

量子信息启发的固体系统量子态操纵的基本问题

Fundamental issues of quantum manipulation
inspired by quantum information

在过去的 30 年里，量子物理学发展经历一个蓬勃发展的新阶段。不仅量子力学自身有一些深刻的观念的提出，而且量子观念的重要性从微观世界的外推到宏观世界，许多宏观量子效应在实验上得以证实。高技术的发展使得人们成功地实现了各种人工结构和物质形态，清晰地展示了极端条件下的各种新奇量子效应。特别是量子理论与信息和计算机科学交叉，产生了新兴的交叉领域——量子信息物理学 (Physics of quantum information)。向实用化推进，量子信息学的实用化有可能引发新的技术革命，最终克服摩尔定律描述的芯片尺度极限对计算机科学发展的本质限制。

由于这些在量子信息和纳米微结构方面的发展要求，人们需要在不同的空间尺度、时间尺度和能量尺度上对量子态进行人工的相干操控。现有的信息处理系统——计算机的传统构架发展也要求人们对各种复杂人工系统的量子态知识有更加深入的了解，发展复杂结构的波函数工程。

从实验角度看：① 由于在各种人工空间结构(如光学晶格)上实现了原子系统玻色-爱因斯坦凝聚，人们能够展示和检验过去在自然物质材料中不能清楚展现的各种量子效应，如Mott绝缘体相变和参量下转换效应。对于这样一个宏观的人工量子系统，人们可以通过Feshbah共振控制原子间的相互作用，从而展现出丰富的量子效应；② 在介观层次上，人们可以制备纳米结构，并探测其GHz的高频振荡，从而可以在实验上考察经典-量子过渡，如实验上观测到了纳米共振器件的量子跃迁。重要的是人们可以把这和高频振荡的纳米器件与单自旋或其他量子比特系统耦合起来，作为一种量子传感器；③ 在量子计算、特别是在固态量子计算方面，人们已经成功地实现了量子比特的可控相干耦合，如NEC研究小组最近实现两个电荷量子比特的逻辑门操作；Yale大学研究小组完成超导传输线与电荷量子比特的强耦

合,形成所谓的circuit QED^[1]。这些介观器件相干耦合实验原则上为实现可规模化量子计算系统奠定了基础。

以上这些实验表明,人们已经能够跨尺度地制备新的固体量子结构,并在一定程度上控制它们的量子状态。伴随着技术的进步,这些实验方面的新结果不仅佐证量子物理学过去的预言,而且为基础物理研究提出了新的课题。例如,人们究竟能够在多大的时空和能量尺度上制备和操纵量子态?对量子态控制的精度是什么?原理上是否存在的控制极限?针对具体系统,通过量子态进行量子信息处理(逻辑门操作,量子信息的存储与传输等)是否也有原理的极限?围绕这些基本问题,针对物理系统,可以开展以下的研究:

为了在物理上实现有实际用途的量子计算机,需要把普适的量子逻辑门有机地集成起来,保持量子比特间的量子纠缠,并能对它们加以操控。随着集成量子比特数目 N 的增多,量子相干性损失(或称量子退相干, quantum decoherence)会变得越来越来,有时甚至呈 e 指数增长关系。最近有研究表明,单粒子的量子相干性的损失呈 e 指数衰变,但用 concurrence 表征的量子纠缠却会在有限的时间内丧失殆尽。这些结果表明了多量子比特简单集成后的量子相干性更加脆弱,原则上对目前的理论和实验提出挑战。

实用化可集成的量子计算机通常应当构筑于具有稳定量子相干性的多粒子固态系统。通常需要利用一个具有强关联特征的“数据总线”(data bus)把两个固态量子比特连接起来(图 1(a))。为了使处于基态的数据总线只能传递信息而不破坏量子比特系统的能量,就必须要求它有能隙的存在(图 1(b))。当这个能隙远远超过量子比特的能级差(满足大失谐条件),则它可以诱导出两个比特的有效耦合,而不引起它们的能量衰变。对一个固体系统而言,存在能隙意味着固态系统的空间量子关联的长度是有限的。直观地看,量子信息传输要求数据总线存在能隙和长距离传输是有矛盾的。因此,能隙的存在导致有限的关联长度是量子信息长距离传输的一个理论上的障碍。量子纠缠和量子关联之间的关系是需要深入探讨的一个关键问题。

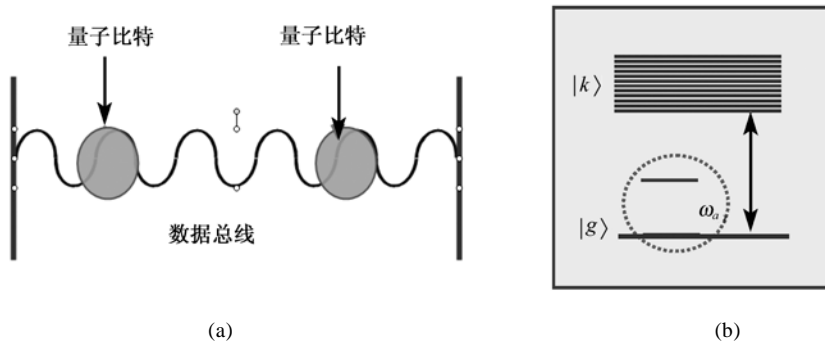


图 1 (a) 量子比特的相干集成 (b) 量子“数据总线”的能谱

克服上述困难的可能途径有二：① 对实际问题，可以有针对性的进行优化，使得信息传输的任务在所要求的目标下得以尽可能的实现。但这只是一种权宜之计，不得已而为之；② 我们可以采用具有强关联的自旋系统。其中自旋-自旋耦合的强度是可以调节的。这样可以在更长距离上，保持量子纠缠，得到空间上足够长的量子关联，完成近乎理想的量子信息传输。最近研究表明，可以采用自旋梯子作为传输自旋态量子信息的“数据总线”，梯子两端有两个弱耦合的自旋。这种设计，可以部分地优化量子信息传输系统：利用能隙的有限性使得自旋梯子的基态成为传输量子信息的稳定通道，尽可能通过虚过程激发传递信息。然而这种办法只能部分地改进关联长度有限的弱点。怎样在常温下用实际的固态系统实现长距离的信息传递是一个没有彻底解决的问题。理论研究还发现，对于一个能谱有共度的量子系统，在特定条件下，实际演化算子可以变成一个空间反演算子，从而可以把在数据总线一端的波包变为在另一端对称的波包。可以证明，一个光学格点上的玻色-爱因斯坦凝聚原子体系或一个三维硬核玻色子系统可以实现这样的能谱结构，完成近乎完美的量子信息传输。然而，这种方案要求的格点数目不能太多，否则中间格点的耦合强度就会变得太大。怎样克服这个困难尚需进一步研究。

关于利用量子自旋链传递量子态还涉及到一个更基本的问题，这就是自旋链自身的量子临界行为对与之相互作用的系统量子态演化的影响。考虑这个问题的动机之一是强关联系统的特点存在能隙，而能级交叉与量子相变的行为有关，而在操纵量子态传输的过程中，外参数改变有可能扫过能级交叉点或量子相变临界点。最近，通过研究了单个量子比特与一个横场伊辛模型耦合发现^[3]，在量子临界点，伊辛系统具有动力学不稳定性，外界扰动的微小差别可以使得伊辛自旋系统长时间演化到

两个差别很大的状态，发生所谓的量子混沌现象。与之对应，和伊辛系统耦合的量子比特会发生量子退相干增强的现象，即描述其有效动力学的约化密度矩阵的非对角项迅速消逝，这个现象可以用Loschmit Echo(洛施密特回声)描述。目前还没有系统的理论方法却克服这种的内禀的量子退相干。

量子信息启发的量子态操纵问题涉及的另一类系统是固态宏观量子系统，如超导系统。近年来利用超导约瑟夫森结量子电路实现二能级人工原子——超导量子比特的研究，在实验和理论方面均取得了引人瞩目的进展。关于超导量子器件的宏观量子特性，各类超导量子比特(包括电荷量子比特、磁通量子比特和相位量子比特)的实验，本质上展示了宏观尺度上人工原子结构的存在。超导约瑟夫森量子比特可以看成是一个人工原子，类似的人工原子会有与传统自然原子完全不同的性质。如一个非临界外磁通驱动下的三结约瑟夫森环，由于对称性破缺，会出现 Δ 原子结构。而自然原子由于 $SO(3)$ 和 $SO(4)$ 对称性，只有V型、 Ξ 型和 Λ 型结构。对于这种人工 Δ 原子进行量子绝热操纵，有可能产生持续的可控单光子，形成所谓的单光子腔。这里有诸多的理论问题有待进一步探讨，如平面超导电势分布的量子化条件及其向经典过渡的物理机制、半经典效应对产生量子纠缠的影响。

为了进一步揭示宏观人工原子所展现的新奇量子现象，并把它们应用于量子计算的物理实现，人们探索了这种人工原子与微波电磁场、超导传输线(superconducting transmission line)以及纳米机械谐振器件(nano-mechanical resonator)的强耦合机制。实现各种玻色子模式与超导人工原子的强耦合，人们便得到了一些崭新的、全固态的腔量子电动力学(cavity QED)结构。从而，可以在更广泛的范围内探索真空物理效应等场量子化现象，实现以此类玻色子模式为数据总线(data bus)的量子信息传输。

实验上已经成功地观测到超导传输线与电荷量子比特强耦合导致的真空 Rabi 劈裂和应的交流 Stark 效应(或 Lamb 移动)。其中,超导线电压分布量子化相当于一个平面上的量子微腔,与微腔和光学腔的区别是它能实现与约瑟夫森量子比特的强耦合。这些重要进展证实了量子光学和微腔 QED 结构的普适性,启发人们去探索在固体系统中人工原子所特有的新奇的量子光学结构,由此发展各种新型的量子操纵技术,为量子计算机的最终实现奠定基础。

在纳米机械共振器件^[4](NAMR)方面,自旋共振力显微镜^[5]相关的理论问题与量子传感器的研究有关。目前实验上已经实现了 Q 值为 10^4 、频率为GHz,达到标准量子极限的NAMR,它恰好可以和约瑟夫森结量子比特相耦合,因此可以作为传导量子计算的一种“数据总线”,也可以用来检验微腔QED的一些新奇物理现象,如渐进的量子退相干(progressive decoherence)。从物理上讲,它实现了一些全新的固态器件-纳米机械腔QED结构,其应用联系所谓的自旋力“显微镜”(图2)。

自旋力“显微镜”的原理也与 NAMR 类似,它是一个纳米尺度的臂,有一个带磁矩的针尖,与铁磁性样品中的单个自旋耦合。这些介观尺度上的纳米器件,充分展示了从量子世界到经典世界过渡中绚丽多姿的新奇物理现象,为实用量子比特的实现提供了各种可以在实验上检验的候选者。最终在实验上实现 GHz 纳米机械共振器件与各种人工原子的相干耦合对于物理学是重大挑战。其中的关键是要考虑固态或机械器件噪声结构的独特性质,如 $1/f$ 的低频噪音(其根本机制现在人们还极不清楚)。今后需要理论和实验研究的共同努力,彻底理解低频噪音的起源,提出各种独特的冷却方案,从而克服低频噪音对固体量子计算的影响。

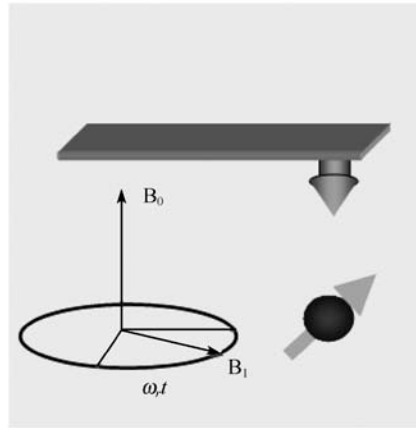


图2 纳米机械腔 QED 与自旋力“显微镜”

参 考 文 献

- [1] Wallraff A, et al. Nature (London) 2004, 431: 162.
- [2] Quan H T, Song Z, Liu X F, et al. Phys. Rev. Lett. 2006, 96: 140604.

-
- [3] Shi T, Li Y, Song Z, et al. Physical Review A 2005, 71 (3): 032309.
 - [4] LaHaye M D, et al. Science, 2004, 304: 74.
 - [5] Rugar D, Budakian R, Mamin H J et al. Nature 2004, 430: 329.

撰稿人：孙昌璞

中国科学院理论物理研究所 北京 100080