

全球量子网络

彭承志

中科院量子信息与量子科技创新研究院、中国科学技术大学，合肥 230026

Email: pcz@ustc.edu.cn

摘要：国际首颗量子科学实验卫星于 2016 年 8 月 16 日在中国酒泉发射中心成功发射。在过去的三年里，“墨子号”量子卫星在轨运行状态良好。利用该卫星，我们在大空间尺度中完成了一些列量子通信以及量子物理相关实验，比如，星地千公里级双向量子纠缠分发和贝尔不等式检验、星地量子密钥分发和地星量子态隐形传输等，以及结合我国首条量子保密通信干线“京沪干线”实现了洲际量子保密通信。这些实验的完成为构建覆盖全球的天地一体化量子保密通信网络提供了可靠的技术支撑，为我国在未来继续引领世界量子通信技术发展和空间尺度量子物理基本问题检验前沿研究奠定了坚实的科学与技术基础。在本报告中，我将首先介绍近期我们在空间尺度中开展的一些量子实验和最新取得的实验进展，然后介绍未来构建全球化量子网络所面临的技术挑战、可能的解决途径和我们正在开展的相关研究工作，主要从三方面展开：基于低轨微小卫星的量子星座、中高轨量子卫星和光纤量子骨干网，最后简要介绍我们未来在该研究方向的计划和对全球量子通信网络的前景进行展望。

关键词：量子通信 量子网络 量子纠缠

超导量子计算

朱晓波

中国科学技术大学，合肥 230026

Email: xbzhu16@ustc.edu.cn

摘要：超导量子计算由于其良好的可扩展性受到了广泛的关注。随着所集成的比特数目不断增加，目前最核心的问题是如何保持所有比特的性能并实现对所有比特高精度有效的控制和读取。我们在过去的几年里，全面提升了超导量子处理器的性能。在 12 比特处理器上，弛豫时间达到了 30-50 微秒，成功实现了 12 个超导量子比特的多体真纠缠态“簇态”的制备。生成纠缠的方式是由标准的量子比特门搭建而成，原则上具有更好的可扩展性。[1]同时我们还在在固态量子计算系统中实验演示了强关联纠缠体系的量子随机游走。观察到了高保真度的态、纠缠度及关联函数在时空光锥中的含时演化以及由于边界反射及波函数干涉形成的次级纠缠波阵面的传播行为。在引入双粒子激发的情况下，实验上观测到了由时间依赖的长程反相关的强关联光子形成的费米子化行为，描绘出了光子的反聚束行为[2]。

参考文献：

[1]Ming Gong et al., Phys. Rev. Lett. 122, 110501 (2019).

[2] Z. Yan et al., Science 364(6442), 753-756 (2019).

超导量子电路中错误透明的逻辑比特相位门操作

马雨玮¹、徐源¹、蔡伟州¹、王伟婷¹、潘啸轩¹、穆相豪¹、邹长铃²、孙麓岩¹

¹清华大学交叉信息研究院，北京 100084

²中国科学技术大学量子信息重点实验室，合肥，230026

Email: mayw16@mails.tsinghua.edu.cn

摘要：由于量子系统不可避免地与非受控环境耦合，一个可扩展量子计算机最终要由量子纠错保护的逻辑量子比特构造。近来，利用微波谐振腔中光子态进行玻色量子编码的研究方案引起了人们的广泛关注。该方案利用了谐振子无限维希尔伯特空间进行信息冗余编码，同时只需监测一种错误症状，因此对硬件要求大大降低。在超导量子系统中，已经实现了二项式玻色量子纠错码，以及对逻辑量子比特的完全控制【1】。进一步地，除了对存储量子信息的逻辑比特进行保护，容错量子计算还需要对编码比特操控的动力学过程进行保护，从而得到可靠的量子逻辑门。因此，人们提出了错误透明逻辑门（error-transparent gate）的概念【2,3】：通过特殊设计的操控哈密顿量，可以使逻辑比特量子态在错误空间的演化过程跟在编码空间演化能够一一对应；这样在量子门操作过程中随机发生的错误不仅可以在其完成之后被检测纠正，而且其演化过程中的随机跳跃并不会带来额外的退相干。

我们在超导量子电动力学体系中，基于对辅助量子比特的非共振驱动，实现了对波色模式中任意光子数态的频率失谐调制，从而实现了一种基于波色编码的错误透明的任意相位门，并进行了自主量子纠错的实时保护【4】。实验对比了这种相位门和不加非共振驱动时由克尔效应产生的相位门，这种错误透明的相位门下逻辑比特的寿命有了显著的提升。我们的实验证明了错误透明的逻辑比特量子操作的可行性，为将来的容错量子计算提供了一种新思路。

关键词：容错量子计算 波色编码的逻辑比特 错误透明的量子门

参考文献

- 【1】 L. Hu et al. Quantum error correction and universal gate set operation on a binomial bosonic logical qubit, *Nature Physics*, 2019, 15, 503
- 【2】 O. Vy, X. Wang, and K. Jacobs, Error-transparent evolution: the ability of multi-body interactions to bypass decoherence, *New Journal of Physics*, 2013, 15, 053002
- 【3】 E. Kapit, Error-transparent quantum gates for small logical qubit architectures, *Physical review letters*, 2018, 120, 050503
- 【4】 Y. Ma et al., Error transparent gates on a logical qubit under quantum error correction, in preparation.

基金项目：国家科技部重点研发计划（NO. 2017YFA0304303），国家自然科学基金项目（NO. 11474177, 11874342, 11874235），安徽省量子信息技术引导专项（AHY130200）。

中性原子量子信息处理实验进展

何晓东^{1, 3, +}, 郭瑞军^{1, 2, 3}, 盛诚^{1, 3}, 许鹏^{1, 3}, 王坤鹏^{1, 2, 3}, 庄军^{1, 2, 3},

刘敏^{1, 3}, 王谨^{1, 3}, 詹明生^{1, 3, *}

1 中国科学院武汉物理与数学研究所, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉, 430071

2 中国科学院大学物理学院, 北京, 100049

3 中国科学院冷原子中心, 武汉, 430071

⁺hexd@wipm.ac.cn

^{*}mszhan@wipm.ac.cn

摘要：相互作用可控、相干时间较长且阵列几何构型灵活的中性原子体系具备在 1 mm^2 的面积上提供 10^3 到 10^4 的量子比特的能力，是进行量子模拟、实现量子计算机的有力候选者。近年来，国际上中性原子体系也取得了很大的进展，被《科学》杂志称之为量子计算的“黑马”^[1]。

本报告将介绍我们研究团队在中性原子量子信息方面的系统性工作：（1）光频移问题：包括我们的工作在内的大量的研究表明，原子量子比特在囚禁光场中的频移的差别所造成的非均匀展宽是主要的退相因素。该退相因素是限制量子比特相干时间，引发量子比特转移中相干性丢失从而降低比特之间的互联性、以及造成较大的量子门操控误差的主要原因；利用囚禁在微型光偶极阱中的单个 ^{87}Rb 原子测量了量子比特的超极化率，由此构造了新型的单原子的魔幻光强囚禁，成功地将微型光阱中的单原子量子比特的非均匀退相时间从毫秒量级提升到秒量级，最终实现关键的原子量子比特的无消相干转移^[2]。接着利用魔幻光强囚禁技术搭建新型的偶极阱阵列，构造了高品质的 16 原子量子比特寄存器。在该寄存器中，实现了平均保真度高达 99.9953% 的全局单量子比特门^[3]。（2）串扰问题：在寄存器中进行量子门操控和态的读出时，原子量子比特之间的串扰也是造成误差因而是阻碍进行量子纠错的问题关键。基于里德堡态原子的长程相互作用，首次实现了异核两原子的量子受控非门和量子纠缠^[4]。

关键词：中性原子阵列；退相干；量子门保真度；量子信息处理；光和原子相互作用；

参考文献（中文小五号宋体，其中英文和数字为 Times New Roman 小五号字）

[1] Sophia Chen, Arrays of atoms emerge as dark horse candidate to power quantum computers, doi:10.1126/science.aav5457.

[2] Jiaheng Yang, et al., Coherence Preservation of a Single Neutral Atom Qubit Transferred between Magic-Intensity Optical Traps, Phys. Rev. Lett. 2016, 117, 123201.

[3] Cheng Sheng, et al., High-Fidelity Single-Qubit Gates on Neutral Atoms in a Two-Dimensional Magic-Intensity Optical Dipole Trap Array, Phys. Rev. Lett. 2018, 121, 240501.

[4] Y. Zeng, et al., Entangling Two Individual Atoms of Different Isotopes via Rydberg Blockade, Phys. Rev. Lett. 2017, 119, 160502.

基金项目：科技部国家重大科学研究计划“基于原子、离子与光子的少体关联精密测量”、国家自然科学基金委基金、中科院“基于原子的精密测量物理”先导专项和中国科学院青年创新促进会的资助。

设备无关量子随机数扩展

李明翰、刘文钊、赵思然、白冰、刘洋、张军、张强、范靖云、潘建伟

微尺度物理科学国家实验室和近代物理系, 中国科学技术大学上海研究院, 上海 201315

Email: lwz158@mail.ustc.edu.cn

摘要: 随机数不仅是当今一些信息处理任务的重要资源, 而且与科学和哲学中的一些本质和基础问题密切相关。量子理论中的内禀随机性使得其能够实现完全不可预测的量子随机数生成。但是, 由于随机数的产生依赖于设备, 在无法完全了解设备的机制时, 产生的随机数的安全性也受到了挑战。无漏洞的贝尔检测为实现产生设备无关的随机数提供了一条很好的途径, 这被称为设备无关的量子随机数发生器 (DIQRNG) [1]。DIQRNG 借助无漏洞的贝尔检测的精妙的实验 [2,3] 很好的证明了其可行性。这些结果促进了设备无关量子随机性扩展 (DIQRE) 的发展。DIQRE 实现了产生的随机性大于消耗的。这不仅有助于理解随机性和量子理论的基本原理, 而且也推动了设备无关随机数商业化的进程。

DIQRE 的实现相比于 DIQRNG 需要更大的贝尔不等式破坏值。目前已知的无漏洞贝尔检测系统可以分为 2 类, 一类是纠缠的原子系统, 这些系统可以实现很大的贝尔不等式违背, 但是受限于系统的低采样率, 很难在有限的时间内积累足够的数据量进行分析。另一类是基于纠缠的光子系统, 它相对于原子系统有较低的贝尔不等式破坏, 但是拥有较高的采样频率。我们的 DIQRE 实现是基于最近的两项技术进步, 一是单光子探测器技术的进步使得单光子探测效率的提高, 这显著的提高了贝尔不等式的违背。另一个是随机性分析协议的发展, 使得能够从有限的结果中提取更多安全的随机性。这样的协议主要分为 2 个, 一个是基于熵累积定理 (EAT) [4], 这个协议已经在 DIQRNG 的实现中得到了应用。而在此协议基础上的改良与进步可用于实现 DIQRE。另一个是量子概率估计因子 (QEF) [5], 它对于较小的贝尔不等式破坏也能有效的实现 DIQRE。我们分别用两种分析方法实现了 DIQRE, 在实验上我们使用的是 780nm-1560nm 的自发参量下转换 (SPDC) 的纠缠源, 通过采用抽点检查协议 (spot-checking) 在保证安全性的条件下实现了 DIQRE。

关键词: device-independent (设备无关), randomness expansion (随机性扩展), loophole-free bell test (无漏洞贝尔检测)

参考文献:

- 【1】 Colbeck, R. Quantum and Relativistic Protocols For Secure Multi-Party Computation. Ph.D. thesis, University of Cambridge (2007)
- 【2】 Pironio, S. et al. Random numbers certified by Bell's theorem. *Nature* **464**, 1021-1024 (2010)
- 【3】 Liu, Y. et al. Device-independent quantum random number generation. *Nature* **562**, 548 (2018)
- 【4】 Dupuis, F., Fawzi, O. & Renner, R. Entropy accumulation. e-print [arXiv:1607.01796](https://arxiv.org/abs/1607.01796) (2016)
- 【5】 Knill, E., Zhang, Y. & Fu, H. Quantum probability estimation for randomness with quantum side information. e-print [arXiv:1806.04553](https://arxiv.org/abs/1806.04553) (2018)

Information Scrambling in Quantum Neural Network

翟荟

清华大学

Email: huizhai.physics@gmail.com

摘要: A quantum neural network encodes information of the entire input wave function into few qubit, and the concept of information scrambling describes how a local information scrambles into the entire system. In the letter we point out that these two are reverse processes of each other, therefore, we can apply the tripartite information developed for describing information scrambling to diagnose the training process of a quantum neural network. We find an empirical two-time-scale rule by examining two different tasks with different algorithms and different initializations. For sufficiently random initialization, we find that the training process contains two time scales. In a short early time scale, the performance of the neural network improves rapidly and the tripartite information increases with a universal slope. This means that the neural network becomes less scrambled than the initial random unitary. By analyzing two-point correlation, we show evidence that during this time scale of training the neural network is performing locally construction. In a longer later time scale, the performance improves with a much slower rate, and the tripartite information decreases. By analyzing the performance of the neural network on testing set with large domain structure, we show that during this time scale of training, the neural network starts to develop global structure and therefore the information is more scrambled. We believe that our work builds up a significant connection between two research topics and opens up a new way to understand quantum neural network.

Dynamic topology in parity–time-symmetric quench dynamics

薛鹏

北京计算科学研究中心, 100193

Email: gnep.eux@gmail.com

摘要: Topological phases feature a wealth of fascinating properties governed by the geometry of their ground state wave functions at equilibrium, but topological phenomena also manifest as non-equilibrium quantum dynamics in driven-dissipative and Floquet systems, as well as in quench processes. The study of phase transitions lies at the core of the description of equilibrium states of matter. Besides conventional continuous phase transitions that are signaled by symmetry breaking, topological phase transitions, characterized by the change of topology in their ground-state wavefunctions, have attracted much attention since the discovery of quantum Hall effects.

We report the first experimental study of dynamic quantum phase transitions (DQPTs) using discrete-time quantum walks (QWs) of single photons. We simulate many-body quench dynamics between distinct Floquet topological phases using photonic quantum-walk dynamics, and experimentally characterize DQPTs and the underlying dynamic topological order parameters (DTOPs) through interference-based measurements. Our experiment directly confirms the relation between DQPTs and DTOPs in quench dynamics of topological systems. This experiment opens up the avenue of investigating DQPTs and related dynamic topological phenomena using QW dynamics, whose flexible control paves the way for future studies in novel contexts such as engineered non-unitary dynamics, with decoherence, or in higher dimensions.

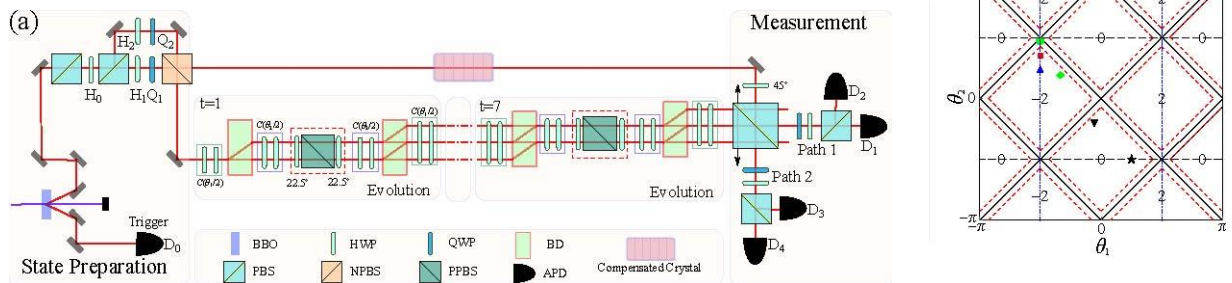


Fig. 1 Experimental setup for the simulation of DQPTs using QWs.

Furthermore, we also reported an experiment on observation of emergent momentum-time skyrmions in parity-time-symmetric non-unitary quench dynamics. We theoretically characterize and experimentally detect momentum-time skyrmions in single photon discrete-time QWs for the first time. We simulate the quench dynamics of topological systems and devise an experimental scheme where time-dependent momentum-space density matrices can be constructed by the interference-based measurements and projective measurements in position space. The experiment not only provide a new evidence that the photonic QWs represent a powerful platform for the quantum simulation but also opens up a new avenue of investigating topological quantum computation.

关键词: quantum walks, dynamic quantum phase transitions, momentum-time skyrmions

参考文献

- [1] K. K. Wang, X. Qiu, L. Xiao, X. Zhan, Z. H. Bian, B. C. Sanders, W. Yi, and P. Xue, Nat. Commun. 10, 2293 (2019).
 [2] K. K. Wang, X. Qiu, L. Xiao, X. Zhan, Z. H. Bian, W. Yi, and P. Xue, Phys. Rev. Lett. 122, 020501 (2019).

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11674056) 等

Classical simulation of quantum state using vortex light.

Shilong Liu^{1,2}, Zhi yuan Zhou^{1,2}, Bao sen Shi^{1,2}.

¹ Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China.

² Synergetic Innovation Center of Quantum Information & Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China.

Email: lslong@mail.ustc.edu.cn

The classical analogy can help us understand and visualize the behaviors of 'true' quantum state. The famous analogy is 'classical entanglements' with employing the degree of freedom of polarization and angular orbital momentum (OAM) of light. Here, we use the OAM light to simulate quantum optical cat state and high dimensional entanglement. We transfer a cat state $|\alpha\rangle_{live} + |-\alpha\rangle_{dead}$ defined in photon number space to it living in mode number space, named as analogous cat state (a-CS). We find that the intensity distributions of a-CS in position space is similar to the Wigner function of q-CS in phase space [1]. Experimentally, we generate an a-CS with high fidelity evolved from 'kitten' to 'cat'. Also, we propose an analogous model system to simulate high-dimensional quantum entanglement, based on angular and radial degrees of freedom of the improved Laguerre Gaussian mode [2]. Experimentally, we observed strong violations of the Bell-CGLMP inequality for the maximally non-separable state of dimension 2 through 10. The results for violations in classical non-separable states are in very good agreement with quantum instance, which illustrates that our scheme can be a useful platform to simulate high-dimensional non-local entanglement. The analogies in both cat state and high dimensional entanglement not only help us visualize quantum state, but also may provide promising applications for classical and quantum information processing.

Keywords: Cat state, OAM light, Wigner function, High dimensional entanglement.

Ref:

[1] Liu S L, Zhou Q, Liu S K, et al. Classical analogy of a cat state using vortex light[J]. **Communications Physics**, 2019, 2(1): 75.

[2] Liu S, Liu S, Yang C, et al. Classical simulation of high-dimensional entanglement by non-separable angular-radial modes[J]. **Optics Express**, 2019, 27(13): 18363-18375.

纠缠态连续变量量子密钥分发与经典光信号的密集波分复用

杜珊娜、刘文元、田岩、李永民

山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006

Email: yongmin@sxu.edu.cn

波分复用是指在同一根光纤中同时传输多个不同波长光信号的技术, 其主要意义在于增加通信容量, 节约光纤资源, 建立动态可重构网络。目前大多数量子通信实验系统都是利用专用暗光纤作为量子通道, 将量子密钥分发(QKD)系统与波分复用技术相结合, 有利于实现在现有光纤网络上部署 QKD, 推进 QKD 系统的实用化。其面临的困难主要在于经典光信号的不充分隔离和光纤的非线性效应等, 会在量子信道处产生额外的噪声, 对 QKD 性能产生严重的影响。我们理论和实验研究了纠缠态连续变量量子密钥分发(CV-QKD)与经典光信号的密集波分复用, 重点分析了影响 QKD 的两个主要噪声源: 自发拉曼散射(SRS)和四波混频(FWM)噪声。实验上利用单光子探测器(SPD)测量了五个密集波分复用(DWDM)光(ITU 42-46 通道, 总功率 10mW)入射到不同长度单模光纤所产生的位于量子通道(ITU47)上的 SRS 和 FWM 总噪声功率(图 1)。之前的研究工作^[1,2]主要讨论 SRS 对 QKD 的影响, 通过降低经典光功率、加大通道间隔以及增加传输距离的办法, 忽略了 FWM 的不利影响。然而对于常规的光功率、较小的通道间隔和较短的传输距离, FWM 的影响不可忽视, 我们研究分析了经典光信号产生的 FWM 噪声对 CV-QKD 的影响机制, 并在实验上进行了验证(图 2); 进一步通过将量子通道置于 ITU 47.5 通道, 有效抑制了 FWM 噪声的不利影响, 实现了纠缠态 CV-QKD 与较强经典光信号的密集波分复用。

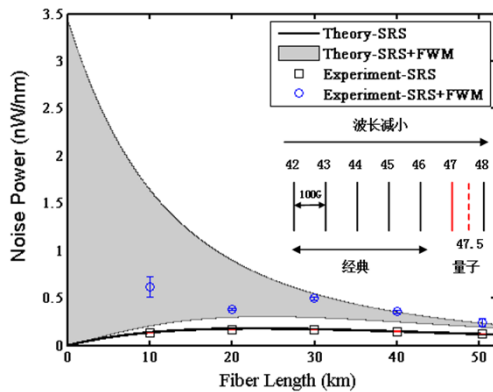


图 1 SPD 测量 SRS 和 FWM 噪声

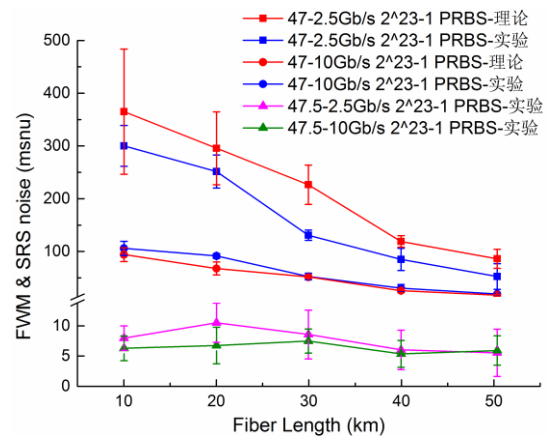


图 2 BHD 测量散射到 47 和 47.5 通道上的 SRS 和 FWM 噪声

关键词: 连续变量量子密钥分发 密集波分复用 四波混频噪声 自发拉曼噪声

参考文献

- 【1】 Bing Qi *et al.*, Feasibility of quantum key distribution through a dense wavelength division multiplexing network, *New J. Phys.* 2010, 12, 103042.
- 【2】 Rupesh Kumar *et al.*, Coexistence of continuous variable QKD with intense DWDM classical channels, *New J. Phys.* 2015, 17, 043027.

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0301403), 国家自然科学基金(61378010, 11504219)

固态自旋量子控制实验研究

荣星、伍旻、段昌奎、杜江峰

中国科学技术大学，物理学院，近代物理系，合肥，230026

Email: xrong@ustc.edu.cn

摘要: 实现量子系统的精确控制是认识并利用微观世界的必然诉求,也是诸多前沿科学领域的核心要素。量子信息研究中的量子态制备、抑制量子消相干过程、量子逻辑门的执行、量子纠缠态制备与保护等等从本质上都可以归结为量子相干控制问题。在实际固态自旋物理体系中,由于存在环境噪声造成的退相干效应,量子相干会被严重破坏。此外,用于操控量子比特的外加调控场也会引入新的噪声,从而限制量子控制的精度。因此如何实现高精度的电子自旋量子相干控制成为基于自旋的量子技术领域的关键科学问题之一。

本报告将汇报我们近年发展动力学解耦技术和量子最优控制方法,逐步克服了限制量子控制精度的诸多不利因素,实现了达到容错量子计算阈值的普适量子逻辑门操控,并且实现了“又快又好”的量子逻辑门操控[1-4],为基于电子自旋的量子计算及量子精密测量提供了重要基础。此外,我们还将展示如何通过高精度自旋量子控制在单自旋体系中观测宇称时间对称性破缺这一重要物理学现象[5]。

关键词: 自旋 量子信息 量子控制

- 【1】 X. Rong et al., Phys. Rev. Lett. 112, 050503 (2014)
- 【2】 J. Zhou et al., Phys. Rev. Lett. 112, 010503 (2014)
- 【3】 X. Rong et al., Nat. Commun. 6, 8748 (2015)
- 【4】 J. Geng et al., Phys. Rev. Lett. 117, 170501(2016)
- 【5】 Y. Wu et al., Science 364, 878 (2019)

基金项目: 科技部重点研发专项 (NO. 2018YFA0306600 和 2016YFB0501603)。

盲人摸象:从局部信息中探索经典与量子世界的边界

王子竹

北京计算科学研究中心, 100193

Email: zizhu@uestc.edu.cn

摘要: 如何有效的认证一个由数百个量子比特构成的物理系统的量子性质? 什么样的量子性质才是量子算法超越经典算法的制胜法宝? 在量子技术飞速发展的今天, 上面这两个问题仍不能被完全解答。通过另辟蹊径, 我们采用“盲人摸象”的方法, 通过深入研究符合一定对称的经典与量子系统的局部信息, 探寻经典与量子世界的边界, 摸索上述全局问题的答案。我们从数学中的经典问题:边缘问题出发, 使用凸多胞体的方法表征一维和二维欧氏晶格上符合平移不变这一常见对称的概率分布的近邻边缘分布。我们发现一维晶格的边缘分布可以用“多米诺骨牌”的方法完全刻画(图1), 但到了二维边缘分布就变的极为复杂: 根据每个节点的取值个数不同, 边缘分布的概率空间由简单到复杂。当每个节点只取2-3 个值的时候, 此空间是个凸多胞体。用拼接法和动态系统可以证明, 当每个节点取值接近3000 的时候, 此空间不再是半代数集合。而如果对每个节点取值无限制, 那么边缘问题就是不可解的问题。有了边缘分布概率空间的近似刻画, 我们通过非定域的方法使用这些边缘分布表征 Bell 不等式并采用凝聚态物理中的基于矩阵基态和张量网络态的数值算法研究多体量子系统对不等式的破坏。通过对不等式对应的经典系统和破坏不等式的量子系统进行研究, 我们既可以对全局量子系统的纠缠和非定域性质做出定性结论, 又可以研究非定域性与量子加速间的关系, 从而对回答上述问题提供全新的理论工具。

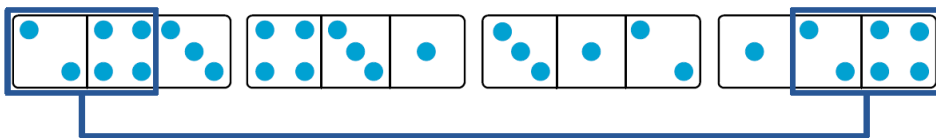


图1 一维边缘分布集合的顶点均由类似这样的多米诺骨牌组成

关键词: 量子基础理论, 多体量子系统的非定域性, 凸优化

参考文献

【1】 Wang Z, Navascués M. 2018 Two-dimensional translation-invariant probability distributions: approximations,

characterizations and no-go theorems. Proc. R. Soc. A 474: 20170822.

【2】 Wang Z, Singh S, Navascués M. 2017 Entanglement and nonlocality in infinite 1D systems.

Phys. Rev. Lett. 118, 230401.

【3】 Goldstein S, Kuna T, Lebowitz JL, Speer ER. 2017 Translation invariant extensions of finite

volume measures. J. Stat. Phys. 166, 765–782.

【4】 Kari J. 2008 On the undecidability of the tiling problem. LNCS, vol. 4910, pp. 74–82. Berlin, Germany: Springer.

多模高斯体系中量子导引的判定及分配

项玉、何琼毅

北京大学物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871

Email: xiangy.phy@pku.edu.cn

摘要: 作为量子力学区别于经典力学最显著的特征之一, 量子纠缠不仅具有重要的理论研究意义, 也是量子密码、量子通信、量子计算和量子测量等技术的重要资源, 对这方面的研究已经成为国际科技界激烈竞争的焦点。量子导引是一种特殊的量子纠缠类型, 与一般定义的量子态不可分的纠缠类型相比, 还具有非定域性和天然的不对称性, 这些特性使得它在实现单方设备不依赖的量子密钥分发和量子秘密共享等量子信息处理任务中具有不可替代的作用。

针对实际中广泛存在的多模高斯态, 基于体系的协方差矩阵, 可以度量任意模式间的量子导引。我们利用此判据, 首次发现并证明了多模高斯体系内存在一类特殊的CKW型单配性 (monogamy) 约束。广义上, 人们把多体量子体系中描述量子关联在子体系之间如何分配的约束关系式统称为单配性不等式。之后, 我们分别与山西大学及西安交通大学的两个实验组合作, 在四模式方形高斯簇态【1】以及由量子光学频率梳产生的十六模高斯态【2】两个实验中, 实现了任意模式间量子导引的度量, 并验证了现有的四种单配性约束关系, 制备了单向量子导引态, 为未来构建具有等级权限的多方量子通信网络提供了可能。

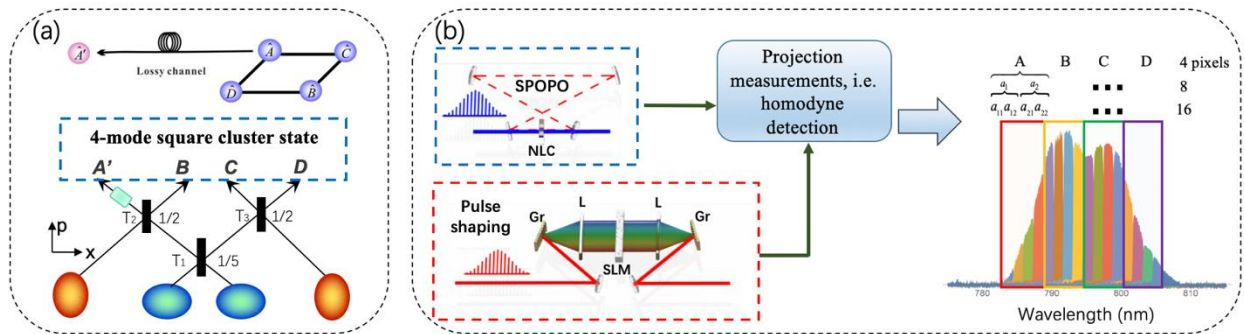


图 1 a. 四模式方形高斯簇态制备示意图 b. 由量子光学频率梳产生的十六模高斯态制备示意图

关键词: 量子导引 多模高斯态

参考文献

【1】X. W. Deng, Y. Xiang, C. Tian, G. Adesso, Q. Y. He, Q. H. Gong, X. L. Su, C. D. Xie, and K. C. Peng, Demonstration of monogamy relations for Einstein-Podolsky-Rosen steering in Gaussian cluster states, *Phys. Rev. Lett.* 118, 230501 (2017).

【2】Y. Cai, Y. Xiang, Y. Liu, Q. Y. He, N. Treps and C. Fabre, Versatile multipartite EPR steering via a quantum frequency comb, in preparation.

基金项目: 国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目 No. 2016YFA0301302 等

颜色无关探测器在多色干涉中的应用

曲泺源、马飞、管建宇、郑名扬、谢秀平、陈宇翱、张强、潘建伟

微尺度物理科学国家实验室和近代物理系, 中国科学技术大学上海研究院, 上海 201315

Email: quluoyua@mail.ustc.edu.cn

摘要: 干涉测量法利用辐射场中的相位信息来揭示其光源的属性[1]。它被广泛用于天文学, 显微学和计量学[2-4], 作为实现高分辨率的方法。传统的光学探测器基本上是光子计数器, 其机制依赖于对光子能量敏感的物理过程。因此, 它们区分不同的波长, 因此光学干涉通常只涉及准单色光[5]。然而, 不同波长的光子之间的相对相位可能提供丰富的信息源。在这里, 通过构建颜色无关探测器[6], 我们在不同波长的光之间实现了强度干涉测量[7,8], 从而揭示了光学辐射场的新特征。

实际上, 测量装置通常被认为是破坏量子相关性的对象, 或者粗略地说, 是“使波函数崩溃”。相反, 在这里, 我们故意利用我们的检测设备的量子特性, 特别是它们与它们正在测量的系统纠缠在一起的能力。通过有目的地操纵探测器和待测系统之间的纠缠, 我们发现了隐藏的相关性, 这些相关性能够实现一种新的颜色相关空间分辨手段。

我们新的探测器和干涉测量法可以增强荧光显微镜[9-11]解析附近蛋白质的能力, 这些蛋白质以不同的频率发射。同时, 由于我们的技术不需要透镜, 因此它可以应用于非常大的探测孔径, 以及不容易获得透镜的光谱区域中。

关键词: color blind detector (颜色无关探测器), intensity interferometry(强度干涉), frequency conversion(频率转换)

参考文献:

1. P. Hariharan, *Basics of interferometry* (Elsevier, 2010).
2. J. D. Monnier, *Reports on Progress in Physics* 66, 789 (2003).
3. G. Shtengel, et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 3125 (2009).
4. V. Giovannetti, S. Lloyd, L. Maccone, *Nature Photonics* 5, 222 (2011).
5. L. Mandel, E. Wolf, *Optical coherence and quantum optics* (Cambridge University Press, 1995).
6. J. Cotler, F. Wilczek, V. Borish, arXiv preprint arXiv:1607.05719 (2016).
7. R. H. Brown, R. Twiss, *Nature* 178, 1046 (1956).
8. G. Baym, *Acta Physica Polonica. Series B* 29, 1839 (1998).
9. K. S. Grubmayer, D.-P. Herten, *Advanced Photon Counting* (Springer, 2014), pp. 159–190.
10. O. Schwartz, et al., *Nano Letters* 13, 5832 (2013).
11. B. O. Leung, K. C. Chou, *Applied Spectroscopy* 65, 967 (2011).

基金项目: 2018YFB0504300

Work statistics with quantum coherence

Bao-Ming Xu^{1, 2*}, Zhan Chun Tu^{2†}, Jian Zou^{3‡} and Jihua Wang¹

¹Shandong Key Laboratory of Biophysics, Institute of Biophysics,
Dezhou University, Dezhou 253023, China

²Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

³School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

An open question of fundamental importance in thermodynamics is how to describe the statistics of work for the initial state with quantum coherence. In this paper, work statistics is considered in a fully new perspective of “wave-particle” duality. Based on the generalized quantum work measurement, the predictability of energy levels D_w and the effectiveness of coherence V_w are defined, and they obey the inequality $D_w^2 + V_w^2 \leq 1$ which is a fundamental tradeoff relation between coherent and incoherent work distributions. These results shed light on the effects of quantum coherence in quantum thermodynamics. As one concrete demonstration of these results, we give a unified framework of quantum work statistics for any initial state.

* xbm@bit.edu.cn

† tuzc@bnu.edu.cn

‡ zoujian@bit.edu.cn

Coherence time, scalable global gate and error mitigation with ion-qubits

Kihwan Kim

Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

The performance of a physical quantum device for quantum computation can be evaluated by the following three criteria; the coherence time of a qubit, the fidelity of a logical gate, and number of qubits involved in coherent operations.

We have demonstrated the coherence time of a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion-qubit over 600 s with sympathetic cooling by a $^{138}\text{Ba}^+$ ion and optimized dynamical decoupling-pulses in an ambient magnetic field condition [1]. Recently, we experimentally investigate the limiting factors and enhance the coherence time to more than twice. We find that ambient magnetic-field noise and phase noise of the local oscillator are main sources for decoherence. To suppress field fluctuation, we enclose our vacuum system with a two-layer μ -metal magnetic-shielding and use a permanent magnets to produce stable field. For the reference of the local oscillator, we use a crystal oscillator, which has one order of magnitude smaller Allan deviation than our previous Rb clock at 1 s. With such improvements, we observe the enhancement for the coherence time of clock state of $^{171}\text{Yb}^+$ ion.

We also have developed a five-qubit programmable system and realized a scalable global quantum gate. A quantum algorithm can be decomposed into a sequence consisting of single qubit and 2-qubit entangling gates. To optimize the decomposition and achieve more efficient construction of the quantum circuit, we can replace multiple 2-qubit gates with a single global entangling gate. Here, we propose and implement a scalable scheme to realize the global entangling gates on multiple $^{171}\text{Yb}^+$ ion qubits by coupling to multiple motional modes through external fields. Such global gates require simultaneously decoupling of multiple motional modes and balancing of the coupling strengths for all the qubit-pairs at the gate time. To demonstrate the usefulness of the global gates, we prepare the Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) states in a single global-gate operation, and successfully show the genuine multi-partite entanglements up to four qubits with the state fidelities over 93.4 % [2].

For the improvements of logic gate fidelities, we apply a scheme of quantum error mitigation based on probabilistic error cancellation [3], which requires no additional qubit resources different from the scheme of quantum error correction. We benchmark the performance of the protocol of the probabilistic error cancellation in our trapped-ion system. We clearly observe that effective gate fidelities exceed physical fidelities. The error rates are effectively reduced from 10^{-3} to 10^{-5} and from 10^{-2} to 10^{-3} for single- and two-qubit gates, respectively [4]. We believe our demonstration opens up the possibility of implementing high-fidelity computations on a near-term noisy quantum device.

[1] Ye Wang, et al., Nature Photon. 11, 646 (2017)

[2] Yao Lu, Shuaining Zhang, Kuan Zhang, et al., arXiv:1901.93598

[3] Y. Li and S. C. Benjamin, Phys. Rev. X 7, 021050 (2017)

[4] Shuaining Zhang, et al., arXiv:1905.10135

N-phonon bundle emission via the anti-Stokes process

吕新友

华中科技大学物理学院, 武汉 430074

Email: xinyoulu@hust.edu.cn

The manipulation of quantum states is one of the main topics of modern science. Here, We demonstrate theoretically the bundle emission of n strongly correlated phonons in an acoustic cavity QED system. The mechanism relies on anti-Stokes resonances that generate super-Rabi oscillations between states with a large difference in their number of excitations, which, combined with dissipation, transfer coherently pure n -phonon states outside of the cavity. This process works with close to perfect purity over a wide range of parameters and is tunable optically with well-resolved operation conditions. This broadens the realm of quantum phononics, with potential applications for on-chip quantum information processing, quantum metrology, and engineering of new types of quantum devices, such as optically heralded N -phonon guns.

参考文献

[1] Qian Bin, Xin-You Lü, F. P. Laussy, F. Nori, and Ying Wu, arXiv: 1907.12714

量子纠缠态光场及基于光纤信道纠缠分发的研究

冯晋霞、李渊骥、张宽收

山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006

Email: fengjx@sxu.edu.cn

摘要: (摘要正文, 中文, 宋体五号字, 其中英文和数字为 Times New Roman 五号字, 摘要不得少于 400 字)

连续变量纠缠态由于其确定性产生、高效率的特点而被广泛应用于连续变量量子信息处理[1-3]。在量子信息处理过程中纠缠态与量子信道发生相互作用而退相干, 这是限制长距离量子信息发展的重要因素之一。光纤信道作为理想的量子信道, 是目前连续变量量子信息研究关注的热点。我们利用 II 类匹配的楔角 PPKTP 晶体构成了三共振的非简并光学参量放大器, 获得了 8.3 dB 的光通信波段 1.5 μm 连续变量纠缠态光场[4]。将产生的量子纠缠态光场注入单模光纤研究其在光纤信道的分发特性。连续变量量子纠缠态光场的量子特性在光纤信道传输距离达 20 km 后仍得到保持[5, 6]。该研究可为基于光纤的长距离连续变量量子信息研究提供有效的依据。

关键词: 非简并光学参量放大器, 光纤通信, 量子纠缠态, 纠缠分发

参考文献 (中文小五号宋体, 其中英文和数字为 Times New Roman 小五号字)

- 【1】 S. L. Braunstein S L, H. J. Kimble, 1998, Phys. Rev. Lett. 80 869
- 【2】 X. Y. Li, Q. Pan, J. T. Jing, J. Zhang, C. D. Xie, K. C. Peng, 2002, Phys. Rev. Lett. 88 047904
- 【3】 L. S. Madsen, V. C. Usenko, M. Lassen, R. Filip, 2012, Nat. Commun. 3 1083
- 【4】 J. X. Feng, Z. J. Wan, Y. J. Li and K. S. Zhang, 2018, Laser Phys. Lett. 15(01), 015209
- 【5】 J. X. Feng, Z. J. Wan, Y. J. Li and K. S. Zhang, 2017, Opt. Lett., 42(17), 3399
- 【6】 万振菊, 冯晋霞, 成健, 张宽收, 2018, 物理学报 67 (2), 024203

Sending-or-Not-Sending Twin-Field 量子密钥分发实验研究

刘洋^{1,2,3}、于宗文^{4,5}、张伟君⁶、管建宇^{1,2}、陈玖朋^{1,2}、张驰^{1,2}、胡骁龙⁴、李浩⁶、

姜聪⁴、陈腾云^{1,2}、尤立星⁶、王镇⁶、王向斌^{2,3,4}、张强^{1,2}、潘建伟^{1,2}

1. 中国科学技术大学微尺度国家实验室&近代物理系, 上海 201315

2. 中国科学院量子信息与量子科技前沿卓越创新中心, 上海 201315

3. 济南量子技术研究院, 山东 250101

4. 清华大学低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084

5. 数据通信科学技术研究所, 北京 100191

6. 信息功能材料国家重点实验室, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050

Email: zc4044@mail.ustc.edu.cn

摘要: 量子密钥分发(QKD)从物理学原理上保证了密钥分发的安全性。在实际应用中, 信道损耗是提高量子密钥分发传输距离最大的限制因素之一。理论方面, 诱骗态协议将基于相干态光源的 QKD 安全成码率与信道损耗的平方关系提升至线性关系, 该协议可以抵御针对不完美光源的光子数分离攻击, 提供了理论上与采用单光子源同样高的安全性及相近的成码率。双场量子密钥分发(TF-QKD)方案的提出, 将成码率-信道损耗的线性关系进一步提升至平方根关系, 并能在理论上打破由 PLOB bound 所限定的无中继 QKD 安全成码率极限, 有可能打破现有协议在实际 QKD 应用中的最远距离极限。TF-QKD 所面临的技术挑战是实现两个远距离独立激光源单光子量级的干涉。本研究团队采用频率锁定技术锁定两个独立激光源的波长, 并利用相位参考光和后补偿方案估计和补偿光纤链路中的相位漂移。结合高性能的单光子探测器, 本实验在最远 300km 距离的光纤场景下演示了基于 Sending-or-Not-Sending(SNS)协议的 TF-QKD 方案。考虑到有限码长效应, 本实验在 300km 距离下的安全成码率为 1.96×10^{-6} , 打破了无中继的 QKD 安全成码率极限(8.64×10^{-7})。

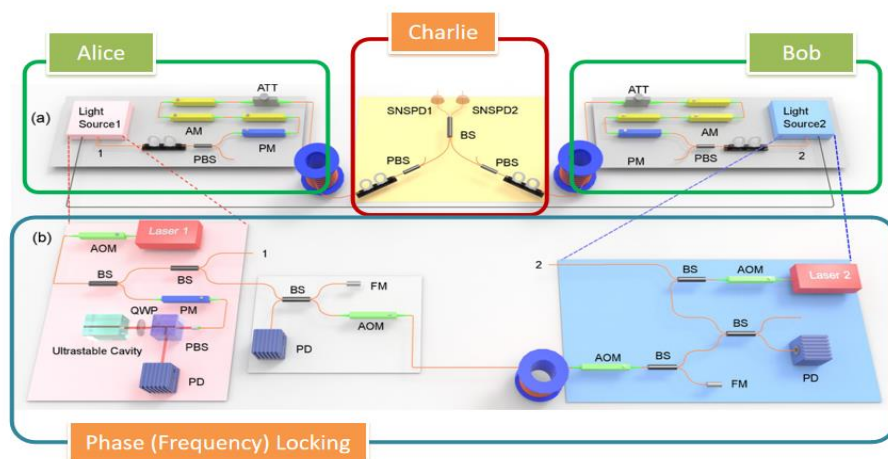


图 1 Sending-or-Not-Sending 双场量子密钥分发(TF-QKD)实验装置图

关键词: 双场量子密钥分发 Sending-or-Not-Sending 频率锁定 相位参考光 PLOB bound

参考文献

- 【1】 Y. Liu *et al.*, Experimental Twin-Field Quantum Key Distribution through Sending or Not Sending, *Phys. Rev. Lett.* (已接收)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 2017YFA0303900 No. 2017YFA0304000)

贝尔对角态的定域隐态模型

张福林、张媛媛

天津大学物理系，天津 300072

Email: flzhang@tju.edu.cn

摘要：量子导引是一种介于量子纠缠和贝尔非定域性之间的量子关联，它存在于不能用定域隐态模型刻画的量子态中。因而构造定域隐态模型相当于给出量子态无量子导引的充分条件，一族量子态最优的定域隐态模型对应了该类态量子导引的分界点。然而，解析地构造定域隐态模型，尤其是最优的定域隐态模型，是一个非常困难的问题，现有的已知模型均可以在某些意义下看作 1989 年 Werner 所给出的模型的推广。

本报告对本课题组最近期在定域隐态模型的工作给出简单的综述，其中主要结果表明，可以从高对称性态的结果通过变换得到低对称态的非平庸的定域隐态模型。具体讲，我们从两量子比特的系统入手，发现可以将 Werner 态的定域隐态模型通过变换给出贝尔对角态的结果，并且所给出的模型是最优的。该结果的进一步推广可以给出普遍的两量子比特态的一类非最优的定域隐态模型，也就是给出了两量子比特态无量子导引的一个充分条件。同时，将利用离散随机变量给出的 Werner 态的定域隐态模型做上述变换，可以给出贝尔对角态的离散随机变量给出的 Werner 态的定域隐态模型定域隐态模型，该结果展示了在利用经典随机变量模拟量子纠缠时，所需要的经典随机性与量子纠缠之间的关系。

关键词：定域隐态模型 量子导引 贝尔对角态

参考文献

- 【1】 F.-L. Zhang *et al.*, Local-hidden-state models for Bell diagonal states and beyond, *Phys. Rev. A.* 2019, 99, 062314.
- 【2】 Y.-Y. Zhang *et al.*, Local hidden state models for T-states using finite shared randomness, *Europhys. Lett.*. 2019, *to be published.*

基金项目：国家自然科学基金项目 (No. 11675119, No. 11575125, No. 11105097)

Simultaneous cooling of coupled mechanical resonators in cavity optomechanics

赖登高¹、邹芬¹、侯邦品²、肖云峰³、廖洁桥¹

1. 湖南师范大学, 长沙 410081;

2. 四川师范大学, 成都 610068;

3. 北京大学, 北京 100871

Email: jqliao@hunnu.edu.cn

摘要: Quantum manipulation of coupled mechanical resonators has become an important research topic in optomechanics because these systems can be used to study the quantum coherence effects involving multiple mechanical modes. A prerequisite for observing macroscopic mechanical coherence is to cool the mechanical resonators to their ground state. Here we propose a theoretical scheme to cool two coupled mechanical resonators by introducing an optomechanical interface. The final mean phonon numbers in the two mechanical resonators are calculated exactly and the results show that the ground-state cooling is achievable in the resolved-sideband regime and under the optimal driving. By adiabatically eliminating the cavity field in the large-decay regime, we obtain analytical results of the cooling limits, which show the smallest achievable phonon numbers and the parameter conditions under which the optimal cooling is achieved. Finally, the scheme is extended to the cooling of a chain of coupled mechanical resonators.

关键词: 腔光力学, 力学振子, 量子冷却

参考文献

【1】 Deng-Gao Lai, Fen Zou, Bang-Pin Hou, Yun-Feng Xiao, and Jie-Qiao Liao, Simultaneous cooling of coupled mechanical resonators in cavity optomechanics, *Phys. Rev. A* 2018, **98**, 023860.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11822501, No. 11774087, No. 11505055, No. 11574398, and No. 11654003) 等

Measurement-induced cooling of a qubit in structured environments

景俊 (Jun Jing)

Zhejiang Province Key Laboratory of Quantum Technology and Device,
Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China
jingjun@zju.edu.cn

Abstract:

In this work, we study the dynamics of a two-level system (qubit) embedded in a finite-temperature structured-bath under periodical non-demolition measurements. The system under measurements will reach a quasi-steady state, whose effective temperature can be maintained lower than that of the surrounding environment. We study the influence of the environmental modes from different regimes of frequency on the qubit. The spectrum of the bath consisting of a large number of bosonic harmonic oscillators can be approximately divided into three parts according to their effects of cooling or heating. Due to the spectral analysis over the structured-bath based on a time-convolutionless master equation beyond the rotating-wave approximation, we propose a necessary cooling condition for the bath in the context of quantum non-selective and non-demolition measurements. It is consisted of two parts: (i) the logarithmic derivative of the spectrum around the system transition frequency should be large enough, at least larger than one half of the inverse temperature of the bath; (ii) the spectrum should have a sharp high-frequency cutoff that cannot be far-detuning from the system transition frequency. From this condition, we find that environments with two popular types of spectra, i.e., the modified Lorentzian models and the super-Ohmic models, are available for cooling the open quantum system.

Reference:

Jia-Ming Zhang, Jun Jing*, Lian-Ao Wu, Li-Gang Wang, and Shi-Yao Zhu, arXiv:1901.09667, accepted by Physical Review A.

Quantum self-contained refrigerator

于长水

大连理工大学物理学院, 大连 116024

Email: ycs@dlut.edu.cn

Abstract: Thermodynamics is one of the four pillars of theoretical physics and provides us with an essential way to study the thermodynamic process such as the heat engine and the refrigerator. The studied physical system down to the quantum level, quantum mechanics will have to be considered. Quantum thermodynamics which is the intersection of thermodynamics and quantum mechanics, provides a new approach to investigating microscopic physics. Recently, the concept of the self-contained quantum refrigerator has been raised [28–32]. The “self-contained” means that (i) all degrees of freedom of the refrigerator should be considered; (ii) no external source of work is allowed; and (iii) in particular, time-dependent Hamiltonians or prescribed unitary transformations are not allowed. The self-contained refrigerator works in the regime of weak internal coupling. Could a strong internal interaction provide more effective power?

Motivated by this question, we study the strong-internal-coupling quantum refrigerator. It is shown that strong internal coupling reduces the cooling ability of the refrigerator. In contrast to the weak-coupling case, strong internal coupling could lead to quite different and even converse thermodynamic behaviors. If some modes of the three thermal reservoirs can be properly filtered out, the efficiency and the working domain of the refrigerator can be improved in contrast to the those in the weak internal coupling regime, which indicates one advantage of the strong internal coupling. However, the background natural vacuum reservoir could cause the filtered refrigerator to stop working and the background natural thermal reservoir could greatly reduce the cooling efficiency. Finally, we also demonstrate that such a quantum self-contained refrigerator can also be implemented via quantum Cavity QED in the weak coupling regime.

关键词: Quantum refrigerator, quantum thermodynamics

参考文献

- 【1】 N. Linden, S. Popescu, and P. Skrzypczyk, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 130401 (2010).
- 【2】 P. Skrzypczyk, N. Brunner, N. Linden, and S. Popescu, *J. Phys. A: Math. Theor.* **44**, 492002 (2011).
- 【3】 Chang-shui Yu, and Qing-yao Zhu, *Phys. Rev. E.* **90**, 052142 (2014).
- 【4】 Zi-chen He, Xin-yun Huang, and Chang-shui Yu, *Phys. Rev. E.* **96**, 052126 (2016).
- 【5】 Chang-shui Yu, Bao-qing Guo, and Tong Liu, *Optics Express.* **27**, 6863 (2019).

在三能级系统中实现快速绝热的通用几何量子计算

吴金雷, 宋杰, 姜永远

哈尔滨工业大学物理学院, 哈尔滨 150001

Email: jinlei_wu@126.com

苏石磊

郑州大学物理学院, 郑州 450001

夏岩

福州大学物理系, 福州 350002

摘要: 我们提出在三能级系统中实现通用快速绝热的几何量子计算, 其中有三种不同的耦合情况被考虑, 分别是时变失谐耦合, 大失谐耦合, 以及单光子共振耦合。对于时变失谐耦合和单光子共振耦合两种情况, 通过固定 pump 脉冲和 Stokes 脉冲的幅值比例, 我们可以把三能级系统转化为一个有效的两能级系统。对于大失谐耦合的情况, 通过二阶微扰近似的方法, 三能级系统也可以被转化成一个有效的两能级系统。基于有效的两能级系统, 通过使用反向导热驱动的方法, 一系列通用的单量子比特几何相位门可以被实现。对于非平庸的两量子比特门, 我们引入一个量子比特-共振器系统, 它由两个三能级系统和一个单模量子场组成。通过设置参数条件, 这个量子比特-共振器系统可以被简化为一个三能级系统, 从而能够被进一步转化为一个有效的两能级系统。基于有效的两能级系统, 使用类似于通用的单量子比特几何相位门的方法, 在三种耦合情况下我们均可以实现一个非平庸的两量子比特几何相位门。通过组合通用的单量子比特门和一个非平庸的两量子比特门, 任意的量子么正操作可以被实现。

三种实现快速绝热几何量子计算的耦合方案都是实验可行的, 因为没有不可实现的基态之间的耦合被引入, 只需要对经典场的波形和相位进行修正。另外, 我们还讨论了方案实现的速度, 方案对系统的衰减和参数控制误差的鲁棒性, 以及不同耦合方案之间的对比。

关键词: 几何相位, 绝热捷径, 量子计算, 三能级系统

参考文献

- 【1】 J.L.Wu *et al.*, Universal speeded-up adiabatic geometric quantum computation in three-level systems via counterdiabatic driving, *J. Phys. A: Math. Theor.* 2019, 52, 335301

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11804308)

基于非马环境及李雅普诺夫控制实现机械振子压缩

熊标、周玲*

大连理工大学物理学院, 大连 116024

Email: zhlxn@dlut.edu.cn

摘要: 对量子涨落的压缩在基础量子物理中起着重要作用, 并且对超灵敏探测有着显著的影响。在这个报告中, 我们将展示我们最近的两个关于实现机械振子压缩的研究工作。第一个工作中, 我们通过将机械振子暴露在非马尔可夫环境中, 诱导出机械振子的参量放大项, 从而压缩机械振子。与马尔科夫环境相比, 我们可以获得更强的压缩, 而且得到的压缩是渐进稳定的。第二个工作中, 我们通过李雅普诺夫控制的方法制备机械振子的压缩, 在这个方案中, 选择机械振子的方均涨落作为控制函数, 机械振子的自由频率作为控制场, 通过李雅普诺夫控制的方法选择控制场, 结果表明, 机械振子的方均涨落可以单调递减, 从而实现振子压缩。并且压缩度经过一个很短的演化时间就超过 3dB 极限, 即使在室温下也可以实现超过 3dB 的机械振子的压缩。两个方案中我们都探讨了对得到的振子压缩的探测。

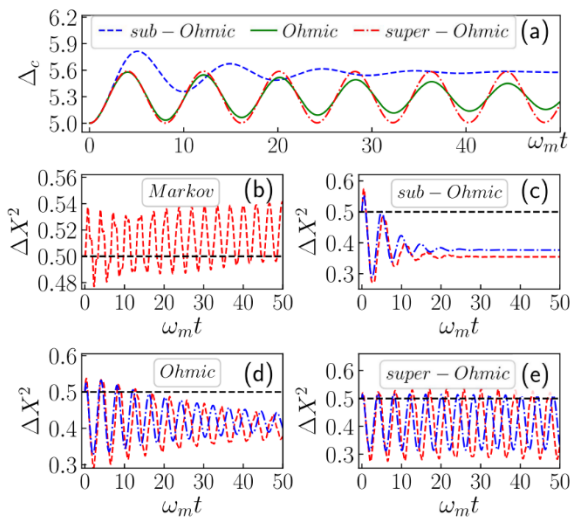


图 1 基于非马尔可夫环境实现振子压缩

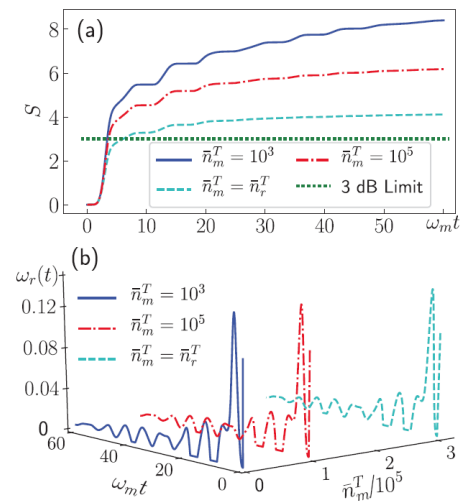


图 2 基于李雅普诺夫控制实现压缩

关键词: 振子压缩, 光力系统, 非马环境, 李雅普诺夫控制

参考文献

- 【1】 Biao Xiong *et al.*, Optomechanical quadrature squeezing in the non-Markovian regime, *Optics Letters*, 2018, 43 (24), 6053-6056.
- 【2】 Biao Xiong *et al.*, Strong mechanical squeezing in optomechanical system based on Lyapunov control, submitted.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11874099, 11474044)

反常光机械系统及其在手性声子调控中的应用

王信

工作单位: 西安交通大学理学院物理系

E-mail: wangxin.phy@xjtu.edu.cn

实现单量子水平的声子调控, 是近几年量子调控关注的重点方向。近几年量子声子学的快速进展表明, 声子调控在量子信息处理、量子精密测量等领域有着广泛的应用潜力。在本报告中, 基于声表面波-混合超导量子电路, 我们提出了光场调节声学腔边界条件的反常光机械系统。和传统的光机械系统相反, 反常光学系统中声学腔的有效长度将被量子化的电磁场调控, 即声子和光子的角色进行了互换。借助这一系统, 我们有可能实现声学腔的长度调制、参量放大等过程, 甚至可以观测到声子的动态卡西米尔效应等。在反常光力学系统中, 声学腔的有效长度和频率由电磁场控制, 其调控速度有明显的优势。基于反常光机械系统, 我们展示了如何在声学腔组成的晶格中形成人工规范场, 从而破坏声学腔晶格的时间反演对称性, 实现声学波的手性操控。我们将讨论声学波类AB干涉效应、声子循环器件(circulator)以及如何构造拓扑Hofstadter模型中的手性Ladder。这些都为研制更好的量子声子学器件调控提供了新的思路。

关键词: 量子光学; 光机械系统; 声子调控

参考文献:

- [1] Unconventional Cavity Optomechanics: Nonlinear Control of Phonons in the Acoustic Quantum Vacuum, arXiv:1902.09910.
- [2] R. Manenti, M. J. Peterer, A. Nersisyan, E. B. Magnusson, A. Patterson, and P. J. Leek, Surface acoustic wave resonators in the quantum regime, *Phys. Rev. B* 93, 041411 (2016).
- [3] T. T. Heikkila, F. Massel, J. Tuorila, R. Khan, and M. A. Sillanpaa, Enhancing optomechanical coupling via the Josephson effect, *Phys. Rev. Lett.* 112, 203603 (2014).
- [4] D. Zueco, G. M. Reuther, S. Kohler, and P. Hanggi, Qubit-oscillator dynamics in the dispersive regime: Analytical theory beyond the rotating-wave approximation, *Phys. Rev. A* 80, 033846 (2009).

光学薛定谔猫态的幅度操控

苏晓龙, 王美红, 秦忠忠, 谢常德, 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室 太原 030006)

薛定谔猫态是一种宏观量子态, 在基本物理问题的探讨方面具有重要的科学意义。光学薛定谔猫态是一种重要的量子资源, 在量子测量、量子计算等方面具有重要的应用价值。我们采用减光子的技术手段, 从一个压缩真空态中减去一个光子, 实验制备了对应于铷原子吸收线的光学薛定谔猫态。目前限制光学薛定谔猫态应用的一个重要因素是其幅度较小。我们利用光学参量放大器实现了光学薛定谔猫态幅度的确定性操控。当光学参量放大器工作在参量放大状态时, 光学薛定谔猫态的幅度被放大。当光学参量放大器工作于参量反放大状态时, 光学薛定谔猫态的幅度被缩小。通过改变光学参量放大器的增益, 我们可以获得不同幅度的压缩猫态。研究结果表明光学参量放大是操控光学薛定谔猫态幅度的一种有效手段。

关键词: 光学薛定谔猫态, 光学参量放大器, 减光子

可调控的非马尔可夫量子开系统动力学

闻经纬¹、陶明杰¹、艾清²、龙桂鲁¹

1、清华大学物理系, 北京 100084

2、北京师范大学物理学系, 北京 100875

Email: aiqing@bnu.edu.cn

摘要: 量子系统由于和环境的相互作用, 不可避免地会导致量子退相干和信息的损失。传统研究基于马尔可夫近似, 于是系统的信息单向流向环境。当系统与环境相互作用较强、或环境的自由度相对于系统自由度不是无穷多时, 可能出现信息从环境回流系统的现象, 此即非马尔可夫效应。有理论研究指出, 光合作用中波形能量传输可能是由于非马尔可夫效应、而不是量子相干效应所导致的。另一些理论方案提出, 可以用非马尔可夫性提高量子精密测量的精度。量子开系统由于其复杂性, 一直不便于在实验中进行操控和观测。在前文中, 我们用梯度上升脉冲工程算法 (GRAPE) 和热库工程技术, 指数加快了对量子开系统的精确量子模拟。在本文中, 我们以量子费舍尔信息流和量子互信息作为媒介, 不仅演示了从马尔可夫过程到非马尔可夫过程的过渡, 而且还展示了不同非马尔可夫程度的量子开系统动力学。我们的研究为实验调控非马尔可夫过程和验证理论方案和预言, 提供了一种有效手段。

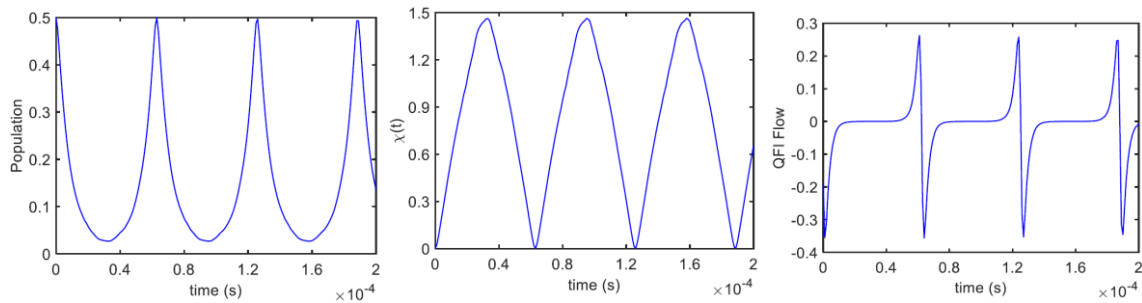


图 1 量子开系统动力学中密度矩阵、退相干因子和费舍尔信息流随时间的演化

关键词: 量子开系统、非马尔可夫、量子模拟

参考文献

【1】H.-P. Breuer, E.-M. Laine, and J. Piilo, Measure for the Degree of Non-Markovian Behavior of Quantum Processes in Open Systems, *Phys. Rev. Lett.* 103, 210401 (2009).

【2】B.-H. Liu, *et al.*, Experimental Control of the Transition from Markovian to Non-Markovian Dynamics of Open Quantum Systems, *Nat. Phys.* 2011, 7, 931-934.

【3】B. X. Wang, *et al.*, Efficient Quantum Simulation of Photosynthetic Light Harvesting, *npj Quantum Inf.* 2018, 4, 52.

【4】X.-M. Lu, X. G. Wang, and C. P. Sun, Quantum Fisher Information Flow and Non-Markovian Processes of Open Systems, *Phys. Rev. A* 2010, 82, 042103.

【5】S. L. Luo, S. S. Fu, and H. T. Song, Quantifying non-Markovianity via correlations, *Phys. Rev. A* 2012, 86, 044101.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11674033, 11474026, 11505007) 等。

噪声适应的纠缠态探测

Yuan-Yuan Zhao,^{1,2,3} Guo-Yong Xiang,^{1,3,*} Xiao-Min Hu,^{1,3} Bi-Heng Liu,^{1,3,†} Chuan-Feng Li,^{1,3} Guang-Can Guo,^{1,3} René Schwonnek,^{4,5,‡} and Ramona Wolf^{4,§}

1 CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, P. R. China

2 School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong, China 519082

3 CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, P. R. China

4 Institut für Theoretische Physik, Leibniz Universität Hannover, Germany

5 Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore

摘要: It is well-known that the violation of a local uncertainty relation can be used as an indicator for the presence of entanglement. Unfortunately, the practical use of these non-linear witnesses has been limited to few special cases in the past. However, new methods for computing uncertainty bounds became available. Here we report on an experimental implementation of uncertainty-based entanglement witnesses, benchmarked in a regime dominated by strong local noise. We combine the new computational method with a local noise tomography in order to design noise-adapted entanglement witnesses. This proof-of-principle experiment shows that quantum noise can be successfully handled by a fully quantum model in order to enhance entanglement detection efficiencies.

关键词: quantum entanglement, quantum uncertainty

【1】 Y. Y. Zhao *et al.*, Entanglement detection by violations of noisy uncertainty relations: A proof of principle, *Phys. Rev. Lett.* 2019, 122, 220401.

基金项目: 该项研究得到科技部、国家自然科学基金委、中科院、教育部、安徽省、博士后基金委, 以及德国相关研究基金的支持。

绝热量子计算的一个新模型

李福祥

湖南大学物理与微电子学院, 410082

电子邮件地址: fuxiangli@hnu.edu.cn

关键词: 绝热量子计算, 量子退火, 量子热化, 含时 BCS 哈密顿量, 量子纠缠

摘要正文:

绝热量子计算是利用量子退火的原理来进行最优化求解的一种量子计算实现方案。D-Wave 公司在 2011 年推出了第一台基于量子绝热量子计算的商用量子计算机。但是这台计算机没有量子纠错模块, 且无法保证其计算时的能隙小于环境温度对应的能量, 人们对其是否算是量子计算机产生了广泛的争议。我们在这里提出一个严格可积的含时哈密顿量系统的演化模型, 即含时 BCS 系统。这个模型拥有绝热量子计算所需要的大部分特征: 初始态具是完全的量子纠缠态, 演化过程中基态与激发态直接始终有一个能隙, 演化快慢可以由参数调控, 可以进行编码。我们的严格求解显示, 在允许一定的错误概率的情况下, 这个模型可以实现量子加速。这种量子加速是由量子关联导致的。另外, 我们的严格解显示, 在这个可积模型演化的最后, 各个微观状态上的概率分布呈现出吉布斯分布, 表明系统实现了完全的热化。

参考文献: Fuxiang Li, V. Y. Chernyak, N. A. Sinitsyn, "Quantum annealing and thermalization: insights from integrability", arXiv:1804.00371, Physical Review Letter, 121, 190601(2018).

耗散机制下分布式量子纠缠的制备

金 钊

东北大学, 沈阳, 110819

Email: jzphysics@163.com

摘要: Dissipation has been conventionally considered as a detrimental factor traditionally because it would destroy the unitary dynamics and induce decoherence. The quest to find viable strategies for avoiding decoherence is an essential issue for the development of quantum technologies. For the cavity quantum electrodynamics system, the typical dissipative factors that induce the decoherence including atomic spontaneous emission process, cavity leakage process and so on. Recently, a new strategy has been put forward: the dissipative processes can act as a prerequisite for the implementation of quantum information processing, transforming the detrimental dissipative factors of system into positive factors. Such as preparation of entangled quantum state with atom-cavity systems and solid state systems. This is different from traditional ideas. By means of an reasonably engineered interaction of the system with its environment, dissipative process can not perturb unitary dynamics. Strictly speaking, the relationship between unitary dynamics and the dissipative process can be interpreted as unity of opposites between competition and cooperation, which jointly drives the system to stabilization. The main purpose of this report is to design schemes which utilize the dissipative processes in the spatially separated cavities to prepare distributed entanglement. We hope that the theoretical considerations can offer convenience and supporting theories for the experimental works.

关键词: entanglement, cavity QED system, solid-state system, dissipative process

参考文献:

- [1] Jin Z, Su S L, Zhu A D, Wang H F, Zhang S. Dissipative preparation of distributed steady entanglement: an approach of unilateral qubit driving[J]. Optics Express, 2017, 25(1):88.
- [2] Jin Z, Su S L, Zhang S. Adjustable steady entangled state of two NV centers via dissipation: a scheme simultaneously utilizing two dissipative factors[J]. Physical Review A (submitting)

时间最优化的几何量子计算

薛正远

华南师范大学物理与电信工程学院，广州 510006，

zyxue83@163.com

摘要：几何量子计算是利用几何相位构造量子逻辑门的量子计算策略，是容错量子计算领域的重要进展之一。然而，由于需要复杂的量子比特间相互作用，几何量子计算的实验实现是非常困难的。同时，几何量子门所需的时间通常比动力演化量子门要长，这就导致退相干将引入更多的误差，从而成为其主要缺点。我们提出了一种在可扩展二维正方超导比特格点模型上实现基于无退相干子空间编码的快速几何量子计算方案，该方案结合了几何操作鲁棒特性和无相干子空间编码的相干保护特性。通过可调的参数耦合，我们仅利用两个具有传统两体相互作用的 transmon 比特来编码逻辑量子位，避免了 transmon 的泄漏误差，并且避免了使用辅助耦合元件。同时，我们应用时间最优控制技术来加速量子门的实现，几何量子门可以用最少的门时间获得，改善了几何量子计算的主要缺点。此外，相对于动力学门操作，我们的数值结果表明可以实现超高保真和强鲁棒性的几何量子操作。因此，我们的方案为可扩展的容错量子计算提供了一种有前景的方法。

关键词：几何相位，量子计算，时间最优化

全光量子中继器的实验实现

李正达

南方科技大学量子科学与工程研究院，深圳 518055

Email: zhengda@mail.ustc.edu.cn

量子中继器【1】是量子通信中的重要器件。在长距离通信过程中，信道所传递的量子信息往往随通信距离的增加而指数地减少。这极大地限制了量子通信的距离。为解决这一问题，目前主要有两种方法。其一是利用外太空几乎真空因而量子信号损耗非常小的特点，通过卫星的辅助达到极大扩展量子通信距离的目的【2】。其二是利用量子中继器将一段长距离信道分割成多段距离比较短的信道，使得量子信号不再随距离的增加而指数衰减，从而达到扩展量子通信距离的目的。一般认为，传统量子中继器需要基于纠缠交换、纠缠纯化、量子存储三个必不可少的基础技术【3】。然而，目前的量子存储器性能非常有限，除非未来有重要的实验突破，否则量子存储的性能在很长一段时间内仍然是实现实用化量子中继器的主要障碍【3】。而近年 Azuma 等人提出的全光量子中继器方案在理论上成功地解除了量子存储的性能对量子中继器研究的限制【4】。

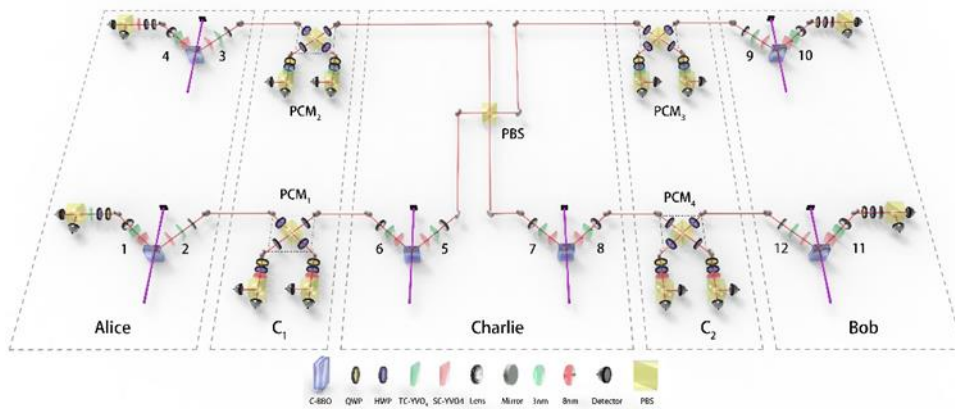


图 1 全光量子中继器实验装置

在该项工作中，研究团队首先对原始的全光量子中继方案【4】进行改进，设计了实验可行的方案。在该方案中，研究团队使用了光子 GHZ 态和后选择贝尔测量来实现不同信道间光子对的任意连接，从而有效地提升量子信道中纠缠态的分发成功概率。然后，研究团队利用六个独立的参量下转换双光子纠缠源，在实验上成功地搭建了一个基于十二光子的全光量子中继器，测试了该量子中继器的各方面性能，并在实验上验证了其相比于纠缠交换方案的优势。实验结果显示，全光量子中继器可以有效提升量子态的传输速率，从而拓展量子通信的传输距离。该项工作成功验证了全光量子中继器的可行性，在原理上使得量子存储器不再是搭建量子中继器的必要条件，为实用化量子中继器的研究开辟了新途径。更多细节参看文献【5】。

关键词：量子中继器 量子纠缠 纠缠交换 参量下转换

参考文献

- 【1】 H.-J. Briegel *et al.*, Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication, *Phys. Rev. Lett.* 81, 5932–5935 (1998).
- 【2】 J. Yin, *et al.* Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science* 356, 1140–1144 (2017).
- 【3】 N. Sangouard *et al.*, Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics, *Rev. Mod. Phys.* 83, 33–80 (2011).
- 【4】 K. Azuma *et al.*, All-photon quantum repeaters, *Nat. Commun.* 6, 6787 (2015).
- 【5】 Z.-D. Li *et al.*, “Experimental quantum repeater without quantum memory,” *Nat. Photon.* DOI: <http://doi.org/10.1038/s41566-019-0468-5> (2019).

基金项目：国家重点研发计划（No. 2018YFB0504303、No. 2018YFA0306501），国家自然科学基金项目（No. 11425417、No. 61771443、U1738140），安徽省量子信息技术引导和中国科学院等

Adiabatic Quantum Control and Its Physical Realization

许克标

无锡量子感知研究所

Email: xukb@ciqtek.com

摘要: Quantum adiabatic evolutions find a broad range of applications in quantum physics and quantum technologies. The traditional form of the quantum adiabatic theorem limits the speed of adiabatic evolution by the minimal energy gaps of the system Hamiltonian. Here, we experimentally show using a nitrogen-vacancy center in diamond that, by fast modulation of dynamic phases, we demonstrate near-unit-fidelity quantum adiabatic processes in finite times. These results challenge traditional views and provide deeper understanding on quantum adiabatic processes, as well as promising strategies for the control of quantum systems.

关键词: Adiabatic Quantum Evolution, Quantum Control Systems, NV center

参考文献:

【1】 **Kebiao Xu**, Tianyu Xie, Fazhan Shi, Zhen-Yu Wang, Xiangkun Xu, Pengfei Wang, Ya Wang, Martin B. Plenio, and Jiangfeng Du, Breaking the adiabatic speed-limit by jumping along geodesics, *Sci. Adv.* **5**, eaax3800 (2019).

【2】 **Kebiao Xu**, Tianyu Xie, Zhaokai Li, Xiangkun Xu, Mengqi Wang, Xiangyu Ye, Fei Kong, Jianpei Geng, Changkui Duan, Fazhan Shi, and Jiangfeng Du, Experimental Adiabatic Quantum Factorization under Ambient Conditions Based on a Solid-State Single Spin System, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 130504 (2017).

Understanding protein folding via quantum walk approach

吕丽花、毛雯雯、李有泉

浙江大学物理系, 杭州浙大路 38 号 310027

Email: lhlu@zju.edu.cn

摘要: Protein folding problem has been an important topic in interdisciplinary field involving molecular biology, computer science, polymer physics as well as theoretical physics etc.. Levinthal noted early in 1967 that a much larger folding time is inevitable if proteins are folded by sequentially sampling of all possible conformations. It was widely assumed that a random conformational search does not occur in the folding process, for which various hypotheses with the help of a series of meta-stable intermediate states have been often proposed. Here we introduce a quantum strategy to formulate folding as a quantum walk on a definite graph, which provides us a general framework without making hypotheses. We define the protein folding time as the mean of first-passage time, and evaluate it by taking two examples of protein chain with four and six amino-acid residues. The corresponding results are shown that the folding time via our quantum approach is much shorter than the one obtained via classical random walks. This idea is expected to evoke more insights for future studies. Additionally, on the base of the quantum walk approach we proposed, we further study the protein folding problem by considering the mode of protein chain with nine amino-acid residues. We introduce the concept of distance space and its projections on a XY -plane, and two characteristic quantities, one is called compactness of protein structure and another is called probability ratio involving shortest path. We calculate the evolution of those characteristic quantities without considering the effect of sequences, and our results not only confirm the fast quantum folding time but also unveil the existence of quantum intelligence hidden behind in choosing protein folding pathways.

Keywords: protein folding, continuous-time quantum walk, mean first-passage time, quantum intelligence, first-passage probability

Reference

- [1] L. H. Lu and Y. Q. Li, Chin. Phys. Lett., 36(8):080305, 2019.
- [2] W. W. Mao, L. H. Lu and Y. Q. Li, arXiv:1907.07179, 2019.

Acknowledgment: This work is supported by National Key R & D Program of China, Grant No. 2017YFA0304304, and partially by the Fundamental Research Funds for the Central University.

混合初始态的量子速度极限

武少雄

中北大学理学院, 太原, 030051

E-mail: sxwu@nuc.edu.cn

摘要: A unified bound on the quantum speed limit is obtained for open quantum systems with a mixed initial state by utilizing the function of relative purity proposed by F. Campaioli et al. [Phys. Rev. Lett. 120, 060409 (2018)]. As applications, it is found that the quantum speed limit bound for the damped Jaynes-Cummings model is determined by the competition among the non-Markovianity, the population of the initial excited state, and the initial-state coherence, which shows that the population of the initial excited state and the coherence of the initial state can make the quantum speed limit bound tighter even though the non-Markovian effects can accelerate the evolution of open quantum system. For the dephasing model, a simple factorization law with the initial-state coherence shows that the quantum speed limit is governed by only the competition between the non-Markovianity and the coherence of the initial state.

关键词: quantum speed limit, open system, mixed initial state

参考文献:

- [1]、Shao-xiong Wu and Chang-shui Yu. Quantum speed limit for a mixed initial state. Phys. Rev. A, 98, 042132 (2018).
- [2]、Shao-xiong Wu, Yang Zhang, Chang-shui Yu and He-shan Song. The initial-state dependence of the quantum speed limit. J. Phys. A: Math. Theor., 48, 045301 (2015).

基金资助: 国家自然科学基金项目(No. 11747022, 11775040, 11375036)等

设备无关量子安全直接通信

周澜¹, 盛宇波^{2*}, 龙桂鲁^{3**}

¹南京邮电大学理学院, 南京, 210003

²南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003

³清华大学物理系, 北京, 100084

Email: shengyb@njupt.edu.cn, gllong@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 量子安全直接通信 (QSDC) 是指不需要密码, 通信双方利用量子信道直接传输秘密信息的新型保密通信模式^[1,2]。近年来, QSDC 在实验上取得了较大进展, 受到广泛关注^[3,4]。同其他保密通信模式类似, 为保证通信安全, QSDC 协议要求通信双方完美的控制信号源及探测设备。

“设备无关”是指将所有实验设备视为黑盒子, 不关心盒子内部的过程, 只关心通信双方的输入数据及输出数据。“设备无关”思想最早被用于量子密钥分发 (QKD) 方案中^[5,6]。课题组首次将“设备无关”思想引入到 QSDC 中, 提出了第一个设备无关量子安全直接通信 (DI-QSDC) 方案^[7]。该方案不仅能简化对实验设备的要求, 还能增强 QSDC 的安全性。在理想量子信道条件下, DI-QSDC 方案高效且绝对安全。在实际噪声量子信道条件下, 信道噪声引起的光子传输丢失和量子态退相干效应将引起信息丢失及信息错误, 限制 DI-QSDC 的安全通信距离, 并造成信息泄露。为克服光子传输丢失和退相干效应, 课题组在 DI-QSDC 方案中引入量子态指示放大及纠缠纯化。通过运行量子态指示放大及纠缠纯化, 通信双方能完全消除信息丢失及信息泄露, 延长通信距离, 并减少信息错误。

关键词: 量子安全直接通信, 设备无关, 信息安全

参考文献

- 【1】G. L. Long, X. S. Liu, Theoretical efficient high capacity quantum key distribution scheme, 2000, arXiv: preprint quant-ph/0012056.
- 【2】F. G. Deng, G. L. Long, and X.S. Liu, Two-step quantum direct communication protocol using the Einstein-Podolsky-Rosen pair block, 2003, 68, 042317.
- 【3】W. Zhang, D. S. Ding, Y. B. Sheng, L. Zhou, B. S. Shi, and G. C. Guo, Quantum secure direct communication with quantum memory, Physical Review Letters, 2017, 118, 220501.
- 【4】F. Zhu, W. Zhang, Y. B. Sheng, Y. D. Huang, Experimental long-distance quantum secure direct communication, Science Bulletin, 2017, 62, 1519-1524.
- 【5】A. Acin, N. Brunner, N. Gisin, S. Massar, S. Pironio, and V. Scarani, Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks, Phys. Rev. Lett. 2007, 98, 230510
- 【6】S. Pironio, A. Acin, N. Brunner, N. Gisin, S. Massar, and V. Scarani, Device-independent quantum key distribution secure against collective attacks, 2009, New J. Phys. 11, 045021.
- 【7】L. Zhou, Y. B. Sheng, G. L. Long, Device-independent quantum secure direct communication against collective attacks, 2019, arXiv: 1907. 01235.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11474168), 中国博士后科学基金项目 (NO. 2018M642293)。

复合几何量子计算：理论与实验实现

陈涛

华南师范大学 物理与电信工程学院 510006

Email: chentamail@163.com

摘要：量子计算是基于量子力学规律调控量子信息单元进行计算的一种新型计算模型，能更有效解决一些经典计算机难以解决的问题，但它在理论和实验实现上均面临很大挑战，一方面，量子体系与环境间不可避免的相互作用将导致量子系统的退相干，使计算要求的量子系统相干性无法保持；另一方面，由于实验的不完美操控引入额外的系统误差。因此，为解决以上量子计算存在的问题，实现高保真度的通用的量子门操控，我们提出基于几何相位的量子操作与无退相干子空间编码相结合，综合二者内禀的避免局域噪声以及抵抗集体性退相位的优势来强化构建量子门的鲁棒性。然而前期的实验发展中，由于涉及到三体相互作用以及复杂的比特间的可调操控，在扩展的量子平台实验上的实现往往都很困难。在我们的工作中，我们理论上^[1,2]提出并在实验上^[3]基于核磁共振体系实现了基于无退相干子空间编码下的几何量子计算。其中我们一步单圈实现了通用的量子门，并仅仅采用了两体相互作用，摒弃了原先所需要涉及到的辅助比特和能级的参与，一定程度减少了额外噪声误差影响的引入。此外，为进一步降低由于系统误差造成的几何循环演化条件不满足对门保真度的巨大影响，我们理论提出采用复合脉冲的优化方案提高了量子门的鲁棒性，并在实验上给出了方案优势的验证结果。因此，我们的理论方案和实验验证为实现可靠、鲁棒的几何量子操纵提供了一条有希望的途径。我们相信，目前的工作是非常重要的和及时的，这将激发人们对几何操作于鲁棒固态量子计算的理论和实验的重大兴趣。

关键词：几何相位，优化量子控制，固态量子计算

参考文献：

【1】 **Tao Chen** and Zheng-Yuan Xue[†], Nonadiabatic geometric quantum computation with parametrically tunable coupling, *Phys. Rev. Appl.* **10**, 054051 (2018);

【2】 **Tao Chen**, Jiang Zhang and Zheng-Yuan Xue, Nonadiabatic holonomic quantum computation on coupled transmons with ancillaries, *Phys. Rev. A* **98**, 052314 (2018);

【3】 Zhennan Zhu*, **Tao Chen***, Xiaodong Yang, Ji Bian, Zheng-Yuan Xue[†], Xinhua Peng[‡], Realization of Composite-loop and Single-loop Realization of Nonadiabatic Holonomic Quantum Computation in a Decoherence-free Subspace, Accepted for publication at *Phys. Rev. Appl.* on 17 Jul.

使用广义簇相关展开法研究自旋库中氮空位色心的纵向弛豫

杨炎晟¹、王彦翔¹、陶明杰¹、章梅¹、艾清¹、邓富国¹、杨文²

1.北京师范大学物理学系, 北京市新街口外大街 19 号 100875

2.北京计算科学研究中心, 北京 100094

Email: aiqing@bnu.edu.cn

摘要: 金刚石因其带负电的氮-空位发光缺陷(NV 色心)发光强度高, 荧光稳定, 拥有独特的能级结构, 易于初始化; 同时在室温下它的自旋态有很长的相干时间, 可以被微波精确操控和集成等特点, 成为固态体系中最有竞争力的平台之一。量子信息具有经典信息所不具备的优势, 但是在实际实施量子信息的方案时却遇到了很多的障碍, 其中, 阻止我们实现量子信息的方案的一个重要的障碍就是退相干, 退相干问题在金刚石 NV 色心为平台的量子系统中的占有重要位置。退相干是由于系统和环境之间的相互作用而产生的。在设计量子信息方案时, 人们通常会把系统与外界的相互作用忽略掉, 而把系统当成封闭系统来考虑, 但是基于现实世界中系统都或多或少的与外界发生相互作用这一事实, 量子信息方案的有效性要重新考虑。退相干效应会使得量子信息方案的有效性降低。由于退相干效应的影响的普遍性和严重性, 退相干效应已经是一个非常重要的而且非常必要的研究课题。

本文从理论上研究了在金刚石的 ^{13}C 核自旋环境中氮空位中心的纵向弛豫问题。通过将电子自旋引入团簇中, 推广了团簇相关展开法 (CCE), 从理论上模拟了 NV 中心电子自旋的总体动力学。利用广义 CCE 数值模拟了室温下交叉弛豫引起的电子态衰减过程。结果表明, CCE 方法不仅能够描述大失谐区的纯去相效应, 而且可以模拟近共振区的量子动力学特性。

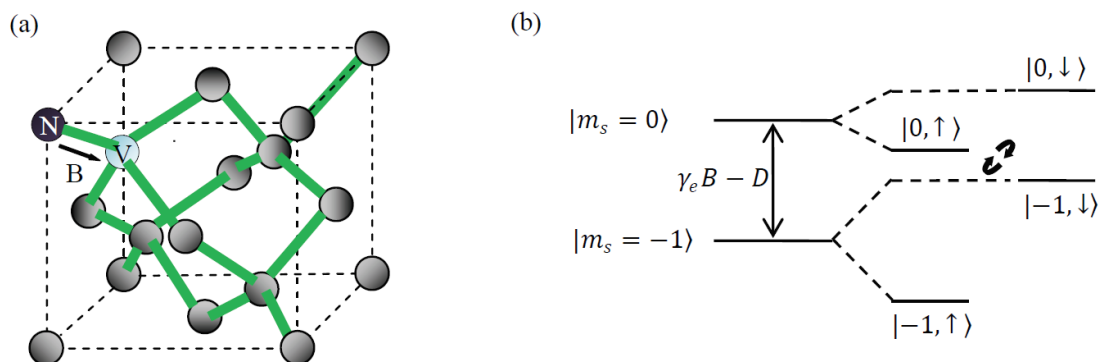


图 1 NV 色心的结构及能级

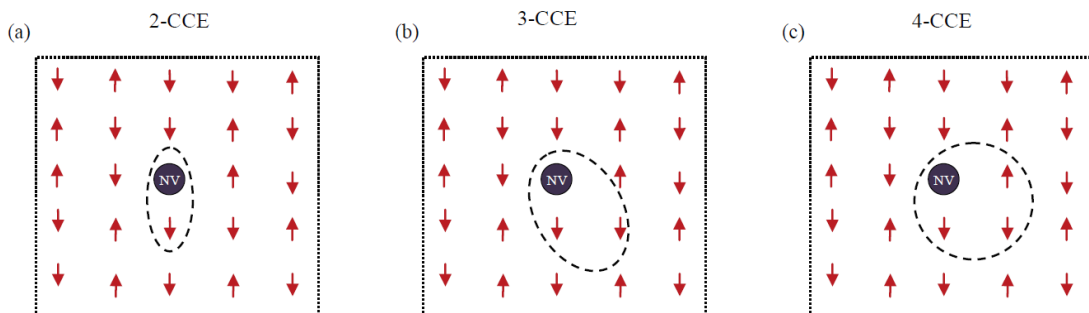


图2 广义 CCE 方法示意图

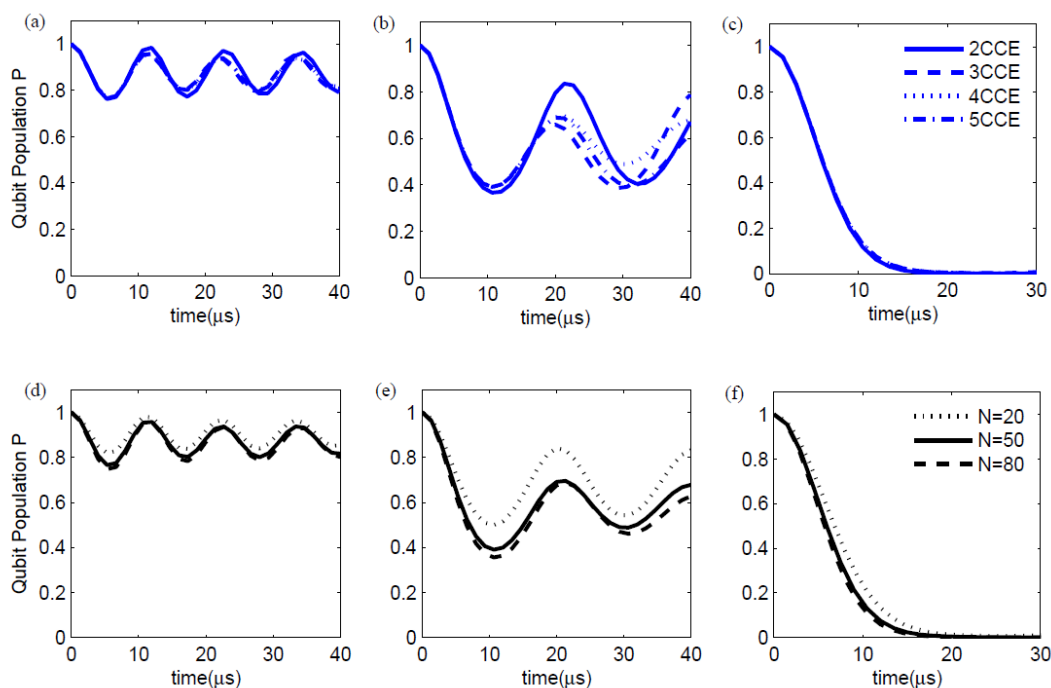


图3 纵向弛豫过程的数值模拟

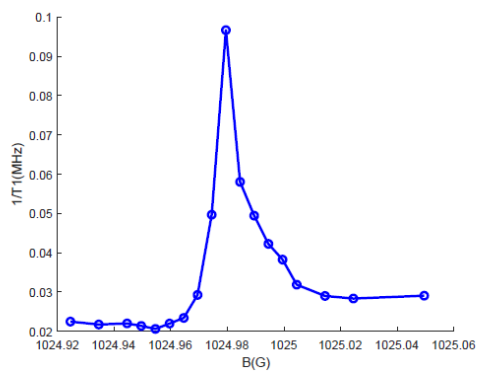


图4 纵向弛豫特征时间随外加磁场强度的变化

关键词： NV 色心 纵向弛豫 CCE

参考文献

【1】 M. W. Doherty et al., The nitrogen-vacancy colour centre in diamond, Phys. Rep. 2013, 528, 1.

- 【2】 V. V. Dobrovitski et al., Quantum control over single spins in diamond, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* 2013, 4, 23.
- 【3】 G. de Lange et al., Universal dynamical decoupling of a single solid-state spin from a spin bath, *Science* 2010, 330, 60.
- 【4】 N. Bar-Gill et al., Solid-state electronic spin coherence time approaching one second, *Nat. Commun.* 2013, 4, 1743.
- 【5】 L. Childress et al., Fault-tolerant quantum communication based on solid-state photon emitters, *Phys. Rev. Lett.* 2006, 96, 070504.
- 【6】 M. V. G. Dutt et al., Quantum register based on individual electronic and nuclear spin qubits in diamond, *Science* 2007, 316, 1312.
- 【7】 X. K. Song et al., Shortcuts to adiabatic holonomic quantum computation in decoherence-free subspace with transitionless quantum driving algorithm, *New J. Phys.* 2016, 18, 023001.
- 【8】 Y.-Y. Wang et al., Dark state polarizing a nuclear spin in the vicinity of a nitrogen-vacancy center, *Phys. Rev. A* 2018, 97, 042313.
- 【9】 F. Dolde et al., Electric-field sensing using single diamond spins, *Nat. Phys.* 2011, 7, 459.
- 【10】 J. R. Maze et al., Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond, *Nature* 2008, 45, 644.
- 【11】 J. P. Tetienne et al., Spin relaxometry of single nitrogen-vacancy defects in diamond nanocrystals for magnetic noise sensing, *Phys. Rev. B* 2013, 87, 235436.
- 【12】 D. M. Toyli et al., Fluorescence thermometry enhanced by the quantum coherence of single spins in diamond, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 2013, 110, 8417.
- 【13】 F. Grazioso et al., Measurement of the full stress tensor in a crystal using photoluminescence from point defects: The example of nitrogen vacancy centers in diamond, *App. Phys. Lett.* 2013, 103, 101905.
- 【14】 F. Z. Shi et al., Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions, *Science* 2015, 347, 1135.
- 【15】 H. B. Liu et al., Scheme for detection of single-molecule radical pair reaction using spin in diamond, *Phys. Rev. Lett.* 2017, 118, 200402.
- 【16】 L. T. Hall et al., Detection of nanoscale electron spin resonance spectra demonstrated using nitrogen-vacancy centre probes in diamond, *Nat. Commun.* 2016, 7, 10211.
- 【17】 H. J. Wang et al., Optically detected cross-relaxation spectroscopy of electron spins in diamond, *Nat. Commun.* 2015, 5, 4135.
- 【18】 P. Wang et al., Theory of nuclear spin dephasing and relaxation by optically illuminated nitrogen-vacancy center, *New J. Phys.* 2015, 17, 113041.
- 【19】 A. Ishizaki et al., Theoretical examination of quantum coherence in a photosynthetic system at physiological temperature. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2009, 106, 17255.
- 【20】 Q. Ai et al., Clustered geometries exploiting quantum coherence effects for efficient energy transfer in light harvesting, *J. Phys. Chem. Lett.* 2013, 4, 2577.
- 【21】 W. M. Witzel et al., Quantum theory for electron spin decoherence induced by nuclear spin dynamics in semiconductor quantum computer architectures: Spectral diffusion of localized electron spins in the nuclear solid-state environment, *Phys. Rev. B* 2006, 74, 035322.
- 【22】 W. M. Witzel et al., Multiple-pulse coherence enhancement of solid state spin qubits, *Phys. Rev. Lett.* 2007, 98, 077601.
- 【23】 W. M. Witzel et al., Concatenated dynamical decoupling in a solid-state spin bath, *Phys. Rev. B* 2007, 76, 241303(R).
- 【24】 W. Yao et al., Theory of electron spin decoherence by interacting nuclear spins in a quantum dot, *Phys. Rev. B* 2006, 74, 195301.
- 【25】 W. Yao et al., Restoring coherence lost to a slow interacting mesoscopic spin bath, *Phys. Rev. Lett.* 2007, 98, 077602.
- 【26】 R. B. Liu et al., Control of electron spin decoherence caused by electron-nuclear spin dynamics in a quantum dot, *New J. Phys.* 2007, 9, 226.
- 【27】 S. K. Saikin et al., Single-electron spin decoherence by nuclear spin bath: Linked-cluster expansion approach, *Phys. Rev. B* 2007, 75, 125314.
- 【28】 W. Yang et al., Quantum many-body theory of qubit decoherence in a finite-size spin bath, *Phys. Rev. B* 2008, 78, 085315.

- 【29】 W. Yang et al., Quantum many-body theory of qubit decoherence in a finite-size spin bath. II. Ensemble dynamics, *Phys. Rev. B* 2009, 79, 115320.
- 【30】 L.-S. Li et al., Measurement of weak static magnetic field with nitrogen-vacancy color center, *Acta Phys. Sin.* 2017, 66, 230601.
- 【31】 L. P. Yang et al., Electron spin decoherence in silicon carbide nuclear spin bath, *Phys. Rev. B* 2014, 90, 241203(R).
- 【32】 N. Zhao et al., Anomalous decoherence effect in a quantum bath, *Phys. Rev. Lett.* 2011, 106, 217205.
- 【33】 P. Huang et al., Observation of an anomalous decoherence effect in a quantum bath at room temperature, *Nature Commun.* 2011, 2, 570.
- 【34】 V. Jacques et al., Dynamic polarization of single nuclear spins by optical pumping of nitrogen-vacancy color centers in diamond at room temperature, *Phys. Rev. Lett.* 2009, 102, 057403.
- 【35】 X. K. Song et al., Physically feasible three-level transitionless quantum driving with multiple Schrödinger dynamics, *Phys. Rev. A* 2016, 93, 052324.
- 【36】 N. Zhao et al., Atomic-scale magnetometry of distant nuclear spin clusters via nitrogen-vacancy spin in diamond, *Nature Nanotech.* 2011, 6, 242.
- 【37】 A. Jarmola et al., Temperature- and magnetic-field-dependent longitudinal spin relaxation in nitrogen-vacancy ensembles in diamond, *Phys. Rev. Lett.* 2012, 108, 197601.
- 【38】 D. A. Redman et al., Spin dynamics and electronic states of N-V centers in diamond by EPR and four-wave-mixing spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* 1991, 67, 3420.
- 【39】 A. Jarmola et al., Longitudinal spin-relaxation in nitrogen-vacancy centers in electron irradiated diamond, *App. Phys. Lett.* 2015, 107, 242403.
- 【40】 M. Mrózek et al., Longitudinal spin relaxation in nitrogenvacancy ensembles in diamond, *EPJ Quantum Technology* 2015, 2, 22.
- 【41】 N. Zhao et al., Decoherence and dynamical decoupling control of nitrogen-vacancy centre electron spins in nuclear spin baths, *Phys. Rev. B* 2012, 85, 115303.
- 【42】 V. V. Dobrovitski et al., Decay of Rabi oscillations by dipolar-coupled dynamical spin environments, *Phys. Rev. Lett.* 2009, 102, 237601.
- 【43】 W. Zhang et al., Modelling decoherence in quantum spin systems, *J. Phys. Condens. Matter* 2007, 19, 083202.
- 【44】 S. E. Lillie et al., Environmentally mediated coherent control of a spin qubit in diamond, *Phys. Rev. Lett.* 2017, 118, 167204.
- 【45】 A. Jarmola et al., Observation of coherent oscillations in a single electron spin, *Phys. Rev. Lett.* 2004, 92, 076401.

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 11505007, No. 11474026, No. 11274036, No. 11322542, No. 11475021）等

基于单光子纠缠的孪生场量子密钥分发协议

李威、赵生妹

信号处理与传输研究院, 南京邮电大学, 南京 210003

Email: alfred_wl@njupt.edu.cn

摘要: 孪生场量子密钥分发(TF-QKD)协议是目前量子信息领域非常火热的研究课题[1]。与以往基于单光子的量子密钥分发机制不同, 孪生场量子密钥分发使用相干场或者是波动态作为量子比特的载体, 它的密钥率相对于之前的量子密钥分发协议有一个平方的提升。在本工作中, 我们提出了一种纠缠模式下的孪生场量子密钥分发协议, 它是孪生场量子密钥分发协议的时间反转版本。具体的实施方案如图 1(a)

所示, Alice 和 Bob 根据各自产生的随机数比特串 K_a, K_b 制备弱相干态 $\left| \sqrt{\mu} e^{i(\phi_{a(b)} + \pi k_{a(b)})} \right\rangle, (k_{a(b)} \in K_{a(b)})$,

$\phi_{a(b)}$ 是随机相位; 第三方 Charlie 制备路径纠缠的单光子态; 然后将光子态发送给第四方 Eve 进行干涉测量, 并通过公共信道公布测量结果; 当 $\phi_a = \phi_b$ 时 Alice 和 Bob 可成密钥, 并通过构造 Bell 不等式来评估系统的误比特率以及外界的窃听。我们利用纠缠提纯协议对该方案的安全性做了评估, 并考虑实际设备的不完美特性推导出针对该协议的量子密钥率公式, 并与其它协议进行对比, 结果如图 1(b)所示。仿真结果显示我们提出的 extended SEPM-QKD 协议的密钥率相对 BB84-, MDI-QKD 等协议有一个平方的提升, 并且该协议相对于孪生场协议 PM-QKD 的传输距离提升了一倍。

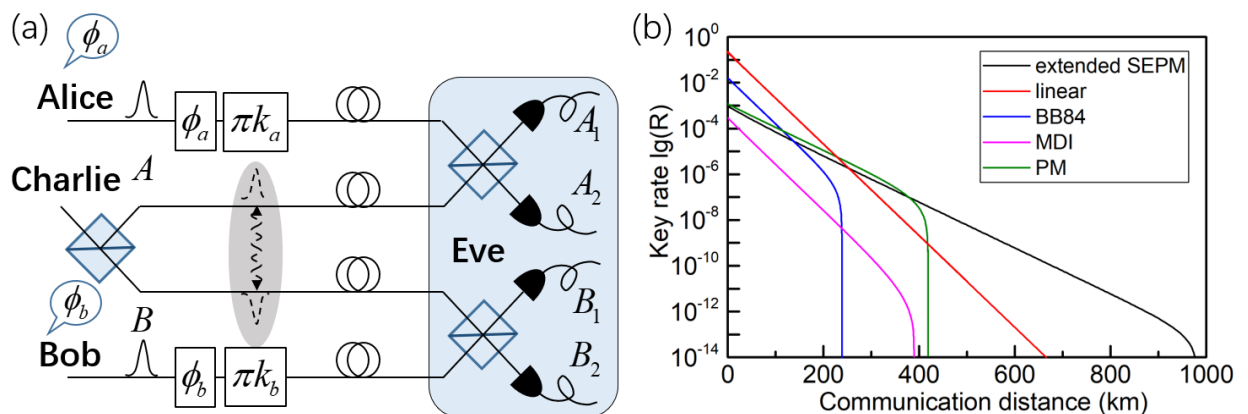


图 1 (a) extended SEPM-QKD 实验装置示意图; (b) 密钥率的仿真示意图。

关键词: 单光子纠缠, 孪生场量子密钥分发, 波动态

【1】 M. Lucamarini *et al*, Overcoming the rate–distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters, *Nature* 2018, 557,400

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目 (NO. SJ216025), 南京大学固体微结构国家实验室开放课题 (NO. M31021), 南京邮电大学科研启动基金 (NO. NY215034).

满足严格时空关系的基于独立纠缠源量子非二元定域性的实验验证

孙启超*, 江扬帆*, 白冰*, 张伟君, 李浩, 江晓, 张军, 尤立星, 陈险峰,

王振, 张强, 范靖云, 潘建伟

中国科学技术大学微尺度物质科学国家研究中心, 合肥, 230026

Email: yfjiang@mail.ustc.edu.cn

摘要: 随着量子信息的高速发展, 科学家们开始构建全球化量子通信网络。然而全球化量子通信网络结构复杂, 迫切需要从各个方面对其进行深入研究, 例如复杂结构中的量子物理基础研究, 通信安全性研究, 对资源的高效利用研究等。2010年, Branciard 等科学家提出了二元隐变量模型(bilocal hidden variable model), 对小型量子网络——量子纠缠交换——的非定域性进行了理论研究, 并提出二元定域性不等式(bilocal inequality)【1】。我们搭建了一个五节点量子纠缠交换装置, 其中两个节点为独立纠缠源, 分别分发纠缠光子对至其他三个测量节点。我们的实验严格满足时空关系, 首次在同时关闭独立纠缠源漏洞、定域性漏洞, 实现独立的随机的测量基矢选择的条件下验证了量子纠缠交换中的量子非二元定域性(nonbilocality)。我们实验得到 $B=1.181 \pm 0.004$, 以 45 倍标准差破坏了二元定域性不等式 ($B \leq 1$), 我们也测量得到 CHSH 的值为 $S=2.652 \pm 0.059$, 以 11 倍的标准差破坏了贝尔不等式 ($S \leq 2$)。我们的工作除了是量子网络中的重要量子物理基础研究, 还证明了量子非二元定域性比早前的量子非定域性(nonlocality)对噪声有更好的鲁棒性, 对未来量子通信网络的设计和实现具有重要意义。

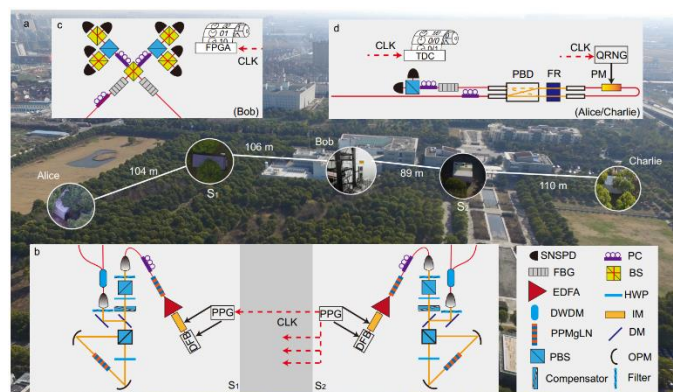


图 1 量子非二元定域性实验验证装置

关键词: 量子纠缠交换 量子非二元定域性 (nonbilocality)

参考文献

- 【1】 Branciard, C. et al. Characterizing the nonlocal correlations created via entanglement swapping. Phys. Rev. Lett. 2010,104, 170401.

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFA0303900, 2017YFA0304000), 国家自然科学基金等

*: 共同一作。

变折射率微球光学显微镜超分辨成像的量子理论

邓履璧

东南大学物理系 南京 210096

E-mail: lbdeng@seu.edu.cn

摘要: 2011 年文献 [1]的作者发现了一种新的微球超分辨显微技术,他们将光学透明微球(如二氧化硅 折射率 $n=1.46$)放置在所需成像表面,利用普通光学显微镜,使用 $4.74\mu\text{m}$ 微球与放大 80 倍的显微镜(数值孔径 $\text{NA}=0.9$),成功分辨了 50nm 直径的样品,其分辨率达 $(1/8)\lambda=50\text{nm}$ ($\lambda=400\text{nm}$)到 $(1/14)\lambda=53.57\text{nm}$ ($\lambda=750\text{nm}$)。2013 年文献[2]的作者从几何光学角度分析微球透镜的光学成像特性及其与显微物镜配合实现高分辨显微的成像原理[3]。

我们提出用变折射率微球透镜也可以实现微球透镜光学显微镜的超分辨成像,其分辨率可达到 1nm 的分辨率。我们使用半径 $54\mu\text{m}$ 的微球,微球折射率沿半径从球心到球表面作线性减小,范围在 1.575 到 1.447 之间变化。使用我们提出的光子态的路径积分表示式[4],导出光子经样品再穿过变折射率微球成像的量子态表示式,计算了微球的焦距,成像的像高,从计算的几率分布的图形表示中,我们给出了如下结果: 1. 球的焦距 $54.07\mu\text{m}$, 在球的表面处。2. 从焦距处光子的横向几率分布(即 Airy 斑)得到第一最小几率半径为 $0.16\mu\text{m}$ 。3. 计算了量子像差: 轴向球差 $\Delta z'=0.02\mu\text{m}$, 垂轴球差 $\Delta x=0.00\mu\text{m}$, 轴向色差 $\Delta z'_{\text{FC}}=0.047\mu\text{m}$, 垂轴色差 $\Delta y'_{\text{FC}}=1.0\mu\text{m}$ 。

从上面所给出的变折射率微球的 Airy 斑半径,我们可得到变折射率微球的分辨率为 $0.16/2=0.08\mu\text{m}$ 。与波长之比为 $0.08/0.5876=0.136$, 即 0.136λ (λ 为光子的波长)。这个结果达到了超分辨率(Rayleigh 判据是 0.5λ)。这个分辨率接近 2011 年文献 [1]的作者用光学显微镜及近场方法达到的分辨率。这里我们只用了一个变折射率微球透镜就接近了他们给出的数值。如果使用 20 倍的低倍显微镜,则可近似估计其分辨率为 $(0.16/2)/20=4\times 10^{-3}\mu\text{m}$, 即可分辨 4nm 的间隔。如果用 80 倍的显微镜,则可近似达到 $(0.16/2)/80=1\times 10^{-3}\mu\text{m}$, 可分辨 1nm 的间隔。分辨率提高了 50 倍。

改变变折射率微球半径 ($R=52.5\mu\text{m}$), 给出了相同的分辨率。

使用变折射率半球透镜与微球透镜在微小光学的成像与其它方面有广泛的应用: 如在光互联,光耦合器件(分光器,波分复用器,光开关,光路由器等),在微型内窥镜,在光传感器,高速摄影系统等中都有重要应用。

关键词: 变折射率微球透镜; 量子像差; 路径积分。

参考文献:

- 【1】 Z. Wang, W. Guo, L. Li, B. Luk'Yanchuk, A. Khan, Z. Liu, Z. Chen, M. Hong, Optical virtual impinging at 50nm lateral resolution with a white-light nanoscope, Nat. Commun. 2011, 2: 218
- 【2】 王淑莹 章海军 张东仙 基于微球透镜的任选区高分辨光学显微成像的新方法, 物理学报, 2013, 62: 034207
- 【3】 周锐 吴梦雪 沈飞 洪明辉 基于近场的微球超分辨显微效应, 物理学报, 2017, 66: 140702
- 【4】 Lü-bi Deng (邓履璧), Diffraction of entangled photon pairs by ultrasonic waves, Front. Phys., 2012, 7(2): 239

基于边缘搜索和边缘照明的反馈关联成像

谷俊豪、孙帅、徐耀坤、林惠祖、刘伟涛

国防科技大学文理学院，长沙 410003

Email: 983025414@qq.com

摘要：关联成像所使用的照明散斑场是影响成像质量与速度的重要因素。当前，常用的照明方式对视场中各部分是无差异对待的，而各部分中目标蕴含的有效信息实际上是不均匀的。因而，这样的采样过程获取了大量冗余信息，限制了每次采样对有效信息的获取效率。考虑到图形中的有效信息主要集中在目标边缘区域，我们提出了实时反馈调节并进行边缘照明的关联成像方案。从低采样次数的图像中搜索出目标边缘区域，并使用更小的视场与更小的散斑对该区域进行重点成像，再从中结果更精确地确定边缘区域，并对光场进行反馈调节。本方案可以提升每次采样所获取的有效信息量，大幅减少生成高质量图像所需的采样次数。对于简单二值目标，完全重构图像所需的采样率可以降至 10% 以下。与传统的关联成像相比，减少采样次数可以使关联成像更好的应用于运动目标成像、医学成像等领域。而相对于同样可以加速成像的压缩关联成像，该方法并不需要大量的计算资源进行数据后处理，在实时成像等领域更有优势。

关键词：关联成像 计算成像 反馈 边缘搜索

基金项目：国家自然科学基金项目 (NO. 11774431 and NO. 61701511)

Fast shuttling of a particle under weak spring-constant noise of the moving trap

Xiao-Jing Lu, A. Ruschhaupt, J. G. Muga

许昌学院电气机电工程学院, 许昌 461000 (许昌市八一路 88 号)

Email: luxiaojing1013@163.com

摘要: We investigate the excitation of a quantum particle shuttled in a harmonic trap with weak spring-constant colored noise. The Ornstein-Uhlenbeck model for the noise correlation function describes a wide range of possible noises, in particular for short correlation times the white-noise limit examined by Lu *et al.* [Phys. Rev. A **89**, 063414 (2014)] and, by averaging over correlation times, “ $1/f$ flicker noise.” We find expressions for the excitation energy in terms of static (independent of trap motion) and dynamical sensitivities, with opposite behavior with respect to shuttling time, and demonstrate that the excitation can be reduced by proper process timing and design of the trap trajectory.

关键词: 噪声, 离子输运

参考文献

- 【1】 X.-J. Lu, J. G. Muga, X. Chen, U. G. Poschinger, F. Schmidt-Kaler, and A. Ruschhaupt, Phys. Rev. A **89**, 063414 (2014).
- 【2】 E. Torrontegui, S. Ibanez, X. Chen, A. Ruschhaupt, D. Guéry-Odelin, and J. G. Muga, Phys. Rev. A **83**, 013415 (2013).
- 【3】 X.-J. Lu, M. Palmero, A. Ruschhaupt, X. Chen, and J. G. Muga, Phys. Scr. **90**, 074038 (2015).
- 【4】 X. Chen, E. Torrontegui, D. Stefanatos, J.-S. Li, and J. G. Muga, Phys. Rev. A **84**, 043415 (2011).

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11747144); 许昌学院重点项目 (No. 2018ZD007)

Generating squeezed-coherent-cat state in a double-cavity optomechanical system

Shi-Lei Chao, Biao Xiong and Ling Zhou*

School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024

Email: zhlxn@dlut.edu.cn

Abstract: Squeezed-coherent-cat state (SCCS) in mechanical system not only plays an important role for macroscopic quantum coherence, but also can be a carrier for quantum information. We propose a scheme to generate SCCS in a two-mode optomechanical system, in which the modulated hopping interaction of two cavities is introduced. The two cavity modes couple with the same mechanical mode with linear and quadratic interaction respectively. We analytically deduce the SCCS under a appropriate initial state, and numerically calculate the average phonon number and the parameter of squeeze. Wigner function shown the properties of superposition and squeezing is plotted. Including the dissipation of the environment, our results show that high quality of the mechanical resonator and the low noise of its environment is required so as to obtain high fidelity.

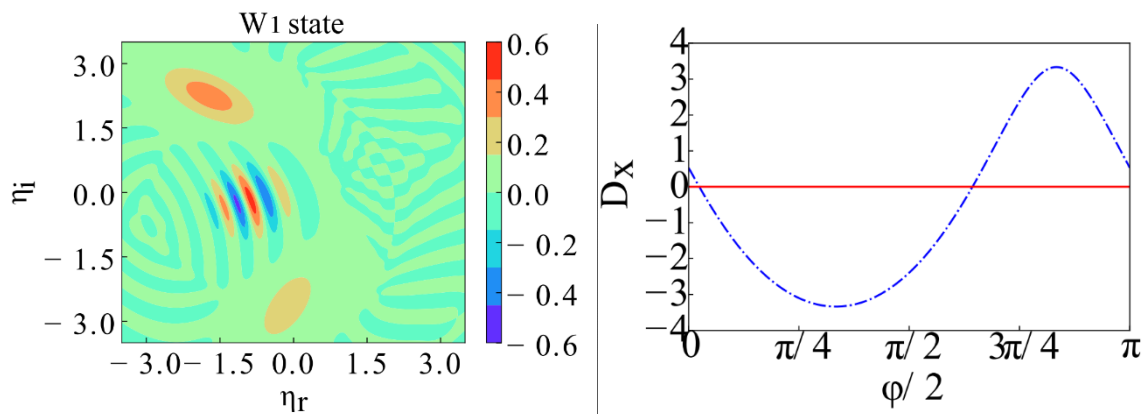


Figure 1. The Wigner function W_1 versus the η_r and η_i , and the degree of squeezing of the mechanical quadrature X_b in dB unit versus the ϕ

Key words: Optomechanical system Squeezed coherent cat state

References

【1】 submitted to Annalen der Physik

Funding: National Natural Science Foundation of China (NSFC) (NO. 11874099)

特异材料界面的表面波群速度调控

刘婉 许静平

同济大学物理系, 上海 200092

Email: 1731004@tongji.edu.cn

摘要:

一般的表面波分析都是模式分析（单频），这里我们主要研究表面波的色散问题，左手材料为芯层的不对称的平面波导的传输特性，在 TE 极化下，利用麦克斯韦方程和边界条件得到三个区域的电磁场分布，进而得到表面色散关系，色散斜率为正对应前向表面模，色散斜率为负对应后向表面模，也从能流计算角度计算出结构的总能流，由总能流来判断表面模的类型，利用能流来验证前向表面模和后向表面模与色散曲线斜率的关系。通过改变结构参数，来调控前向表面模和后向表面模的转变。在考虑多频表面波包的传输问题时，不仅涉及模式分析，还要考虑材料的色散，利用高斯光束作为入射光束，以群速度，能流速度为切入点，以表面波包的时空演化验证前向表面波和后向表面波，实现材料色散，厚度对表面波包的调控效果。此研究有利于促进力学结构设计以及其他学科的发展，同时扩大自身的应用范围。

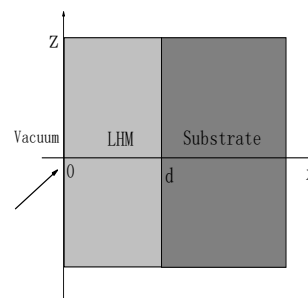
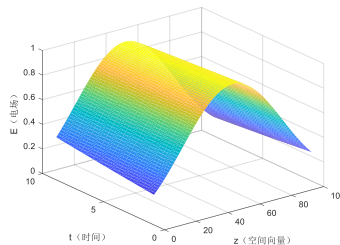
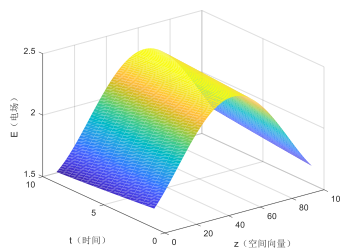
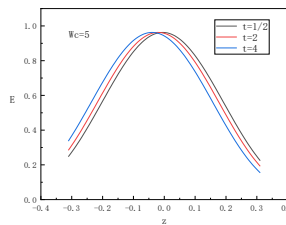
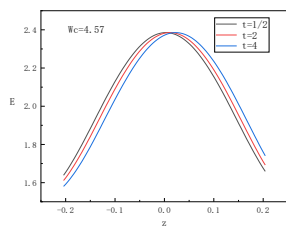


图 1: 电场随时间的变化

图 2: 电场的时空演化

图 3: 不对称波导结构

关键词: 左手材料, 前向表面模, 高斯光束

参考文献

【1】Eistiak A, Hasan Md. Mehedi, Faruque Mohammad Rashed Iqbal, et al. Left-handed metamaterial inspired by joint T-D geometry on flexible NiAl₂O₄ substrate[J]. Plos One, 2018, 13(6):e0199150.

Counterdiabatic holonomic gates using off-resonant driven Rydberg atoms

齐士凡、景俊

浙江大学物理学系, 杭州 310000

Email: 3140104308@zju.edu.cn

摘要: Geometric phase is insensitive to certain local disturbances due to the global properties accumulated through a closed loop in the parameter space. It can be utilized to realize high-fidelity logic gates for geometric quantum computation. In this work, we propose a novel scheme for geometric quantum gates using three or two level systems under the detuning-controllable drivings, which can be considerably improved by the transitionless quantum driving. In particular, we introduce a controllable variable, the detuning between the driving frequency and the atomic energy spacing, to modify the traditional scheme for geometric gates. Subsequently we can have two instantaneous eigenstates with opposite eigenvalues constituting a closed loop in the parameter space. The accumulated dynamical phase is exactly cancelled when the loop is completed, which is out of the parallel-transport restriction. The transitionless quantum driving in our proposal can be used to enhance the speed and the fidelity of geometric transformation, rendering revisions in both amplitudes and phases of the driving fields. Then in a shorter time we can realize a universal set of single-qubit gates and nontrivial double-qubit gates. We also estimate the gate fidelity under both dephasing and dissipation processes.

关键词: off-resonant, transitionless quantum driving, geometric gate

【1】 Counterdiabatic holonomic gates using off-resonant driven Rydberg atoms, Shifan Qi, Jun Jing, arxiv:1905.09524.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11575071) 等

温度对非线性光学中的相位匹配影响

刘毅嘉

南开大学物理学院, 天津 300017

Email: minkowskizhangliang@outlook.com

摘要: 在非线性光学中需要在非线性晶体中控制光束的相位使其相位满足一定的条件并使光线相干, 但是在非线性晶体中, 非线性色散导致光束相位产生变化并且让两个光无法相干。我们可以通过改变温度来改变折射率的方法, 由于 o 光和 e 光折射率变化并不相同, 所以, 我们可以利用折射率的差值使光程的偏差引起相位的变化, 从而使相位相同达到相位匹配的目的。

关键词: 非线性, 相位匹配

参考文献

- [1] 宋峰, 常树人. 热学 第二版 习题分析与解答[M]. 高等教育出版社, 2010.
- [2] 常树人. 热学 第二版[M]. 南开大学出版社, 2009.
- [3] 张伟琦. 半导体光波导中的模间相位匹配频率转换方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [4] Robert W. Boyd. Nonlinear Optics[M]. The Institute of Optics University of Rochester, New York USA: 2003.

含有二能级原子的光力磁系统的阻塞

赵成松、周玲*

大连理工大学物理学院, 大连 116024

Email: Zhhlxn@dlut.edu.cn

摘要: 基于磁偶极相互作用的光磁系统和基于辐射压的光力系统已经在量子信息的光学调控等众多方面有了广泛的研究。我们从理论上研究了一个弱驱动下的光力磁混合系统的量子统计性质。该系统是将一个 YIG 球体和一个二能级原子放置于一端有可移动镜子的光学谐振腔中, 我们计算了光子, 磁子, 声子和光磁准模的等时二阶关联以及不同光子数分布下与泊松分布的偏差, 发现基于传统和非传统的阻塞机制可以同时实现光学, 磁学, 及声学模式的阻塞。基于高阶关联函数, 我们还计算了双光子阻塞的条件和结果。此外我们还计算了延时二阶关联, 这些研究对于这一混合系统用于单光子(磁子, 声子)源, 以及光力磁信息之间的转换具有理论意义。

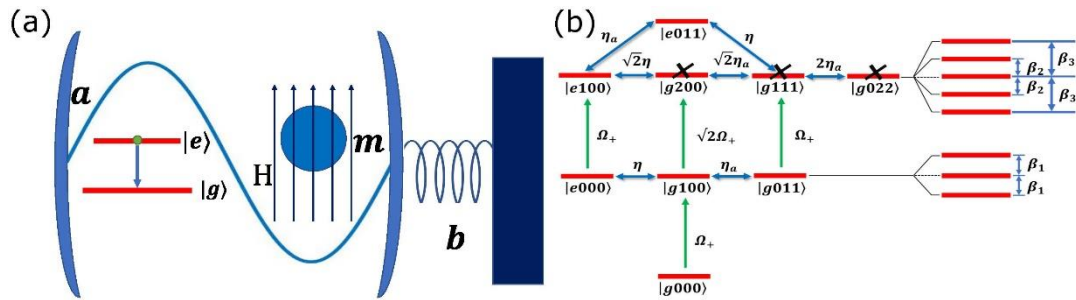


图 1 装置图和能级图

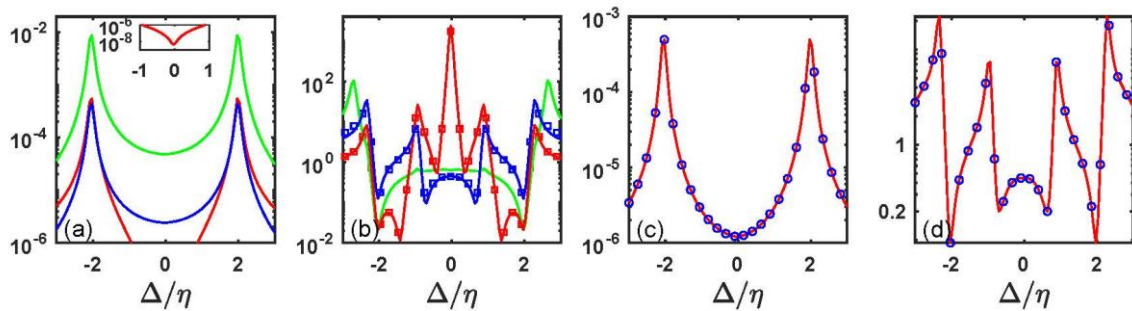


图 2 平均光子数和二阶关联函数

关键词: 光力系统 光磁系统 光子阻塞 声子阻塞 磁子阻塞 反聚束 泊松分布

参考文献

【1】 Chongsong Zhao *et al.*, Blockade in hybrid optomagnonic and optomechanic system, in preparation.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11874099, 11474044) 等

连续变量量子电路实现神经网络

侯晓凯 王玲娜 金睽 王晓霆

电子科技大学基础与前沿研究院, 四川省成都市成华区建设北路二段四号 611731

Email: houxiaokai615@gmail.com

摘要: 在量子计算领域, 基于量子光学的连续变量计算模型近年来得到了广泛的应用, 包括量子隐形传态, 相位估计等。与离散的量子比特模型不同的是, 连续变量模型利用了自然的类波特性, 以场的量子态编码量子信息, 所以它非常适合用于模拟具有连续值的量子算符 (位置算符和动量算符)。

如何在量子计算机平台下搭建神经网络是近年来量子机器学习研究的热点问题。本文采用连续变量模型作为机器学习的环境, 介绍了在量子计算机上构建神经网络的一种方法。从量子光学的原理出发, 用具有连续参数的门电路搭建量子神经网络, 具体实现过程如下: 通过位移门作用于真空状态来准备输入的量子态, 将输入数据集写入位移门 (Displacement) 的参数。然后输入的量子态依次通过线性光学干涉仪 (Interferometer) - 压缩门 (Squeeze Gate) - 线性光学干涉仪 (Interferometer) 实现了线性变换, 这个过程等同于将输入的原始数据乘上了用于机器学习的权值矩阵。紧接着使用位移门来完成添加偏置向量的操作。最后, 通过对系统作用立方相位门 (the Cubic Phase Gate) 或克尔门 (the Kerr Gate) 等非高斯门来实现非线性激活函数。从而完成了单层量子神经网络门电路的搭建。我们通过采取测量操作或计算期望值读取输出的量子态作为神经网络的输出。在函数拟合这一学习任务中, 我们采取计算输出期望值的方法来读取量子神经网络的输出, 并用均方差 (MSE) 来定义损耗函数用于观察拟合效果; 在鸢尾花分类问题中, 采用光子计数的测量读取预测值, 由此确定分类结果。在基于光量子计算机的仿真软件平台 (Strawberry Field) 进行的仿真实验结果表明, 用连续变量量子门电路搭建的神经网络在解决函数拟合和鸢尾花分类问题中展现了较高的准确度, 由此展现了连续变量量子神经网络的学习能力。

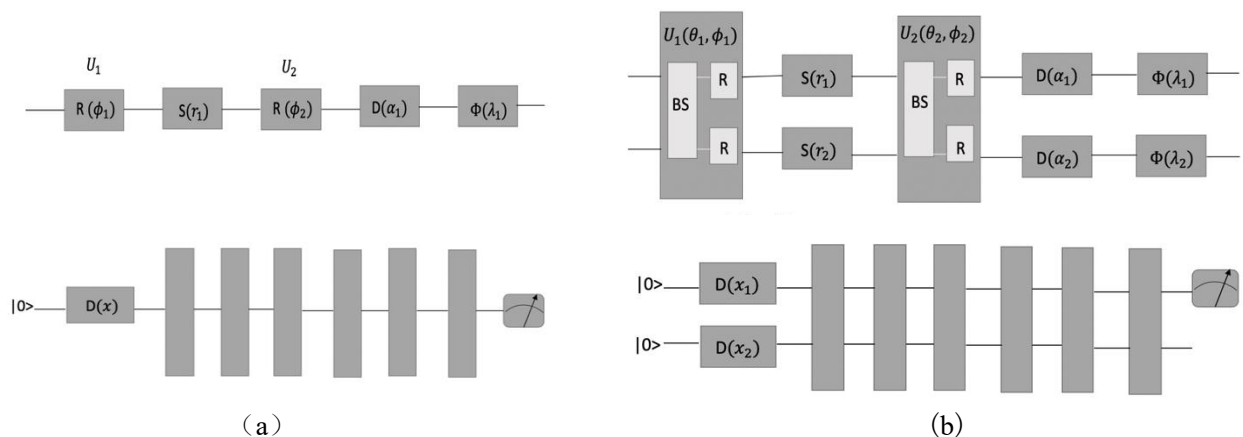
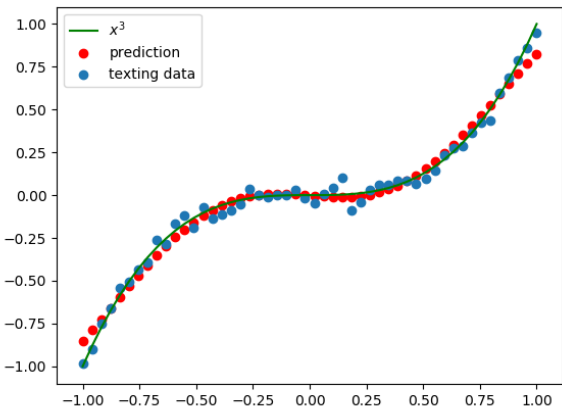
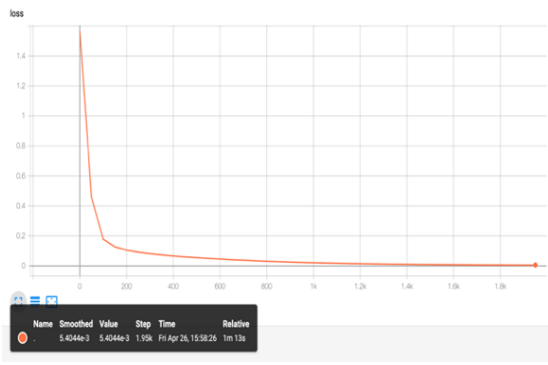
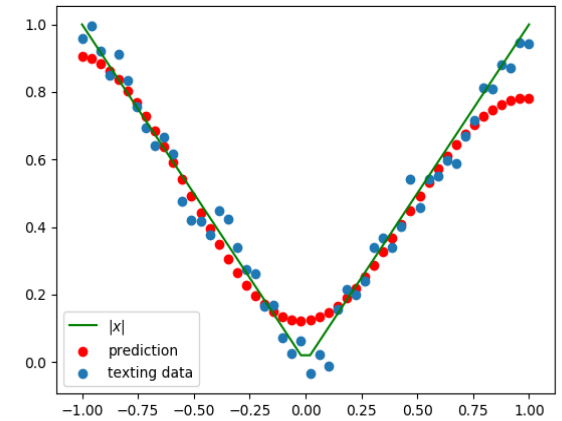
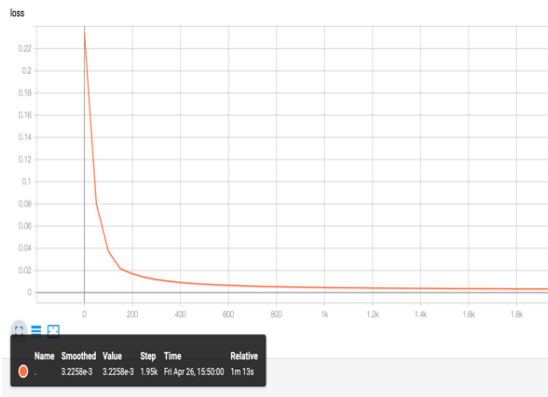


图 1 用于函数拟合的量子神经网络搭建图:

(a) 一元函数拟合; (b) 二元函数拟合



(a)

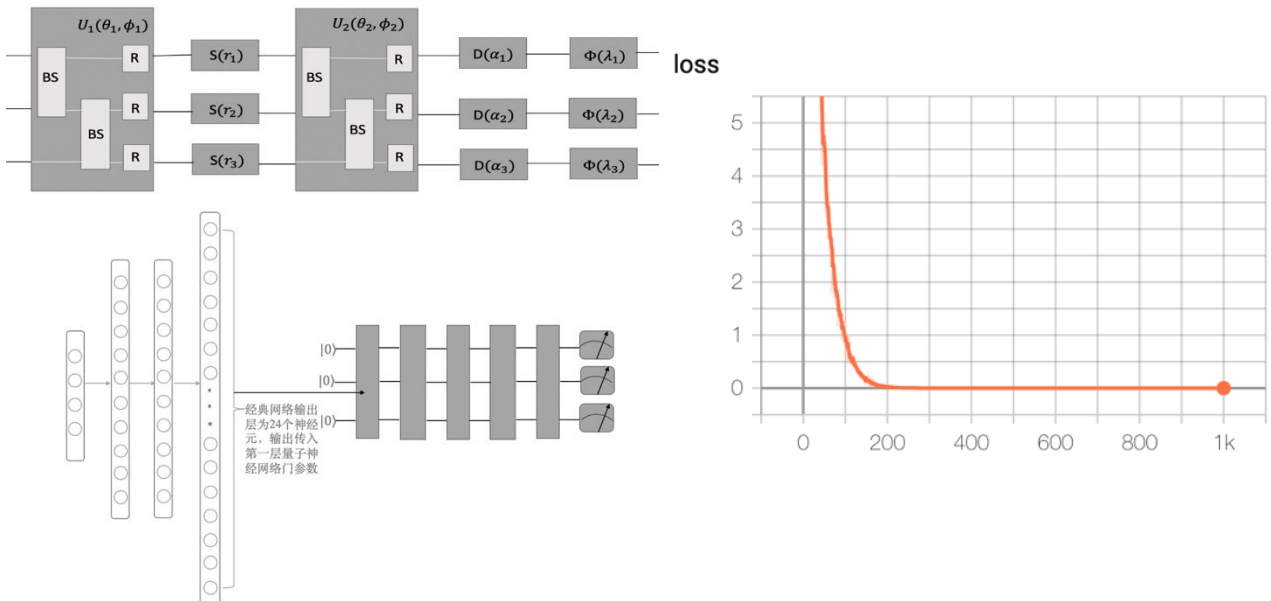


(b)

图2 一元函数拟合损耗函数的变化曲线和拟合效果图:

(a) $f(x) = x^3$; (b) $f(x) = |x|$

图3 用于鸢尾花分类的经典-量子混合神经网络结构及其训练结果



关键词: 连续变量量子信息, 量子机器学习, 回归预测, 数据分类

参考文献:

- 【1】 N. Killoran, T. R. Bromley, J. M. Arrazola, et al. Continuous-variable quantum neural networks [DB]. arXiv:1806.06871, 2018
- 【2】 S. L. Braunstein, P. V. Loock. Quantum information with continuous variables [DB]. arXiv:quant-ph/0410100, 2004
- 【3】 N. Killoran, J. Izaac, N. Quesada, et al. Strawberry Fields: A Software Platform for Photonic Quantum Computing [DB]. arXiv:1804.03159v1, 2018

一维调制压缩态连续变量量子密钥分发

曹艳霞、王普、王旭阳、李永民

山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006

Email: yongmin@sxu.edu.cn

一维调制 (UD) 相干态连续变量量子密钥分发 (CV-QKD) 协议具有调制过程简单, 低成本及随机数消耗少的优点; 在低额外噪声环境下, 其性能接近传统的二维调制相干态协议 (GG02), 受到人们的关注。我们提出一种 UD 压缩态 CV-QKD 协议^[1], 建立了统一的协方差矩阵, 通过改变压缩参数就可以方便研究比较 UD 压缩态协议与 UD 相干态协议的性能。证明了 UD 压缩态协议的制备与测量方案与基于纠缠方案的等价性, 分析了集体攻击下的正向协调 (DR) 与反向协调 (RR) UD 相干态协议与压缩态协议的安全性, 进一步比较了 DR 与 RR 情况下两种协议的性能。通过数值仿真, 我们发现: 对于 UD 正交振幅压缩态协议, 其性能在 DR 或 RR 条件下均不如相干态协议; 但是 UD 正交相位压缩态协议在相对较长距离 RR 条件下比相干态协议性能更优, 然而其提升的空间较小; UD 正交相位压缩态协议在 DR 条件下的性能改善比 RR 条件下更明显, 但是传输距离十分有限。考虑到相干态比压缩态更易制备, 且态的压缩效应对协议性能改善并不显著, UD 相干态协议从实用化角度具有优势。

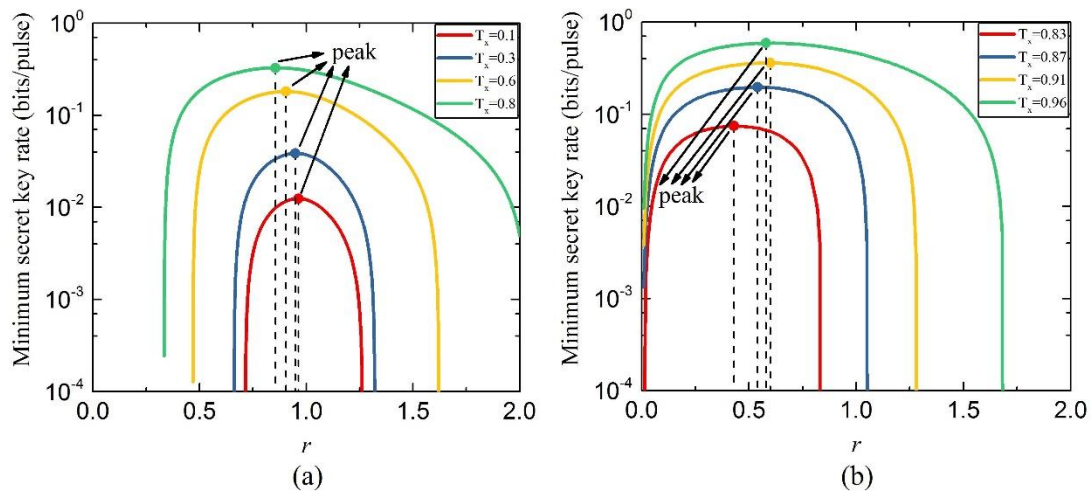


图 1 不同传输效率下最小密钥率与参数 r 的关系。(a) RR 协调 (b) DR 协调

(其他参数设置: $\beta=0.99$ $\varepsilon=0.01$ $\eta=0.6$ $v_{el}=0.1$, 调制方差取最优, r 为压缩参数, $r>1$ 正交振幅压缩, $r<1$ 正交相位压缩, $r=1$ 相干态)

关键词: 连续变量量子密钥分发 一维相干态协议 一维压缩态协议

参考文献

- 【1】 Xuyang Wang, Yanxia Cao, Pu Wang, and Yongmin Li. Advantages of the coherent state compared with squeezed state in unidimensional continuous variable quantum key distribution. *Quantum Inf. Process.* 2018, **17**, 344.

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0301403), 国家自然科学基金(61378010, 11504219)

Generating macroscopic quantum superposition and phonon laser in Hybrid Optomechanical Systems

Zhen Yang, Shi-Lei Chao and Ling Zhou*

School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, 116024

Email: zhlxn@dlut.edu.cn

Abstract: The superposition state of single mode or two-mode coherent state is always an attractive topic. We propose a scheme to generate Schrödinger cat state and entangled coherent state of mechanical oscillator in a hybrid optomechanical system. By introducing time-dependent coupling between atom and photon, an effective Hamiltonian is deduced where a tripartite interaction with time-dependent coupling is achieved. The effect of relatively high free energy can be cancelled so that we can obtain relatively large average phonon number. As its application, we show that a Schrödinger cat state can be generated for single mechanical oscillator system, meanwhile entangled coherent states of two mechanical oscillators can be obtained. Including the dissipation, we derive the analytic solution of our system and discuss the decoherence and the disentanglement. In addition, a steady phonon laser can be reached.

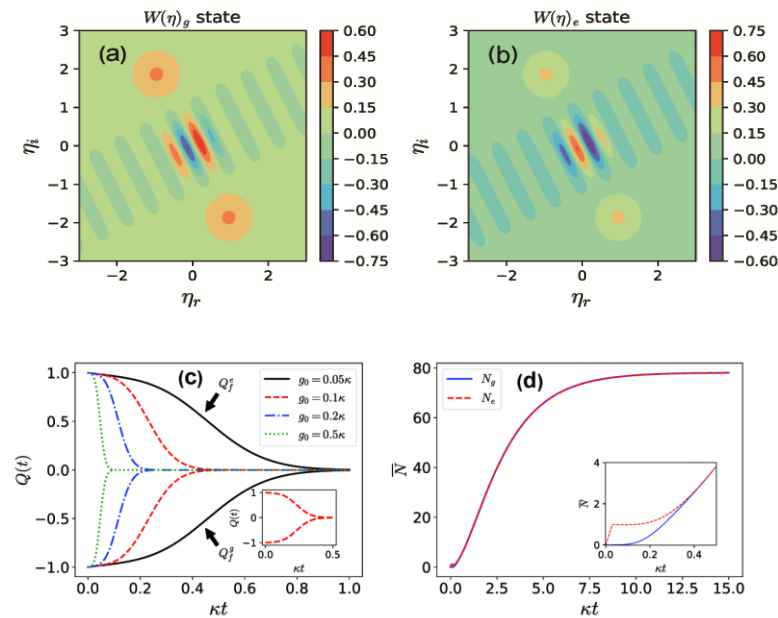


Fig. 1. (a), (b) The Wigner function. (c) The Mandel-Fano parameter of the phonon field. (d) The average phonon number.

Key Words: quantum superposition, phonon laser, entangled coherent state

Reference

- 【3】 Zhen Yang *et al.*, Generating macroscopic quantum superposition and phonon laser in Hybrid Optomechanical Systems, submitted.

Funding: National Natural Science Foundation of China (NO.11874099).

基于旋转环形腔系统的光学非互易传输及放大

彭蕊、周玲*

大连理工大学物理学院, 大连 116024

Email: zhlhxn@dlut.edu.cn

摘要: 非互易光学在光学二极管、单向光学通讯中具有重要的应用。我们提出一个利用一个旋转的环形腔 1 耦合一个静止的环形腔 2 来实现非互易性点的方案。在我们的方案中, 腔 1 与波导管耦合用以输入信号。结果表明, 由于旋转效应诱导的光场模式自由项的平移, 从左往右或从右往左通过波导管向腔 1 中输入的量子信号, 在传输至腔 2 的过程中是非互易的。通过控制腔 1 的旋转频率, 可以完美实现单向信号导通; 为了实现传输信号的放大, 我们在腔 1 中引入光学参量放大晶体, 结果显示, 不同传播方向的信号可以通过选择合适的参数区间进行放大。

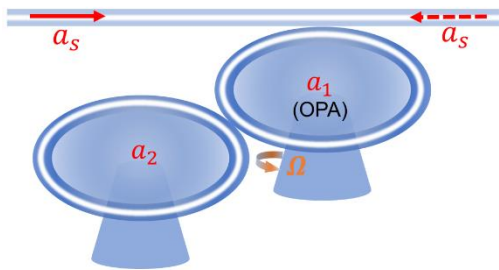


图 1 旋转环形腔系统的示意图

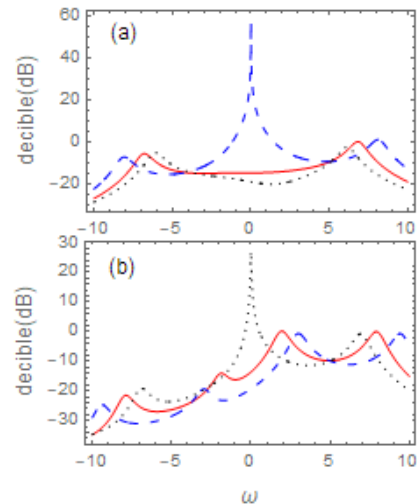


图 2 传输信号的非互易放大

关键词: 非互易光学, 信号放大, 旋转环形腔系统

参考文献

【4】 Rui Peng *et al.*, Optical nonreciprocity and amplifier in spinning annular cavity system, in preparation.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11874099, 11474044)