米深度开采;因此,深部资源开采中工程灾害的成灾机理及控制技术是深部资源开采所面临的极具挑战性的世界技术难题。

深部地下工程面临高地应力、高地温、高渗透

压、强烈工程扰动等极端条件(即“三高—扰动”),使深部工程建设面临极具挑战性的世界难题,既缺乏成熟的理论与方法,又无国际上的成功经验可借鉴。通过自主创新,建设深部地下实验室,开展多学科交叉研究,系统全面认识深部工程地质赋存环境与深部岩体的力学特征与行为,研究深部工程地质灾害的诱发因素与控制技术,从而建立领先世界的深地岩体力学理论与深部工程技术,是攻克这一世界难题的必要途径。

我国是一个地震灾害非常频繁的国家。地震预报的难处在于地震的应力积累和孕育过程都在地壳深处,特别是地下的形变和压力以及孔隙流体的信息,从地面很难进行监测。如果能够在深部地下实验室对深部岩石地震波、形变场和应力场进行连续、直接的观测,将能够提供断层和破裂带附近直接的能量积累的过程图像、断层滑移的特征与地震大小之间的关系,这对地震预测研究有极为重要的作用。建立深部地球物理实验室,可以布设大量的仪器,观测地下的震动情况,灵活性高,观测内容更加丰富和可靠。

3 国家深地科学与工程实验室建设的机遇与展望

3.1 国外发展现状

深部地下科学是诸多交叉前沿研究领域的一个重要组成部分。至今为止,世界上已有的 10 多个深地实验室中,多数都在数百到 1000 多米深。吸纳研究课题最多,规模最大的是位于意大利 Gran Sasso 的实验室,深度为 1400 米,总容积 18 万立方米,单个实验厅有 100 米长、20 米宽、18 米高(图 1)。比 Gran Sasso 更深的曾有两个单项实验,一个是前文提到的美国 Homestake(1500 米深)金矿的太阳中微子实验;另一个是在加拿大 Sudbury(2000 米深)的 SNO 太阳中微子实验。近年来,由于一些重大科学问题对测量环境的苛刻需求,越来越多的科学家转向深地下实验,追求原创性的科研成果。美国的深地科学与工程实验室(DUSEL)计划就是一个典型例证。DUSEL 计划恢复 Homestake 的地下实验室,并向 2225 米的深处建设更深的地下实验室。

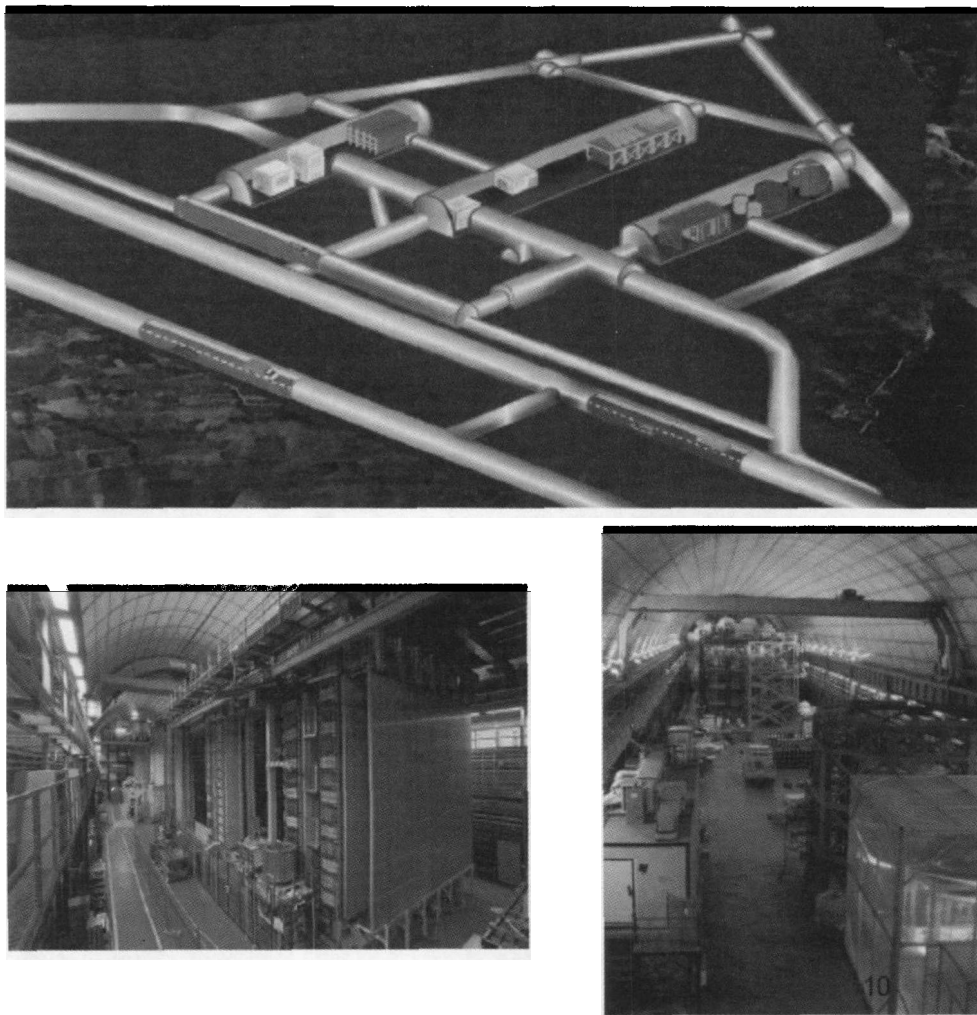


图 1 位于意大利 Gran Sasso 的深地国家实验室布局(上)及实验室大厅(左下,右下)

3.2 在锦屏山地区建设深部地下实验室的优势和可能的国际地位

20世纪80年代,中国科学院高能物理研究所的物理学家曾在北京郊区的煤矿井进行过双 β 衰变实验。我国的科学家曾参加过国际上多项地下实验,例如在Gran Sasso早年的LVD实验和DAMA暗物质实验,日本的超级神冈实验和KamLand实验等。但是,至今我国还没有自己的深地科学实验室。为了打造面向国家战略需求的基础科学与技术问题的综合性研究平台,急需建设我国自主的深地科学实验室。2004年,中国科学院提出的“建设国家深地科学和工程实验室”建议列入了国家中长期科技发展规划的基础研究部分。

四川省雅砻江锦屏二级水电工程的建设以及其特殊的地理条件,为建设我国首个深地科学实验室带来了历史契机。锦屏II水电工程将建设7条长约17公里、横穿锦屏山的长隧洞,最大埋深2525米。

其中2条辅助洞(作为交通和勘探试验洞)已经贯通,在辅助洞中间洞段埋深较大处可以通过开挖支洞建设深地科学实验室。初步研究表明,锦屏山辅助洞内岩石放射性本底极低,约2500米的岩石覆盖层,宇宙线的通量比著名的意大利Gran Sasso国家地下实验室低约100倍。计划中的美国的DUSEL深地实验室,要通过竖井或螺旋闲暇的隧道进入。锦屏山深地实验室不仅可提供世界上最大的埋深的实验室,而且通过水平隧道进入,大幅降低施工难度,运输方便,可直接运送大型设备,安全性高,有条件建成世界上最好的超低本底实验室,是开展暗物质探测等粒子物理实验的极佳场所(图2)。即将建成的锦屏II水电站,可为深地实验室建设提供优质的基础设施;水电站建设期间的地质状况调查和深地隧道建设所积累的经验,可以大大缩短实验室的建设周期,所有这些,将大幅度降低深地实验室的建设和运行费用。

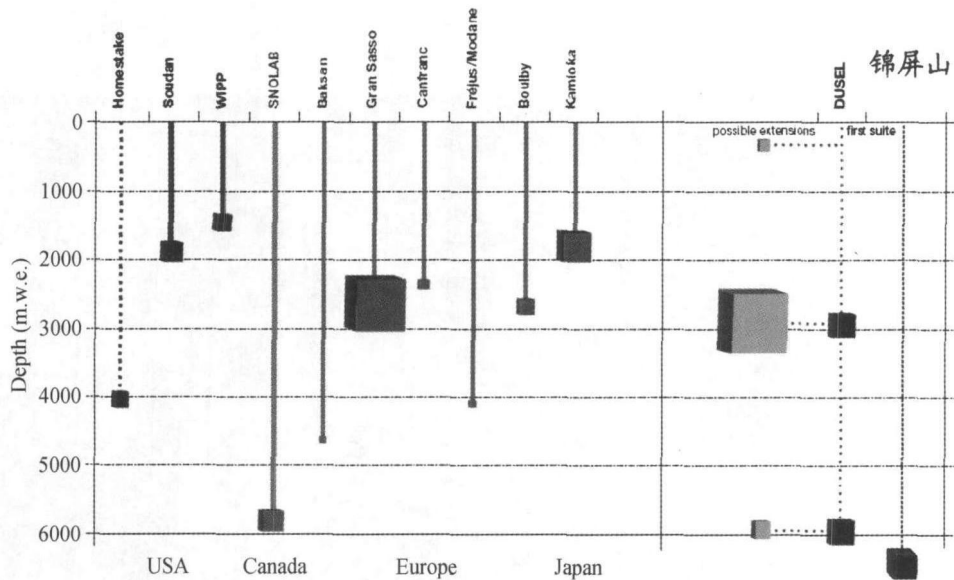


图2 国际上已建成的深地实验室的深度和规模

(摘自美国NSF报告*Deep Science Report*),其中,深度用等效水深(米)表示,图案的大小代表实验规模的大小,虚线代表DUSEL规划。我们标上锦屏山的深度,以作比较。

4 建设我国锦屏山深地科学与工程实验室的战略设想

锦屏山的“地利”优势,已经引起了国内外学术界的广泛关注。中国科学院(高能物理研究所、武汉岩土力学研究所、兰州近代物理研究所、武汉物理与数学研究所、测量与地球物理研究所等)、清华大学、上海交通大学等单位的需求日益迫切;二滩水电开发有限公司是国家授权进行雅砻江流域水能资源开发的业主单位,负责包括锦屏水电工程在内的流域梯

级水电站建设和运营管理,公司十分支持深地科学实验室计划,已经和清华大学合作准备先建一个可提供暗物质预先研究的小型实验室,并与武汉岩土力学研究所建设一个进行深地岩土力学研究的小型实验室。二滩水电开发有限公司积极支持在锦屏山隧道群建设国家深地科学与工程实验室的设想,并表示愿意成为深地国家实验室建设的合作组成员。

我国的深地科学和工程技术研究面临着前所未有的发展机遇和挑战。我们应当抓住机遇,多学科、多单位合作,欢迎国际合作,目标是把锦屏山深地实

实验室建设成为一个国家实验室,成为对国内外高度开放的国际一流的深地科学和工程技术多学科交叉研究平台。

实验室的建设将采取“科学规划,统筹安排,分步实施”的方针。一方面是各学科和项目需求,另一方面是实验室洞室和基本工作环境的建设,需要科学地规划深地实验室的近期、中期和远期的发展,统筹安排、分步实施。同时需要认真部署相关领域的实验,重要实验项目的形成要有地面实验和预先研

究的基础,努力在实验探测技术上有新的方法,有创新和发展,争取我国在深地实验研究方面实现跨越式的发展。

致谢 本文系作者在2009年10月25—26日第S-11次香山科学会议上的主题发言,并融入了与会专家的发言、讨论和建议,在此向与会专家,特别是马宇蓓研究员表示感谢。

DEEP UNDERGROUND SCIENCES IN CHINA: STATUS AND PROSPECTS

Chen Hesheng

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract Deep underground science experiments involve many important scientific issues in various fields, such as particle physics, nuclear physics, astrophysics, life sciences, earth sciences, deep rock mechanics and other disciplines. The deep underground science and engineering laboratories are important infrastructures and research platforms for the researches, and to promote the interdisciplinary studies. The facilities can provide special environment with the lowest noise, as well as the extremely low background produced by cosmic rays. In another aspect, the developing of the deeply construction and resource exploration require more and more research subjects to solve the problems on high stress, high temperature, high osmotic pressure, and so on, in deeply underground conditions. Therefore, in recent years, the deep underground sciences have developed very quickly in the international community. The scientists intend to go to deeper underground for their experiments. The tunnels at Jinping Mountain of Sichuan is an ideal site to build large-scale science and engineering laboratory with unique geographical advantage. We should seize this historic opportunity, planning scientifically, step by step to establish a national deep underground science and engineering laboratory, which will be open internationally, so as to promote the deep science and engineering research in China.

Key words deep underground sciences, dark matter search, particle physics, geophysics, rock mechanics, nuclear astrophysics, Jinping Mountain

· 资料 · 信息 ·

科技系统联席会议召开

2010年1月15日,科技系统联席会议在国家自然科学基金委员会召开。来自国家教育部、国家科技部、中国科协、中国科学院、中国工程院和国家自然科学基金委员会等部门的50余人出席了会议。

6个单位的领导简要介绍了各单位2009年的工作情况,以及2010年的工作计划。通过6位报告人的介绍,与会人员对过去一年各单位的工作情况有了进一步的了解,并结合本单位本部门的工作对

我国基础研究发展现状和所存在的突出问题进行了探讨,为共同推进中国的科学研究事业的发展建言献策。

本次会议的召开,为新的一年各单位之间紧密联系、相互配合,加强工作中的协作与支持打下了良好的基础。

(办公室 供稿)