

20超导量子比特薛定谔猫态制备获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/6369.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

20超导量子比特薛定谔猫态制备获进展。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)态的实验制备，国际竞争尤为激烈。近期，由浙江大学王浩华课题组与中国科学院物理研究所范桁、郑东宁课题组所组成的超导量子计算团队，在长期合作的基础上，最近又与中科院自动化研究所、北京计算科学研究中心等国内单位密切合作，在超导多量子比特纠缠态的制备方面取得新进展。

中科院物理所研究员范桁、郑东宁、副研究员许凯、博士生李贺康(现浙江大学博士后)、博士张煜然(现北京计算科学研究中心博士后)，与浙江大学博士生宋超、教授王浩华、王大伟、中科院院士朱诗尧，以及中科院自动化所研究员蒿杰、助理研究员冯卉等通力合作，经过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，并首次展示了20量子比特5组分薛定谔猫态。这一成果将固态系统GHZ态纠缠量子比特数世界纪录从10个推进到18个，薛定谔猫态比特数推进到20个，成果已于8月9日在国际学术刊物《科学》发表(Science 365, 574-577 (2019))。

同期《科学》上也背靠背发表了哈佛大学Mikhail Lukin组20量子比特薛定谔猫态的工作(Science 365, 570-574 (2019))，他们利用里德堡原子制备了薛定谔猫态并证明其GHZ态的纠缠数目可以达到20量子比特。另外，美国IBM超导量子计算团队的预印本(arXiv:1905.05720)同样报道了其20超导量子比特纠缠态制备的实验工作，数据显示18比特GHZ纠缠态保真度超过了多体真纠缠的阈值判据(0.5)，与浙江大学与物理所团队所报道的保真度几乎持平。三篇文章报道的纠缠态比特数目基本处于同样水平，也几乎同时投送到预印本库(浙大物理所团队5月1日提交：arXiv:1905.00320；IBM团队5月14日提交：arXiv:1905.05720；哈佛团队5月14日同时提交：arXiv:1905.05721)，反映了以纠缠态制备为代表的多量子比特相干操控是目前主要的努力目标之一。

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假想实验，设想微观粒子态， $|0\rangle$ ， $|1\rangle$ ，和宏观生命状态猫的死和活相关联，形成相干叠加的量子态形式， $|0\rangle$ |猫活 $\rangle + |1\rangle$ |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(EPR)对的量子纠缠态有相似的形式， $|00\rangle + |11\rangle$ ，只不过爱因斯坦-波多尔斯基-罗森对一般指空间分离的两个微观粒子，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 $|00\dots0\rangle + |11\dots1\rangle$ 称之为多比特GHZ态，或者两组分的薛定谔猫态，同时把相似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，图一展示了薛定

谓猫态和GHZ态。

多量子比特GHZ和薛定谔猫态制备，一方面可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。

实验中所采用的器件上集成有20个超导量子比特，请参考示意图，其平均相干时间达到34微秒，全部超过了20微秒，最高达到51微秒，多数集中在30多微秒，所有量子比特可通过同一共振腔产生相互作用，和共振腔的耦合参数几乎相等，反映了器件制备工艺稳定，有利于GHZ态和薛定谔猫态的制备，每个量子比特都可以精确调控，实验利用随机旋转操作标定的单比特逻辑门保真度都超过0.99，平均达到0.996，长相干时间、操控精度及读出、以及相同的共振频率等都是实验成功的重要基础。器件量子比特多对多的构型可以在任意两个量子比特间产生纠缠和相互作用，有利于实现量子计算多种方案和模拟多种量子现象，图2展示了实验所使用的具有20量子比特的超导量子处理器及量子态演化中的布洛赫球分布。实验中先将每个量子比特都精确制备于位于布洛赫球赤道X方向处的叠加态，然后让所有量子比特根据系统哈密顿量进行演化，根据器件构型和参数，系统哈密顿量等同于Z算子和的平方，量子态将产生自旋压缩态，并在不同时间点分别出现5,4,3,2个组分叠加的薛定谔猫态，其中两组分的薛定谔猫态就是GHZ态。

GHZ态是一种多体纠缠态，其纠缠判据对应于所制备的量子态和目标态的保真度超过0.5，对实验精度要求非常之高，保真度由两部分构成，即占据数和相干量。以占据数为例，18量子比特的占据几率分布有218种，一般需要测量223次得到几率分布，即测量八百万次，其中一半必须得到正确的结果，而其它分布是随机的几乎可以忽略，实验中得到保真度约为 0.525 ± 0.005 ，证明了18量子比特GHZ是多体真纠缠，即此纠缠不是由于部分比特间有纠缠而导致的结果，而是GHZ特有的全局纠缠。

量子态的演化过程可以很直观地用多量子比特在布洛赫球分布的Q函数来刻画，可以发现在不同的时间点，量子态分别演化为多组分的薛定谔猫态，组分数分别为2, 3, 4, 5, 其中5组分是第一次被实验观测到，因此实验实现了20量子比特的薛定谔猫态，其量子特性可以由魏格纳函数确定，证明20比特薛定谔猫态被成功制备，请参考图1。

谷歌和IBM选择以超导量子比特作为实现量子计算的技术路线，团队实力强劲，过去有(自)媒体报道谷歌完成了有72个超导量子比特的器件，而IBM已经制备出50左右量子比特的器件，这次IBM团队的论文展示了利用20量子比特器件可以达到18量子比特的GHZ态，保真度比浙大物理所团队稍低，但IBM团队利用逻辑门操作制备GHZ态，技术上又具有一定挑战性，哈佛大学Lukin组同期《科学》文章利用里德堡原子，采用了优化控制和补偿探测效率等方法，实现了20量子比特薛定谔猫态和GHZ态。总体来讲，精度和实验技术上各团队现阶段基本处于同样水准。

有噪音中小规模量子计算暂时还没有达到能超越经典计算机的水准，但是有噪音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。也就是现阶段，经典计算机已经不能判断量子计算结果，是否可以表述为经典和量子计算能力已经互不可比呢？

此项实验测试在浙江大学完成，器件设计制备、数据分析等由各单位协作完成，此工作得到国家重点研发计划(No. 2017YFA0304300，No. 2016YFA0300600)、自然科学基金(No. 11725419，No.

11434008)及中科院先导专项(No. XDB28000000)等的支持。

本文同等贡献一作为：宋超(浙江大学)，许凯(中科院物理所)，李贺康(中科院物理所)，通讯作者为：王浩华(浙江大学)、范桁(中科院物理所)、郑东宁(中科院物理所)。

图1：量子态的时间演化过程，薛定谔猫态和GHZ态在不同时间点被分别制备，上下两行A、B是数值模拟和实验结果的对照，C部分展示了薛定谔猫态的量子性验证，此图来自《科学》文章配图。



图2：本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。

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发