

# 2023 年量子信息热点回眸

李传锋

中国科学技术大学物理学院;中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室,合肥 230026

**摘要** 回顾了量子信息领域在 2023 年的重大进展,盘点了量子计算与量子模拟、量子通信与量子网络、量子精密测量和量子信息物理等量子信息研究领域的研究热点。量子信息的发展会带来物理上安全的通信、高效的信息处理和精密的测量等,对国家信息安全及人类生产生活方式产生重大影响。

**关键词** 量子计算与量子模拟;量子通信与量子网络;量子精密测量;量子信息物理

量子信息是量子力学与信息论相结合的产物,核心思想是利用量子态的操控来实现各种信息过程,研究领域包括量子计算与量子模拟、量子通信、量子精密测量、量子信息基本物理问题,以及把各种量子信息过程相结合的量子网络。量子信息涉及的物理系统包括光学系统、原子、超导、半导体、离子阱、固态色心、稀土离子掺杂晶体等。这些物理系统的共同特点是具有非常好的相干性,所以除了光学系统外,大多需要放在低温环境或者需要进行激光冷却,以增强其相干性。

早在 1981 年,费曼提出利用遵循量子力学的装置来模拟量子系统,此后物理学家多伊奇提出了通用量子计算机的概念。1984 年物理学家班奈特和密码学家布拉萨德提出了量子密钥分发的 BB84 协议。直到 1994 年数学家肖尔提出了大数分解算法,对现有的密码体系造成了巨大威胁,量子信息

才引起广泛关注,进入蓬勃发展阶段。经过几十年的发展,量子信息已经成长为和物理学并列的重要学科,各个研究领域均取得重要进展。量子计算与量子模拟领域已经在光学系统<sup>[1-2]</sup>和超导系统<sup>[3]</sup>等领域展示了量子优势,在处理高斯玻色取样等问题上超越了经典超级计算机的计算能力。量子通信领域中,城域量子密钥分发技术已逐步走向实用化,基于量子卫星实现了千公里的量子纠缠分发<sup>[4]</sup>和地对星的量子隐形传态<sup>[5]</sup>等。量子精密测量领域研制出超精准的光晶格钟<sup>[6]</sup>,首次在毫米尺度验证广义相对论。量子网络领域则实现了 3 节点的量子网络<sup>[7]</sup>。

2023 年,量子信息研究取得了激动人心的成果。本文将从量子计算与量子模拟、量子通信与量子网络、量子精密测量、量子信息基本物理问题等方面分别介绍。

收稿日期:2023-12-31;修回日期:2024-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11821404)

作者简介:李传锋,教授,研究方向为量子光学与量子信息,电子信箱:cfl@ustc.edu.cn

引用格式:李传锋. 2023 年量子信息热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 245-265; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.016

## 1 量子计算与量子模拟

量子计算与量子模拟是近年来量子信息最活跃的研究领域。量子计算的核心思想是利用量子力学的叠加原理并行处理信息,在某些问题的求解上获得超越经典计算机的信息处理能力。典型例子就是大数分解的肖尔算法。量子计算机是通用、可编程、可纠错的。而量子模拟机则是专门解决某一问题的专用的量子计算机,不需要通用、可编程和可纠错。量子计算与量子模拟在生物制药、密码破译、数据搜索等问题上具有重要用途。

### 1.1 超导电路系统

量子计算机的量子比特必须能够承受噪声,因为噪声会影响量子计算机计算的准确性。实用量子计算所需的误差率将远远低于物理量子比特所能达到的误差率。量子纠错通过将逻辑量子比特编码到许多物理量子比特中,提供了一条实现算法相关错误率的途径。

表面码是目前广受关注的量子纠错码之一,它比其他代码具有更高的噪声阈值。表面码是将逻辑量子比特编码为二维物理量子比特阵列的联合状态。随着物理量子比特阵列的增大,只要量子比特收到的噪声低于噪声阈值,这些编码就能提高误差抑制能力。然而要制造一个足够大的设备来处理编码信息,同时噪声又不超过阈值,具有很大的挑战性。

在2023年2月发表的论文<sup>[8]</sup>中,谷歌量子人工智能(artificial intelligence, AI)团队制造了1台拥有72个量子比特的超导量子处理器(小型的量子计算机)。团队用这台量子处理器运行了2种表面码:距离-5(一种在49个物理量子比特上编码的较大表面码)和距离-3(一种在17个物理量子比特上编码的较小表面码)(图1<sup>[8]</sup>)。要创建如此强大的量子操作,需要对校准技术进行大量改进,加深对设备物理特性的理解,并改进算法,以识别在纠错过程中发生了哪些类型的错误等。通过这些改进,团队发现较大的表面码比较小的表面码(每周期3.028%的逻辑误差)具有更好的逻辑量子比特性能(每周期2.914%的逻辑误差)。这些结果标志着

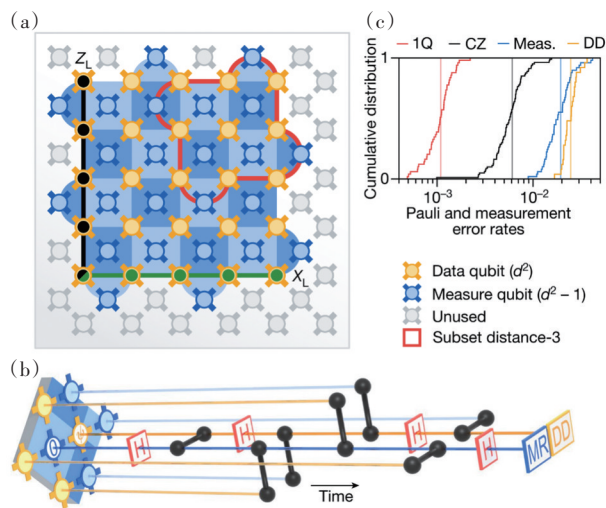


图1 实现表面码逻辑量子比特

量子纠错开始随着量子比特数的增加而提高性能,为达到计算所需的逻辑误差率指明了道路。

量子硬件领域的最新进展,尤其是超导量子处理器,验证了可编程量子计算的潜力。虽然这些器件已成功用于实现随机量子电路采样,并展示了数十个量子比特的量子计算优势,但系统量子态的保真度相对较低( $<1\%$ ),不足以用于实际应用。

随着量子比特数量的增加,可扩展地产生真正的多方纠缠对于量子信息技术的基础研究和实际应用都非常重要。一方面,多体纠缠显示了量子力学预言与局域实在论之间的强烈矛盾,可用于研究量子到经典的转变。另一方面,实现大规模纠缠是量子系统质量和可控性的基准,对于实现通用量子计算至关重要。然而,在最先进的量子设备上可扩展地生成真正的多体纠缠具有挑战性,需要精确的量子门和高效的验证协议。中国科学技术大学Cao等<sup>[9]</sup>展示了一种在66个量子比特超导量子处理器上制备和验证中等规模真正纠缠的可扩展方法。研究团队使用了高保真并行量子门,并将并行单量子门和双量子门的保真度分别优化为99.91%和99.05%。通过高效的随机保真度估计,实现了51量子比特的一维簇态和30量子比特的二维簇态(图2<sup>[9]</sup>),纠缠态保真度分别为 $0.637 \pm 0.030$ 和 $0.671 \pm 0.006$ 。在高保真簇态的基础上,研究团队进一步展示了用于扰动平面码的基于测量的变分量量子本征求解器的原理验证实现。这项工作为准

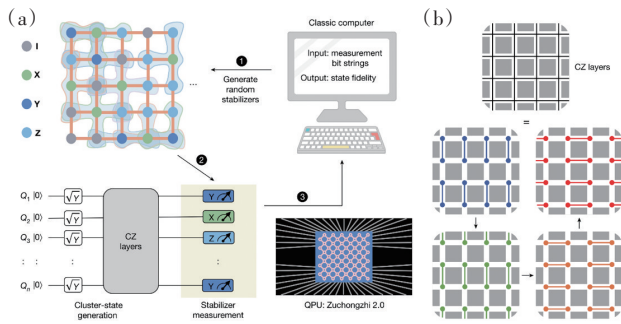


图2 簇态的制备和验证

备和验证几百个量子比特的纠缠提供了一种可行的方法,从而使超导量子系统的中等规模量子计算成为可能。

建造量子计算机的主要障碍之一是环境引起的退相干,它会破坏存储在量子比特中的量子信息。退相干引起的错误可以通过重复应用量子纠错(QEC)程序来纠正,即在高维希尔伯特空间中对逻辑量子比特进行编码,这样不同的错误会将系统投射到不同的正交子空间中,从而可以在不干扰所存储量子信息的情况下明确地识别和纠正错误。

在大多数量子纠错编码中,逻辑量子比特都是用一些离散变量(如光子数)来编码,这样编码后的量子信息就能在处理后被明确提取出来。在过去的10年中,已经用各种离散变量编码方案演示了重复的量子纠错。然而,如何延长编码逻辑量子比特的寿命,使其超过现有最佳物理量子比特的寿命,仍然是一个难题,这也是判断量子纠错实际用途的一个平衡点。在2023年3月发表的论文中,南方科技大学 Ni 等<sup>[10]</sup>展示了超导电路量子电动力学架构中的量子纠错程序,逻辑量子比特在微波腔的光子数态中进行二元编码,并色散耦合到辅助超导量子比特。通过向辅助量子比特施加具有定制频率梳的脉冲,研究团队可以高保真地重复提取错误校正子(error syndrome),并通过反馈控制进行相应的纠错,从而将编码逻辑量子比特寿命提高了约16%,超过了盈亏平衡点(图3<sup>[10]</sup>)。该工作表明了硬件高效离散变量编码在容错量子计算中的潜力。这也是国际上首次通过主动的重复错误探测和纠错过程实现延长量子信息的存储时间超越盈亏平衡点,具有里程碑式的重要意义。

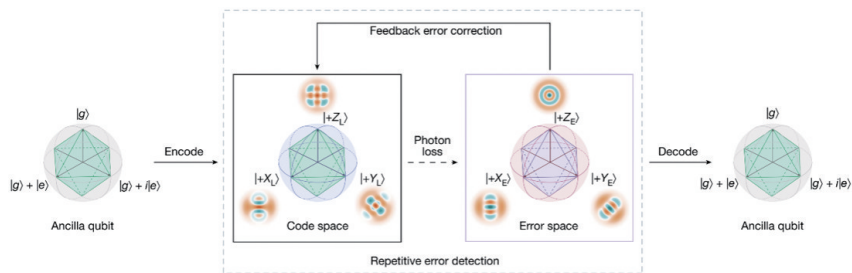


图3 使用最低阶光子数态编码逻辑量子位的量子纠错程序示意

《Nature》2023年第616期中,耶鲁大学 Sivak 等<sup>[11]</sup>发表了与 Ni 等类似的工作,他们在超导量子电路中利用 GKP(Gottesman-Kitaev-Preskill) 编码展示了一种完全稳定和纠错的逻辑量子比特(图4<sup>[11]</sup>),其量子相干性大大长于参与量子纠错过程的所有不完美量子元件的量子相干性,以  $G=2.27 \pm 0.07$  的相干性增益击败了其中最好的元件。他们结合了多个领域的创新成果,包括超导量子电路的制备和无模型强化学习等,从而实现了这一性能。

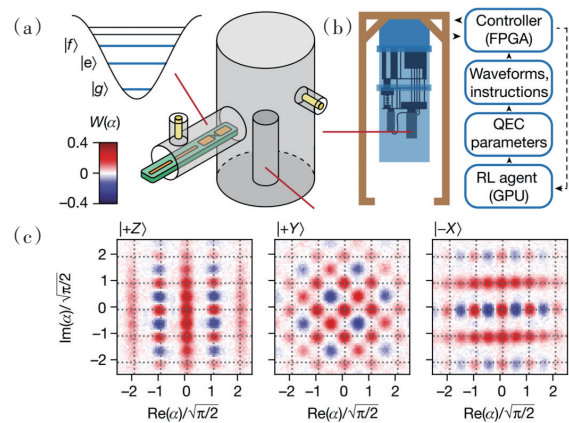


图4 量子纠错的实验系统

大多数研究者认为,诸如因式分解或相位估计等先进的量子算法将需要量子纠错。然而,目前的量子处理器是否能够可靠地运行其他深度更短的量子电路,从而为解决实际问题提供优势,这一点还存在激烈的争论。这里存在一个有趣的问题:在量子处理器输出结果的保真度很低的情况下,理想状态的特性是否也能被获取?在高噪声设备上实现近期量子优势的误差缓解方法恰好解决了这个问题,即人们可以利用经典后处理方法,从高噪声量子电路的多次不同运行中得出精确的期望值。

在2023年6月的论文中<sup>[12]</sup>,国际商业机器公司(International Business Machines, IBM)量子团队报告了在一个有噪声的127量子比特处理器上进行的实验(图5<sup>[12]</sup>),其运行的量子电路具有多达60层的双量子比特门,共计2880个CNOT门(可控非门),并展示了对电路量的精确期望值的测量,其规模超过了暴力经典计算。实验结果表明了量子计算在前容错时代的实用性。这些实验结果得益于超导处理器在这种规模下的相干性和校准方面的进步,以及在如此大的设备上表征和可控操纵噪声的能力。团队将测得的期望值与可精确验证的电路输出进行比较,从而确定了期望值的准确性。在强纠缠状态下,量子计算机能提供正确的结果,而基于纯态的一维(矩阵乘积态, MPS)和二维(等距张量网络态, isoTNS)张量网络方法等领先的经典近似方法则无法提供正确的结果。这些实验展示了实现近期量子应用的基础工具。

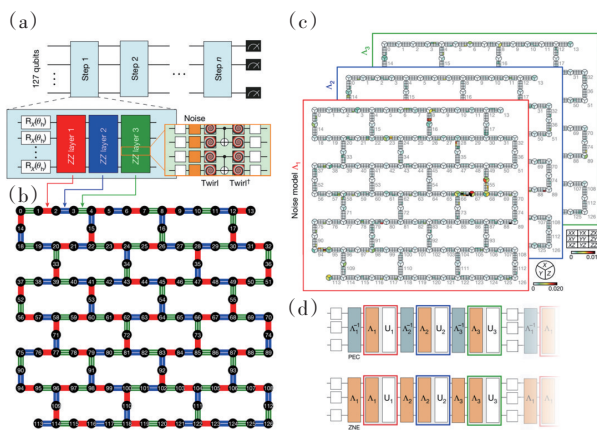


图5 127个量子比特的时间演化电路的噪声表征和标度

量子模拟器通常由一组量子粒子构成,这些粒子被可控地放置在晶格上,然后允许它们相互影响,但这也存在局限性。基于中性原子的量子模拟器缺乏独立控制和读出单个原子的灵活性,基于囚禁离子的量子系统难以扩展到数十个离子以上,而超导量子电路则仅限于量子比特之间的局部相互作用。加州理工学院Zhang等<sup>[13]</sup>通过将超导量子比特与微波光子带隙超材料波导连接起来,构建了一个多体量子模拟器。这种超导量子比特-超材料混合方法是开发大规模量子模拟平台的一条新途径,可将晶格进行二维扩展,容纳更多数量的量子粒子。

这种基于超材料的新型超导量子模拟器如图6<sup>[13]</sup>所示,其中的量子比特通过可扩展的光子带隙超材料连接,从而实现了具有可调跳变范围和现场相互作用的一维玻色-哈伯德模型。利用单个位点控制和读出,研究团队描述了多体淬火动力学的测量结果统计,从而实现了原位哈密顿量学习。此外,结果统计还揭示了跳跃范围增大的影响,显示了从可整性到遍历性的预测交叉。本工作能够研究混沌多体演化中出现的随机性,并从更广泛的意义上扩展了利用超导电路进行量子模拟的哈密顿量。

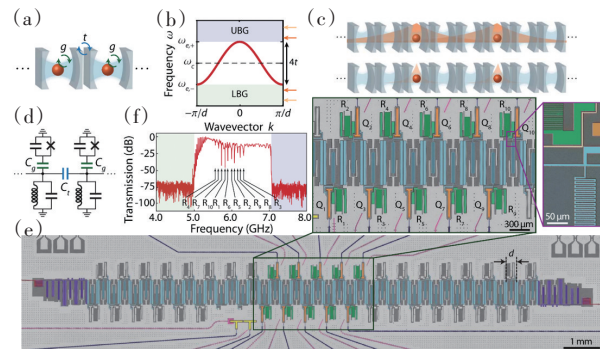


图6 基于超材料的超导量子模拟器

粒子的不可区分性是量子力学的基本原理。对于迄今观测到的所有基本粒子和准粒子,包括费米子、玻色子和阿贝尔任意子(anyons)来说,这一原理保证了相同粒子的编织(braiding)会使系统保持不变。然而,在二维空间中,存在着一种耐人寻味的可能性:非阿贝尔任意子的编织会导致拓扑简并波函数空间的旋转。因此,它可以在不违反不可

区分性原则的情况下改变系统的观测值。尽管对非阿贝尔任意子有完善的数学描述和众多的理论建议,但几十年来,对其交换统计的实验观测仍然遥不可及。量子处理器上产生的可控多体量子态为探索这些基本现象提供了另一条途径。传统固态平台通常涉及准粒子的哈密顿量动力学,而超导量子处理器则可以通过单元门直接操纵多体波函数。基于稳定子(stabilizer)码可以承载投影非阿贝尔伊辛任意子的预测,谷歌量子AI团队及其合作者利用超导量子处理器实现了一种广义稳定子码和统一的协议,以产生和编织它们<sup>[14]</sup>。研究人员可以通过实验验证任意子的融合规则(图7<sup>[14]</sup>),并通过编织操作实现其统计研究。此外,还研究了将任意子用于量子计算的前景,并利用编织操作创建了一个任意子纠缠态,编码3个逻辑量子比特。该工作提供了关于非阿贝尔编织的新见解,通过未来加入纠错来实现拓扑保护,可以为容错量子计算开辟一条新道路。

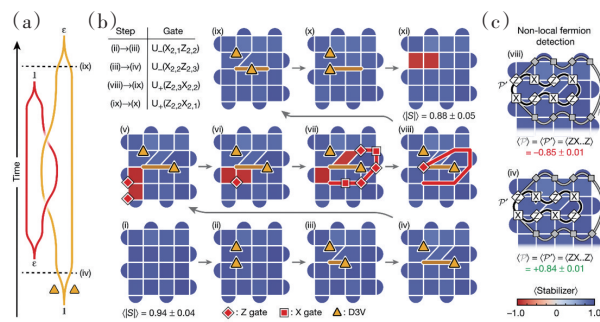


图7 演示任意子的基本融合规则

量子计算机有望以比传统计算机快得多的速度解决某些计算问题。然而,目前的量子处理器受限于其规模和明显的错误率。因此,最近展示量子加速的努力主要集中在经典计算起来困难,自然适合当前量子硬件的问题上,例如,从复杂的,虽然并不明确有用的,概率分布中采样。

IBM量子团队介绍并实验演示了一种量子算法,同样非常适合当前的硬件,能从多个应用中出现的复杂分布中采样<sup>[15]</sup>。该算法采用马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)这一著名的迭代技术,对经典伊辛模型(图8<sup>[15]</sup>)的波尔兹曼分布进行采样。与大多数近期量子算法不同的是,这一算法虽然很难进行

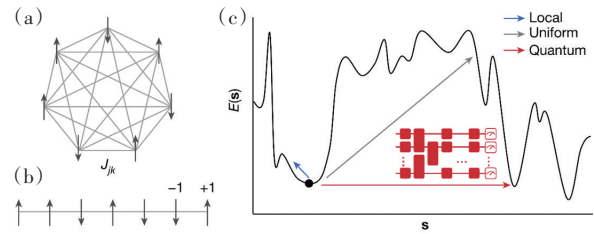


图8 伊辛模型表示

经典模拟,但可以证明会收敛到正确的分布。但与大多数MCMC算法一样,它的收敛率很难从理论上确定,因此研究团队转而通过实验和模拟来分析。在利用一个27量子比特的超导量子处理器进行的实验中,团队提出的量子增强MCMC算法比常见的经典MCMC算法收敛的迭代次数更少,这表明其对噪声具有非同寻常的鲁棒性。团队证实量子增强MCMC算法相比经典MCMC算法具有三次方到四次方的多项式加速。这种提速如果能持续到更大的尺度,就能缓解机器学习、统计物理和优化中这一抽样问题带来的计算瓶颈。因此,该算法为量子计算机解决有用而不仅仅是困难的采样问题开辟了一条新途径。

## 1.2 冷原子系统

传统超导电性是由声子介导的电荷载流子——电子或空穴配对产生的。然而,对于“非常规”超导而言,自从20世纪80年代发现在100 K以上的温度下具有超导性的材料以来,配对的起源一直是现代量子多体物理学中备受争议的话题。当电荷载流子被引入具有反铁磁秩序的电绝缘体时,这种高温超导性就会显现出来,在这种结构中,相邻晶格位点上的电子自旋(固有角动量)会朝向不同的方向。一些基于简化模型的理论预测,这种磁性背景会导致电荷载流子之间产生吸引力。然而,在这些复杂的材料中,强烈的相互作用和许多相互竞争的过程使得很难在实验中分离出单一的效应,也很难在实验室中证明磁性介导的配对过程。

德国马克斯·普朗克量子光学研究所的Hirthe等<sup>[16]</sup>通过实验观察到了这一由来已久的理论预测,报告了在超冷原子的量子气体中由于磁关联而产生的空穴对。研究团队在大相互作用下扩展了费米-哈伯德梯子,并设置了一个势能偏移,从而有

效地实现了混合维度系统。通过设计具有混合维度耦合的掺杂反铁磁梯,在短程上抑制了空穴的泡利阻塞(图9<sup>[16]</sup>)。这导致了结合能的显著增加和空穴对尺寸的减小,使团队能够观察到空穴对主要占据梯子的同一梯级。研究团队发现空穴-空穴结合

能与超交换能相当,而且随着掺杂量的增加,观察到空穴对分布的空间结构,这表明束缚空穴对之间存在排斥。通过设计一种能强烈增强结合能的构型,研究团队确定了一种提高超导临界温度的策略。

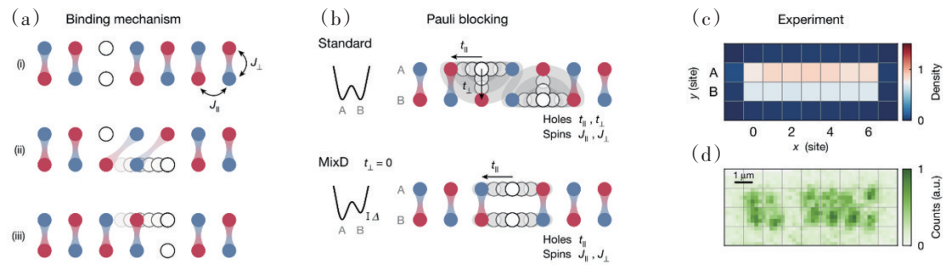


图9 混合维度梯子中的空穴配对

前文介绍超导量子计算进展时提到,把总是容易出错的量子处理器的规模扩大是一项艰巨的任务。尽管量子纠错最终有望实现容错量子计算,但所需的量子比特开销和错误阈值却令人望而生畏。最近,有人提出了一种方案,即在系统中嵌入所谓的“旁观者”量子比特,用来读出累积的噪声。然后实时利用这些信息来抵消正在执行计算的“数据”量子比特的退相干,对数据量子比特错误进行实时、连贯的修正。在2023年6月发表的论文中,芝加哥大学 Singh 等<sup>[17]</sup>使用铯“旁观者”量子比特阵列来修正铷数据量子比特阵列上的相关相位误差<sup>[17]</sup>。实验系统由  $10 \times 10$  的铯原子阵列和  $11 \times 11$  的铷原子阵列组成(图10<sup>[17]</sup>)。通过结合序中读出、数据处理和前馈操作,这些相关错误在量子电路的执行过程中被抑制。该协议广泛适用于量子信息平台,并

为扩展中性原子量子处理器建立了关键工具:原子阵列的电路中读出、实时处理和前反馈,以及原子量子比特的相干电路中重载。

磁序是指自旋(磁矩)在晶格上排列的各种方式。几何阻挫是指晶格对称性所允许的可能的自旋排列与使其相互作用最小化的排列之间的不相容性。这种现象抑制了磁有序,并可能导致许多新出现的相位,这些相位通过强度相似的竞争性自旋相互作用而变得稳定。然而,在许多情况下,这些相的性质并不明确。

在由3个晶格位点形成的三角形中可以看到几何挫折,其中通过反铁磁相互作用(使相邻自旋向相反方向排列的相互作用)耦合的自旋不能同时与相邻的2个自旋反排列。如果通过一种称为掺杂的过程在这样的体系中引入移动电荷,就会产生更复杂的相,因为移动电荷的加入会改变填充度——每个晶格位点的平均自旋数。在没有几何阻挫的情况下,电荷运动可以扰乱磁序,同时促进强关联相的形成。然而,随着阻挫的增加,磁性的结果如何,以及移动电荷是破坏还是增加磁性秩序一直备受争议。

哈佛大学 Xu 等<sup>[18]</sup>利用束缚在光晶格中的超冷原子,构建了一个量子模拟器。原子在光晶格中的运动及其相互作用产生了哈伯德模型。研究团队通过调整光的强度来改变晶格的几何形状,并使用

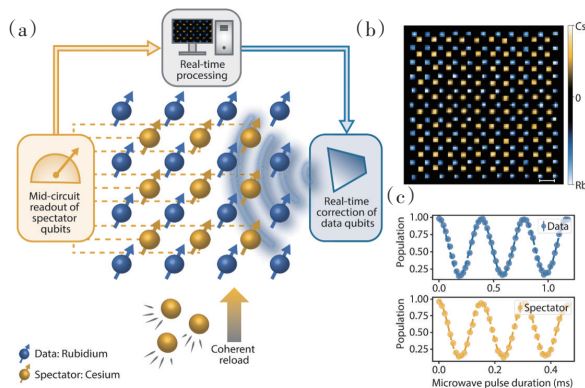


图10 利用双种原子阵列实现旁观者量子比特协议

光学显微镜直接对每个晶格部位的单原子及其内部状态进行成像。最后通过对原子排列和自旋状态的成像,获得了系统的磁性(图 11<sup>[18]</sup>)。

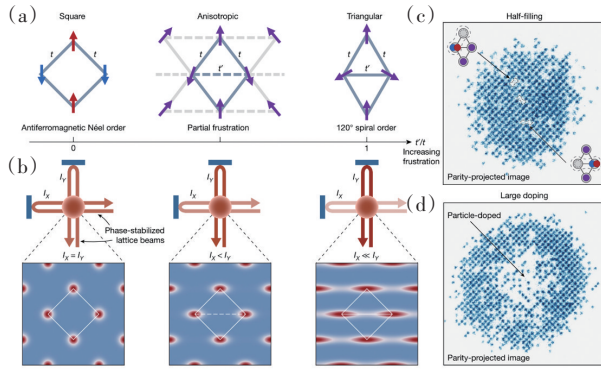


图 11 用量子气体显微镜研究可调三角形晶格上的阻挫

在每个位点有一个原子的正方形晶格中,反铁磁相互作用促使自旋与相邻原子反排列。当把几何形状从正方形变为三角形时,几何挫折增加了。反过来,反铁磁关联的空间范围减小了,磁关联的对称性也根据底层几何形状进行了调整,向螺旋自旋模式过渡。然后通过引入空穴或双占位形式的移动电荷,改变了值为 1 的填充度。然而,在三角形晶格中,电荷运动增加了填充度为 1 以下的反铁磁相关性,并强烈抑制,甚至逆转了填充度为 1 以上的铁磁相关性(与相邻自旋指向相同方向有关的相关性)。磁序的这种非对称演化表明,在磁交换相互作用之外还存在一种目前未知的机制,这种相互作用导致了哈伯德模型中的反铁磁性。

霍尔效应源自于带电粒子在磁场中的运动,它对材料的描述有着深远的影响,已经远远超出了凝聚态物质的范畴。尽管超冷原子气体是电中性的,但它可以模拟固体中的霍尔效应,实验中的关键是引入一个合成维度。

意大利佛罗伦萨大学 Zhou 等<sup>[19]</sup>将费米态镱原子放置于一维光学晶格中,用镱原子的 2 个超精细态作为正交合成维度,利用人工磁场就可以实现一个合成梯子(synthetic ladder),由此构造出一个原子量子模拟器(图 12<sup>[19]</sup>)。在这个模拟器中,通过倾斜光晶格以产生原子流,研究人员研究了超冷费米原子在合成梯子中的运动。他们通过可控淬灭动力学,测量了一系列合成隧穿和原子相互作用强度

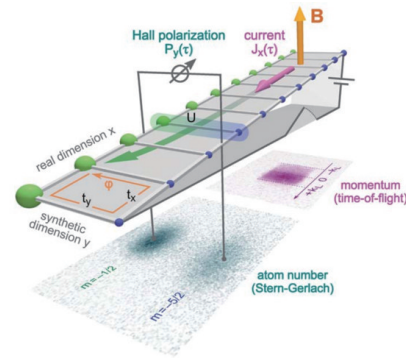


图 12 利用原子量子模拟器研究霍尔效应

下的霍尔响应(Hall response)。实验结果表明,在相互作用强度超过阈值后,霍尔响应就会变得与相互作用无关,这与近期的理论分析是一致的。由于具有强关联和有限温度的特点,这个冷原子实验能够达到目前理论计算难以达到的状态,这表明量子模拟在描述物质强相关拓扑状态方面的强大能力。

在量子处理器上执行大规模、有用的算法需要非常低的门错误率(一般低于 $\sim 10^{-10}$ ),远远低于任何物理设备可能实现的门错误率。量子纠错(QEC)理论的里程碑式发展为这一挑战提供了解决方案,关键思路是利用纠缠将逻辑量子比特分散到许多冗余的物理量子比特上,这样,就算任何给定的物理量子比特发生故障,也不会破坏底层的逻辑信息。原则上,只要有足够低的物理错误率和足够多的量子比特,逻辑量子比特就能以极高的保真度运行,为实现大规模算法提供了一条可行的途径。

《Nature》在线发表了哈佛大学 Bluvstein 等<sup>[20]</sup>的论文,在量子纠错方面取得了前所未有的进展。他们利用中性原子阵列实现了基于编码逻辑量子比特的可编程量子处理器(图 13),该处理器最多可运行 280 个物理量子比特。利用逻辑级控制和可重构中性原子阵列中的分区架构,该系统结合了高双量子比特门保真度、任意连接性,以及完全可编程的单量子比特旋转和线路中读出。通过在该逻辑处理器运行各类编码,展示了通过将表面码(surface code)距离从  $d=3$  扩展到  $d=7$  来改进双量子比特逻辑门、制备具有盈亏平衡保真度的色码(color code)量子比特、容错制备逻辑 GHZ 纠缠态、实现前反馈纠缠的量子隐形传态,以及实现 40 个

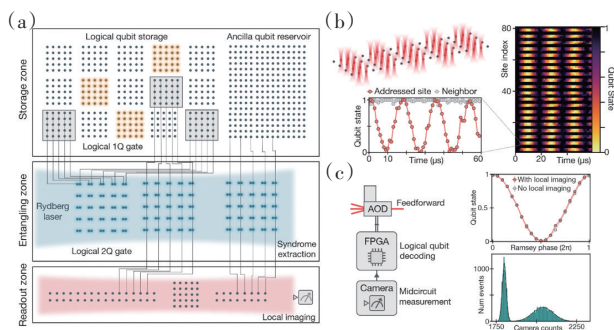


图13 基于可重构原子阵列的可编程量子逻辑处理器

色码量子比特的操作。他们还实现了具有多达48个逻辑量子比特的复杂计算采样电路。这种逻辑编码大大提高了错误检测的算法性能,这些结果预示着早期纠错量子计算的到来,并为大规模逻辑处理器的发展指明了道路。

### 1.3 离子阱系统

探索新物相一直是物理学的前沿领域。其中量子物相特别有趣,因为它具有经典物相所没有的非局域性和宏观性。一维量子系统可通过各种计算或分析方法进行有效描述,因而受到特别关注。具有长程相互作用的一维量子系统可以表现出具有长程序的相。一个典型的例子是具有长程铁磁相互作用的自旋1/2粒子链,它具有连续的旋转 $U(1)$ 对称性。在没有磁场的情况下,自旋链可以展现一种奇异相,在这种相中,自旋处于对称平面上集体态的叠加态,没有优先取向,连续对称性的自发破缺表现为整个链上的磁关联。这种连续对称性破缺(CSB)的物相从未在一维系统中观测到过。因为在大多数物理系统中,相互作用都是短程的,阻碍了这种相在一维中的出现。

在最近的工作中,杜克大学Feng等<sup>[21]</sup>研究了一维离子阱量子模拟器中的CSB。通过同时单独控制由23束光束组成的线性阵列来处理单个离子,研究团队使系统处于CSB相,表现出长程自旋-自旋关联(图14<sup>[21]</sup>)。通过对自旋的单独控制,可以对自旋之间的相互作用进行精确地工程设计和测量,并对对称破缺扰动下的非平衡动力学进行研究。这些成果代表了量子物相控制的一个前沿领域,为研究低维系统中的新量子相和远离平衡动力学开辟了一条途径。

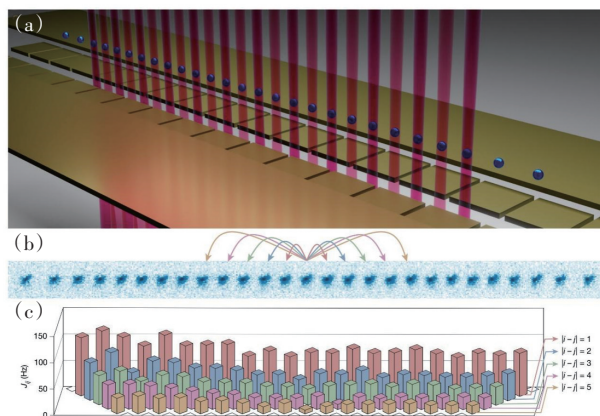


图14 一维离子阱系统

纠缠是量子世界区别于经典世界的关键要素,对量子物理的各个方面都有影响,从基础方面到量子计算,再到凝聚态系统和量子化学,引起了人们浓厚的研究兴趣。在量子多体问题中,纠缠导致其复杂性随系统规模呈指数级增长。虽然经典模拟难以解决多体问题,但量子模拟实验本身就利用了量子系统,有能力展现大规模纠缠。

奥地利科学院量子光学与量子信息研究所Joshi等<sup>[22]</sup>利用离子阱,以纠缠哈密顿(entanglement Hamiltonian, EH)为基础,对大型子系统的约化密度算符进行有效描述,从而对纠缠进行了实验研究<sup>[22]</sup>。研究团队在51离子可编程量子模拟器上制备了一维XXZ海森堡链的基态和激发态,并对多达20个晶格点位的子系统进行了EH的样本高效“学习”(learning)(图15<sup>[22]</sup>)。该实验为EH的局部结构提供了令人信服的证据。观察结果首次证实了比索纳诺(Bisognano)和维希曼(Wichmann)对量子场论的基本预言及其在共形场理论(CFTs)中的推广。研究结果还显示了冯·诺依曼纠缠熵从基态到激发态、从面积律到体积律的过渡。

霍尼韦尔分拆出的量子计算公司Quantinuum描述了一种新型量子电荷耦合器件(QCCD)架构,并对其进行了基准测试<sup>[23]</sup>。该架构已应用于其最新的离子阱量子计算系统Quantinuum H2上(图16<sup>[23]</sup>)。它基于一个具有周期性边界条件的线性离子阱,类似于赛道。新系统成功地集成了对未来可扩展性至关重要的几项技术——包括电极广播、多层射频路由和磁光阱(MOT)加载——同时保持并

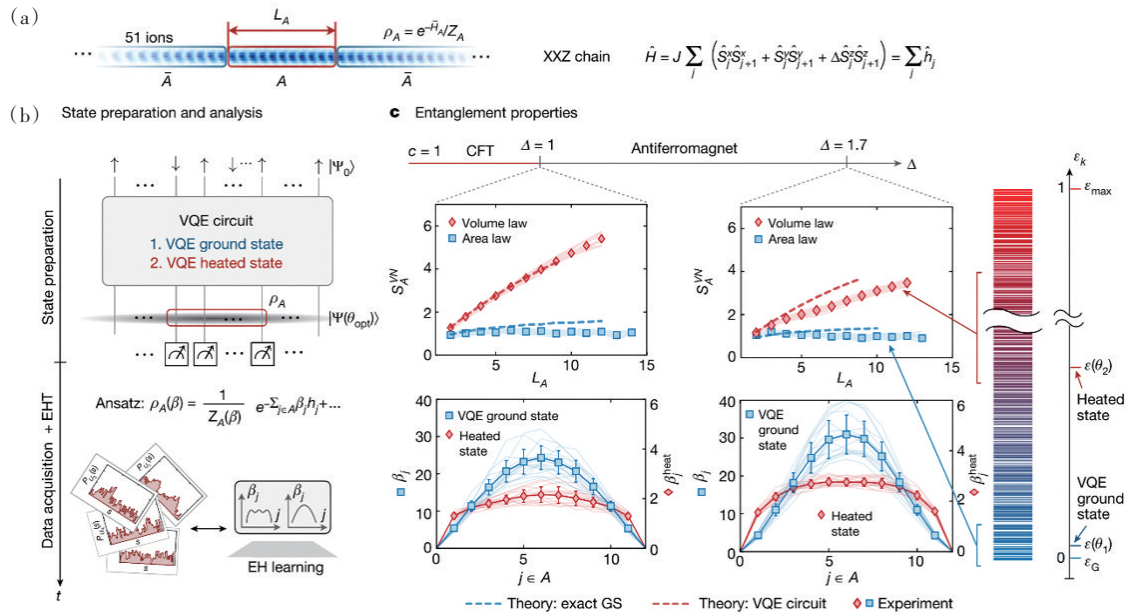


图 15 利用机器学习确定基态和激发态的纠缠结构

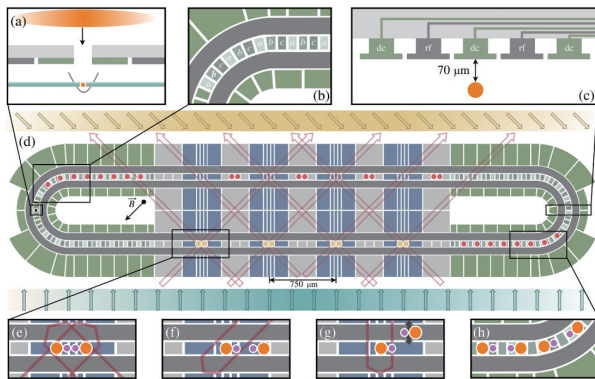


图 16 Quantinuum H2 离子阱概览

在某些情况下超过了以前 QCCD 系统的门操作保真度。该系统最初使用 32 个量子比特运行,但未来的升级将允许使用更多量子比特。研究人员对原始操作的性能进行了基准测试,包括  $1.6(1) \times 10^{-3}$  的平均态制备和测量误差、 $2.5(3) \times 10^{-5}$  的平均单量子比特门不保真度 (infidelity) 和  $1.84(5) \times 10^{-3}$  的平均双量子比特门不保真度。量子处理器的系统级性能通过镜像基准、线性交叉熵基准、 $QV=2^{16}$  的量子体积测量,以及 32 量子比特的 GHZ 纠缠态制备进行了评估。还测试了应用基准,包括哈密顿模拟、量子近似优化算法、重复码纠错及量子比特重复利用的动力学模拟。论文还讨论了新系统的未来升级,旨在增加更多的量子比特和功能。

## 2 量子通信与量子网络

量子通信就是通过传输量子态来完成信息传输的过程。量子通信的优点是理论上绝对安全,当然实际系统的安全性也是需要重点关注的问题。常见的量子通信过程包括量子密钥分发 (QKD)、量子中继、量子隐形传态。利用量子通信还可以把量子节点联接起来构成量子网络,以实现分布式量子计算和量子精密测量等。

过去 30 年, QKD 技术取得了突出进展。然而 QKD 技术的适用性和可扩展性受到几个因素的阻碍。对于目前最常用的,在单光子偏振、时间戳 (time-bin)、频率或空间模式中编码密钥的离散变量 QKD, 密钥生成率受到超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 和读出电子设备性能的限制。此外,将 QKD 系统集成到现有光学基础设施的能力仍是一个未决问题。因为经典光与量子信号共存于同一光纤中,对量子态的传输会带来各种杂散噪声,从而限制了密钥传输速率。

密钥传输速率是任何 QKD 系统的关键性能指标。迄今为止,密钥传输速率一直被限制在每秒几兆比特。最近, 2 个独立的研究组采用定制的多像素单光子探测器,将密钥生成率分别提高到

115.8 Mbit/s<sup>[24]</sup>和 64 Mbit/s<sup>[25]</sup>,在密钥传输速率上取得突破性进展。

第1项工作由中国科学技术大学Li等<sup>[24]</sup>完成。他们研制了一种QKD系统(图17<sup>[24]</sup>),能在10 km标准光纤上以创纪录的115.8 Mbit/s的速率传输密钥,并能在长达328 km的超低损耗光纤上分发密钥。这种高速率传输密钥的能力归功于一个具有超高计数率的多像素超导纳米线单光子探测器(探测效率78%,死时间0.7 ns),一个能以低误差稳定编码偏振态的集成发射器、一个用于实时生成密钥的快速后处理算法及高速的系统运行时钟。研究结果证明了利用光子技术实现实用的高速率QKD的可行性,从而为其广泛应用提供了可能。

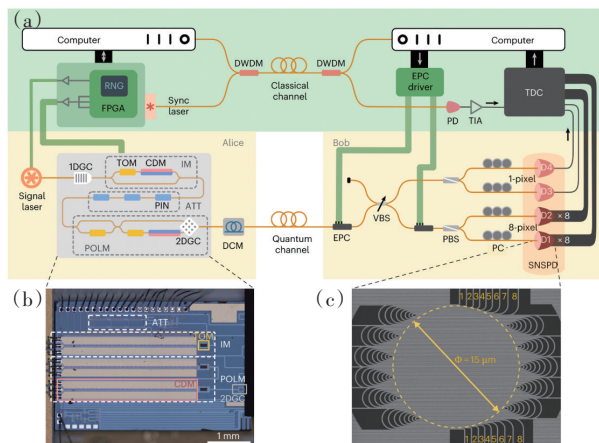


图17 超过110 Mbit/s 密钥传输速率的QKD系统

第2项工作由日内瓦大学应用物理组Grüenfelder等<sup>[25]</sup>完成。他们展示了一种定制的多像素超导纳米线单光子探测器(图18<sup>[25]</sup>),其设计旨在保证高计数率和精确的时间分辨。该探测器的探测效

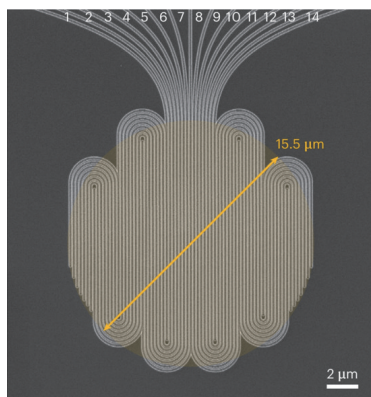


图18 多像素超导纳米线单光子探测器

率达到82%,死时间小于8 ns。将探测器与快速采集和实时密钥提取电子装置相结合,研究人员实现了密钥传输速率在现有技术水平上的大幅提升。结合一个简单的2.5 GHz时钟的时间戳(time-bin)量子密钥分发系统,在10 km的距离内以64 Mbps的速率生成密钥,在102.4 km的距离内以3.0 Mbps的速率实现实时密钥提取。

光子在长距离连接中的损耗限制了量子网络的发展,因此必须使用量子中继器系统来增强网络节点之间的信号。固态原子缺陷是用于长距离量子通信的量子中继器网络的关键组成部分。最近,人们对稀土离子产生了浓厚的兴趣,尤其是铒离子 $\text{Er}^{3+}$ ,因为它的通信波段光跃迁可以在光纤中实现长距离传输。然而,基于稀土离子的中继器节点的开发一直受到光学光谱扩散的阻碍,无法产生全同的单光子。近来,普林斯顿大学Ourari等<sup>[26]</sup>将 $\text{Er}^{3+}$ 植入钨酸钙( $\text{CaWO}_4$ ,一种兼具非极性点位对称性、核自旋退相干较低和无背景稀土离子的材料)中,从而显著减少了光学光谱扩散。对于与具有大Purcell因子的纳米光子腔相耦合的浅植入离子,研究人员观测到的单扫描光学线宽为150 kHz,长期光谱扩散为63 kHz,两者都接近Purcell增强的辐射线宽21 kHz(图19<sup>[26]</sup>)。这使得研究人员能够观测到单个铒离子连续发射的光子之间的Hong-Ou-Mandel干涉,在36 km延迟线之后测得其可见度为 $V=80(4)\%$ 。该成果在利用单个 $\text{Er}^{3+}$ 离子构建通信波段量子中继器网络方面迈出了显著的一步。

超导处理器中的量子信息是以低能微波光子的形式存储的,但要长距离传输这些信息以建立量子网络,需要将低能光子转换为高能光学光子。现在,激光冷却的铷原子可以实现能量相差悬殊的光子之间的转换<sup>[27]</sup>。

虽然超冷原子和超导电路在探索新物理学的过程中一直各自发展,但利用它们在集成系统中的互补优势,就能获得全新的技术能力。芝加哥大学Kumar等<sup>[27]</sup>制备了这样一个系统,它在低温(5 K)环境中将冷 $^{85}\text{Rb}$ 原子系综同时耦合到一个三维超导谐振腔和一个低震动的光学腔(图20<sup>[27]</sup>)。为了展示这一平台的能力,并着眼于量子网络,研究团

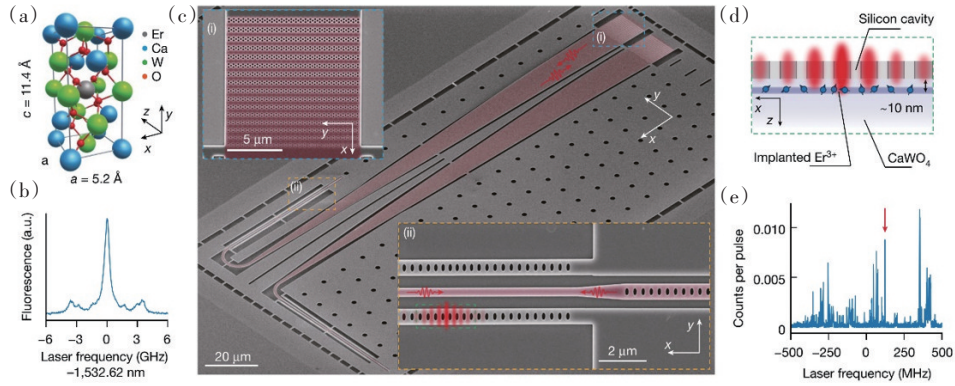


图19 钨酸钙掺铒离子的器件架构

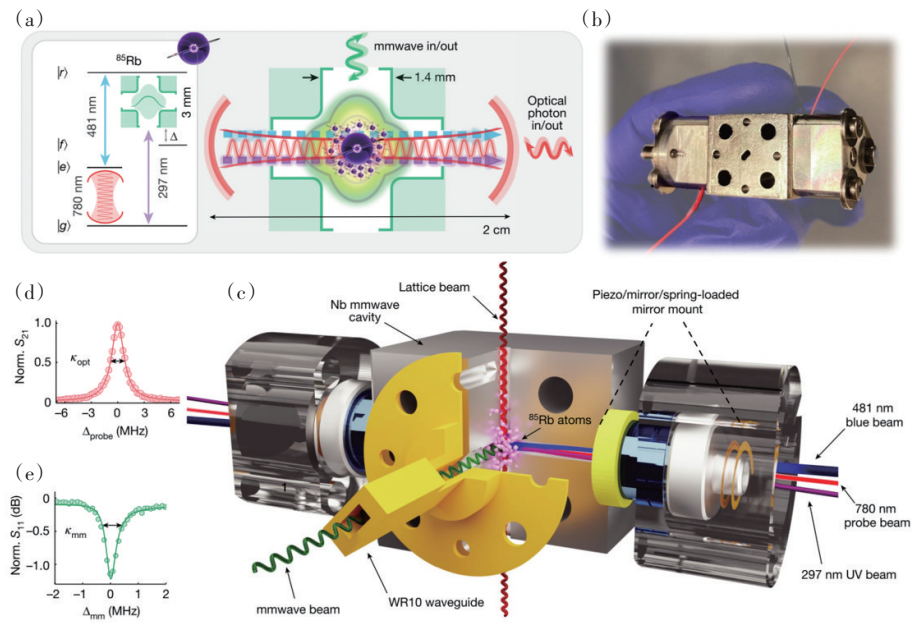


图20 毫米波光子到光波光子的量子转换实验装置

队利用里德堡原子与超导谐振腔之间的强耦合,实现了毫米波光子到光学光子的量子转换器。他们测得的内部转换效率为58(11)%,转换带宽为360(20) kHz,热噪声为0.6光子,与理论计算结果一致。这项技术的进一步发展将实现毫米波和微波波段到光波波段的效率接近为1的量子转换。该成果开辟了毫米波和光量子混合科学的新领域,有望在强耦合机制下进行操作,高效生成对量子计量或量子计算有用的纠缠态,并利用强非局部相互作用进行量子模拟和量子计算。

目前的量子信息系统在不同的工作波长下运行。未来的实用技术很可能是各种量子系统的混合体,需要在工作波长差异较大的物理系统间产生

和共享量子纠缠。如果能在超导微波电路和光学或原子系统间共享量子纠缠将实现许多新的功能,但这一一直受阻于微波(超导电路的工作波长)光子和光波(远距离量子通信的工作波长)光子之间大于 $10^4$ 的能量失配以及由此产生的损耗和噪声。奥地利科学与技术研究所 Sahu 等<sup>[28]</sup>在 mK 的低温环境中制备并验证了微波场与光场之间的纠缠。利用光学脉冲超导电光设备,研究人员展示了行波微波场和光场之间的连续变量纠缠(图 21<sup>[28]</sup>)。这一成果不仅为超导电路与通信波段光场之间的纠缠铺平了道路,为高效连接混合量子系统提供了一条新途径,还在模块化、传感和跨平台验证等方面对混合量子网络有着广泛的影响。

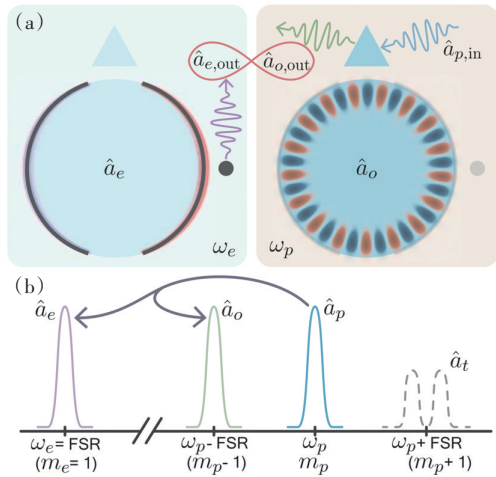


图21 微波场与光场纠缠制备示意

量子网络为量子通信、时钟同步、分布式量子计算和传感提供了框架。实现大规模和实用的量子纠缠网络在实验上仍具有挑战性。它需要可扩展的量子硬件、技术和架构,以便通过大容量量子信道在大量量子节点之间分发纠缠态。量子光子集成电路是一种新兴的量子信息处理和通信硬件系统。

北京大学 Zheng 等<sup>[29]</sup>提出并展示了一种多芯片多维量子纠缠网络,它基于可大规模制造的集成纳米光子量子节点芯片,通过互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺在硅晶圆上制造而成(图22<sup>[29]</sup>)。研究人员实验演示了分布在由少模光纤连接的多个芯片上的多维纠缠态。他们基于芯片的量子纠缠网络将在量子通信、量子精密测量和分布式量子计算中具有重要应用。

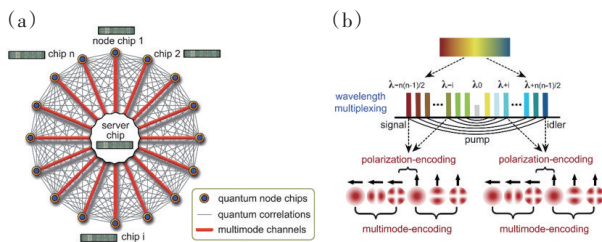


图22 多芯片多维量子纠缠网络架构

过去半个世纪以来,通信网络改变了人们的生活。量子技术的最新进展使得在网络中连接量子设备成为可能。远距离量子通信预示着经

典网络无法实现的功能。为了充分利用纠缠和其他量子效应,量子网络在单光子层面交换信号。因此,光纤衰减是这些系统的主要误差来源。不过,光子损耗可以通过一组称为量子中继器的中间网络节点来弥补,这些节点可以在遥远的网络节点之间建立直接的纠缠连接。

奥地利因斯布鲁克大学 Krutyanskiy 等<sup>[30]</sup>利用离子阱系统实现了一个量子中继节点,该节点可以充当单光子发射器、量子存储器和基本量子处理器的囚禁离子为基础。具体而言,研究团队使用一对钙40离子实现量子中继节点,这对钙40离子在受到激光脉冲照射后会发射光子。接着,这些光子(每个光子与发射它的单个离子处于纠缠状态)就被转换成通信波长并沿着互相独立的2根25 km的光纤输出去。由此,该节点能够在2根25 km光纤上独立建立纠缠。然后通过这一对钙40离子有效地交换纠缠,将其延伸到2根光纤上。由此在50 km信道两端的通信波段光子之间建立了量子纠缠(图23<sup>[30]</sup>),这个距离与现实世界构建实际量子网络所需的距离相当。最后,研究团队还理论上计算了如何改进系统,使量子中继节点链能够以赫兹速率在800 km范围内建立起量子纠缠。成果揭示了一条通向纠缠传感器、原子钟和量子处理器的分布式网络的可行途径。该成果入选了《Physics World》2023年度十大科学突破。

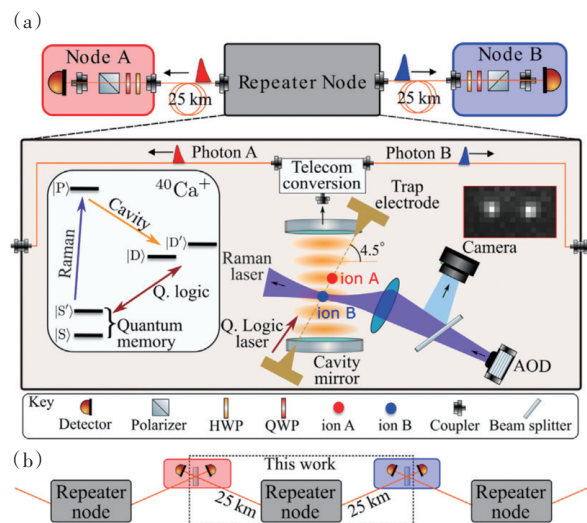


图23 离子阱量子中继节点

### 3 量子精密测量

实现量子计算机的重要困难之一就是退相干,也就是量子比特对环境非常敏感,很容易被环境影响。很自然地,利用量子比特对环境的响应就可以很敏感地探测环境中的相关物理量,这就是量子精密测量。可见,用一个量子比特就可以做量子精密测量,如果能用多个处于纠缠态的量子比特做精密测量,就可以大幅增强探测的灵敏度。

由于系统的量子性质,测量物理量的最终精度受到量子力学的限制。然而,要达到量子极限并非易事,需要对探测器的量子状态进行适当调整。光机械系统(optomechanical system)已被用于力、加速度和磁场的超灵敏测量。科学家对光机械传感的基本极限进行了广泛的研究,现在对其有了很好的理解。玻色光学和机械模式的内在不确定性,加上两者之间相互作用产生的反作用噪声,决定了标准量子极限。为了克服单个光机械传感器的标准量子极限,科学家已经开发出了非经典探针、压缩光和反作用衰减逃逸等先进技术。另一种更简单的增强光机械传感的方法是由多个传感器进行联合测量。此前,克服联合测量基本限制的途径尚未得到探索。在最近的实验中,阿里桑那大学 Xia 等<sup>[31]</sup>证明了在多个光机械传感器上使用纠缠探针进行联合力测量,可以提高热噪声主导机制下的带宽或散粒噪声主导机制下的灵敏度(图 24<sup>[31]</sup>)。此

外,他们还用灵敏度-带宽乘积量化了纠缠探针的整体性能,发现与经典探针相比,纠缠探针的性能提高了 25%。该成果所展示的纠缠增强型光机械传感器将为惯性导航、声学成像和新物理探索带来新的研究途径。

量子精密测量致力于把量子力学原理运用到各种测量任务中,以实现超过经典极限的测量精度。海森堡极限被认为是利用量子方法和资源所能达到的最终极限。之前国际上曾有一些工作声称超越了海森堡极限,然而这些工作利用了非线性效应或者包含了含时的哈密顿量,引起了广泛讨论,最终被理论上证明在以能量等作为规范化资源定义的前提下仍然会遵循海森堡极限。

近年来,学术界提出一种新的量子结构,即量子不确定因果序。量子力学的叠加原理不仅允许不同量子本征态之间的叠加,也允许 2 个事件处于 2 个相反时序的量子叠加。这样一种新型的量子资源已经被证实可以在特定的量子计算和量子通信任务中发挥优势,然而此前工作都是基于离散变量体系,未能直接应用于量子精密测量任务中。

中国科学技术大学 Yin 等<sup>[32]</sup>与香港大学同行合作,利用量子不确定因果序实现了超越海森堡极限精度的量子精密测量。他们设计了一种全新的杂化(hybrid)量子装置,即用一个离散量子比特控制光子 2 组连续变量的演化时序,实验实现了不确定因果序,从而实现了演化产生的几何相位的超海森堡极限的精密测量,即测量的不确定度  $\delta A$  反比于独立演化过程的次数  $N$  的平方( $\delta A \propto 1/N^2$ )。实验结果表明,这种新方法在实验演示的范围内获得了对确定因果序方法理论上的最高测量精度,即海森堡极限( $\delta A \propto 1/N$ , 图 25<sup>[32]</sup>中的蓝色虚线)的绝对优势,实验结果逼近了理论上的超海森堡极限(图 25 中的红色实线)。

该实验使用单个光子作为探针,不存在光子间的相互作用,且单次测量所需要的能量不超过单个光子的能量,从而实现了首个在规范化资源定义下超越海森堡极限的实验工作。实验实现的相对于确定因果序方法的提升可以直接转化为在实际测量任务中的现实优势。

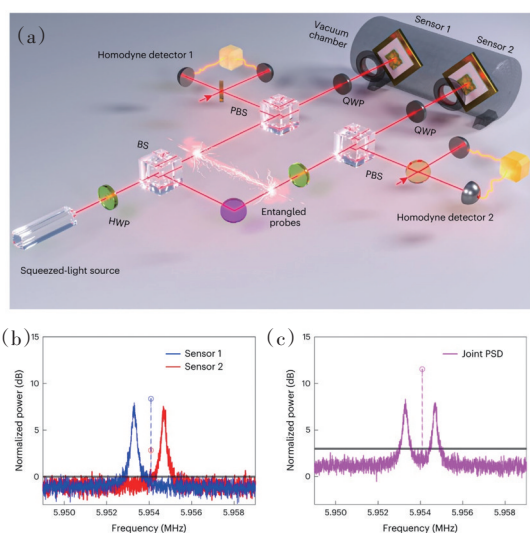


图 24 多个传感器联合测量的实验装置和测量功率谱

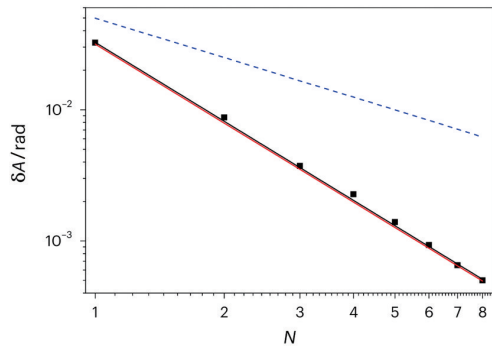


图 25 超海森堡极限的量子精密测量实验结果

通过对原子系统中量子态的控制,科学家制造出了迄今为止最精确的光学原子钟。目前,它们的灵敏度受到标准量子极限的限制,标准量子极限是量子力学为不相关粒子设定的基本极限,在使用纠缠粒子时是可以突破的。然而,在现实世界的传感器中展示量子优势极具挑战性。

奥地利因斯布鲁克大学 Franke 等<sup>[33]</sup>在由多达 51 个离子组成的一维链上,展示了利用大规模纠缠进行量子精密测量的途径。结果表明,他们的传感器可以模拟单轴扭转(OAT)模型的许多特征,该模型是一个标志性的全连接模型,已知可用来制备可扩展的压缩态(图 26<sup>[33]</sup>)和类 GHZ 态。他们在拉姆齐型干涉仪中演示了这些态的精密测量效用,在该干涉仪中,将测量不确定性降低(-3.2±0.5) dB,低于 N=51 离子的标准量子极限。

量子纠缠能提供超越标准量子极限的更高测量精度,而标准量子极限是经典方法所能达到的最

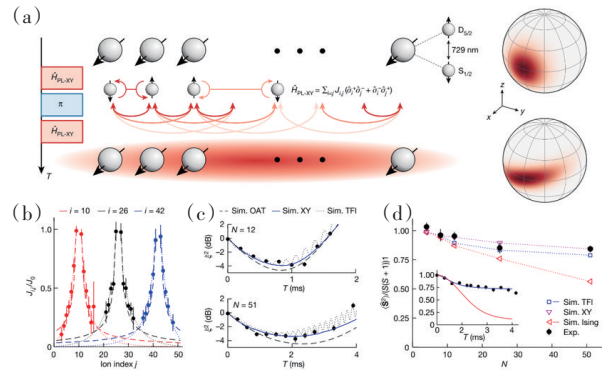


图 26 在离子阱中制备压缩态

高精度。然而,由于在纠缠的制备、控制和检测方面存在实验限制,要观测到大幅增强的量子纠缠仍然具有挑战性。清华大学 Mao 等<sup>[34]</sup>报告了一种在自旋原子玻色-爱因斯坦凝聚体中使用自旋-向列压缩回声的非线性干涉测量协议。研究团队通过自旋混合动力学(类似光学中的四波混频)产生自旋-向列压缩态。通过类似于自旋回波技术的状态翻转操作,压缩态被重新聚焦回初始态附近,这导致编码相位优先于噪声被放大(图 27<sup>[34]</sup>)。利用由 26400 个原子组成的大型原子系综,观察到在检测小角度拉比旋转时,灵敏度为(15.6±0.5) dB,超出了标准量子极限;在类似拉姆齐干涉测量法的应用中,相位感应灵敏度为(16.6±1.1) dB。这些研究结果凸显了自旋-向列压缩态的多体相干性,并指出了它们在原子磁强计、原子钟和洛伦兹对称性违反的基本检测中可能的量子计量应用。

量子纠缠可以提高计算、传感和密码等多项信

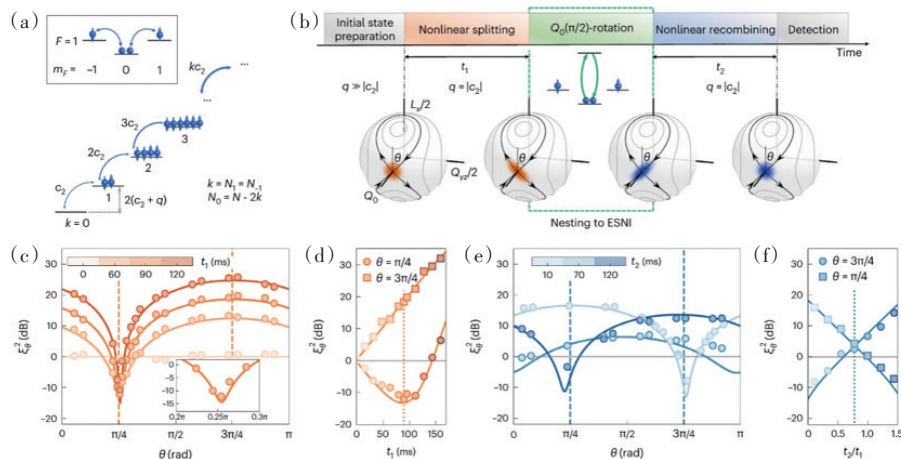


图 27 自旋-向列压缩态及其回波演化

息技术的性能,但其对噪声和损耗的敏感性阻碍了其广泛应用。即使在纠缠被破坏的情况下,某些任务仍会表现出量子优势。一个突出的例子是量子雷达,它能增强在嘈杂环境中对目标的探测。量子雷达的量子照明协议是使用一个最初与闲置光子纠缠的探针光子,对2个纠缠光子进行联合测量。除了在光学频率上成功演示了这种量子照明协议之外,更接近传统雷达的微波雷达的提议也引起了人们的极大兴趣。

法国国家科学研究中心 Assouly 等<sup>[35]</sup>展示了一种实现微波量子雷达的超导电路,其性能比任何可能的经典雷达都要高出 20% 以上(图 28<sup>[35]</sup>)。该方案涉及在探针从目标反射并混入热噪声后,联合测量纠缠探针和闲置微波光子状态。通过在谐振腔中存储闲置光子,研究团队减轻了闲置光子损耗对量子优势的不利影响。通过测量各种参数范围内的量子优势,他们发现初始探针-闲置纠缠态的纯度是主要的限制因素,在任何实际应用中都需要加以考虑。

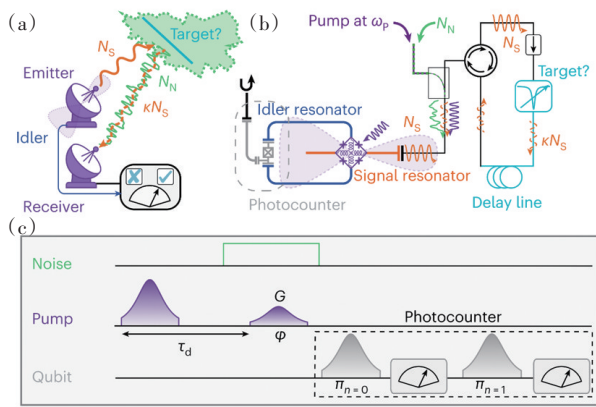


图 28 量子雷达的工作原理与实验实现

高压技术已经广泛应用于物理学、材料科学、地球物理和化学等领域。特别是压力下高临界温度超导体的实现,引起了学术界的极大关注。然而一直以来,原位高分辨率的磁测量是高压科学研究的难题,并制约着高压超导抗磁行为和磁性相变行为的研究。传统的高压磁测量手段,如超导量子干涉仪难以实现金刚石对顶砧中微米级样品的弱磁信号的高分辨率原位探测。为了解决这一关键核

心难题,金刚石氮-空位(nitrogen-vacancy, NV)色心光探测磁共振技术已被用于原位压力诱导磁性相变检测。然而,由于 NV 色心具有 4 个轴向,并且其电子自旋的零场分裂是温度依赖的,不利于分析和解释测量得到的光探测磁共振谱。

针对高压磁探测的难题,中国科学技术大学 Wang 等<sup>[36]</sup>在国际上首次实现了基于碳化硅中硅空位色心的高压原位磁探测,该技术在高压量子精密测量领域具有重要意义。研究团队加工了碳化硅对顶砧(又称为莫桑石对顶砧),然后在碳化硅台面上利用离子注入产生浅层硅空位色心,并利用浅层色心实现高压下的原位磁性探测。碳化硅中的硅空位色心只有单个轴向,而且由于电子结构的特殊对称性,该色心电子自旋的零场分裂是温度不敏感的,能够很好地避免金刚石 NV 色心在高压传感应用中遇到的问题。研究组首先刻画了硅空位色心在高压下的光学和自旋性质,发现其光谱会蓝移,而且其自旋零场分裂值随压力变化很小(0.31 MHz/GPa),远小于金刚石 NV 色心的变化斜率 14.6 MHz/GPa(图 29<sup>[36]</sup>)。这将有利于测量和分析高压下的光探测磁共振谱。在此基础上,研究组基于硅空位色心光探测磁共振技术观测到了钕铁硼磁体在 7 GPa 左右的压致磁相变,并测量得到钇钡铜氧超导体的临界温度-压力相图。实验装置和实验结果如图 29 所示。该实验发展了基于固态色心自旋的高压原位磁探测技术。碳化硅材料加工工艺成熟,可大尺寸

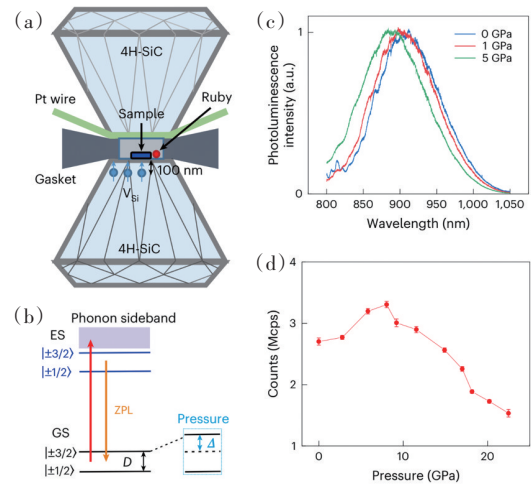


图 29 碳化硅对顶砧及硅空位色心的光学性质随压力的变化

制备并且相对金刚石有很大的价格优势,该工作为磁性材料特别是室温超导体高压性质的刻画提供了一个优异的量子研究平台。

尽管量子系统的所有么正演化原则上都是可逆的,但在一般相互作用多体系统中逆转时间箭头在实践中却极具挑战性。这是因为时间反演动力学中的任何微小扰动或缺陷都会导致量子波函数发生非常复杂的非局部变化,类似于混沌理论中的蝴蝶效应。这种量子力学效应被称为“信息置乱”(information scrambling)。量子置乱描述了在量子系统中,信息被扩散到许多自由度中,从而使信息不再能在局部获取,而是分布在整个系统中。它产生了从量子引力模型到量子计量学等各种不同寻常的现象和应用。信息置乱的速度可以用非时序关联函数(out-of-time-order correlator, OTOC)量化,它是2个不同量子操作的非对易性建立速度的度量。

麻省理工学院 Li 等<sup>[37]</sup>利用腔内原子系综探究了相空间双稳态点附近多粒子系统的指数置乱,并将其用于纠缠增强计量学(图 30<sup>[37]</sup>)。通过时间反演协议,研究团队观察到计量增益和 OTOC 同时呈指数增长,从而验证了量子计量学和量子信息置乱之间的关系。研究结果表明,能够以指数级速度产生纠缠的快速置乱动力学对于实用计量学是有用的,可以带来超出标准量子极限的 6.8(4) dB 增益。

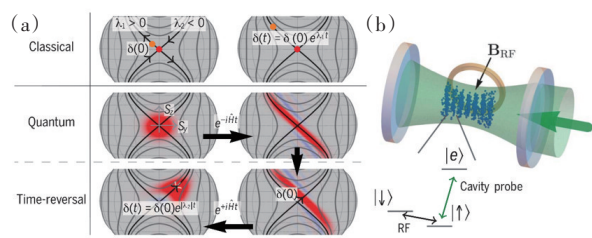


图 30 具有不稳定固定点的系统中基于时间反演的灵敏度指数增长

## 4 量子信息物理

量子信息的研究除了实现前面提到的各种量子信息过程外,还包括基本物理问题的研究:各种纠缠态的制备和表征、多体非局域性、量子编码与量子纠错、量子算法、量子通信协议、纠缠光子与物

质的相互作用等。这些基本物理问题是量子信息的基础。另外,随着量子信息技术的发展,可以利用量子信息的技术和观点更加深入地研究和探索量子世界。

纠缠光子表现出经典物理学无法解释的关联。过去几十年来,物理学家利用光子的纠缠态测试了量子力学中一些奇特的预言,如违反贝尔不等式和远距传物。纠缠光子也被证明是量子技术中所不可或缺的,例如,与设备无关的量子通信和线性光量子计算。虽然量子纠缠是一种宝贵资源,但它们容易受到各种过程的影响,从而影响其非经典关联。例如,来自动态介质的散射通常会扰乱并平均掉这种关联。

希伯来大学 Safadi 等<sup>[38]</sup>展示了从动态复杂介质中经过多重散射反射出的纠缠光子仍然部分关联。在实验和模拟中,研究人员观察到,在由传输平均自由路径决定的范围内,关联存在增强,超过了无序平均(图 31<sup>[38]</sup>)。理论分析表明,这种增强源于散射轨迹之间的干涉,在散射轨迹中,光子离开样品,又重新射入样品。这些轨迹是导致经典光相干反向散射(coherent backscattering)的轨迹的量子对应。此项工作为量子纠缠在复杂系统的动态多重散射中的传输提供了可能。

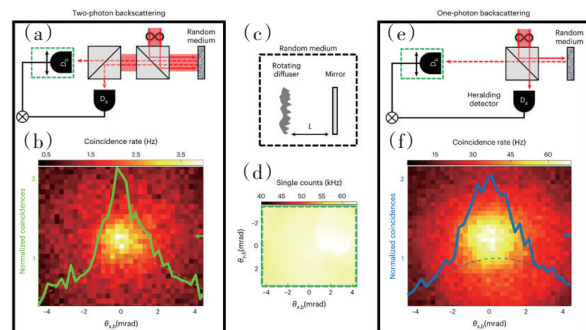


图 31 实验观测双光子相干反向散射和单光子相干发现散射

热力学理论也许是自诞生以来唯一经受住了数次颠覆科学范式的革命的物理理论。热力学的特殊地位源于它的元理论特性:从根本上说,热力学是一个框架,用于决定一个封闭系统可以或不可以发生哪些转变,而与底层物理学无关。

量子纠缠理论与热力学之间出现了许多富有成果的类比,促使人们追求一种类似于热力学定律的纠缠公理描述。一个长期悬而未决的问题是建立一个真正的纠缠第二定律,特别是一个刻画纠缠系统之间所有变换的独特函数,它反映了热力学中熵的作用。德国乌尔姆大学 Lami 和日本东京大学 Regula<sup>[39]</sup>证明这是不可能的,也无法建立热力学第二定律的直接对应关系。他们从第一原理出发,证明了纠缠操作的不可逆性(图 32<sup>[39]</sup>)。他们仅假定纠缠操作存在最一般的微观物理约束,就证明纠缠理论在所有非纠缠变换下都是不可逆的。他们还进一步排除了没有大量纠缠消耗的可逆性,表明可逆的纠缠变换需要制备宏观上大量的纠缠。这些研究结果不仅揭示了量子纠缠变换与热力学过程的根本区别,还展示了纠缠的独特性质,使其有别于其他已知的量子资源。

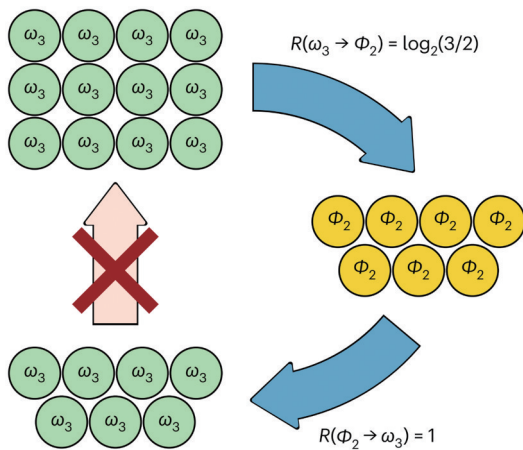


图 32 纠缠操作的不可逆性

随着摩尔定律达到极限,量子计算机不断涌现,有望大幅超越经典计算机。现在已经可以制造出超过 100 个量子比特的量子处理器,有望超越经典模拟。伴随着这些发展,人们期待量子计算机在某个阶段能够完成任何经典计算机都几乎不可能完成的任务。达到这一门槛的主要候选方法是随机电路采样,即在实施一连串随机量子操作后,对量子计算机的输出进行采样。然而,很难从理论上保证经典计算机模拟随机量子电路的难度。谷歌量子 AI 团队的 Movassagh<sup>[40]</sup>证明,对任何经典计算机来说,估计随机量子电路的输出概率都是 #P-hard 的。

他还将结果扩展到量子计算的一个受限模型,即瞬时量子多项式时间(IQP)电路,通过将量子电路仿真的最坏情况降为平均情况来实现这一点(图 33<sup>[40]</sup>)。研究结果对估计误差的稳健性可作为经典算法性能的新硬度标准。结果表明,大多数量子电路的近似经典模拟都存在指数级的难度障碍。

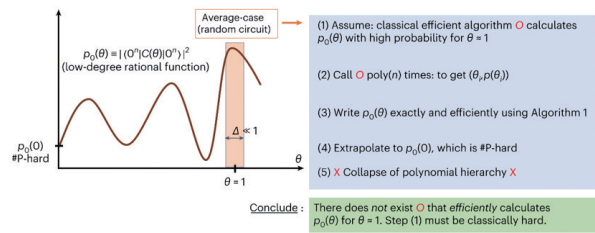


图 33 平均情况难度证明过程

量子多体系统在进行么正演化的同时,还增加了穿插测量,表现出多种在纯么正演化下不会出现的动力学阶段。然而,由于需要大量的辅助量子比特或重复的高保真电路中测量,这些系统在近期量子硬件上的研究仍具有挑战性,而这种能力直到最近才得以实现。

加州理工学院 Koh 等<sup>[41]</sup>报告了在多达 14 个超导量子比特上利用混合随机电路实现测量诱导的纠缠相变,并具有电路中读出能力(图 34<sup>[41]</sup>)。该工作确立了将电路中测量作为近期量子计算机量子模拟的强大资源。

光子是量子信息的理想载体,能够确定性地操纵光子纠缠的设备至关重要。然而,由于光子之间没有相互作用,许多光子量子操作只能通过概率线性光学方法进行演示,导致资源开销过大、可扩展性差。

华中科技大学 Ye 等<sup>[42]</sup>报告了一种新型纠缠滤波器,它能传输所需的光子纠缠态,并阻断不需要的纠缠态(图 35<sup>[42]</sup>)。与以往的概率方法不同,他们的实验利用了里德堡原子产生的强且可控的光子-光子相互作用,因此在每次实验中都能成功过滤掉不需要的状态。研究团队可以从初始保真度任意低的输入状态中提取出保真度接近于 1 的光子纠缠态。这种纠缠滤波器开辟了利用多个雷德堡原子集合实现可扩展光子量子信息处理的新途径。

虽然在各种原子、光子和超导平台上都实现了

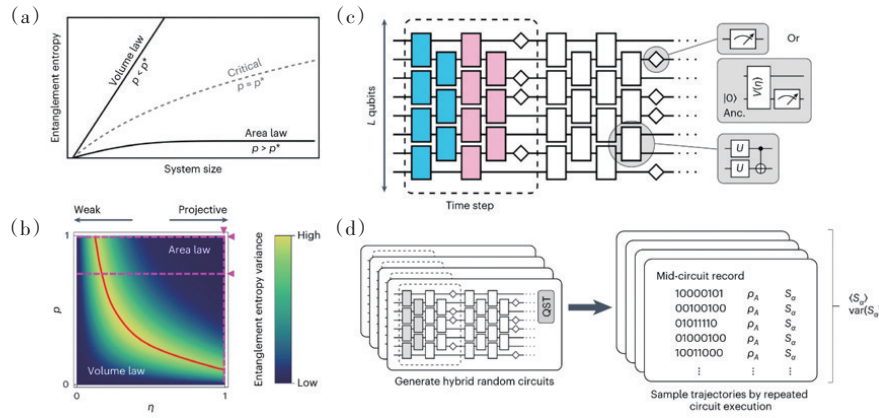


图 34 使用混合随机量子电路模型测量诱导纠缠相变

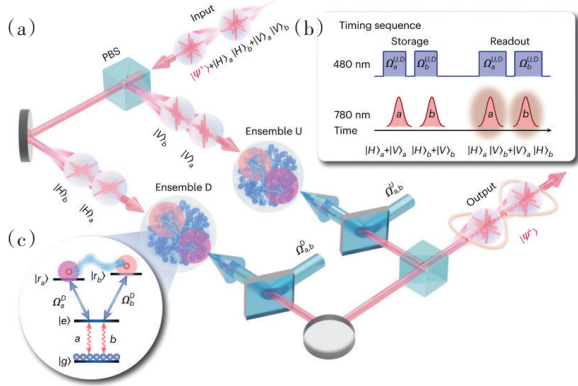


图 35 纠缠滤波实验装置

纠缠,但受控地制造分子纠缠却是一项长期挑战。超冷极性分子是量子计算和量子模拟领域前景广阔的候选量子比特。它们的长寿命分子旋转态形成了稳健的量子比特,分子间的长程偶极相互作用用来实现量子纠缠。控制分子纠缠的主要障碍是众多内部旋转和振动能态所带来的复杂性。这些状态的热布居与在单量子水平上控制分子内部状态,从而将其引导到所需量子状态的必要性相冲突。

Bao 等<sup>[43]</sup>和 Holland 等<sup>[44]</sup>的 2 个研究组利用放置在光镊中的氟化钙 (CaF) 分子之间的偶极相互作用实现了这一目标,制备出了分子纠缠态。在第 1 项工作中,哈佛大学 Bao 等<sup>[43]</sup>展示了被囚禁在光镊阵列中的氟化钙分子间的偶极自旋交换相互作用 (图 36<sup>[43]</sup>)。他们将有效的自旋 1/2 系统编码到分子的旋转态中,实现了自旋 1/2 的量子 XY 模型,并通过 iSWAP 操作生成了贝尔态。实验测得的贝尔态保真度为 0.89(6)。此外,利用交错镊子阵列,他们还证明了单点分子寻址能力。

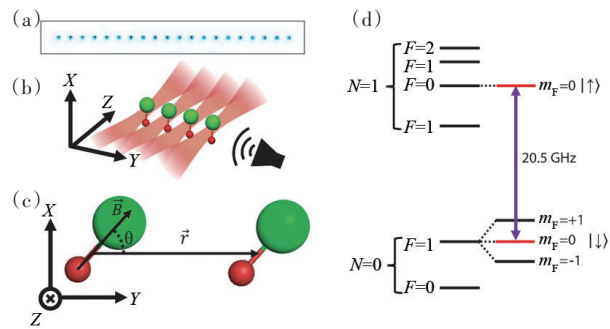


图 36 制备极性分子纠缠的实验装置和相关的能级结构

在第 2 项工作中,普林斯顿大学 Holland 等<sup>[44]</sup>将激光冷却的单个氟化钙分子囚禁在一个可动态重新配置的光镊阵列中 (图 37<sup>[44]</sup>)。通过激光冷却、光学捕获和传输等一系列步骤,单个分子从一个磁光阱转移到由 37 个相同的光镊组成的一维 (1D) 阵列中,这些光镊的均匀间距为 4.20(6) μm,然后在 3 ms 内将每对阱的间距缩短到 1.93(3) μm,用以增强相互作用。利用成对氟化钙分子间的电

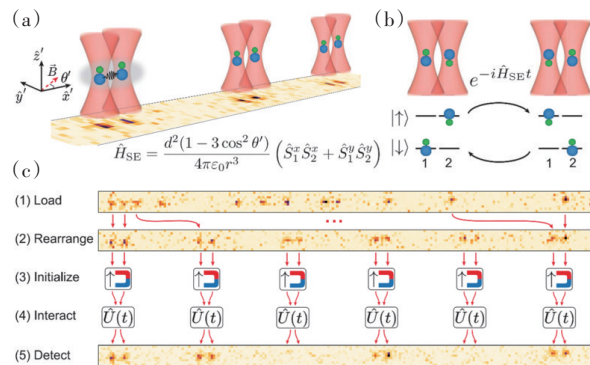


图 37 可重构光镊阵列中分子的激光冷却

偶极相互作用,可以确定性地制备分子贝尔态。该成果展示了量子应用所需的关键元件,并可推动使用囚禁分子的量子增强基础物理检验。

量子设备可以实现网络中各方之间的安全通信和计算。因此,能够验证量子设备的性能符合预期非常重要,尤其是在无法访问其内部工作状态的情况下。这就是自测试(self-testing)的概念。以前对自测试的研究主要针对只有2个量子系统相互通信的情况。现在,法国索邦大学Šupić等<sup>[45]</sup>研究了如何在网络中其他节点的协助下,对任意数量量子比特的任何纯态进行自测试。

论文中,Šupić等介绍一种网络辅助自测试框架,可以用它来自测试任意数量系统的任何纠缠纯态(图38<sup>[45]</sup>)。该方案需要准备与系统数量成线性比例的纠缠单态,并实施标准的投影测量和贝尔测量,所有这些在当前技术条件下都是可行的。当所有网络约束条件都得到利用时,所获得的自检认证比任何贝尔型方案都要强大。这个方案还可以推广到高维系统。

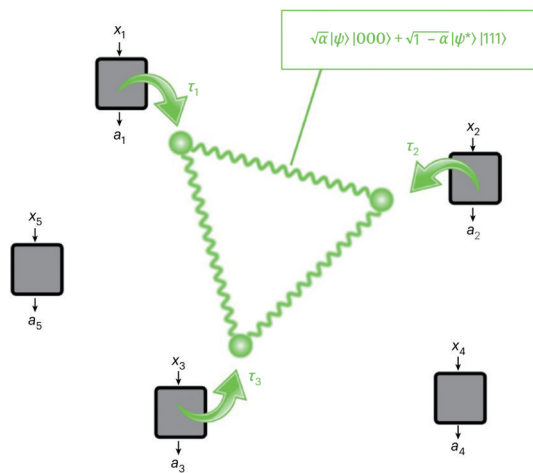


图38 5节点网络中对3个节点进行网络辅助自测试

## 5 结论

2023年量子计算与量子模拟、量子通信与量子网络、量子精密测量和量子信息物理等量子信息领域取得重要进展。尤其是量子纠错的实现为普适量子计算机的研制打下重要基础,50 km量子中继节点的实验演示则使得基于光纤的千公里量子

通信成为可能。未来随着量子信息研究不断取得进展,必将对国家信息安全及人类生产生活方式产生重大影响。

## 参考文献(References)

- [1] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. Science, 2020, 370(6523): 1460–1463.
- [2] Madsen L S, Laudenbach F, Askarani M F, et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor[J]. Nature, 2022, 606: 75–81.
- [3] Gong M, Wang S Y, Zha C, et al. Quantum walks on a programmable two-dimensional 62-qubit superconducting processor[J]. Science, 2021, 372(6545): 948–952.
- [4] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. Science, 2017, 356(6343): 1140–1144.
- [5] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation[J]. Nature, 2017, 549: 70–73.
- [6] Bothwell T, Kennedy C J, Aeppli A, et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample[J]. Nature, 2022, 602: 420–424.
- [7] Pompili M, Hermans S L N, Baier S, et al. Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits[J]. Science, 2021, 372(6539): 259–264.
- [8] Google Quantum AI. Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit[J]. Nature, 2023, 614: 676–681.
- [9] Cao S, Wu B, Chen F, et al. Generation of genuine entanglement up to 51 superconducting qubits[J]. Nature, 2023, 619: 738–742.
- [10] Ni Z, Li S, Deng X, et al. Beating the break-even point with a discrete-variable-encoded logical qubit[J]. Nature, 2023, 616: 56–60.
- [11] Sivak V V, Eickbusch A, Royer B, et al. Real-time quantum error correction beyond break-even[J]. Nature, 2023, 616: 50–55.
- [12] Kim Y, Eddins A, Anand S, et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance[J]. Nature, 2023, 618: 500–505.
- [13] Zhang X, Kim E, Mark D K, et al. A superconducting quantum simulator based on a photonic-bandgap metamaterial[J]. Science, 2023, 379(6629): 278–283.
- [14] Google Quantum AI and Collaborators. Non-Abelian

- braiding of graph vertices in a superconducting processor [J]. *Nature*, 2023, 618: 264–269.
- [15] Layden D, Mazzola G, Mishmash R V, et al. Quantum-enhanced Markov chain Monte Carlo[J]. *Nature*, 2023, 619: 282–287.
- [16] Hirthe S, Chalopin T, Bourgund D, et al. Magnetically mediated hole pairing in fermionic ladders of ultracold atoms[J]. *Nature*, 2023, 613: 463–467.
- [17] Singh K, Bradley C E, Anand S, et al. Mid-circuit correction of correlated phase errors using an array of spectator qubits[J]. *Science*, 2023, 380(6651): 1265–1269.
- [18] Xu M, Kendrick L H, Kale A, et al. Frustration- and doping-induced magnetism in a Fermi-Hubbard simulator[J]. *Nature*, 2023, 620: 971–976.
- [19] Zhou T W, Cappellini G, Tusi D, et al. Observation of universal Hall response in strongly interacting Fermions [J]. *Science*, 2023, 381(6656): 427–430.
- [20] Bluvstein D, Evered S J, Geim A A, et al. Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays[J]. *Nature*, 2023, 2023: 1–3.
- [21] Feng L, Katz O, Haack C, et al. Continuous symmetry breaking in a trapped-ion spin chain[J]. *Nature*, 2023, 623: 713–717.
- [22] Joshi M K, Kokail C, van Bijnen R, et al. Exploring large-scale entanglement in quantum simulation[J]. *Nature*, 2023, 624: 539–544.
- [23] Moses S A, Baldwin C H, Allman M S, et al. A race-track trapped-ion quantum processor[J]. *Physical Review X*, 2023, 13: 041052.
- [24] Li W, Zhang L, Tan H, et al. High-rate quantum key distribution exceeding  $110 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 416–421.
- [25] Gr̃unenfelder F, Boaron A, Resta G V, et al. Fast single-photon detectors and real-time key distillation enable high secret-key-rate quantum key distribution systems [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 422–426.
- [26] Ourari S, Dusanowski Ł, Horvath S P, et al. Indistinguishable telecom band photons from a single Er ion in the solid state[J]. *Nature*, 2023, 620: 977–981.
- [27] Kumar A, Suleymanzade A, Stone M, et al. Quantum-enabled millimetre wave to optical transduction using neutral atoms[J]. *Nature*, 2023, 615: 614–619.
- [28] Sahu R, Qiu L, Hease W, et al. Entangling microwaves with light[J]. *Science*, 2023, 380(6646): 718–721.
- [29] Zheng Y, Zhai C, Liu D, et al. Multichip multidimensional quantum networks with entanglement retrievability[J]. *Science*, 2023, 381(6654): 221–226.
- [30] Krutyanskiy V, Canteri M, Meraner M, et al. Telecom-wavelength quantum repeater node based on a trapped-ion processor[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(21): 213601.
- [31] Xia Y, Agrawal A R, Pluchar C M, et al. Entanglement-enhanced optomechanical sensing[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 470–477.
- [32] Yin P, Zhao X, Yang Y, et al. Experimental super-Heisenberg quantum metrology with indefinite gate order [J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 1122–1127.
- [33] Franke J, Muleady S R, Kaubruegger R, et al. Quantum-enhanced sensing on optical transitions through finite-range interactions[J]. *Nature*, 2023, 621: 740–745.
- [34] Mao T W, Liu Q, Li X W, et al. Quantum-enhanced sensing by echoing spin-nematic squeezing in atomic Bose-Einstein condensate[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 1585–1590.
- [35] Assouly R, Dassonneville R, Peronnin T, et al. Quantum advantage in microwave quantum radar[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 1418–1422.
- [36] Wang J F, Liu L, Liu X D, et al. Magnetic detection under high pressures using designed silicon vacancy centres in silicon carbide[J]. *Nature Materials*, 2023, 22: 489–494.
- [37] Li Z, Colombo S, Shu C, et al. Improving metrology with quantum scrambling[J]. *Science*, 2023, 380(6652): 1831–1834.
- [38] Safadi M, Lib O, Lin H C, et al. Coherent backscattering of entangled photon pairs[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 562–568.
- [39] Lami L, Regula B. No second law of entanglement manipulation after all[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 184–189.
- [40] Movassagh R. The hardness of random quantum circuits [J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 1719–1724.
- [41] Koh J M, Sun S N, Motta M, et al. Measurement-induced entanglement phase transition on a superconducting quantum processor with mid-circuit readout[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 1314–1319.
- [42] Ye G S, Xu B, Chang Y, et al. A photonic entanglement filter with Rydberg atoms[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 538–543.
- [43] Bao Y, Yu S S, Anderegg L, et al. Dipolar spin-exchange and entanglement between molecules in an optical tweezer array[J]. *Science*, 2023, 382(6675): 1138–

- 1143.
- [44] Holland C M, Lu Y, Cheuk L W. On-demand entanglement of molecules in a reconfigurable optical tweezer array[J]. *Science*, 2023, 382(6675): 1143–1147.
- [45] Šupić I, Bowles J, Renou M O, et al. Quantum networks self-test all entangled states[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 670–675.

## Memorable sounds of quantum information in 2023

LI Chuanfeng

School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China; CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract** This article reviews the major advances in the field of quantum information in 2023, and checks out the research hotspots in the field of quantum information research, such as quantum computing and quantum simulation, quantum communication and quantum networks, quantum precision measurement, and quantum information physics. The development of quantum information will lead to physically-secure communications, efficient information processing, precision measurements, etc., which will have a significant impact on national information security and human production and lifestyle.

**Keywords** quantum computing and quantum simulation; quantum communication and quantum networks; quantum precision measurement; quantum information physics ●



(责任编辑 王微)