

量子信息启发的量子态操纵 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。基本理论重要的发展还包括人们关于量子理论与时空结构引力理论结合的许多尝试。这方面的努力引伸了量子测量和量子退相干的研究内涵，如黑洞的信息损失问题。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，在各种尺度上对微观、介观乃至宏观结构的形态与演化进行量子控制。

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)。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：

(1) 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？

(2) 人们对量子态控制的精度是什么？原理上是否存在的量子控制极限？

(3) 针对具体系统，通过量子态进行量子信息处理(逻辑门操作，量子信息的存贮与传输等)是否也有原理的极限？

(4) 关于能量(或能级结构)是传统量子物理耳熟能详的课题，但能量与信息的关系如何？可否通过信息的提取，改进各种人工系统对外做功的能力？

围绕以上的问题，就具体的物理系统，建议开展以下四个方面的研究

1. 人工原子的腔 QED 与量子比特集成

由于固态体系量子计算发展的迫切需求，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注目的进展。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。

为了进一步揭示这种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研究，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)实现强耦合的可能性。一旦能够实现各种玻色子模式与超导人工原子的强耦合，人们便实现了一种崭新的、甚至是全固态的腔量子电动力学(cavity QED)结构。从而，不仅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，而可以在固态系统中实现以此类玻色子模式为数据总线(data bus)的量子信息传输。

在过去两年里,这方面研究取得了突飞猛进的进展。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。一方面,这些重要进展证实了量子光学和微腔 QED 结构的普适性:人工原子与场的相互作用和自然原子具有相同的物理特性;另一方面,它会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现象,深入讨论基于超导人工原子的强耦合量子光学结构形成的物理机制。在高技术方面,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。

另外,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,理论上可以产生持续的可控单光子,形成所谓单光子腔。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。

在纳米机械共振器件^[1] (NAMR)方面,自旋共振力显微镜^[2]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)。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。

传统的原子腔 QED 研究可以用作全固态的腔量子电动力学结构的理论分析工具,至少形式上是充分的,但固态或机械器件噪声结构有其独特的性质。如 $1/f$ 的低频噪声起着关键作用,其根本机制现在人们还极不清楚。最近日本 NEC 关于电荷量子比特的实验展现了 $1/f$ 噪声对超导约瑟夫森量子计算系统的支配性。目前人们设想可以利用“bang-bang”脉冲和自旋回波的办法克服噪声,但由于机制不清楚,

因而不能算根本地解决了问题。今后需要理论和实验研究的共同努力,才能彻底理解低频噪音的起源,并克服低频噪音对固体量子计算的影响。

2. 量子态传输与量子信息存储的基础物理问题^[3]

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固态系统。但固态系统的空间量子关联是有限的。例如,在常温下我们可以利用一个具有强关联特征的“数据总线”把两个固态量子比特连接起来,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。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。然而,对一个固体系统而言,存在能隙意味着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,固体系统,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。

克服困难的途径有二:① 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。

实现完美的量子信息传输另外一种可能性是采用量子自旋梯子作为传输自旋态量子信息的中间介质,并使得与梯子两端有两个弱耦合的自旋。这种设计,使得我们能够较好地优化量子信息传输系统:一方面,充分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;另一方面,又使得信息传输是一个没有对数据总线激发的虚过程,从而部分地克服了量子关联长度是有限的这一弱点。

3. 量子计算中的量子控制问题^[4]

量子计算原则上是一个由基本量子逻辑门构成的普适量子网络,其中的每一个量子逻辑门操作原则上是一个量子控制过程:从给定的初态出发,通过选择和改变体系的哈密顿量,使体系演化的末态达到预想的目标态。

与经典控制一样,量子控制可分为开环(open loop)和闭环(close loop)控制。前者是一个初态给定、相互作用给定的自动演化过程,而后者则包含了对临时输出的测量与反馈。但不管是何种类型的量子控制,真正的量子控制要求控制器本身应该是一个量子系统,由它提供的控制变量不再是一个人为给定变化规律的经典变量。在量子控制过程中,控制变量的变化是应当由其自身运动和相互作用导致的动力学决定。因此,控制器对被控系统的反作用是不可忽略的。特别是当考虑到有反馈的闭环量子控制,反馈的过程要求从被控系统的输出提取信息,而提取信息的过程相当于量子测量。众所周知,量子力学中的量子测量会引起波包坍缩,从而导致被测系统致命的状态改变。为了克服这种量子反馈的困难,一种可能性是部分地提取信息,优化逼近目标的时间演化。

量子控制的另一个研究方向是环境噪音控制。虽然目前人们对噪音源的结构和起源不甚清楚,但人们通过加入适当的周期脉冲,压低噪音引起的量子态演化对目标的偏离。这种方法被期望用来克服低频噪音,并且与量子 Zeno 效应与反 Zeno 效应等基本物理现象相联系。

4. 信息处理的物理极限与量子热力学^[5]

Landauer 原理本质上预言了任何计算过程一定存在物理极限。在计算机发展的过程中,有各种各样“那么不基本”的物理条件制约计算技术本身。这些制约是从物理技术的层面考虑问题的,而 Landauer 和 Bennett 的工作主要强调了计算原理上的物理限制。总之,除了在微观的层面给出“麦克斯韦妖”佯谬的一个解决方案, Landauer 原理的另一个意义就是预言了信息处理的物理极限存在。Landauer 原理

的直接结果是导致了所谓的摩尔定律(Learn More, 1965)的终结。根据 Landauer 原理，擦出一个比特信息就要消耗能量 $kT\ln 2$ 。由于普适的计算过程必然包括初始化过程，而初始化意味着信息擦出，也就意味着必然要消耗一定的能量，是一种典型的物理不可逆过程。Bennett 进一步证明：对计算系统进行测量的“麦克斯韦妖”，自身首先必须制备在一个“标准态”上，而测量过程伴随着它的熵转移到环境中去，而环境的熵增加正好补偿这种熵减少。因而，当把“麦克斯韦妖”和系统放在一起，进行整体的考虑，普适计算的循环过程可视之为一个热力学可逆循环。因此，在量子的层次研究热力学循环和量子热机，是普适量子计算研究的必然要求。

量子热力学研究的另一个重要方面，与相对论和量子非定域性矛盾有关。大家知道，量子的纠缠观念对时空结构的认识赋予了崭新的内容。弯曲时空背景上，物质场会表现出十分奇异的量子特性。由于时空奇异性 and 视界的存在，真空有可能具有内禀的量子纠缠特征，产生霍金辐射等重要物理现象。另一方面，为了阐释解释引力场量子化如何自治地给出经典世界的经典物理，人们需要应用“量子退相干历史”的观念。这些观念植根于量子力学的测量问题和量子开系统的一般理论，密切联系奇异时空结构导致量子信息损失的物理现象。与传统时空结构有关的量子纠缠问题本质上是一种半经典理论。一个全量子的理论应当包含时空背景场的量子化——这就是所谓的量子引力。量子力学与引力的成功结合，可能是解决 20 世纪物理学许多悬而未决问题的开端：对于整个宇宙而言，通常不存在外部的观察者(仪器)和环境，为什么观察到的宇宙是经典的？另外既然经典力学是量子力学的极限，量子力学本身会不会是某种更精确理论的极限？

参 考 文 献

- [1] LaHaye M D, et al. Science, 2004, 304 : 74.
- [2] Rugar D, Budakian R, Mamin H J et al. Nature, 2004, 430: 329.
- [3] Quan H T, Song Z, Liu X F, et al. Phys. Rev. Lett. 2006, 96: 140604.
- [4] Fu H C, Dong Hui, Liu X F, Sun C P. Phys. Rev. A 2007, 75: 052317.
- [5] Quan H T, Wang Y D, Liu Yu-xi et al. Phys. Rev. Lett. 2006, 97: 180402.

撰稿人：孙昌璞

中国科学院理论物理研究所