

大亚湾反应堆中微子实验获国家自然科学奖一等奖

# 看神秘粒子如何“振荡”世界

本报记者 余惠敏 李茂达

## 热点追踪

在2016年度国家科学技术奖励大会上,大亚湾反应堆中微子实验凭借其对我国粒子物理的巨大贡献荣获国家自然科学奖一等奖。此次实验的成功填补了我国在中微子这个基础物理研究领域的空白,提升了我国物理研究的国际影响力。首次尝试中微子振荡研究就取得如此骄人的成绩,这在国际上都是十分罕见的。那么,什么是中微子振荡?这次实验又是如何成功的?且听《经济日报》记者向您娓娓道来。

### “幽灵”粒子 来去无踪

中微子常用符号 $\nu$ 表示,与带电轻子、夸克一同被称为构成物质世界最基本的粒子。人们叫它“闪电侠”——中微子质量非常轻(小于电子的百万分之一),以接近光速运动,具有极强的穿透力,可以轻松穿过地球直径那么厚的物质;人们叫它“独行侠”——中微子只参与非常微弱的弱相互作用,在亿万个中微子中只有个别会与物质发生反应,因此中微子的检测十分困难。它难以琢磨——中微子有大量谜团尚未解开,包括它的质量大小和起源、磁矩、CP破坏大小等等,却又无处不在——宇宙中充斥着大量的中微子,大约每立方厘米300个,大多数粒子物理和核物理过程中都伴随着中微子的产生,例如核裂变、核聚变、贝塔衰变等。

中微子在飞行过程中,从一种类型转变成另一种类型的现象叫做中微子振荡,科学家用三个混合角来描述三种中微子相互转化时的振荡幅度,分别是 $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\theta_{13}$ 。

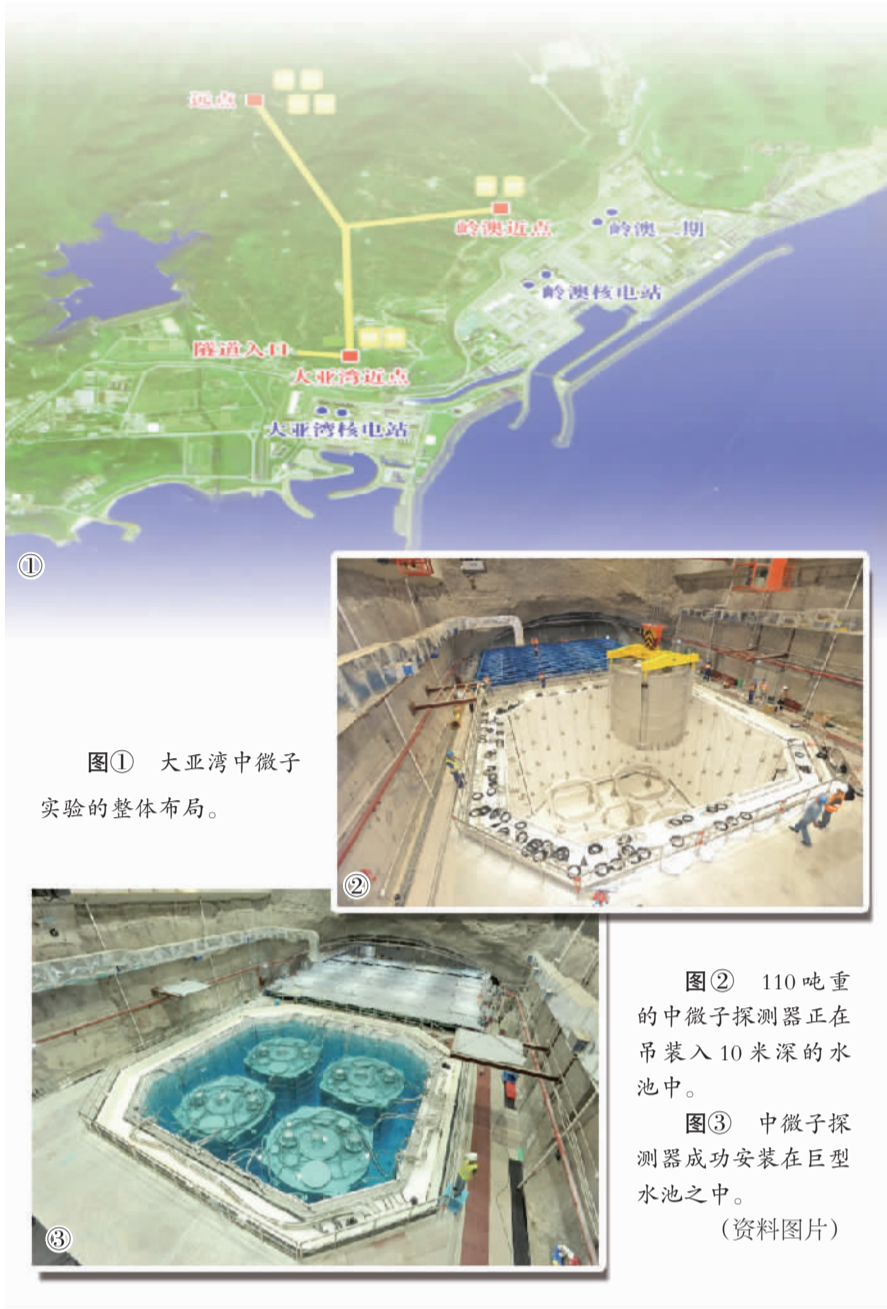
1998年的超级神冈实验和2001年SNO实验先后测出混合角 $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$ 的大小,证实了中微子有质量,并因此获诺贝尔物理学奖。但第三种振荡混合角 $\theta_{13}$ 却迟迟没有被发现,直到2012年大亚湾中微子实验首次公布了对 $\theta_{13}$ 的精确测量结果。“这是物理学上具有重要基础意义的一项重大成就。”诺贝尔物理学奖得主李政道如是评价大亚湾实验。

大亚湾实验的科学意义在于 $\theta_{13}$ 值的确定,使科学界得以更深入地了解中微子的基本特性,预示着中微子的全部奥秘有望在不远的将来被彻底解开。“基础研究的主要目的是为了认识世界,此次实验的成功标志着我们对自然界的发现又迈出了新的一步,这是我们对人类作出的贡献。”大亚湾中微子实验首席科学家、中国科学院高能物理研究所所长王贻芳说。

除此之外,大亚湾实验从高精度大型探测器加工到特殊材料,从化学化工到高速读出电子学,提升了我国在相关领域的技术水平,并培养出一批具有国际水准的青年科研人员,为我国基础物理研究的发展打下了坚实基础。

### 追求完美 抢占先机

2003年前后,来自不同国家的科学家们共提出8个可能测出 $\theta_{13}$ 的实验方案,其中就包括大亚湾反应堆中微子实验方案。如何在与美国、日本、欧洲等经验丰富团队的激烈竞争中脱颖而出?



图① 大亚湾中微子实验的整体布局。

图② 110吨重的中微子探测器正在吊装入10米深的水池中。

图③ 中微子探测器成功安装在巨型水池之中。(资料图片)

“取胜的第一点原因是,我们的实验设计精度比别人高。”王贻芳告诉记者,大亚湾实验的测量精度比过去的实验高出约一个数量级,在8个国际同类方案中精度是最高的。“我们要为世界提供一个最精确的振荡参数,要做就做到极致。”王贻芳说。

“其次,我们的方案设计有优势、有创新。”王贻芳说,大亚湾实验采用远近相对测量方法,在反应堆附近和距反应堆2000米左右的地方各放一个探测器。如此一来,便能够部分抵消探测效率、靶的有效体积、靶核数目和能量测量等与探测器相关的误差,提高实验灵敏度。

此外,大亚湾实验还创造性地在同一个实验厅内放置多个相同的探测器,这是国际上唯一采用这种设计方法的中微子实验。多个全同探测器的测量便于比较,使实验误差又降低了“根号n倍”。

在实验厅位置的选择上,设计者们也花费一番心思。为了解决远点探测器放置位置、宇宙射线产生本底、山体覆盖厚度等问题,科学家们将1:5000的数字化地形测量图予以转换,得到山体轮廓,在平面图上以50米为一格,比较了3个实验大厅移动到不同位置时测量 $\theta_{13}$ 的灵敏度,定量地计算出不同因素对测量结果的影响,从而确定大亚湾实验的总体布局。

“如果要取得成功,所有的事情都得做对。”大亚湾实验拥有最大的反应堆功

率、最合适的远点基线、最大的探测器质量以及最深的岩石覆盖。再加上科学家们力求卓越的设计理念、精益求精的研究态度,让实验在测量精度、灵活度以及可靠性上都达到了前所未有的高度,使得大亚湾实验成为“中国有史以来最重要的物理学成果”。

### 技术创新 攻坚克难

液体闪烁体(下文简称液闪)是中微子实验使用的探测介质,钆是一种稀土元素,在液闪中掺钆可以放大关联信号,提高探测精度。但如何在液闪中掺钆并保持其稳定性是大亚湾实验的重中之重,也是难以突破的瓶颈。大亚湾中微子实验项目副经理曹俊告诉记者,把无机物钆掺到由有机物组成的液闪中,由于不相溶,钆便会析出,导致液闪无法有效地探测。“将化学技术与核物理相结合,这种跨界研发确实比较困难。”曹俊说。

高能所化学专家张智勇告诉曹俊可以将钆变成有机的钆络合物,从而提高其在有机液闪中的溶解度。通过多次实验,尝试了多种配体用来生成钆的络合物,最终发现,异壬酸与钆反应生成的络合物进入液闪后对液闪的透明度和光产额等没有明显影响,完全满足实验要求。

与此同时,美国布鲁克海文国家实验室也在攻克掺钆液闪稳定性的难题,

并对高能所的配方心存疑虑。“这是完全可以理解的,我们彼此相互交换样品测试,都觉得有一定的可行性,但最终用谁的一直相持不下。”王贻芳说。

作为捕获中微子的核心物质,掺钆液闪一旦出现问题,整个实验都将功亏一篑。中美双方分别提供样品,由位于香港大学的第三方实验室开展光学性能和稳定性的测量。最终,高能所研制的掺钆液闪完美地通过了考核,其配方和工艺为大亚湾实验的顺利完成立下了汗马功劳。

技术难关被攻克以后,大规模生产又给大亚湾的科学工作者们出了一道难题。为了防止金属进入液闪中影响掺钆液闪稳定性,所有与液闪接触的部分都要使用有机玻璃和氟塑料,这就给加工、生产以及运输带来了很大的困难。

实验所需的掺钆液闪分50个批次生产,实验过程中,现场人员层层把关、步步小心,通过合理的分工、密切的合作以及不辞劳苦地昼夜奋斗,终于在不到两个半月的时间内就完成了50个批次的全部生产工作,重复性非常好。时至今日,大亚湾实验已经运行数年,掺钆液闪依然很稳定,完全满足取数要求。

### 展望未来 国际领先

大亚湾实验在测量 $\theta_{13}$ 数值中拔得头筹,使得我国中微子物理研究向前迈出了坚实的一大步。但是,中微子世界还有许多未解之谜有待探索和解答。“目前中微子研究一个很重要的方向是测量其质量顺序,这也是江门中微子实验的首要科学目标。”王贻芳介绍说。

江门中微子的实验原理与大亚湾实验相同,即用液闪探测器探测反应堆中微子,但难度大得多。一方面,为了测到足够多的中微子,探测器的有效质量需达2万吨;另一方面,为了保证测到的数据足够精确,在倍增能量精度的同时还要尽可能地提高光子转化成电子的效率(称为量子效率)。

对此,高能所的科学家们集思广益,为江门中微子实验出谋划策。首先,设计了目前世界上尺寸、规模最大的中微子探测器;其次,将用于接受光子的光电倍增管覆盖全部探测器,使其排布效率达到极限;最后,高能所的科学家们与多家科研院所、企业合作,经过多年努力,终于研发出一种新型的高量子效率光电倍增管,并将用于江门中微子实验。

江门中微子实验于2013年立项,预计2020年运行取数,大约运行5年后可以给出中微子质量顺序的确切答案。该实验不仅能测量中微子质量顺序,还将精确测量中微子振荡的6个基本参数中的3个至优于1%精度的国际最高水平,以检测中微子混合的 $\theta_{13}$ 正负、寻找新物理,并可以在超新星中微子、地球中微子、太阳中微子、暗物质寻找、质子衰变等方面作出贡献。“在完成首要科学目标以后,我们还计划对江门中微子实验做出进一步的升级改造,以研究中微子是否是自身的反粒子。”王贻芳说。

下一代中微子实验还包括韩国的反应堆中微子实验、美国的加速器中微子实验以及其在南极的大气中微子实验、法国在地中海的大气中微子实验等。中微子世界的未解之谜正是我国粒子物理实现跨越式高速发展、达到国际领先水平的助推器。

## 科技万象

# 我国千万个

不久前在美国盐湖城举行的2016年全球超级计算大会上,由中国科学院软件研究所研究员杨超等人领衔的应用成果“千万核可扩展全球大气动力学全隐式模拟”获得国际高性能计算应用领域最高奖——“戈登贝尔奖”,实现了我国高性能计算应用在此奖项上零的突破,成为我国高性能计算应用发展的里程碑。

超级计算机是计算机中功能最强、运算速度最快、存储容量最大的一类计算机,多用于国家高科技领域和尖端技术研究,对国家安全、经济和社会发展具有举足轻重的意义。

超算应用水平是一国超算实力的象征,被喻为“国之重器”,属于战略高科技领域,是世界各国竞相角逐的科技制高点,也是一个国家科技实力的重要标志之一。戈登贝尔奖创建于1987年,由美国计算机协会于每年11月份在美国召开的超算领域顶级会议(SC)颁发,旨在奖励时代前沿的并行计算研究成果,特别是高性能计算创新应用的杰出成就,是全球超算应用领域最高奖。

1987年至2015年,戈登贝尔奖一直是美日专利,如今杨超研究员领衔的“千万核可扩展全球大气动力学全隐式模拟”研究实现了多项“核心突破”,并成功地使“神威·太湖之光”全机1000多万计算核心协同完成。未来,该研究不仅可以用于高分辨率气候模拟和高精细数值天气预报,在航空、地学、能源等科学计算领域也有广阔的应用前景。

“千万核可扩展全球大气动力学全隐式模拟”研究首次实现了千万个计算核心的扩展,可以同时使用1000多万计算核心协同工作,并且随着计算核心的增加和软件性能持续增强。这项研究首次将大气模拟分辨率提升到500米以内,使得重点区域的精细化数值天气预报成为可能。研究将模拟能力也提升了一个数量级,在相同分辨率下,其大气动力学过程可以在一天内模拟一年后的情况,全面提升了我国应对极端气候事件和自然灾害时的减灾防灾能力。

此外,研究引领了全隐求解的新时代。隐式求解和显式求解是解决大型科学与工程问题的两类主要方法。显式研究快捷但不稳定,时间步很小;隐式则稳定但不快捷。相对于显式方法,全隐式求解方法虽然每个时间步计算较慢,但整体却更快更稳定。在神威·太湖之光超级计算机上,全隐式模拟能力是显式的89.5倍,成功攻克了全隐式方法在超大规模众核平台的难关。文/惠敏

## 我科学家发现病原菌致病机制

据新华社电(记者董峻)南京农业大学教授王源超领导的科研团队日前取得一项关于作物疫病发生机制的突破性成果,揭示了病原菌攻击宿主的全新致病机制——“诱饵模式”。这是人类首次在更精准的层面认识这类严重危害植物的病原菌分子机理,为改良农作物的持久抗病性提供了新方向。

国际知名学术杂志《科学》在线发表了这项成果。病原菌是全球粮食、食品和生态安全的重要威胁。通过对一种重要的病原菌——疫霉菌的研究,科学家发现,在入侵植物的早期,疫霉菌向细胞外分泌糖基水解酶XEG1攻击植物细胞壁,而植物则利用水解酶抑制子GIP1抑制其活性。在进化过程中,疫霉菌又获得了XEG1的失活突变体XLP1,以诱饵“DECOY”的方式干扰抑制子GIP1,与糖基水解酶XEG1协同攻击植物的抗病性。

王源超说,“由于糖基水解酶XEG1在卵菌、真菌和细菌中都广泛存在,因此这一发现为开发能诱导植物广谱抗病的生物农药提供了重要的理论基础”。

## 纸也可以“包住火”了



中科院上海硅酸盐研究所的朱英杰研究员带领科研团队成功研发出新型羟基磷灰石“防水耐火纸”。这种“防水耐火纸”表面呈柔和的乳白色,具有高柔韧性,在外观上与普通的植物纤维纸很相似,其优点是既防水又耐火还具有自清洁功能。图为科研人员在实验室内对比展示“防水耐火纸”的防火特性。新华社记者 丁汀摄

本版编辑 刘佳 周明阳  
联系邮箱 jrbxzh@163.com

# 北斗二号：为应用而创新

本报记者 姜天骄

“北斗二号卫星工程”是国家科技重大专项,是我国北斗卫星导航系统建设“三步走”发展战略承前启后的关键一步,任务是建成覆盖我国及亚太地区的北斗二号卫星导航系统,满足我国经济社会和国防军队建设急需,保障国家安全和战略利益。

当前,我国已经建成由14颗组网卫星和32个地面站天地协同组网运行的北斗二号卫星导航系统,并于2012年12月份正式向我国及亚太地区提供导航、定位、授时和短报文通信服务,服务区内系统性能与国外同类系统相当,达到同期国际先进水平。北斗二号导航系统开创了定位、短报文通信、差分增强三种服务融为一体新模式,在国际上属于首创。

定位,就是告诉你每时每刻在什么位置,这是所有卫星导航都可以提供的一种服务。北斗导航终端与国际同类产品相比,最有特色的是其短报文功能,每条能发送120个汉字。举个例子,如果有人喜欢

户外旅游,到深山探险迷了路,又无法用手机、对讲机与外界联系,北斗导航终端不仅可以帮助他测出自己的位置,还可以向卫星发送一个短信,将自己的位置信息告诉救援者,救援者就可以及时赶赴救援地。这是GPS导航仪无法完成的工作,也是北斗卫星的“独门绝技”。

差分增强系统主要用于卫星导航系统信号的增强和误差修正,增加系统的覆盖面积和抗干扰性能,并进一步改进系统的定位性能,减小数据误差。

为应用而创新,让北斗走出了一条符合中国国情、独具中国特色的卫星导航系统发展道路。北斗二号卫星工程建设的圆满完成,使我国拥有了完全自主的高性能北斗二号卫星导航系统,彻底掌握了时空基准控制权,卫星导航产业发展主动权、国际规则制定话语权,从根本上摆脱了对国外卫星导航系统的依赖,为我国经济建设和国防安全提供了有力保障。

北斗二号作为我国服务国际社会的

公共产品,已成为代表中国的国家名片;北斗二号卫星导航系统是第三个提供运行服务的卫星导航系统,可服务50多个国家、30多亿人口;北斗系统是联合国确认的四大核心供应商之一;北斗已进入国际海事、国际民航和国际移动通信组织标准体系,国际主流的手机芯片已支持北斗功能……“稳步推进北斗系统走出去”被纳入国家“一带一路”建设规划,北斗已成为我国对外交往的重要合作项目,显著提升了我国的国际地位与影响力。

北斗二号作为战略性新兴产业,已成为助推我国经济发展的强劲引擎。卫星导航与互联网、移动通信并称为信息领域三大支柱产业。目前,我国已形成由芯片模块、应用终端、运行服务构成的较为完整的北斗产业链,构建形成了北斗产业保障、应用推进和创新三大体系。北斗系统已在关系国计民生、国家安全的多个重点领域和行业得到规模化应用。随着北斗系统与信息技术实现融合发展,融合北斗

系统的“北斗+”创新应用必将推动生产方式和发展模式的变革。

北斗二号作为我国国防安全的重要支撑,已成为我军现代化建设的强军利器。卫星导航系统是典型的军民共用系统,是军队战斗力生成的重要支撑和保障。北斗系统与美国GPS系统、俄格洛纳斯系统一样,已成为我军现代化建设不可或缺的空间信息系统。

根据北斗系统“三步走”发展战略,在确保北斗二号卫星导航系统稳定运行、推进系统应用的同时,我国正在按计划实施北斗三号卫星导航系统建设,将在2020年前后完成35颗北斗三号卫星的组网,为全球用户提供服务。

中国还将加快推进以北斗系统为基础的国家综合PNT(定位、导航、授时)体系建设,争取到2030年前建成基准统一、覆盖无缝、安全可靠、高效便捷的国家综合PNT体系,显著提升国家时空信息服务能力,满足国民经济和国家安全需求。