

新视界 新使命



高海拔宇宙线观测站
发现首批“拍电子伏加速器”和最高能量光子
开启“超高能伽马天文学”时代

高海拔宇宙线观测站 发现首批“拍电子伏加速器”和最高能量光子 开启“超高能伽马天文学”时代

国家重大科技基础设施“高海拔宇宙线观测站(LHAASO)”在银河系内发现大量超高能宇宙加速器,并记录到最高1.4拍电子伏伽马光子(拍=千万亿),这是人类观测到的最高能量光子,改变了人类对银河系的传统认知,开启了“超高能伽马天文学”的时代。这些发现将于2021年5月17日发表在《Nature》(《自然》)。该研究工作由中国科学院高能物理研究所牵头的LHAASO国际合作组完成。

高海拔宇宙线观测站尚在建设中,这次报道的成果是基于已经建成的1/2规模探测装置,在2020年内11个月的观测结果。科学家们发现了能量超过拍电子伏的光子,来自天鹅座内非常活跃的恒星形成区。还发现了12个稳定伽马射线源,能量一直延伸到1拍电子伏附近,这是位于LHAASO视场内银河系内最明亮的一批伽马射线源,测到的伽马光子信号高于周围背景7倍标准偏差以上,源的位置测量精度优于 0.3° 。这次观测积累的数据还很有限,但所有能被LHAASO观测到的源,它们都具有0.1拍电子伏以上的伽马辐射,也叫“超高能伽马辐射”。这表明银河系内遍布拍电子伏加速器,而人类在地球上建造的最大加速器(欧洲核子研究中心的LHC)只能将粒子加速到0.01拍电子伏。银河系内的宇宙线加速器存在能量极限是个“常识”,过去预言的极限就在0.1拍电子伏附近,从而预言的伽马射线能谱在0.1拍电子伏以上有“截断”现象。LHAASO的发现完全突破了这个“极限”,大多数源没有截断。这些发现开启了“超高能伽马天文”观测新时代,表明以天鹅座恒星形成区、蟹状星云等为代表的高能辐射天体,即年轻的大质量星团、超新星遗迹、脉冲星风云等是银河系超高能宇宙线起源的最佳候选天体,有助于破解宇宙线起源这个“世纪之谜”。科学家们也需要重新认识银河系高能粒子的产生、传播机制,探索极端天体现象及其相关的物理过程并在极端条件下检验基本物理规律。

高海拔宇宙线观测站及其核心科学目标

高海拔宇宙线观测站(LHAASO)是以宇宙线观测研究为核心的国家重大科技基础设施,位于四川省稻城县海拔4410米的海子山,建设由5195个电磁粒子探测器和1188个缪子探测器组成的一平方公里地面簇射粒子阵列(简称KM2A)、78000平方米水切伦科夫探测器、18台广角切伦科夫望远镜交错排布组成的复合阵列,采用四种探测技术全方位、多变量测量宇宙线,占地面积约1.36平方公里。

高海拔宇宙线观测站的核心科学目标就是探索高能宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和暗物质的研究。广泛搜索宇宙中尤其是银河系内部的伽马射线源,精确测量它们从低于1TeV(1万亿电子伏,也叫“太电子伏”)到超过1PeV(1000万亿电子伏,也叫“拍电子伏”)宽广能量范围内的能谱,测量更高能量的弥散宇宙线的成分与能谱,揭示宇宙线产生、加速和传播的规律,探索新物理前沿。

工程技术创新

LHAASO开发了1) 远距时钟同步技术, 确保整个阵列的每个探测器同步精度可达亚纳秒水平, 在高速前端信号数字化、高速数据传输、大型计算集群协助下实现了2) 多种触发模式并行等尖端技术要求, 首次大规模使用3) 硅光电管、4) 超大光敏面积微通道板光电倍增管等先进探测技术, 大大提高伽马射线测量的空间分辨率, 实现更低的探测阈能, 使人类在探索更深的宇宙、更高能量的射线等方面, 都达到前所未有的水平, 为开展大气、环境、空间天气等前沿科学交叉研究提供了重要实验平台, 是多边国际合作共同开展高水平研究的科学基地。

中国的宇宙线研究发展历程

中国的宇宙线实验研究经历了三个阶段, 目前正在建的 LHAASO 是第三代高山宇宙线实验室。高山实验是宇宙线观测研究中能够充分利用大气作为探测介质、在地面进行观测的手段, 探测器规模可远大于大气层外的天基探测器。对于超高能量的宇宙线, 这是唯一的观测手段。1954 年, 中国第一个高山宇宙线实验室在海拔 3180 米的云南东川落雪山建成。1989 年, 在海拔 4300 米的西藏羊八井启动了中日合作的宇宙线实验, 于 2000 年启动中意 ARGO 实验。2009 年, 北京香山科学会议上, 曹臻研究员提出了在高海拔地区建设大型复合探测阵列“高海拔宇宙线观测站”的完整构想。LHAASO 的主体工程于 2017 年开始建设, 2019 年 4 月完成 1/4 的规模建设并投入科学运行, 边建设、边运行。2020 年 1 月完成了 1/2 规模的建设并投入运行, 同年 12 月完成 3/4 规模并投入运行。2021 年全部建成。成为国际领先的超高能伽马探测装置, 长期运行, 从多个方面展开宇宙线起源的探索性研究。

拍电子伏宇宙加速器和PeV光子

“拍电子伏宇宙加速器 (PeVatron)”周围产生的“超高能伽马光子”信号非常弱, 即便是被称为“伽马天文标准烛光”的蟹状星云发射出来的能量超过 1 PeV 的光子在一年内落在 1 平方公里的面积上也就 1 到 2 个, 而这 1 到 2 个光子还被淹没在几万个通常的宇宙线事例之中。LHAASO 的平方公里探测阵列内的 1188 个缪子探测器专门用于挑选光子信号, 使之成为全球最灵敏的超高能伽马射线探测器。借助这前所未有的灵敏度, 1/2 规模的 KM2A 仅用了 11 个月就探测到来自蟹状星云约 1 PeV 的伽马光子。不仅如此, KM2A 还在银河系内发现了 12 个类似的源, 他们都具有超高能光子辐射, 并且都稳定地延伸到 PeV 附近, 甚至还探测到迄今人类从未见过的 1.4 PeV 的最高能量伽马光子。由此可见, LHAASO 此次科学成果发现在宇宙线起源的研究进程上具有里程碑意义, 具体来说有以下三个方面的科学突破:

◆ 1) 揭示了银河系内普遍存在能够将粒子能量加速超过 1 PeV 的宇宙加速器。在这次观测中, LHAASO 所能够有效观测到的伽马射线源中 (统计观测中通常要求 5 倍标准偏差的超出视为有效观测), 几乎所有的天体都具有辐射能谱在 0.1 PeV 以上的超高能区, 说明辐射这些伽马射线的父辈粒子能量确定超过 1 PeV。观测到的伽马射线能谱在 0.1 PeV 以上没有截断, 确定了银河系宇宙线加速源不存在 PeV 以下的加速极限。

这突破了当前流行的理论模型。理论认为拍电子伏特 (PeV) 能量的宇宙线在加速源区与周围气体作用下可以产生 0.1 PeV 的伽马射线, 探测超过 0.1 PeV 的伽马射线是寻找和认证 PeV 宇宙线源的重要手段, 而之前国际上主流探测器工作在 0.1 PeV 能量以下, 无法确认 PeV 宇宙线加速源的存在。LHAASO 发现了银河系内大量存在的 PeV 宇宙加速源, 它们都是超高能宇宙线源的候选者, 这就向着解决宇宙线起源这一科学难题迈出了至关重要的一步。

◆ 2) 开启“超高能伽马天文学”新时代。1989年，亚利桑那州惠普尔天文台的实验组成功发现了首个具有0.1 TeV以上伽马辐射的天体，标志着“甚高能”伽马射线天文学时代的开启，在随后的30年里，已经发现超过两百多个“甚高能”伽马射线源。直到2019年人类才探测到首个具有“超高能”伽马射线辐射的天体。出人意料的是，仅基于1/2规模的LHAASO在不到1年的观测数据，就将“超高能”伽马射线源数量提升到了12个。

随着LHAASO的建成和持续不断的数据积累，可以预见这一探索极端宇宙天体物理现象的最高能量天文学研究将给我们展现一个充满新奇现象的未知“超高能宇宙”。我们知道，由于宇宙大爆炸产生的背景辐射无所不在，它们会吸收高于1 PeV的伽马射线，超出了银河系的范围，即使它们在那里产生出来，我们也接受不到，由此可见这个观测窗口的特殊意义。

◆ 3) 能量超过1 PeV的伽马射线光子首现天鹅座区域和蟹状星云。PeV光子的探测是伽马天文学的一座里程碑，承载着伽马天文界的梦想，长期以来一直是伽马天文发展的强大驱动力。事实上，上个世纪80年代伽马天文学爆发式发展一个重要的诱因就是挑战PeV光子极限。天鹅座恒星形成区是银河系在北天区最亮区域，拥有多个具有大量大质量恒星的星团，大质量恒星的寿命只有百万年的量级，因此星团内部充满大量恒星生死死的剧烈活动，具有复杂的强激波环境，是理想的宇宙线加速场所，被称为“粒子天体物理实验室”。

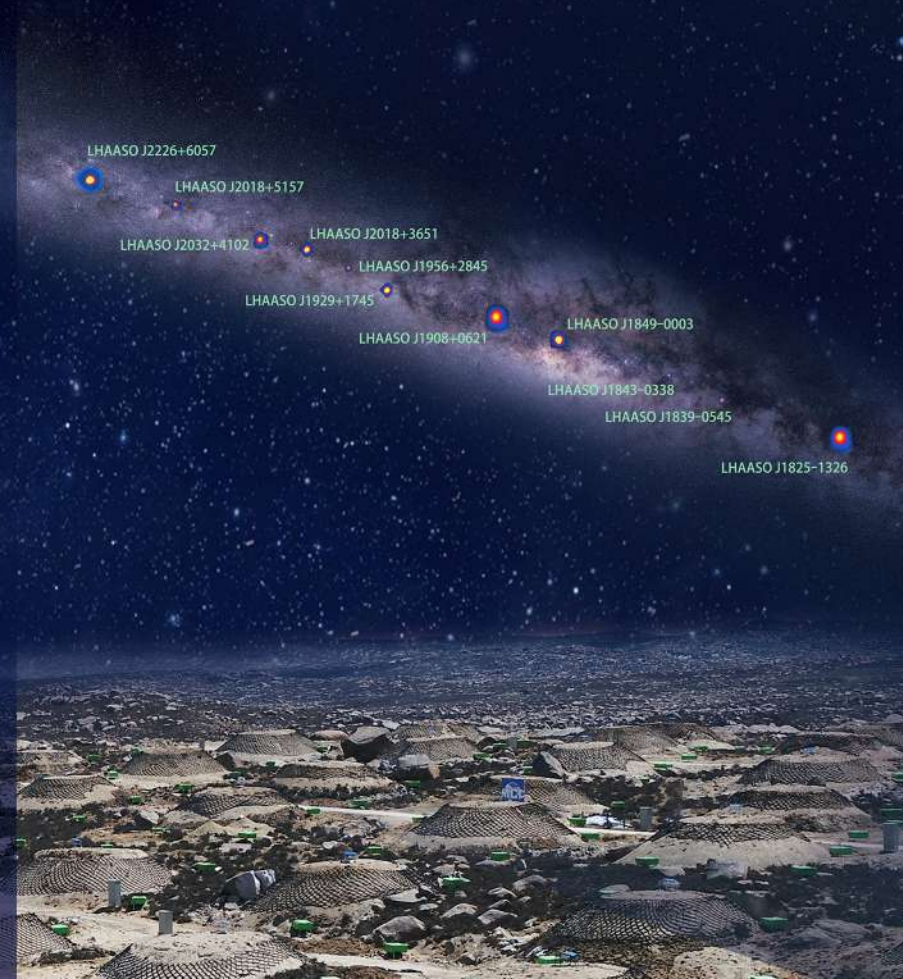
LHAASO在天鹅座恒星形成区首次发现PeV伽马光子，使得这个本来就备受关注的区域成为超高能宇宙线源的最佳候选者，也就自然是LHAASO以及相关的多波段观测、乃至多信使天文学的巨大热门，有望成为解开“世纪之谜”的突破口。

历史上对蟹状星云大量的观测研究，使之成为几乎唯一具有清楚辐射机制的标准伽马射线源，跨越22个量级的光谱精确测量清楚地表明其电子加速器的标志性特征，然而，LHAASO测到的超高能光谱，特别是PeV能量的光子，严重挑战了这个高能天体物理的“标准模型”，甚至于对更加基本的电子加速理论提出了挑战。

LHAASO揭示了银河系普遍存在千万亿电子伏特的宇宙加速器

理论认为拍电子伏特 (PeV) 能量的宇宙线在加速源区与周围气体作用可以产生0.1 PeV的伽马射线，探测超过0.1 PeV的伽马射线是寻找和认证PeV宇宙线源的重要手段，而之前国际上主流探测器工作在0.1 PeV能量以下，无法确证PeV宇宙线加速源的存在。

LHAASO对视场内最明亮的一批伽马射线源，几乎都观测到了0.1 PeV以上的超高能伽马射线辐射，能量接近1 PeV未见明显截断，表明银河系内遍布PeV加速器，它们都是超高能宇宙线源的候选者，这就向着解决宇宙线起源这一科学难题迈出了至关重要的一步。



人类首次在天鹅座区域发现能量超过千万亿电子伏特的伽马光子



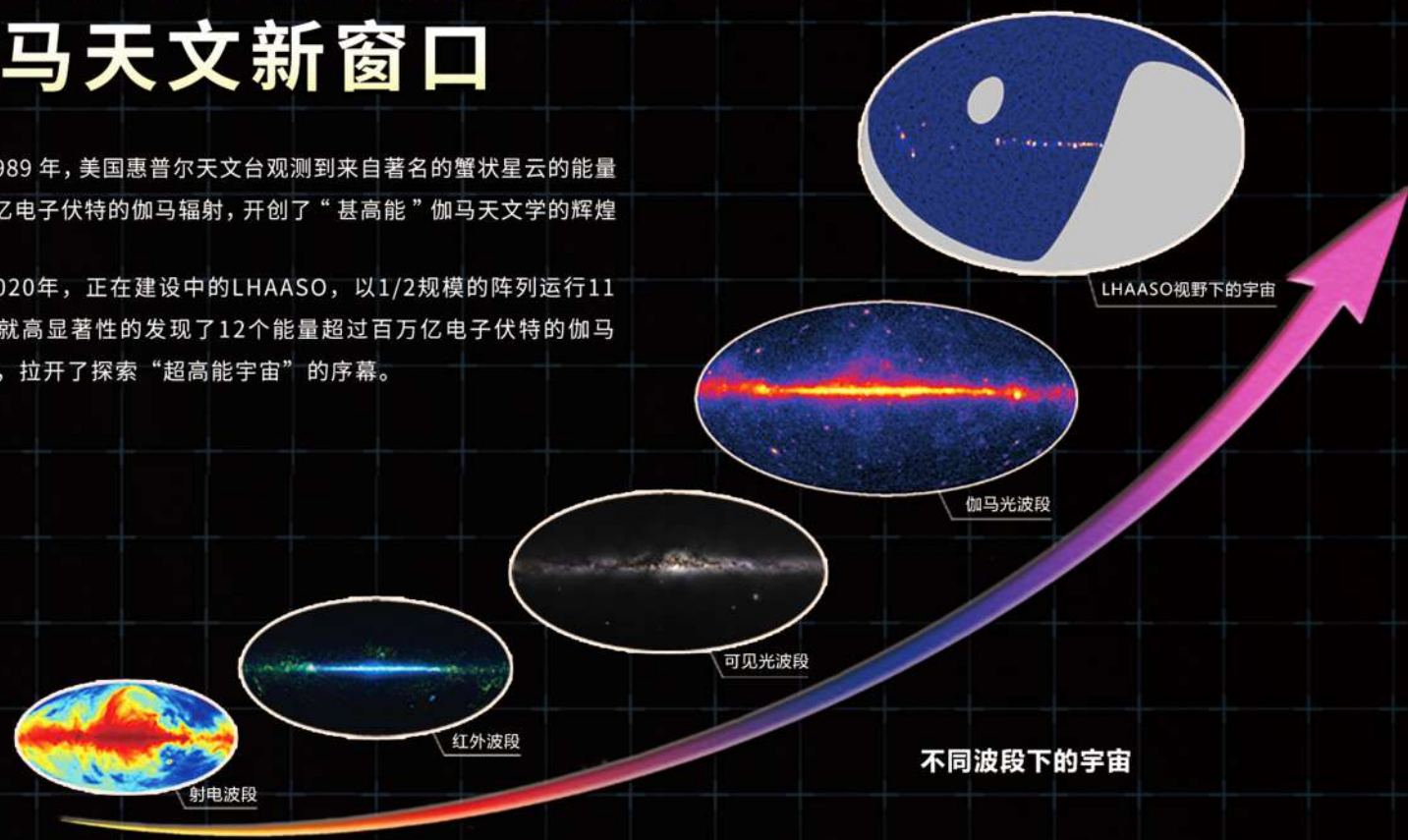
天鹅座恒星形成区是银河系在北天区最明亮的区域，拥有多个大质量恒星团，大质量恒星寿命较短，使得该区域充满恒星生生死死的剧烈活动，具有复杂的强激波环境，是理想的宇宙线加速场所，被称为“天然的粒子天体物理实验室”。

本次 LHAASO 在天鹅座恒星形成区发现千万亿电子伏特伽马光子，使得这个本来就备受关注的区域成为银河系超高能宇宙线起源的最佳候选者，成为未来 LHAASO 以及相关的多波段观测、乃至多信使天文学实验的关注重点，有望成为解开“世纪之谜”的突破口。

LHAASO 打开超高能伽马天文新窗口

1989 年，美国惠普尔天文台观测到来自著名的蟹状星云的能量高于千亿电子伏特的伽马辐射，开创了“甚高能”伽马天文学的辉煌 30 年。

2020 年，正在建设中的 LHAASO，以 1/2 规模的阵列运行 11 个月，就高显著性的发现了 12 个能量超过百万亿电子伏特的伽马辐射源，拉开了探索“超高能宇宙”的序幕。



不同波段下的宇宙

LHAASO挑战宇宙线起源百年未解之谜

科学目标

探索宇宙线起源——精确测量候选天体（超新星遗迹、黑洞等）的伽马射线宽范围能谱，寻找宇宙线源存在的证据，精确测量宇宙线能谱和成分，研究宇宙线加速和传播机制。

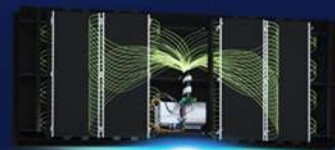
伽马射线源巡天普查——大量发现伽马射线源，揭示新现象、发现新规律。

新物理前沿研究——搜寻暗物质，搜寻超越对撞机能标的新物理现象，检验极端高能条件下、宇观尺度下基本物理规律，如洛伦兹对称性是否破缺等。

LHAASO采用四种探测器复合测量宇宙线信息

电磁粒子探测器阵列

用于测量簇射中的次级电磁粒子，对原初宇宙线的方向、芯位和能量进行重建。



缪子探测器阵列

用于测量簇射中的缪子，对原初宇宙线的种类进行鉴别，有效排除带电宇宙线的干扰，使得LHAASO成为世界上最灵敏的超高能伽马射线探测装置。



水切伦科夫探测器阵列

测量簇射次级粒子在水中产生的切伦科夫光，是世界上最灵敏的甚高能伽马巡天阵列。



广角切伦科夫望远镜阵列

测量簇射次级粒子在大气中产生的切伦科夫光，获得膝区宇宙线能谱和成分。



我国高山宇宙线实验里程碑

1954年

在海拔3180m的云南东川落雪山矿区，设立云南宇宙线工作站，建成了中国第一个高山宇宙线实验室。

1976年

在海拔5200m的西藏甘巴拉山顶建起了大规模高山乳胶室，开展了近10年的观测研究。

1989年

1989年，在海拔4300m的西藏羊八井建立国际宇宙线观测站，并开展了中日合作ASy实验。

2000年

2000年，开始中意合作ARGO-ybj实验建设。

2009年

北京香山科学会议，曹锺研究员提出了在海拔地区建设大型的复合探测阵列“高海拔宇宙线观测站(LHAASO)”的完整构思。

2015年

LHAASO作为十二五期间的国家重大科技基础设施立项，站址位于四川稻城海拔4410m的海子山。

2017年

LHAASO主体工程于2017年11月开始建设。

2019年

LHAASO科学观测正式启动。

2020年

观测到首个超过1PeV伽马光子，并发现了多个河内源在数百TeV处没有截断，预示银河系内普遍存在PeV量级的宇宙粒子加速器。

工程图誌



正在验收定位新安装的ED



WCDA、WFCTA阵列



WFCTA可移动可望远镜筒安装调试



ED、MD阵列



WCDA一号水池PMT安装现场



装配大厅



MD组员测量光衰减时间和光电子数



WCDA水池内安装到位的部分探测器阵列



2019年4月LHAASO科学观测启动暨多信使天文国际研讨会



ED、MD现场部分探测器安装人员合影



观测基地建设前 摄于2014年



LHAASO建设现场 摄于2017年5月



2019年9月LHAASO 1/4DAQ系统通过专家组鉴定验收



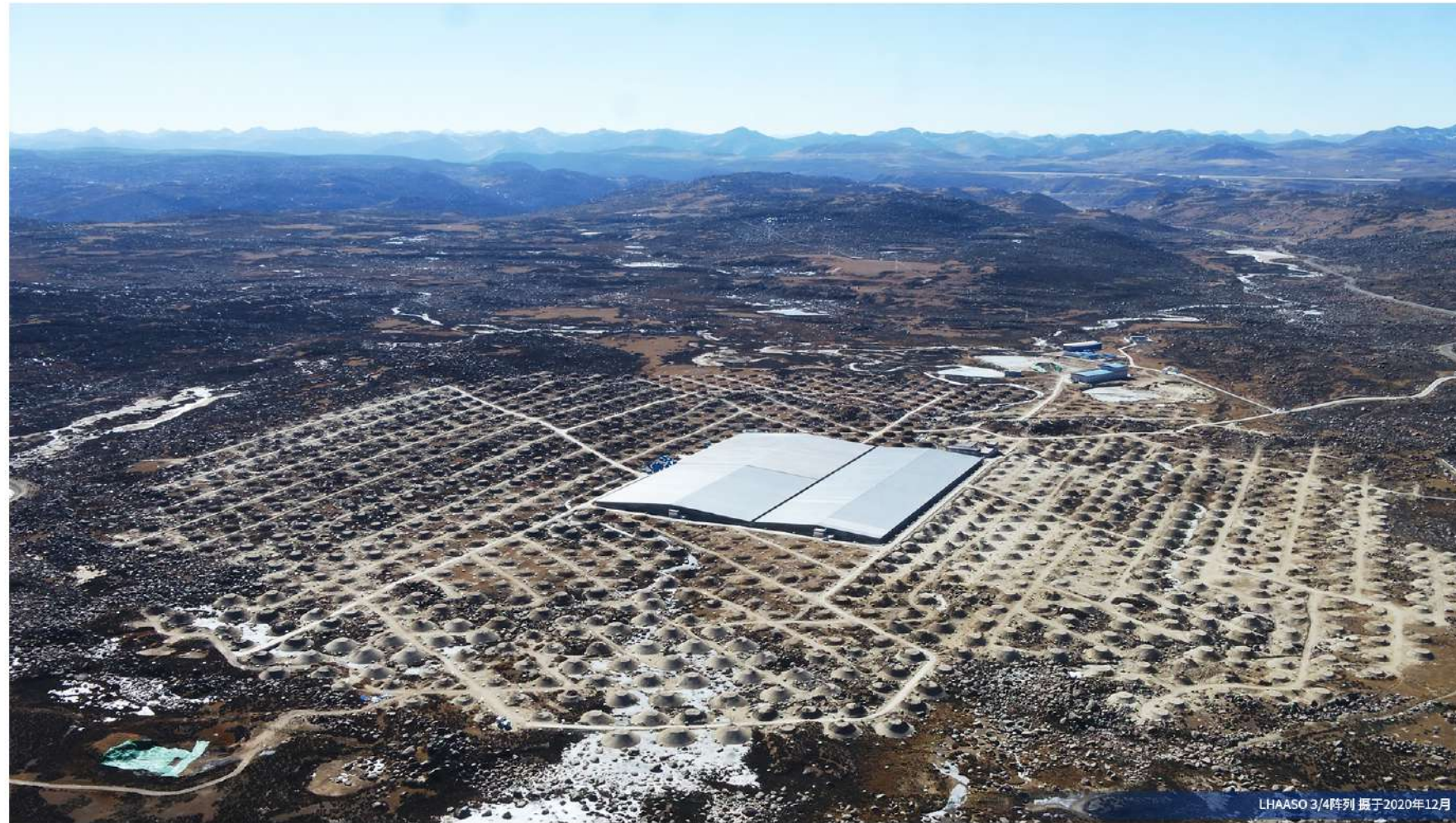
2019年新年现场人员拜年合影



LHAASO 1/4阵列 摄于2018年12月



LHAASO 1/2阵列 摄于2019年12月



LHAASO 3/4阵列 摄于2020年12月



2020年5月雪中观测基地

致谢

项目批复单位

中华人民共和国国家发展和改革委员会
四川省发展和改革委员会

科学研究资助、支撑单位

中华人民共和国科学技术部
国家自然科学基金委员会
国家高能物理科学数据中心
成都市科学技术局
四川天府新区管理委员会

项目共建单位

中国科学院
四川省人民政府

项目建设单位

中国科学院成都分院
中国科学院高能物理研究所

项目合作单位

中国科学院高能物理研究所
清华大学
中国科学技术大学
山东大学
云南大学
四川大学
西南交通大学
中国科学院国家空间科学中心
中国科学院云南天文台
南京大学
北京大学
中国科学院国家天文台
中国科学院紫金山天文台
中国科学院上海天文台
西藏大学
河北师范大学
广州大学

广西大学
中山大学
郑州大学
上海交通大学
武汉大学
瑞士日内瓦大学
俄罗斯核研究所
泰国玛希隆大学

工程参建单位

中国电建成都勘测设计研究院有限公司
中国水利水电第五工程局有限公司
中冶京诚工程技术有限公司
中国电子系统工程第二建设有限公司
中国华西企业股份有限公司
四川省建筑科学研究院
中国科学院空天信息创新研究院
中国科学院电工研究所
中国科学院计算机网络信息中心

工程参建单位

中国建筑技术集团有限公司
中山泛亚电业有限公司
四川公路桥梁建设集团有限公司
四川港航建设工程有限公司
四川三信建设咨询有限公司
黄河勘测规划设计研究院有限公司
北京高能时代环境技术股份有限公司
北京新立机械有限公司
北方夜视技术股份有限公司
北京滨松光子技术股份有限公司
南京春辉科技实业有限公司
北京瞬达科技有限公司
江苏久久防水保温隔热工程有限公司
江苏亨通光电股份有限公司
河北旭峰机电科技有限公司
青岛恒信塑胶有限公司
许昌鑫立泰电器设备有限公司
廊坊宏胜机电制品有限公司
白银有色西北铜加工有限公司

天津市森特尔新技术有限公司
海南展创光电技术有限公司
THE CRYSTALS BUSINESS UNIT OF SAINT-GOBAIN CERAMICS & PLASTICS, INC
东捷光电科技(苏州)有限公司
重庆摩尔水处理设备有限公司
杭州科星水处理工程有限公司
四川蜀源茂林电气安装工程有限公司
四川省西点电力设计有限公司
四川省冶勘设计集团有限公司
四川省煤田测绘工程院
廊坊市建业运输有限公司
绍兴绿色清洁用品有限公司
华诚博远工程咨询有限公司
北京联合至强科技有限公司
航天长征睿特科技有限公司
北京中检维康电子技术有限公司
北京华恒鑫达科技发展有限公司