

编者按

从广袤无垠的银河系到蔚蓝深邃的大亚湾,人类探索宇宙的脚步从未停歇。小至中微子,大至其他未知的星体,科学家在这条“通天”大道上留下了又一个又一个扎实脚印。

然而,随着许多科学问题的范围、规模、复杂性不断扩大,任何一个国家都很难只依靠自己的力量解决所有创新难题。在新的时代背景下,深化国际科技交流合作成为破解人类重大挑战的必由之路。

近年来,我国诸多大科学装置在提高自主创新能力方面发挥了重要作用,大大缩小了与发达国家的差距。与此同时,

围绕这些装置建成的科学与技术中心,也具有很强的辐射、示范、引领作用,逐渐成为重要的创新“高地”。

一直以来,国家自然科学基金重大项目面向国家经济建设、社会可持续发展和科技发展的重大需求,选择具有战略意义的关键科学问题,汇集创新力量,开展多学科综合研究和学科交叉研究,充分发挥导向和带动作用,进一步提升了我国基础研究源头创新能力。

本期自然科学基金版将总结国家自然科学基金重大项目取得的研究进展,展示其取得的成绩。

探寻银河的秘密

——记国家自然科学基金重大项目“LAMOST 银河系研究”

■本报记者 甘晓

每当夜幕降临时,位于河北兴隆县燕山腹地的郭守敬望远镜(LAMOST)慢慢打开了穹顶。在这台由中国自主创新研制、目前世界上口径最大的光谱巡天望远镜中,来自遥远宇宙中的星光经过反射施密特改正板MA、球面主镜MB和焦面,再通过光纤传输到光谱仪。

7年来,LAMOST的“巡天”获得了目前世界上最大的银河系恒星光谱观测数据库。

自2014年起,在国家自然科学基金重大项目“LAMOST 银河系研究”支持下,中国天文学家以LAMOST巡天数据为基础,在有关银河系的重大学术问题上取得了一系列进展。

基于千万条光谱

“迢迢牵牛星,皎皎河汉女”——牛郎星与织女星被银河相隔的现象,引发了先民的丰富想象。银河系作为一条静静的“天河”,是一个富有诗意的美好存在。

现代科学兴起后,银河系则逐渐成为天文学家最为关注的研究对象之一。为“看清”更多的天体、解开宇宙的诸多谜题,LAMOST在中国落成。

与印象中的望远镜不同,人们不是通过它直接给天体拍照,而是获取天体的可见光波段的光谱。科学家靠光谱分析,获得遥远的天体信息。犹如人的指纹各不相同,不同元素都会在特定波长位置留下自己独特的印记。只要能够获得天体发出的光,就可以通过光谱分析知道这个天体到底由什么物质构成。

其中,星系的光谱可以提供距离、化学构成和视向运动等信息,而恒星的光谱则能够推断化学成分、温度、年龄、质量和演化历史等。从大量天体的光谱观测中还可以发现许多奇异的体例和现象。所有这些,将促进人类对宇宙演化规律、物质结构、相互作用等最基本物理规律的新

认识。

LAMOST是世界上口径最大的光谱巡天望远镜,也是一件普查天体“户口”的利器。它的建成给了中国天文学家极大的鼓舞。

“我们利用LAMOST巡天获得的光谱来研究银河系的一些关键科学问题。”中科院国家天文台LAMOST运行和发展中心主任赵刚研究员告诉《中国科学报》。

2013年,国家自然科学基金委员会发布重大项目“LAMOST 银河系研究”申请指南,赵刚组织的研究团队申请获批。他们凝练出利用LAMOST巡天开展银河系研究的几个关键科学问题,包括银河系质量和暗物质分布、动力学模型、年轻星团与恒星形成以及银河系特殊天体及特殊物理过程。

“我们希望能最大程度地利用巡天光谱数据研究银河系的一些关键科学问题,推动中国天文学不断向前发展。”赵刚说。

揭开银河系之谜

“光谱千万条,研究第一条。”这是该重大项目研究人员经常挂在嘴边的一句话,大家是想强调拿到光谱数据之后开展科学研究的重要性。

2019年3月27日,赵刚在该重大项目结题会上,展示了一张银河系的“照片”。深蓝色的背景映衬着一个中央扁平的黄色亮斑,亮斑由无数颜色各异的天体组成,多种成分和结构在这张图片上同时显示,足见探索银河系的复杂、高深。

“研究银河系结构、形成和演化,需要分别对银河系不同星族成分进行研究,也需要紧密结合银河系恒星形成过程、初始质量函数等多种信息。”赵刚强调。

这正是该重大项目的科学目标。5年来,科学家围绕这一科学目标取得了丰硕的成果。

LAMOST庞大的数据量成为挖掘奇异天

体的“富矿”。几年前,在LAMOST海量的光谱数据中,科研人员发现了一条罕见光谱,确定其来自一颗锂丰度异常高的恒星。

事实上,早在1981年,天文学家就曾利用一架小型望远镜首次发现了一颗特殊的恒星,它的光谱非常奇特,在本不该有谱线的地方出现了一条很强的锂线。为弄清富锂巨星的形成,科学家开始搜集这类天体样本,但只发现了极少数的富锂巨星,难以为解决科学问题提供充足证据。

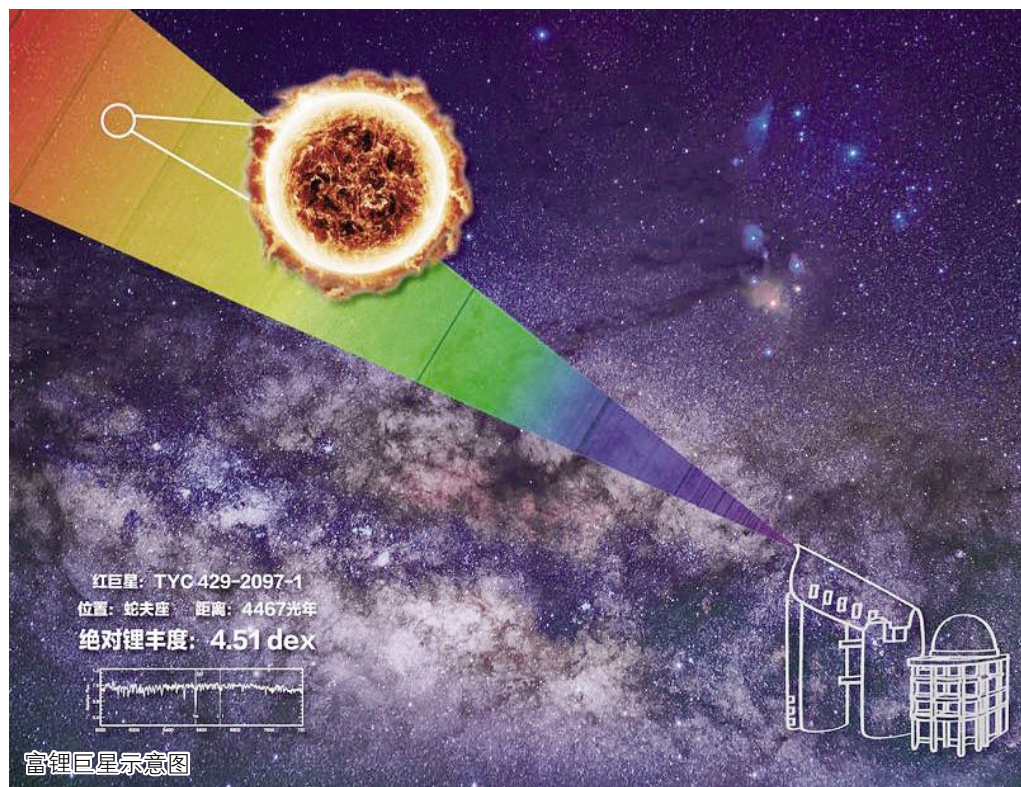
幸运的是,LAMOST在巡天观测中,找到一颗携带罕见谱线的天体。这激发了中国科学家的极大兴趣。

经过进一步跟踪观测,科研人员发现,这颗奇特恒星的质量不足太阳的1.5倍,半径约为太阳的15倍,是一颗典型的巨星。接着,他们对其锂丰度进行了精确测量,发现这颗恒星绝对锂丰度高达4.51,相当于太阳中锂含量的3000倍,是目前人类已知锂元素含量最高的巨星。

这一发现在2018年8月出版的《自然-天文》上发表。“富含锂元素的巨星十分稀有,其在揭示锂元素的起源和演化上具有重要意义。”论文第一作者、中科院国家天文台助理研究员闫宏亮介绍,这颗富锂巨星来自于银河系中心附近的蛇夫座方向,位于银河系盘面以北,距离地球约4500光年。

随后,研究人员对这颗恒星锂元素的来源进行了了解。他们最终证实,这颗恒星的锂元素很可能来自恒星内部一种特殊的物质交换过程——借助一种不对称对流,向上的流速比向下的流速快得多,导致很多恒星内部的原材料被带到表面,最后变成锂元素。

赵刚在该重大项目结题时表示:“这一发现将国际上富锂巨星中的锂丰度观测极限提高了一倍,同时就锂元素的合成和现有恒星演化理论提出了独树一帜的新观点。”



另一颗奇特的恒星也被LAMOST发现。前不久,《自然-天文》刊发了一篇学术文章提出,中日科学家在银晕中发现一颗银、铜、金、铷等重元素含量异常高的恒星。

在该重大项目支持下,研究人员对这颗恒星的来源进行了深入研究。论文通讯作者赵刚接受媒体采访时解释,由于被银河系“吃掉”的矮星系与目前“幸存”的矮星系具有相近的质量分布,因此它们的成员星也具有相似的化学特征。“所以通过研究银河系附近矮星系成员星的化学组成,我们便能获知矮星系家族里恒星的化学特征,从而像做DNA鉴定一样,把银河系内来自矮星系的恒星筛选出来。”

他们通过对比银晕内恒星和银河系近邻矮星系的成员星中镁、硅、钙和钛等元素的含量,判断这颗恒星属于“外来人口”,是银河系吞噬矮星系时带去的“移民”。事实上,这印证了有关银河系形成的假说:初始的银河系不断吞噬附近的矮星系,最终形成了今天的银河系。

该重大项目执行5年来,研究人员在银晕的演化与暗物质分布、银河系动力学、银河系中恒星形成过程以及银河系中特殊恒星等领域取得了一系列显著进展与代表性成果。这些成果在国际上有影响的SCI刊物上发表了280余篇论文。

充分展现“大科学”特点

当前,许多科学问题的范围、规模、复杂性不断扩大,全球科学研究已经进入“大科学时代”。对此,该重大项目成员之一、中科院国家天文台副研究员李海宁深有感触:“不同领域、不同国家的科学家之间进行合作,成为一种必然。”

在执行该重大项目期间,科学家基于LAMOST的银河系研究,在多维度的合作中,

充分展现今天天文学“大科学”的特点。

首先,是数据科学家与天文学家之间的通力合作。“LAMOST光谱数据量非常大,需要数据科学家先将光谱数据处理成科学家能用的数据,再由天文学家进行解释、研究。”李海宁介绍,“每一个团队几乎都有专门从事数据挖掘的科学家。”

同时,跨学科的合作也大有裨益。例如,在富锂巨星发现的同时,闫宏亮、赵刚和施建荣等研究人员,与来自中国原子能科学研究院、北京师范大学等高等院校的科学家合作,对这颗奇特恒星开展了深入的多学科专业研究。

随后,他们还结合美国“自动行星搜寻者望远镜”的高分辨率光谱和中国原子能科学研究院最新的原子数据,通过模拟再现了其内部经历的变化,从而对这颗恒星的锂元素丰度给出了合理解释。

在研究者们看来,正是一系列的合作研究,支持了恒星内部产生锂元素这一结论。

而在发现前述银河系“外来移民”的研究中,中国科学家与日本科学家开展了合作。“LAMOST发挥‘普查’作用,一旦搜寻到有趣的目标,就需要借助具有更高分辨本领的望远镜开展有针对性的精细研究。”李海宁告诉《中国科学报》。

当时,为确认这颗重金属“超标”恒星的身世,中国科学家联合日本科学家向日本国立天文台8米光学望远镜申请了观测时间,并由中国科学家主导,开展了高分辨率光谱联合观测研究。

此外,中国科学家与德国马普天文研究所、海德堡大学、慕尼黑大学等多家世界知名的天文机构建立了长期稳定的合作关系。

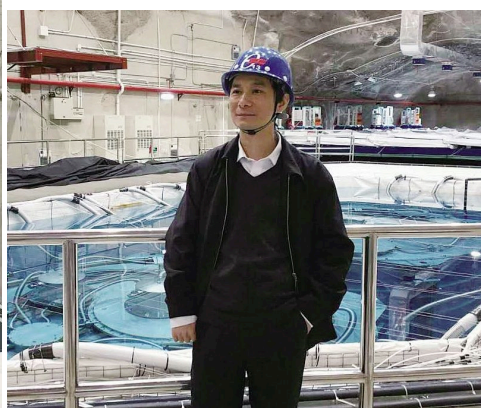
赵刚指出,在该重大项目支持下,银河系研究领域观测与理论上得到充分交叉与融合。“利用LAMOST海量光谱数据,中国天文学家得以揭开诸多银河系未解之谜。”

中微子“振荡”大亚湾之后……

■本报见习记者 程唯珈



2017年安装中的液闪更换装置



曹俊在工作现场

在大亚湾核电站附近几百米的深山里,潜伏着世界上最好的中微子探测器。它本是用来确认中微子的第三种“变身”模式的,几年前已经完成任务。如今,它在国家自然科学基金重大项目的支持下,稳健地迈向新的征程。

“振荡”世界的中微子

中微子是个高深莫测的家伙,一直以来,它都在挑战人类的认知能力。

作为一种不带电、质量极其微小的基本粒子,中微子数量十分庞大,每秒钟约有几万亿自由穿过人体,并以接近光速运动。由于其几乎不与任何物质发生作用,因此也拥有了宇宙间“幽灵粒子”的称号。

不仅神出鬼没,中微子还会“变身”——它可以在飞行中从一种类型转变成另一种类型,即中微子振荡。其拥有3种振荡的量化描述,分别为 θ_{12} 、 θ_{23} 和 θ_{13} 。前两种已被科学家们通过大气中微子和太阳中微子实验测量到,唯有代表第三种振荡模式的 θ_{13} ,长期和全世界的物理学家捉迷藏。

时间回溯到2012年3月8日,这是一个值得科技界铭记的日子。

当天下午2点15分,由中国科学院高能物理研究所牵头的大亚湾中微子实验(以下简称大亚湾实验)国际合作组在北京宣布,大亚湾实

验利用两个近点实验厅和一个远点实验厅内6个中微子探测器的数据,发现了一种新的中微子振荡,并测量到其振荡几率。该实验达到了前所未有的精度,测得第三种中微子振荡模式的振荡幅度为9.2%,误差为1.7%,无振荡的可能性只有千万分之一。

“这是物理学上具有重要意义的一项重大成就。”诺贝尔物理学奖得主李政道曾如此评价大亚湾实验。

一时间,众多荣誉纷至沓来。短暂的喜悦过后,中国科学院高能物理所研究员曹俊陷入了更深的思考。

“中微子振荡的信号不仅体现在中微子个数的减少上,也体现在所测中微子能谱的变形上。”曹俊告诉《中国科学报》,因为不同能量的中微子振荡几率不同,从而造成近点和远点探测到的中微子的能量分布(能谱)不同。研究能谱的变形,可以测量尚未测得的振荡频率,也可以把振幅测得更准。

然而,这项看上去直截了当的工作进展并不顺利。“要测量中微子能谱,先要精确理解探测器对不同能量中微子的响应,而这是个非线性问题。”曹俊说。

曹俊介绍,工作的难点主要在于两方面。“首先,我们通过大量研究发现,探测器的非线性来自电子学和液体闪烁体两个因素,交错在一起,现有数据不足以准确确定。其次,测得的中微子能谱

与理论模型对不上。如果假定能谱是对的,则需要一个看上去很怪的非线性曲线。”

而这两个问题不仅影响大亚湾实验后面的物理研究,也会严重影响我国下一代中微子实验——江门中微子实验。它采用2万吨液体闪烁体,瞄准国际中微子研究的下一个重大问题即中微子质量顺序,同时也将在精确测量振荡参数、太阳中微子、地球中微子、质子衰变等方面取得国际领先。

为了解决这些问题,2014年,国家自然科学基金委员会启动了“大亚湾中微子实验的物理分析与新探测器关键技术研究”重大项目。时隔5年,在项目结题验收会上,曹俊报告了项目取得的主要进展和成果。“这些成果保持了我国在反应堆中微子实验领域领先的国际地位,进一步扩大了我国在中微子研究领域的国际影响。”曹俊评价说。

五朵金花齐绽放

据了解,通过大亚湾实验,我国在反应堆中微子研究领域已取得了领先优势。探测反应堆中微子主要采用液体闪烁体探测器,核心技术包括液体闪烁体、光电倍增管、精确的探测器响应研究等。建设中的江门中微子实验将采用类似探测技术,但桌面仪器已达到研发要求,技术挑战更大。

曹俊介绍,为此该重大项目在大亚湾实验的数据和设施基础上,将研究任务分成5个课题展开。

课题一主要研究探测器的能量非线性模型。课题二与课题三分别针对质量平方差和反应堆中微子能谱进行物理分析,首次测量了反应堆中微子振荡相关的质量平方差,逐步提高精度至2.8%,同时首次精确测量了反应堆中微子能谱,发现与理论模型不一致,在国际上激发了大量关于核数据的研究,开启了新的研究热点。

课题四和课题五则专攻硬件核心技术。其中,课题四研制了一套液闪置换系统,将探测器内部20吨液体闪烁体置换出来,换成江门中微子实验特殊纯化的液体闪烁体,并通过循环改变配方,进行了非线性、光产额、极低本底等一系列研究。

曹俊透露,实验中有个很有意思的发现。“液体闪烁体的配方中有一种波长移位剂,以前国际上的实验,有的对光产额要求不高,没有添加;有的加100毫克/升,有的加20毫克/升,大亚湾实验加了15毫克/升。通过在大亚湾进行的置换实验,发现对大探测器只要加1毫克就够了,多了不仅浪费,也会使性能下降。”

为了研究电子学非线性,课题五研制了一套高速波形读取电子学读出系统,将电子学非线性从10%降到了0.5%,误差0.2%。加上对液闪非线性的研究,探测器非线性达到0.5%的精度,而之前国际最好水平大于1%。这些技术成果不仅提高了大亚湾实验的精度,也为江门中微子实验打好了基础。

曹俊介绍,通过重大项目,一方面可以让整个团队集中精力做研究,另一方面,团队中的一部分人也可以专注于核心技术,服务于科学目标,不用担心论文产出。

“大家有着共同的科学目标,既相互合作、取长补短,也相互竞争,这样培养出的青年人才自然向国际水平看齐。”他说。

在重大项目实施的5年间,大亚湾实验发表全合作组署名、自然科学基金委标注的SCI物理论文共14篇,技术论文2篇,发表的3篇振荡论文和3篇能谱论文均为本领域前19%的高引论文。共培养11名博士、22名硕士,5名讲师升任副教授,2名副教授升任教授。不少博士与博士后获得

“玛丽·居里奖学金”、中德博士后基金、赵忠尧博士后奖学金、粒子物理前沿卓越中心“拔尖青年人才”“优秀青年人才”称号等殊荣。

“通过对核心技术的持续研究,我们为江门中微子实验做好了相关技术和人才储备,力争在国际上继续扩大领先优势。”曹俊说。

强化合作交流

回顾5年来的研发经历,曹俊对合作交流感受颇深。“对于重大问题的研究离不开团队的协作发展。”

首先是充分的国际合作。据了解,本项目研究合作组由中国、美国、俄罗斯、捷克、智利等国科学家组成,其中国外合作者数量约占一半。

其次是项目组内部课题成员的相互合作。“课题一采用了课题四和课题五的成果,得到探测器的整体能量非线性。同时课题一的物理分析人员帮助课题四、五的探测器和电子学研究人员设计实验和设备,提出了指标,也参与了其数据分析。而课题二、三直接采用课题一的能量非线性研究成果,在物理分析中也共同参与。”曹俊说。

此外,该项目研究合作组每年都会组织两次大亚湾国际合作组会和江门国际合作组会。项目组成员每年均得到大量国际会议邀请,参加国际会议、报告成果近百次,得到十多次大会报告机会,其中包括“天体物理与深地物理国际大会”“弱相互作用大会”等顶级会议。

曹俊介绍:“每次会议都由从事相关研究的专业人员参加研讨和交流。这些会议不仅促进了项目内成员之间的合作,也促进了和项目外研究人员的交叉合作。”

面向未来,曹俊介绍,大亚湾实验将于2020年完成使命,新一代的江门中微子实验将于2021年投入运行,几项挑战性的关键技术通过大亚湾实验实施和该重大项目研究已得到了验证。

特别是发现的反应堆中微子能谱与理论模型不一致现象,成为了新的研究热点。今年4月,国际原子能机构核数据中心召开专门会议,讨论中微子实验发现的核数据问题,对大亚湾实验及计划中的小型高精度实验——台山中微子实验寄予厚望。