

20 超导量子比特薛定谔猫态制备

范 桁^{1,†} 郑东宁¹ 王浩华²

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 浙江大学物理系 杭州 310027)

2019-08-21 收到

† email: hfan@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20191206

最近几年,量子计算、量子模拟与量子信息研究发展迅速,人们特别关注量子计算平台的可扩展性,即如何实现更多量子比特的相干操控。超导量子计算平台可集成多个量子比特,相干时间长,操控和读出精度高,是实用化、可扩展量子计算主要技术路线之一。衡量量子计算平台可扩展性及性能的一个标志性成果是多量子比特纠缠态的制备,特别是Greenberger—Horne—Zeilinger (GHZ)态^[1]的实验制备,国际竞争尤为激烈。我们团队紧密合作,经近两年时间的器件设计与制备、实验测控运行及数据处理,成功将全局量子纠缠的量子比特数目推进到20个,特别是实现了18个量子比特GHZ态制备,其保真度超过GHZ多体真纠缠的判据阈值(0.5),并首次展示了20量子比特5组分薛定谔猫态,刷新了固态系统纠缠量子比特数世界纪录,成果已发表于*Science*期刊^[2]。

薛定谔猫(态)来源于量子力学奠基人之一薛定谔所提出的一个著名思想实验,设想微观粒子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$,与宏观生命状态猫的活和死相关联,形成相干叠加的量子态形式 $|0\rangle|\text{猫活}\rangle + |1\rangle|\text{猫死}\rangle$,则该只猫既不是死也不是活;同时,薛定谔猫态也和爱因斯坦—波多尔斯基—罗森(Einstein—Podolsky—Rosen,简称EPR)对^[3]的量子纠缠态有相似的形式, $|00\rangle + |11\rangle$,只不过EPR对是描述空间分离两个微观粒子的量子态,1990年提出的GHZ态是薛定谔猫态和EPR对的直接推广, $|000\rangle + |111\rangle$,但是指出了全局纠缠的概念,因为在不考虑第三个粒子时,GHZ态中任意两个粒子间没有量子纠缠,

只有经典关联,所以三个粒子是全局纠缠在一起的。由于这些概念相互关联,而量子态的具体形式又基本相同,现在把多粒子纠缠态 $|00\dots 0\rangle + |11\dots 1\rangle$ 称为多比特GHZ态,或者两组分的薛定谔猫态,同时把推广的多组分叠加态统称为薛定谔猫态,文章中采取这样的约定。

多量子比特GHZ和薛定谔猫态制备,一方面用来进行量子力学基本问题探索,比如验证量子态非定域性和互文性(contextuality,指互不对易的两种测量算子,对系统的测量结果依赖于两个测量的先后顺序)等原理,如贝尔不等式和Mermin不等式等;另一方面如果可以制备各种纠缠态如簇态,则通用量子计算可采用遵从特定时序的单量子比特测量来实现,即单向方式,会大大降低实现量子计算的难度,所以多比特纠缠态的制备是实现单向量子计算的技术基础。

多量子比特纠缠态制备有系列的实验进展:GHZ态实现有离子阱系统铍离子的6量子比特^[4],钙离子的14量子比特^[5],6光子三个自由度所实现的18量子比特^[6]等。超导量子比特曾实现10量子比特的GHZ态^[7],12量子比特的图态^[8],这次的最新结果是18量子比特的GHZ态和20量子比特的薛定谔猫态^[2]。IBM利用超导量子比特同样

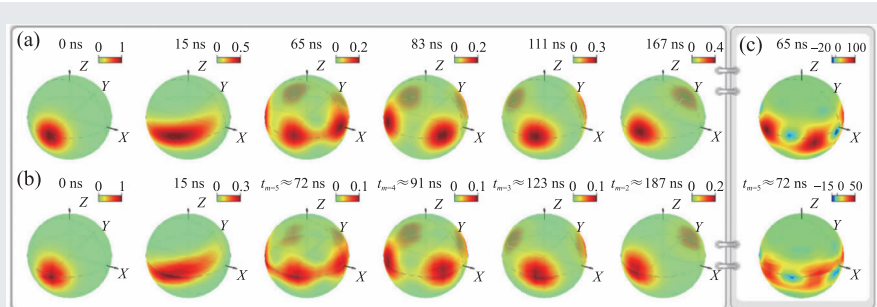


图1 20量子比特从初始态演化到压缩态、5, 4, 3, 2组分薛定谔猫态过程 (a)数值计算结果; (b)实验结果; (c)展示了五组分薛定谔猫态魏格纳函数的结果,表明态的量子属性(图片引自文献[2])

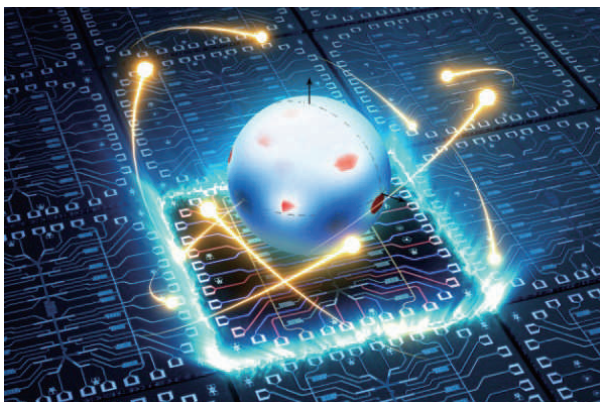


图2 示意图背景为实验所使用的具有20超导量子比特的处理器,中间部分对应量子态演化时其在布洛赫球上的分布

完成了18量子比特的GHZ态^[9],而20个超导量子比特没能超过多体真纠缠的保真度阈值0.5,哈佛大学Mikhail Lukin组利用超冷里德堡铷原子实现了20量子比特的GHZ态^[10]。

实验中使用的量子处理器上集成有20个超导量子比特,这些量子比特和一个共振腔耦合,其全连通分布可使得所有比特能同时耦合起来,也可产生任意两个比特间的纠缠,量子比特的平均相干时间达到34 μs,单比特的门操作保真度平均达到0.996,单比特读取保真度平均达到0.9以上,都属于世界先进水平。

实验中,所有20个超导量子比特被旋转到布洛赫球Y轴的反方向,即 $(|0\rangle - i|1\rangle)^{\otimes N}$,然后让这20个量子比特按照哈密顿量进行演化,系统哈密顿量对应于 σ_z 算子和的平方,则会产生单轴自旋压缩态,同时20量子比特在不同时间点产生5, 4, 3, 2组分的薛定谔猫态,在187 ns所产生的两组分薛定谔猫态就是GHZ态,图1中所展示的就是20量子比特在不同时间点时量子态在布洛赫球上的分布。确认GHZ态需要用保真度,只有当保真度大于0.5时,才能保证GHZ态多体真纠缠的产生,实验中18量子比特的保真度达到 0.525 ± 0.005 ,超过了阈值,而20量子比特薛定谔猫态的量子性需要用魏格纳函数确定,图1中(c)部分即是此结果的展示。

超导量子计算可以实现量子态密度矩阵的读出,非常适合研究量子系统的动力学演化行为,如最近所展示的多体局域化熵随时间对数增长

现象^[11]、量子行走中的类光锥及反聚束效应^[12]、梯子型玻色—哈伯德(Bose—Hubbard)模型边界局域态现象^[13]等等。由于过去凝聚态多体研究较多集中于系统基态性质,而现在量子计算实验平台则更容易实现初态为直积态的演化,也为凝聚态物理研究提出了新的课题,即如何利用直积态的动力学特征来刻画量子物态、拓扑物态、超导、磁性、相变等基本物理现象。

更多的量子比特、更高的操控精度仍然是现阶段量子计算技术追求的主要目标,在有噪音中小规模量子(Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ)平台开展量子计算和量子模拟研究将是今后几年的特点,但是噪音不可避免会削弱量子计算所要展示的超越经典的优势,因此探索有发展前景的实用化方案和具有基础科学意义的问题,需要理论和实验共同的努力。另一方面有噪音20量子比特的动力学已经很难用经典计算机进行数值模拟,比特信息存储已达到现有计算机上限,而且会随量子比特数指数增长,随着量子比特数增加,今后经典计算机的局限会更明显。利用量子计算平台研究凝聚态多体物理、量子场论与统计、量子机器学习、量子化学、粒子物理、宇宙学、生物物理等诸多方向,具有广阔的发展前景。而量子计算的实用化需要实现软硬件有机结合、发展量子汇编语言、高级量子计算机语言及落地应用场景,需各学科的交叉融合,但可以预见,随着技术的不断进步,量子计算机时代并不遥远。

参考文献

- [1] Greenberger D M, Home M A, Shimony A *et al.* Am. J. Phys., 1990, 58(12):1131
- [2] Song C *et al.* Science, 2019, 365:574
- [3] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Phys. Rev., 1935, 47:0777
- [4] Leibfried D *et al.* Nature, 2005, 438:639
- [5] Monz T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 106:130506
- [6] Wang X L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120:260502
- [7] Song C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:180511
- [8] Gong M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122:110501
- [9] Wei K X *et al.* arXiv:1905.05720
- [10] Amran A *et al.* Science, 2019, 365:570
- [11] Xu K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120:050507
- [12] Yan Z *et al.* Science, 2019, 364:753
- [13] Ye Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123:050502