

“四深”领域这样创新④

量子飞跃 未来可期

本报记者 杨俊峰 徐 靖

近日，一则关于量子科技的新闻引起了社会关注。继2017年起先后完成10比特、12比特、18比特的真纠缠态制备之后，在量子科技领域一直走在世界前沿的中国科学家最近又刷新一项世界纪录——成功实现51个超导量子比特簇态制备和验证，刷新所有量子系统中真纠缠比特数目的世界纪录，并首次演示了基于测量的变分量子算法。

从“墨子号”飞向太空到量子计算机研制成功，时至今日，中国的量子科技已经实现了从跟跑、并跑到部分领跑的历史飞跃，量子通信研究稳居国际引领地位，量子计算研究牢固确立国际第一方阵地位，量子精密测量研究多个方向进入国际领先行列。这也意味着，在“天地一体化”、大数据等“深蓝”技术领域，中国的发展正在加速。

这一切，离不开中国科学技术大学（中国科大）中国科学院量子信息与量子科技创新研究院潘建伟院士的研究团队。

潘建伟院士主要从事量子光学、量子信息和量子力学基础问题检验等方面的研究。作为国际上量子信息实验研究领域的开拓者之一，他是该领域有重要国际影响力的科学家。利用量子光学手段，他在量子调控领域取得了一系列有重要意义的研究成果，尤其是他关于量子通信和多光子纠缠操纵的系统性创新工作使得量子信息实验研究成为近年来物理学发展最迅速的方向之一。

量子飞跃，未来可期，用量子研究助力中华民族的伟大复兴，是潘建伟院士团队梦想。正是对这个梦想的不懈追逐，让潘建伟和他的团队成为世界量子通信领域的领跑者。

量子之梦源于报国

2018年12月18日，在庆祝改革开放40周年大会上，潘建伟被授予“改革先锋”称号。在与大学生交流时，潘建伟谈起了自己的少年时代。

1987年，17岁的潘建伟考入中国科大近代物理系。在这里，潘建伟了解到许多科技前辈的感人故事。潘建伟对大学生们说：“很多外国人不明白，中国当时条件那么差，为什么能够完成‘两弹一星’的壮举？正是由于大批具有家国情怀的科学家，为了国家的科技事业奉献了自己的一切。”

在中国科大，潘建伟被量子理论的神秘深深吸引。随着研究的深入，潘建伟感觉到，量子力学中的各种奇妙的现象，需要更尖端的实验技术才能得以验证。因此，年轻的潘建伟决定出国深造，进入奥地利因斯布鲁克大学攻读博士学位。这次留学，潘建伟不仅为了自己的梦想，更是为了心中那个更大的中国梦。

2001年，潘建伟回到中国科大，在主管部门的经费支持下，开始筹建实验室，组建研究团队。2004年，潘建伟研究组在国际上首次实现五光子纠缠和终端开放的量子隐形传态。《自然》杂志发表了这一成果，并称赞他们“完成了一次壮举”。该成果同时入选英国物理学会和美国物理学会评选出的年度国际物理学重大进展，这是中国科学家的“第一次”。

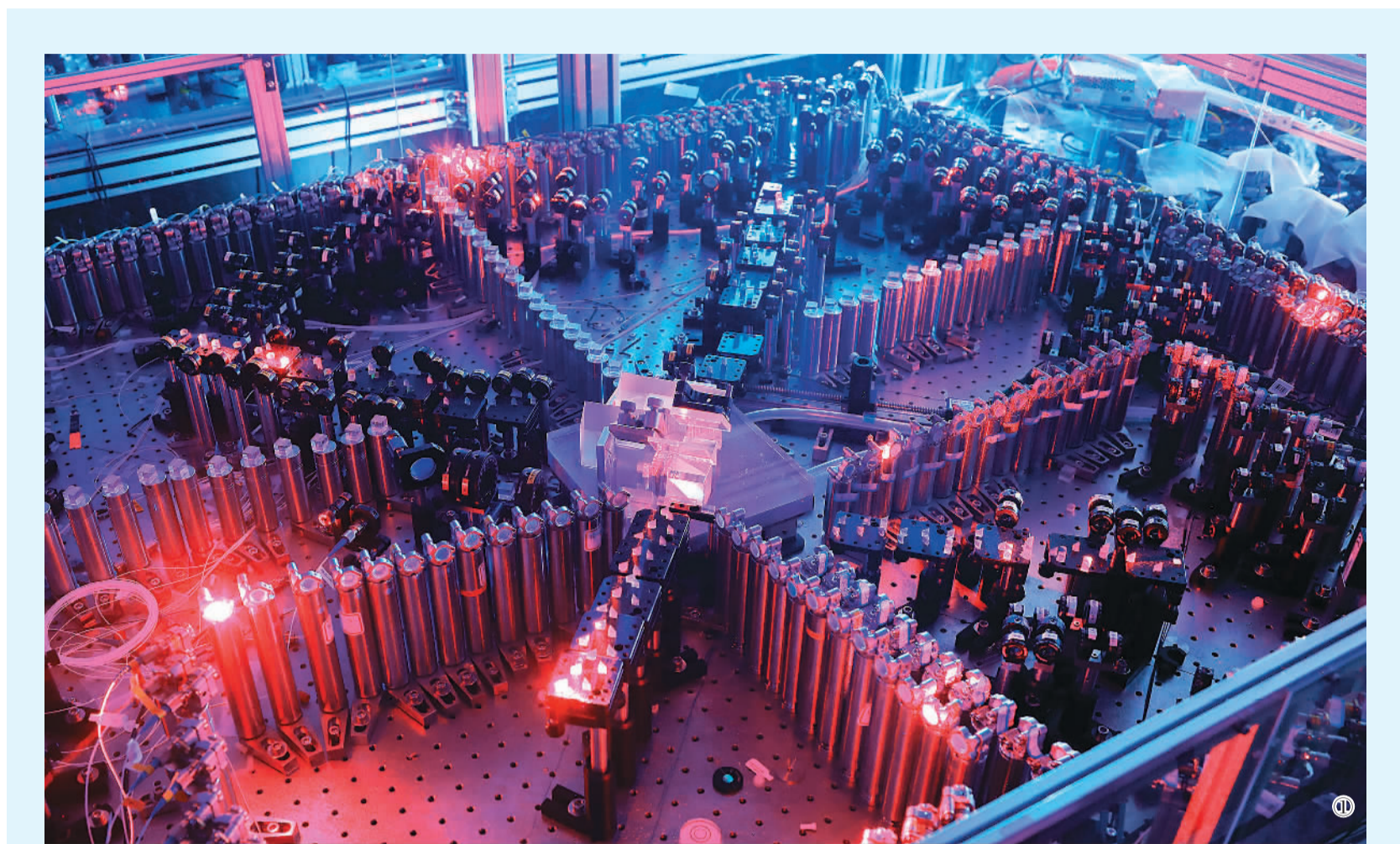
潘建伟说，让他感到骄傲的是，这表明国内研究组在光量子信息方面的工作已经跃居国际领先水平。

2003年，潘建伟提出卫星量子通信这一在国际上没有先例的设想。中国科学院支持潘建伟团队先期开展地面验证试验。经过数年的努力，当各项关键技术的积累已比较充分时，中国科学院又迅速决策，于2011年在国际上率先启动了量子科学实验卫星战略性先导科技专项。

为了推进量子科学实验卫星的研制，中国科学院统筹协调了上海技术物理研究所、微小卫星创新研究院、光电技术研究所、国家天文台、紫金山天文台、国家空间科学中心等院内相关优势研究力量，与中国科大一起协同攻关。潘建伟认为，中国目前科研环境最大的优势就是可以集中力量办大事。正是由于中国科学院的果断决策和快速部署，使得中国在量子太空竞赛中占据先机。

量子通信走在前列

2016年8月，由潘建伟团队研制



图①：图为“九章”量子计算机光量子干涉实物图。

新华社发

图②：2022年9月4日，在北京，一家参展企业代表在2022年国家网络安全宣传周网络安全博览会上介绍量子加密对讲。

新华社记者 刘军喜摄

图③：2022年11月4日，参观者在北京举行的“奋进新时代”主题成就展上观看可编程量子计算系统“祖冲之号”模型。

陈晓根摄（人民视觉）

图④：图为介绍量子计算机用途的科普图。

资料图片

天气预报
天气影响了食品生产、运输和零售贸易等。更加准确地预测天气对很多领域十分重要，比如从灾难中为人类争取更多时间。
计算天气过程的方程式包含很多变量，这使得经典的模拟变得冗长复杂。科学家研究发现控制天气的方程式具有一种隐藏的波动特性，这个可以通过量子计算机来解决。量子计算机可以帮助人类建立更好的气候模型，从而让人类更深入地了解人类是如何影响环境的。这些模型可以成为对未来气候变暖进行评估的工具，帮助人类确定现在需要采取什么措施来防止灾难的发生。

密码演算学
如今大部分网络安全都是依靠大量数据分解为素数解决问题。但通过使用量子计算机来搜索每一个可能答案的方法非常费时，使得“破解密码”变得昂贵而不实用。
量子计算机可以比数字计算机更高效地执行这些计算。新的密码学方法现在正在不断开发但离研究成功还需要一段时间。

人工智能
量子计算机的一个主要应用是人工智能。人工智能是基于从经验中学习的原则，根据不断给出的反馈，机器的反应会越来越准确，直到计算机程序可以算得上“智能”。这个反馈是基于对许多选择可能性的计算，因此人工智能计算问题是量子计算可以解决的一个候选问题。

的“墨子号”量子科学实验卫星在酒泉卫星发射中心发射升空。这是由中国完全自主研发、世界上第一颗空间量子科学实验卫星，为中国引领世界量子通信技术发展奠定了坚实的科学与技术基础。

据量子科学实验卫星工程常务副总师王建宇介绍，“墨子号”在轨测试阶段全面完成了卫星平台测试、有效载荷自测试和天地一体化链路测试，成功构建了星地单向、星地双向、地星单向量子信道，可以满足空间量子科学实验的要求。“墨子号”在世界上首次建立了天地一体化量子通信实验测试平台，具备了开展空间量子科学实验的条件。

“墨子号”的主要应用目标是通

过卫星和地面站之间的量子密钥分发，实现星地量子保密通信，并通过卫星中转实现可覆盖全球的量子保密通信。它可以在外太空以10kbps（千字节/秒）的速率给地面站分发量子密钥，比地面间距离光纤量子通信水平提高了20个数量级以上。这项技术突破使得中国在国际上率先具备了星地量子通信能力。

“墨子号”的另一前沿研究目标是在量子物理基本问题检验领域：即通过千公里量级的量子纠缠分发，首次在空间尺度检验量子力学的非定域性，并利用量子纠缠在地面和卫星之间实现量子隐形传态。此举将使得人类首次具有在空间尺度开展量子科学实验的能力，并为未来在外太空开展

广义相对论、量子引力等物理学基本原理的检验做好了坚实的技术准备。

“墨子号”是中国在过去20年间大力发展量子信息技术的一个缩影。“因为中国在这个领域起步较早，也得到国家重视，所以一直保持一定优势。”潘建伟介绍，针对广域量子通信的发展，国际上有3种技术路线：通过光纤实现城域量子通信网络；通过中继器实现城际量子通信；通过卫星中转实现远距离量子通信。

中国在实用化城域光纤量子通信网络方面已经取得了较多进展。如2007年，实现了光纤量子通信的安全距离首次突破100公里；2008年，建成首个全通型城域量子通信网络；2012年，建成46个节点的规模化量子

通信网络，并将“基于量子通信的高安全通信保障系统”投入永久运行。

在基于可信中继的城际量子通信网络方面，中国已建立光纤总长超2000公里的京沪干线，覆盖四省三市共32个节点，是世界上最远距离的基于可信中继方案的量子安全密钥分发干线，于2017年8月底完成验收。目前，量子京沪干线已接入包括金融、电力、政务等上百多家行业用户，并通过多种安全性测试。

而第三种发展路线——在全球范围内覆盖各类海岛、远洋船舶、驻外机构等光纤难以或者无法到达的地方，“墨子号”的发射填补了这一空白。

潘建伟说，目前“墨子号”已顺利完成三大科学实验任务。“墨子

号”实现了北京和乌鲁木齐之间遥远地点的量子分发，后又完成了双向量子纠缠分发和远距离量子隐形传态实验。在此基础上，完成了“墨子号”和京沪干线的对接，实现了洲际量子保密通信；并对量子力学与引力的融合进行探索。

量子计算实现“优越”

作为一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式，量子计算被认为是下一代信息革命的关键技术。而作为其中“门槛”的“量子优越性”，是指当新生的量子计算原型机，在某个问题上的计算能力超过了最强的传统计算机，就证明其未来有多方超越的可能。

在量子计算领域，由于其本身对环境的干扰非常敏感，潘建伟指出，真要造出一台通用的量子计算机大概还需要15年甚至更长的时间，因为会涉及几百万量子比特的相关操纵。因此，学界定义了3个阶段性的目标：第一阶段是能够操纵50到60个量子比特，使处理某些特殊计算问题时超越传统计算机；第二阶段是能够操纵数百个甚至数千个量子比特，构建某种专用的量子计算机和量子模拟机，揭示某些经典计算机无法解决的复杂物理系统的规律；第三阶段是构建可编程的、通用的量子计算机。

中国在这些方面已取得了比较好的进展。

潘建伟团队在2017年便构建了针对多光子“玻色取样”任务的光量子计算原型机，这是历史上第一台超越早期经典计算机的基于单光子的量子模拟机。

2020年底，中国成功构建了76个光子的量子计算原型机“九章”，实现了具有实用前景的“高斯玻色取样”任务的快速求解，根据最新的经典算法，比当时最快的超级计算机快10万倍。

潘建伟团队成员、中国科大教授陆朝阳说，在费曼提出量子计算的概念近40年后，“九章”在实验上严格地证明了量子计算的加速能力，把梦想变成了现实。和原子、离子、超导电路等类型的量子计算机相比，光量子计算可在室温下、空气中运行，能克服量子噪声极限，结构亦相对比较简单。“九章”使得中国第一次进入国际量子计算第一方阵。

“九章”长啥样？在安徽合肥微尺度物质科学国家研究中心，两个通过光纤连接起来的长3米宽1.5米的不起眼的“盒子”和“盒子”里密布的光学元器件，就是“九章”。“一个用来产生光源，另一个进行干涉，把光信号变成电信号后引到隔壁的探测器进行分析。”陆朝阳的学生、“九章”论文第一作者、95后博士生钟翰森介绍。

此后，潘建伟团队进行了一系列概念和技术创新。2021年，潘建伟、陆朝阳等专家与中国科学院上海微系统与信息技术研究所、国家并行计算机工程技术研究中心合作，成功构建113个光子144模式的量子计算原型机“九章二号”，求解高斯玻色取样数学问题比目前全球最快的超级计算机快100亿倍。

“我们主要有三大突破，首先，显著提高了量子光源的产率、品质和收集效率，将光源关键指标从63%提升到92%。其次，将多光子量子干涉线路从100维度增加到144维度，操纵的光子数从76个增加到113个。第三，新增了可编程功能。”陆朝阳说。

结果显示，“九章二号”的算力实现巨大提升。根据已发表的最优经典算法，“九章二号”求解高斯玻色取样问题的处理速度，比“九章”快10万倍。“九章二号”1毫秒可算出的问题，全球“最快超算”需要上百天。

中国在超导量子计算方面也取得较好进展。

2019年初，中国科学院量子信息与量子科技创新研究院实现了12个量子比特纠缠“簇态”的制备，保真度达到70%，打破了以往10个超导量子比特纠缠的纪录。

而2021年5月，中国已成功研制出62个比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”。目前，已进一步提升到66个超导比特，比目前全球最快的超级计算机快1000万以上。

潘建伟说，中国是目前唯一一个在两种物理系统都实现“量子计算优越性”的国家。

“目前，我们正在向量子计算的第二个目标努力，即用量子模拟机解决重要的科学问题。如研究高温超导的相关机制，推动量子材料本身的发展，预计在3至5年内有较好进展。”

同时，潘建伟希望看到10到15年的努力，发展出能够支撑未来天地一体广域量子通信的相关应用；利用10年左右的时间，实现操纵数百万量子比特，为通用量子计算机的研究奠定基础。