

本报记者 马亚宁

大数据、人工智能、区块链等前沿科技交相碰撞出无穷的未来密码，让“算力”二字从没有像今天这样自带高光，备受世界瞩目。

今天，我国量子计算研究成功攀登至第一个里程碑：量子计算优越性(国外也称之为“量子霸权”)——中国科学技术大学潘建伟、陆朝阳等组成的研究团队与中科院上海微系统所、国家并行计算机工程技术研究中心合作，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。相关论文于 12 月 4 日以“First Release”形式在线发表于国际学术期刊 Science。

根据现有理论，中国“九章”处理高斯玻色取样的速度比目前最快的超级计算机快 100 万亿倍，等效地对比其速度比去年谷歌发布的 53 个超导比特量子计算原型机“悬铃木”快 100 亿倍。

“算力之争”持久战

在气象工程师白冰被追捕的路上，他认识了同样被追捕的宋诚。白冰神秘地拿出一只箱子，“这是一台超弦计算机，是我从气象模拟中心带出来的”。这个有趣的情节，来自科幻作家刘慈欣的中短篇小说《镜子》。故事里的计算机拥有近乎无限的运算和存贮能力——只要给定每个粒子的初始条件，模拟复杂如气象系统都是小菜一碟，就连整个宇宙的运行也会像“镜子”一样，清晰浮现，准确无误。

用计算机模拟现实物理系统，这不仅限于科幻小说中，也是严肃的科学讨论。

超级计算机，曾经是科学界追逐无穷算力的技术法宝。但是，随着量子力学的发展，更多人意识到，实际的量子过程太过复杂，用经典计算模拟量子过程，需要的时间可能会呈指数增长，有效计算是不可能的。1980 年代，科学家费曼提出必须放弃经典计算的老套路，用量子材料造一台新式机器，来自然地解决这些问题——这就是量子计算机！

许多量子科学家认为，量子计算机在特定任务上的计算能力将会远超任何一台经典计算机。2012 年，美国物理学家 John Preskill 将其描述为“量子计算优越性”或称“量子霸权”(quantum supremacy)。科学家们预计，当可以精确操纵的量子比特超过一定数目时，量子计算优越性就可能实现。

经典计算和量子计算的区别在哪里呢？

中国科技大学物理博士林梅说，如果有一个特定的问题，量子计算需要一个小时，经典计算需要上亿年。“从科学家对量子计算优越性的观点来看，有两个关键点，一是操纵的量子比特的数量，二是操纵的量子比特的精准度。只有当两个条件都达到的时候，才能实现量子计算的优越性。”

去年 10 月，谷歌在量子计算方面经十多年布局终于有了里程碑式的表现——国际权威学术杂志 Nature 以“Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”为题，刊发了谷歌的科研工作，谷歌据此宣布实现了量子计算优越性。根据谷歌的论文，该团队选取的用来展示量子计算优越性的特定任务是一种叫做“随机线路采样(Random Circuit Sampling)”的任务。谷歌团队在一个包含 53 个可用量子比特的可编程超导量子处理器上运行“随机线路采样”，用约 200 秒的时间进行了 100 万次采样，同时他们还利用当时世界排名第一的超级计算机 Summit 进行了一个比较。他们预计，同样的任务，Summit 需要算上一万年。“200 秒”PK“一万年”，该团队宣称这意味着量子计算优越性成为现实。

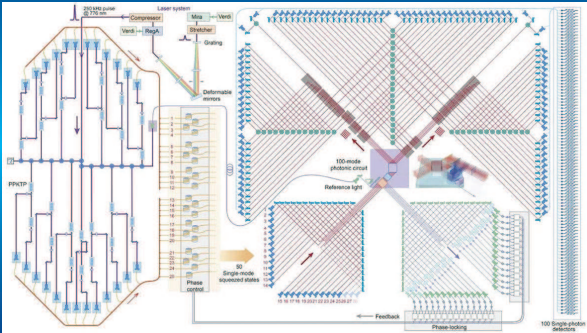
不过，谷歌的量子优越性很快引发了学术界的争议。因为量子计算和经典计算的竞争是一个长期的动态过程，虽然人们操纵量子比特的数量和精准度在不断提高，但是经典计算的算法和硬件也在不断优化，超算工程的潜力更是不可小觑。例如，IBM 宣称实现 53 比特、20 深度的量子随机线路采样，经典模拟完全可以只用两天多时间，甚至还可以更好。

量子计算和经典计算的算力之争，可能是一个长期 battle 的过程，未来一段时间，两者可能会铆足了劲儿地精彩打擂。

量子计算机『九章』厉害了

超越谷歌，中国科学家取得『量子计算优越性』里程碑式进展

“九章”量子计算原型机光路系统原理图



■ 左上方激光系统产生高峰值功率飞秒脉冲；左方 25 个光源通过参量下转换过程产生 50 路单模压缩态输入到右方 100 模式光子干涉网络；最后利用 100 个高效率超导单光子探测器对干涉仪输出光子态进行探测

制图:陆朝阳 彭礼超

■ 光子干涉示意图 制图:文乐 罗弋涵

量子计算“三部曲”

量子计算机在原理上具有超快的并行计算能力，可望通过特定算法在一些具有重大社会和经济价值的问题方面(如密码破译、大数据优化、材料设计、药物分析等)相比经典计算机实现指数级别的加速。当前，研制量子计算机已成为世界科技前沿的最大挑战之一，成为欧美各发达国家角逐的焦点。对于量子计算机的研究，本领域的国际同行公认有三个指标性的发展阶段：

■ **第一阶段：**发展具备 50-100 个量子比特的高精度专用量子计算机，对于一些超级计算机无法解决的高复杂度特定问题实现高效求解，实现计算科学中“量子计算优越性”的里程碑。

■ **第二阶段：**通过对规模化多体量子体系的精确制备、操控与探测，研制可相干操纵数百个量子比特的量子模拟机，用于解决若干超级计算机无法胜任的具有重大实用价值的问题（如量子化

学、新材料设计、优化算法等）。

■ **第三阶段：**通过积累在专用量子计算与模拟机的研制过程中发展起来的各种技术，提高量子比特的操纵精度使之达到能超越量子计算苛刻的容错阈值(>99.9%)，大幅度提高可集成的量子比特数目(百万量级)，实现容错量子逻辑门，研制可编程的通用量子计算原型机。

中国科技大学潘建伟团队一直在光量子信息处理方面处于国际领先水平。2017 年，该团队构建了世界首台超越早期经典计算机(ENIAC)的光量子计算原型机。2019 年，团队进一步研制了确定性偏振、高纯度、高全同性和高效率的国际最高性能单光子源，实现了 20 光子输入 60 模式干涉线路的玻色取样，输出复杂度相当于 48 个量子比特的希尔伯特态空间，逼近了“量子计算优越性”。

“玻色采样”争高下

其实，除了此前谷歌量子霸权展示的“随机线路采样(Random Circuit Sampling)”任务之外，量子计算还有一种秀肌肉的“精英任务”，即玻色采样。这项任务被科学家寄予厚望，是因为对经典算法来说，是极大的挑战，而量子计算机在中小规模下就有可能打败超级计算机。

自“玻色采样”任务提出，世界上陆续有很多个小组从实验上挑战和验证玻色采样。与世界一流实验同步，2017 年中国科大潘建伟、陆朝阳团队同样把目光聚焦到量子点光源，以此为“破题口”，寻找量子计算的“玻色采样”之道。他们用的一种共振激发的量子点光源，产生确定性的高品质单光子。同时，自主设计研发了高效率的线性光学网络。在这种装备武装下，实验上首次实现 5 光子的玻色采样。采样率是之前所有实验的至少 24000 倍，相比于早期的经典计算机，计算能力具有 10-100

倍的提升。

不过，随着研究进一步推进，实验中的低效率始终成为量子计算可扩展的拦路虎。那么短期内，证明量子计算优越性还有希望吗？最终，中国科大潘建伟、陆朝阳团队采用压缩态光源，显著提高了效率。在最终的采样结果里，成功构建了 76 个光子 100 个模式的高斯玻色采样量子计算原型机。科学家给它起了个好看的国风名字“九章”。

得益于团队此前在玻色采样方面的积累，“九章”技术在各个指标上都具有显著的优势。光源方面，拥有国际上唯一同时具备高效率、高全同性、极高亮度和大规模扩展能力的量子光源；具有最大规模(100×100)的干涉技术，还能同时做到全连通、随机矩阵、相位稳定、波包重合好(>99.5%)、通过率高(>98%)。这其中，中科院上海微系统所研制的高性能超导单光子探测器也扮演了重要角色。

“九章”树起里程碑

潘建伟院士团队说，之所以将这台新量子计算机命名为“九章”，是为了纪念中国古代最早的数学专著《九章算术》。《九章算术》是中国古代张苍、耿寿昌所撰写的一部数学专著，它的出现标志中国古代数学形成了完整的体系，是一部具有里程碑意义的历史著作。而这台叫作“九章”的玻色采样新机器，同样具有重要的里程碑意义。

根据目前最优的经典算法，“九章”花 200 秒采集到的 5000 个“玻色样本”：如果用我国的“太湖之光”，需要运行 25 亿年；如果用目前世界排名第一的超级计算机“富岳”，也需要 6 亿年。这样的优势十分明显。

再等效地对比去年谷歌发布的 53 比特量子计算原型机“悬铃木”：对于“悬铃木”来说，200 秒完成的任务，IBM 超算 Summit 需要 2 天，考虑 Summit 和富岳的算力差距，“九章”等效地比谷歌的“悬铃木”快 100 亿倍。

《科学》杂志审稿人评价该工作是“一个最先进的实验”(a state-of-the-art experiment)，“一个重大成就”(a major achievement)。研究人员希望这个工作能够激发更多的经典算法模拟方面的工作，也预计将来会有提升的空间。量子优越性实验并不是一个一蹴而就的工作，而是更快的经典算法和不断提升的量子计算硬件之间的竞争，但最终量子并行性会产生经典计算机无法企及的算力。

值得一提的是，“九章”的研制成功，不仅是取得了“量子计算优越性”的里程碑式进展，也为第二步——解决若干超级计算机无法胜任的具有重大实用价值的问题提供了潜在的前景。“因为九章量子计算原型机所完成的高斯玻色取样算法在图论、机器学习、量子化学等领域具有潜在应用。”林梅说：“除了秀肌肉以外，解决现实问题，其实也是科学家们研发量子计算机的初衷。”

■ 光子干涉装置集成在 20cm×20cm 的超低膨胀稳定衬底玻璃上，用于实现 50 路单模压缩态间的两两干涉，并高精度地锁定任意两路光束间的相位

马汉汉 梁竞 邓宇皓 摄

100 模式相位稳定干涉仪

