

编者按 2010年12月12日,我国首个极深地下实验室——“中国锦屏地下实验室”投入使用,仪式在四川雅砻江锦屏水电站举行.该实验室的建成标志着我国已经具备自主开展暗物质等物理学重大基础前沿科学研究的平台.在这个世界最深的地下实验室中将有CDEX和PANDAX两个实验组进行暗物质直接探测实验.这也是我国目前仅有的自主开展暗物质直接探测的实验.

暗物质是什么?暗物质真的存在吗?证据在哪里?如何探测如此神秘的暗物质?为什么说暗物质的研究、暗物质的直接探测是当前粒子物理、天体物理、宇宙学等研究领域的重大前沿课题?为什么说是21世纪物理学发展中的几个关键难题之一?这些都是人们十分关心的问题.本专题特别邀请了这方面研究的专家从理论和实验的角度对这些问题做了深入浅出的解读,对我国锦屏地下实验室将要进行的两个直接探测实验做了具体的介绍.

国际地下实验室发展综述^{*}

程建平¹ 吴世勇² 岳 骞^{1,†} 申满斌²

(1 清华大学工程物理系 北京 100084)

(2 二滩水电开发有限责任公司 成都 610051)

摘 要 地下实验室是开展粒子物理学、天体物理学及宇宙学等领域一些重大基础性前沿课题的重要研究场所和良好的低本底环境,建设和发展地下实验室对于一个国家的基础科学研究具有重要科学意义.目前,国际上许多国家都已经建立起地下实验室,而中国一直没有很好的地下实验室,特别是极深地下实验室.2009年,清华大学与二滩水电开发有限责任公司开展战略合作,利用锦屏山隧道建立中国首个世界最深的地下实验室——中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL),并于2010年12月12日正式启用.中国锦屏地下实验室的建成,标志着中国已经具备开展物理学重大基础前沿科学研究的自主地下实验平台,对于推动我国相关领域的重大基础前沿课题的自主研究意义重大.文章对国际上一些重要地下实验室的情况进行了介绍,并对中国锦屏地下实验室的基本情况进行了介绍.

关键词 地下实验室,暗物质,本底,中国锦屏地下实验室,中国暗物质实验

A review of international underground laboratory developments

CHENG Jian-Ping¹ WU Shi-Yong² YUE Qian^{1,†} SHEN Man-Bin²

(1 Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Ertan Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract Underground laboratories are essential for various important physics areas such as the search for dark matter, double beta decay, neutrino oscillation, and proton decay. At the same time, they are also a very important location for studying rock mechanics, earth structure evolution, and ecology. It is essential for a nation's basic research capability to construct and develop underground laboratories. In the past, China had no high-quality underground laboratory, in particular no deep underground laboratory, so her scientists could not work independently in major fields such as the search for dark matter, but had to collaborate with foreign scientists and share the space of foreign underground laboratories. In 2009, Tsinghua university collaborated with the Ertan Hydropower Development Company to construct an extremely deep underground laboratory, the first in China and currently the deepest in the world, in the Jinping traffic tunnel which was built to develop hydropower from the Yalong River in Sichuan province. This laboratory is named the China Jinping Underground Laboratory (CJPL) and formally opened on December 12, 2010. It is now a major independent platform in China and can host various leading basic research projects. We present a brief

review of the development of various international underground laboratories, and especially describe CJPL in detail.

Keywords underground laboratory, dark matter, background, China Jinping Underground Laboratory (CJPL), China Darkmatter Experiment (CDEX)

1 引言

人类渴望了解自己身处其中的整个宇宙的本质特性. 这一人类“本能”推动了人类科学技术的不断发展, 特别是推动了粒子物理、天体物理、宇宙学等纯基础物理学的发展. 人类在认识物质世界和研究物质世界的过程中, 不断挑战自我极限, 扩展研究领域, 使得人类对于宇宙的认识逐步发展, 并分别从宇观和微观两个方面深入研究宇宙的构成. 在宇观方面, 人类从研究地球环境中的河流山川、花鸟树木、日月星辰开始, 逐步发展到研究太阳系、银河系、河外星系、其他星系及星系团, 以及更大尺度的遥远天体结构, 甚至整个宇宙. 在微观方面, 人类从研究身边的事物开始, 逐步发展到研究构成这些物体的基本单元, 从分子、原子、原子核, 再到更小尺度的夸克、轻子层次.

近百年来, 人类对于宇宙及其基本组成的认识和理解取得了巨大进展. 理论物理、高能加速器、计算机等科学与技术领域的发展使得人类可以“看到”更小的粒子、更细微的物质结构, 也可以观测大型天体结构的运动和相互作用, 甚至可以模拟整个宇宙的演化过程, 并且通过理论和实验的相互检验, 推动粒子物理、天体物理、宇宙学等领域的理论和实验两个方面不断深入发展.

人类在粒子物理实验研究方面建造的最重要的一类实验装置就是大型高能加速器. 通过高能加速器, 可以将粒子的能量提高到很高的水平, 然后让这些粒子发生碰撞来产生一些新的粒子, 或模拟宇宙演化早期的一些状态. 高能加速器诞生数十年来, 人类在物理学相关领域取得了大量的、极其重要的研究成果. 加速器物理研究已经变成了一个涉及粒子物理学等诸多学科的极其重要的领域.

粒子物理、天体物理、宇宙学等研究领域的另外一个重要发展方向就是非加速器领域. 人类通过一些非常有针对性的特殊环境和实验装置, 探测宇宙中存在的一些稀有粒子和现象, 从而来研究和探索粒子物理学、天体物理学和宇宙学等领域的一些基本而重要的问题. 地下实验室就是非加速器领域的一类重要粒子物理实验研究基地.

2 国际上地下实验室的建设概况

地下实验室是开展粒子物理学、天体物理学及宇宙学等领域的暗物质探测研究和双 β 衰变、中微子振荡、质子衰变等一些重大基础性前沿课题研究的重要实验场所和良好的低本底环境, 也是岩体力学、地球结构演化、生态学等学科开展相关实验研究的重要环境. 从过去几十年国际地下实验室的发展进程可以看出, 地下实验室, 特别是极深地下实验室的建设和发展可以为一个国家提供综合性的重大基础科学研究平台, 是一个国家关键性的重大基础科学研究设施. 因此建设和发展地下实验室对于一个国家的基础科学研究具有重要科学意义.

目前, 国际上正在运行的地下实验室有数十个, 容积从几百立方米到十几万立方米, 垂直岩石覆盖厚度从几百米到两千多米, 各不相同. 在这些实验室中开展了暗物质、双 β 衰变、中微子等各种类型的低本底粒子物理实验, 也开展了岩土力学、地球科学、引力波实验等多学科的实验研究. 很多地下实验室还建立了超低放射性本底测量平台, 为一些低本底实验和其他实验测量提供了技术支持.

国际上一些代表性的地下实验室包括美国的位于明尼苏达州的苏丹 (Soudan)、位于南达科塔州的杜赛尔 (DUSEL)^[1], 加拿大的斯诺 (SNO)^[2], 日本的神冈 (Kamioka)^[3], 韩国的襄阳 (Y2L)^[4], 意大利的格兰萨索 (Gran Sasso)^[5], 法国的摩丹 (Modane)^[6], 英国的伯毕 (Boulby)^[7], 西班牙的坎弗兰克 (Canfranc)^[8] 和俄罗斯的伯克山 (Baksan)^[9] 地下实验室等. 印度也在建设一个垂直岩石覆盖厚度达 1400m 的地下实验室.

目前, 意大利格兰萨索 (Gran Sasso) 地下实验室是正在运行的地下实验空间最大的地下实验室, 其容积达到约 180000m³, 垂直岩石覆盖达 1400m, 位于意大利东北部的亚平宁山脉的一条长达约 10km 交通隧道的中部. 其主要实验空间包括长、

* 国家自然科学基金 (批准号: 10935005, 11055002) 资助项目
2010-11-30 收到

† 通讯联系人. Email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn

宽、高分别约为 100m、20m、20m 的 3 个实验大厅和一些连接隧道. 图 1 和图 2 分别是格兰萨索地下实验室的空间分布图和实验大厅内部照片. 意大利格兰萨索地下实验室中开展了数十个包括暗物质、双 β 衰变、中微子实验、引力波实验、地质力学实验等不同类型的科学研究实验项目, 取得了一系列非常重要的实验成果, 并且建设了国际上最好的超低本底放射性核素测量平台, 其本底计数率可以达到几十个微贝克的超低水平, 为暗物质、双 β 衰变、中微子等实验提供超纯材料选择、本底分析等服务.

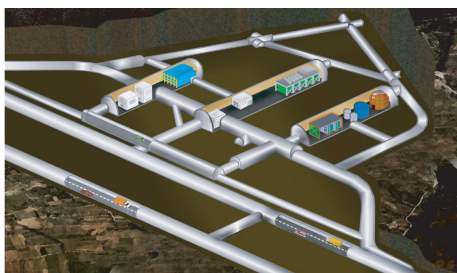


图 1 意大利格兰萨索地下实验室空间分布图



图 2 意大利格兰萨索地下实验室的一个实验大厅内部照片

加拿大的斯诺(SNO)地下实验室是 2010 年前世界上正在运行的岩石覆盖最深的地下实验室, 位于一个废弃的地下矿井中, 其垂直岩石覆盖厚度达到约 2000m, 实验室容积约为 30000m³. 图 3 是斯诺地下实验室的空间分布图. 在斯诺实验室中开展了多项粒子物理实验研究, 其中最著名的就是利用数万吨重水来观测大气和太阳中微子的振荡实验, 其实验结果证实了中微子振荡的存在.

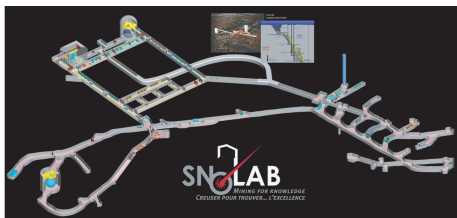


图 3 加拿大斯诺地下实验室的实验空间分布图(图片来自 <http://www.snolab.ca>)

日本神岗(Kamioka)地下实验室位于日本神岗附近的一个矿井中, 其垂直岩石覆盖厚度达到约

1000m, 容积超过 50000m³. 该实验室最著名的实验结果是来自太阳和大气中微子实验. 该实验项目利用约 50000 吨的水作为探测器, 测量到了太阳中微子的振荡现象. 由于这一项实验结果, 日本科学家小柴昌俊获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖.

法国摩丹(Modane)地下实验室建设在法国里昂附近的一个交通隧道中, 其垂直岩石覆盖厚度约为 1700m, 实验室容积约为 3500m³. 图 4 是摩丹地下实验室空间布局示意图. 目前在摩丹地下实验室中开展了暗物质和双 β 实验研究工作, 并建立了非常灵敏的超低本底测量平台, 为暗物质实验和世界其他低本底测量需求提供测量服务. 摩丹地下实验室开展的最大的实验是双 β 衰变实验 NEMO, 利用 ¹⁰⁰Mo 来测量中微子的质量分布.

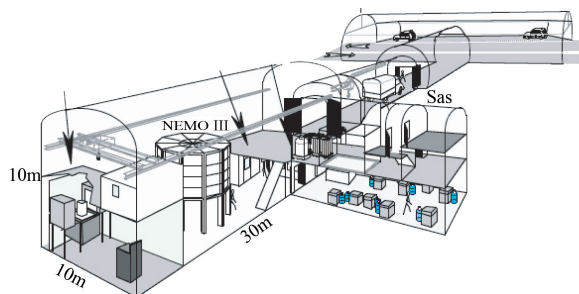


图 4 法国摩丹地下实验室空间布局示意图

英国的伯毕(Boulby)地下实验室位于英国东北部的伯毕矿井中, 其垂直岩石覆盖厚度达 1100m, 实验空间约为 5000m³. 图 5 是伯毕地下实验室空间分布示意图. 在伯毕地下实验室中, 开展了利用液气二相氙直接探测暗物质的实验项目 ZEPLIN, 以及利用时间投影室开展具有暗物质粒子方向测量能力的 Drift 实验项目.

美国苏丹(Soudan)地下实验室位于其北部地区明尼苏达州的一个地下矿井中, 其岩石覆盖厚度约为 600m, 目前开展了利用低温高纯锗和硅探测器直接探测暗物质的实验 CDMS. 由于美国目前还没有深度超过 2km 的极深地下实验室, 为了提高其在重大基础科学前沿的竞争力, 美国在 2008 年决定耗巨资扩建原来位于南达科塔州侯姆斯特克(Homestake)矿井中的地下实验室, 并在其中进一步建设一个深达 2.3km 的新的极深地下实验室——杜赛尔(DUSEL)地下实验室, 准备将杜赛尔地下实验室建成一个可以开展粒子物理、天体物理、工程力学实验和生态学实验的综合性国家级地下科学和工程实验室. 该地下实验室是在 20 世纪 50 年代美国科学家雷蒙德·戴维斯等人开展中微子实验的已经

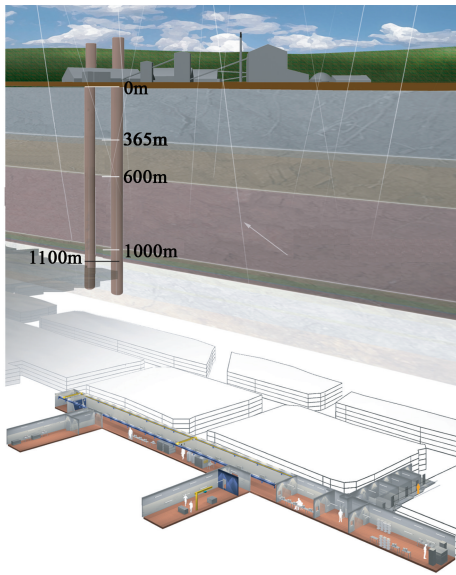


图5 英国伯毕地下实验室空间分布示意图

废弃的旧地下实验室的基础上重新建设的。20世纪50年代,雷蒙德·戴维斯等人在候姆斯特克(Homestake)矿井中利用重量约600吨的 C_2Cl_4 液体作为探测器开展太阳中微子实验研究,证明了中微子的存在,并测量到了太阳中微子。雷蒙德·戴维斯凭借这项研究结果于2002年获得了诺贝尔物理学奖。

按照美国杜赛尔(DUSEL)地下实验室的建设规划(见图6),该地下实验室首期将建设一个岩石覆盖厚度为1500m的地下实验室,并开展实验工作。未来将不断建设,最终将建设一个深度为2300m的地下实验室,开展粒子物理和天体物理方面的研究。美国杜赛尔地下实验室的全部建设工作将于2018年完成。

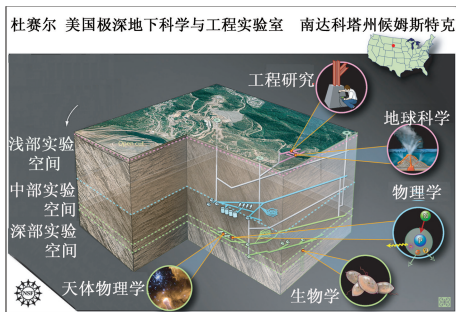


图6 美国杜赛尔地下实验室的未来发展规划图

韩国襄阳(Y2L)地下实验室建设在一个抽水蓄能电站的地下厂房附近的隧道中,其垂直岩石覆盖厚度约为700m,实验室空间约为 $1000m^3$ 。图7为襄阳地下实验室空间位置图。中国清华大学暗物质实验组从2000年开始参加韩国地下实验室的建设、重要参数测量和暗物质实验研究工作。目前韩国开展了碘化

铯晶体直接探测暗物质的实验和钨酸钙晶体测量 $\alpha\beta$ 衰变的实验。清华大学领导的低能量阈高纯锗探测器直接探测暗物质的实验项目从2005年开始正式在该实验室开展实验工作,为我国暗物质实验技术的探索 and 实验人才的培养提供了很好的基础。



图7 韩国襄阳地下实验室空间位置图

表1列出了上述地下实验室岩石覆盖厚度和环境条件的比较情况。

在2010年以前,我国还没有很好的地下实验室,特别是极深地下实验室。因此很多领域的研究课题无法开展,或只能与国外有条件的实验室联合开展研究工作。天体物理与宇宙学方面的类似情况尤为突出。例如,清华大学的科研人员参加了在日本神冈地下实验室进行的太阳中微子研究工作,取得了很好的研究结果;中国科学院高能物理研究所的科研人员参加了意大利格兰萨索地下实验室开展的暗物质探测实验。需要特别提到的是,在国家自然科学基金重大国际合作项目经费支持下,清华大学与韩国首尔大学合作,在韩国襄阳地下实验室开展了暗物质探测实验,并取得了很好的实验结果,2007年对暗物质粒子与核的自旋相关相互作用截面的测量达到了世界最好水平。

表1 国际上主要地下实验室岩石覆盖厚度和环境条件比较

实验室名称	国家	岩石覆盖厚度/km	环境条件
苏丹(Soudan)	美国	0.6	矿井
襄阳(Y2L)	韩国	0.7	隧道
神冈(Kamioka)	日本	1.0	矿井
伯毕(Boulby)	英国	1.1	矿井
格兰萨索(Gran Sasso)	意大利	1.4	隧道
杜赛尔(DUSEL)一期	美国	1.5	矿井
杜赛尔(DUSEL)二期		2.3	
摩丹(Modane)	法国	1.7	隧道
斯诺(SNO)	加拿大	2.0	矿井
中国锦屏地下实验室(CJPL)	中国	2.4	隧道

3 中国锦屏地下实验室的建设

我国二滩水电开发有限责任公司为了开发水能资源而在四川省凉山州锦屏山建设的锦屏隧道群,为我国建设一个极深地下实验室提供了很好的机会^[10].锦屏山位于成都市西南方向,距离成都市约500km,位于西昌市西北方向,距离西昌市约100km,是四川省西部雅砻江流域的一座大山,其顶峰海拔为4193m.雅砻江全长1571km,天然落差达3830m,水量充沛,水能资源蕴藏丰富.雅砻江总体流向为从北向南流,但在四川省凉山州境内,被巨大的锦屏山阻挡,水流改变方向,最终形成了长达150km的雅砻江锦屏大河湾.图8是雅砻江流域及锦屏隧道位置示意图.中国二滩水电开发有限责任公司承担全流域开发雅砻江水能资源的任务,拟在锦屏山两侧各建一个水电站,并开挖长达约17.5km的锦屏引水隧道,利用上下游高达300m的水位落差发电.为了配合水电站建设,二滩水电开发有限责任公司率先修建了两条交通隧道用来运输工程物资.2008年,二滩水电开发有限责任公司在锦屏山建设的两条交通隧道成功贯通.锦屏交通隧道全长17.5km,岩石覆盖厚度大于1.5km的部分超过70%,其中垂直岩石覆盖最厚的洞段岩层厚度达2.4km,是国际上岩石覆盖最厚的地下隧道,也是非常理想的极深地下实验室建设场所.锦屏隧道的建成,为我国地下实验室的建设提供了很好的条件.该实验地点可以开车直达,比在矿井中开展地下实验室工作更为便捷,而且锦屏隧道周围配套工作生活设施完善,是国际上综合条件最好的极深地下实验场所.图9给出了锦屏山、雅砻江和中国锦屏地下实验室示意图.图10是锦屏山剖面图及中国锦屏地下实验室位置示意图.

2009年,清华大学与二滩水电开发有限责任公司开始在锦屏交通隧道中部联合建设我国第一个极深地下实验室——中国锦屏地下实验室(China Jin-Ping Underground Laboratory, CJPL)^[11-13].中国锦屏地下实验室空间容积约为4000m³,包括地下实验室入口隧道、连接隧道和主实验厅3部分,其中主实验厅长40m,宽6.5m,高7.5m.图11是锦屏地下实验室平面规划图.地下实验室建设地点的地质构造和岩石取样分析结果表明,中国锦屏地下实验室周围岩石整体由大理岩构成,其天然放射性杂质含量非常低.一些主要岩石放射性核素含量低于北

京地表正常环境水平的约几十分之一到几百分之一,是一个非常好的天然低本底环境.表2列出了锦屏地下实验室周围岩石放射性杂质含量与北京地表正常环境的比较情况.



图8 雅砻江流域及锦屏隧道位置示意图

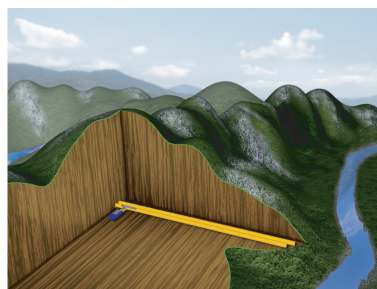


图9 锦屏山、雅砻江和中国锦屏地下实验室示意图

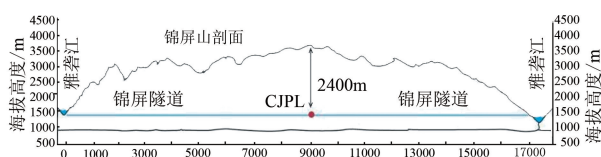


图10 锦屏山剖面图及中国锦屏地下实验室位置示意图

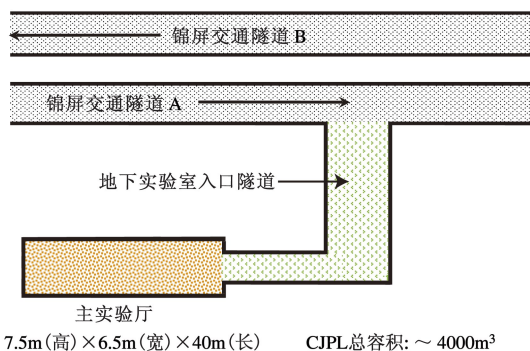


图11 中国锦屏地下实验室平面规划图

表2 中国锦屏地下实验室周围岩石放射性杂质含量测量结果及与北京地表正常环境的比较(表中放射性核素含量是以括号中的能量

值为标准测量得到的. 单位: Bq/kg)

	钾-40 (1.46MeV)	镭-226 (609keV)	钍-232 (911keV)
开挖处岩石样品	< 1.1	1.8±0.2	< 0.27
北京地表正常环境水平	600	25	50

地下实验室主要是用来屏蔽高能宇宙线对于暗物质、双β衰变以及中微子实验的本底影响. 评价一个地下实验室性能的最重要的参数就是宇宙线通量水平. 现在中国锦屏地下实验室已经开始了包括宇宙线通量、中子本底、伽马本底、氡含量等一系列实验室参数的测量工作. 这些实验室参数的测量需要较长时间, 个别参数甚至需要数年时间才能完成测量工作. 根据初步模拟和测量, 中国锦屏地下实验室的宇宙线通量约为每年每平方米小于 100 个宇宙线的水平. 精确的宇宙线通量数据还需要长时间的实验测量. 图 12 是世界上主要地下实验室的宇宙线通量水平的比较.

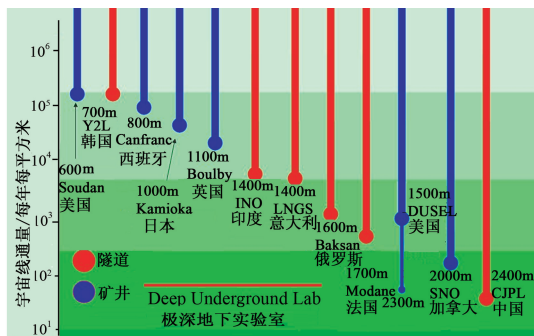


图 12 世界上主要地下实验室的宇宙线通量水平和垂直岩石覆盖厚度的比较

2010 年 1 月, 中国锦屏地下实验室的岩石挖掘工作全部完成. 2010 年 6 月, 中国锦屏地下实验室的配套工程建设完成, 并顺利通过了评审和验收, 标志着我国首个、国际上垂直岩石覆盖最深的极深地下实验室正式建成. 2010 年 7 月, 中国锦屏地下实验室内第一个暗物质实验项目——中国暗物质实验 (China Darkmatter Experiment, CDEX)^[14] 正式开始了其暗物质实验屏蔽体的建设工作, 并于 2010 年 9 月完成屏蔽体建设工作. 2010 年 12 月 12 日, 中国锦屏地下实验室正式投入使用. CDEX 项目组率先利用中国锦屏地下实验室开始了其基于点接触技术的, 极低能量阈高纯锗探测器直接探测暗物质实验项目的, 探测器系统安装和调试.

4 结束语

建设地下实验室, 特别是深度超过 2000m 以上的极深地下实验室, 对于一个国家粒子物理学、宇宙学、天体物理学等方面的重大基础性前沿研究课题的开展具有重要意义, 同时也可以为岩体力学、地球结构演化、生态学等方面的研究提供很好的研究环境. 地下实验室作为低宇宙线强度、低辐射本底的特殊环境, 还可以建设超低本底放射性核素活度的测量平台, 为一个国家的核辐射防护、国土海洋放射性水平普查、超纯材料研制等方面的应用提供基础性测试平台.

清华大学和二滩水电开发有限责任公司联合在锦屏山隧道建立的中国锦屏地下实验室, 用一年左右的时间, 不仅能为我国开展暗物质、双β衰变等低本底实验提供良好的场所, 还可以开展极深地下岩土力学、地质构造等方面的实验研究. 应该说, 目前的中国锦屏地下实验室的实验室规模相对较小, 但利用该实验室开展前期研究, 进行宇宙线通量、环境本底、地质结构等方面的深入研究, 可以为我国未来在锦屏隧道这一独特环境建设国家级的大型极深地下实验室奠定坚实的工作基础.

参考文献

- [1] 美国杜赛尔实验室网站: <http://www.dusel.org>
- [2] 加拿大斯诺实验室网站: <http://www.sno.phy.queensu.ca>
- [3] 日本神冈实验室网站: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index-e.html>
- [4] 韩国襄阳实验室网站 dmrc.snu.ac.kr
- [5] 意大利格兰萨索实验室网站 www.lngs.infn.it
- [6] 法国摩丹实验室网站 www-lsm.in2p3.fr
- [7] 英国伯毕实验室网站 www.hep.shef.ac.uk/research/dm/boulby/info.php
- [8] 西班牙坎弗兰克实验室网站 www.lsc-canfranc.es
- [9] 俄罗斯伯克山实验室网站 www.inr.troitsk.ru/eng/ebno.html
- [10] 二滩水电开发有限责任公司网站 <http://www.ehdc.com.cn/>
- [11] Kang K J, Cheng J P, Chen Y H *et al.* Journal of Physics: Conference Series, 2010, 203 :012028
- [12] Normile Dennis. Science, 2009(5), 324:1246
- [13] Feder Toni. Physics Today, 2010, 63(9): 25
- [14] Li L, Yue Q, Tang C J *et al.* Monte Carlo study for shielding of backgrounds induced by radionuclides for CDEX. Accepted by CPC(HEP & NP)