

# 单量子比特储存时间刷新世界记录

## ——拥有超过10分钟相干时间的单离子量子比特

汪野 廉茶铉 金奇奂<sup>†</sup>

(清华大学交叉信息研究院 量子信息中心 北京 100084)

2018-04-23 收到

<sup>†</sup> email: kimkihwan@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wj20180504

量子力学和经典力学最大的区别在于允许两个甚至多个不同的态同时存在,也就是量子叠加态。量子计算机的优越性来自于生成并使用这些相干的叠加态,使得我们能够通过指数增长的态空间进行大量的并行计算。然而,当量子系统不是完美孤立,而和环境有耦合时,相干性会随着时间的增加而衰减,与此同时量子特性也会逐渐消失。这将导致科学家们能够使用和观测量子特性的时间窗口很短,限制了量子技术的应用价值。尤其是量子计算机、量子中继、量子储存技术的实现非常依赖稳定的量子演化,因此需要尽量维持量子态的相干性,抑制退相干。相干时间可以描述量子态具有相干性的时长,也可以简单认为相干时间是量子态被储存的极限时间。

近年来,科学家们做出了不少杰出的工作以提升不同量子系统的相干时间,尤其是系综系统。例如Mike L. W. Thewalt组在同位素纯化后的硅-28中的磷-31供体系统中共观察到了39分钟的量子相干时间<sup>[1]</sup>, Matthew J. Sellars组在正硅酸钇的钍离子掺杂剂系综中实现了6个小时的量子相干时间<sup>[2]</sup>。另外,早在20年前科学家们就在囚禁离子系综中观测到了10分钟的量子相干时间<sup>[3]</sup>。而原则上在量子比特系综层面进行量子信息的储存、操作、读取是困难的,仅仅通过量子比特系综而非单个量子比特构建量子计算机更加困难。因此科学家们在过去的很长一段时期内都致力于发展在单量子比特层面的操作和控制技术,从而能够使用某些量子特性(比如量子态的不可克隆原理),并能够扩展构建出大规模的完全可控的量子系统。我们认为相较于系综系统,单量子比特系统与环境的耦合更少,理应具有不亚于系综系统

的相干时间。但是事实却非如此。我们惊讶地发现,直到我们的工作之前,单量子比特的相干时间最长不超过1分钟(离子阱系统)<sup>[4]</sup>。在其他的单量子比特系统中,比如超导、金刚石色心,量子态的相干时间更短,约为毫秒到秒级别。毫无疑问,提高单量子比特的相干时间是一项重要且困难的工作。

离子阱系统通过电场或磁场囚禁带电粒子,并能够很好地隔绝外界噪声。得益于良好的环境隔离和控制技术,离子阱系统拥有非常多的科学应用,例如质谱分析、精密测量、量子操控和量子模拟。1978年, David J. Wineland (2012年诺贝尔物理学奖得主)第一次在离子阱中实现了激光冷却离子,这使得测量和操作单个量子比特成为可能<sup>[5]</sup>。经过近40年的发展,科学家们已经可以熟练地在离子阱系统中操作单个或者多个量子比特、制备纠缠态、进行量子模拟和量子计算。离子阱系统是目前最有可能实现通用量子计算机的平台之一,其优点是超高的操作保真度、长量子态相干时间和好的可扩展性<sup>[6, 7]</sup>。近期Christopher Monroe组实现了5个离子组成的小型可编程量子计算机<sup>[8]</sup>和53个离子的量子模拟<sup>[9]</sup>,这更加体现了利用离子阱系统构建大型可控量子系统的潜力。

我们发现限制单离子量子比特相干时间的主要原因是背景加热<sup>[10, 11]</sup>。为了不破坏离子量子比特,在储存量子比特期间不能够进行激光冷却,这就导致离子被环境噪声加热,从而降低了量子态探测的效率。我们采用协同冷却的方法来解决离子的加热问题。实验中,在离子阱中同时囚禁了两种不同的离子:<sup>138</sup>Ba<sup>+</sup>和<sup>171</sup>Yb<sup>+</sup>,<sup>138</sup>Ba<sup>+</sup>离子作为冷却离子,<sup>171</sup>Yb<sup>+</sup>离子作为量子比特离子(图1)。在

整个量子比特储存期间，关闭 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的冷却激光，并常开 $^{138}\text{Ba}^+$ 离子的冷却激光。由于 $^{171}\text{Yb}^+$ 和 $^{138}\text{Ba}^+$ 处于同一个简谐电场势阱中，多普勒冷却 $^{138}\text{Ba}^+$ 离子就可以协同冷却 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子。又由于 $^{138}\text{Ba}^+$ 拥有和 $^{171}\text{Yb}^+$ 相似的质量，协同冷却的效果显著。并且 $^{138}\text{Ba}^+$ 的冷却激光波长距离影响 $^{171}\text{Yb}^+$ 量子比特的敏感波长很远，所以协同冷却过程不会破坏量子比特的相干性。

另一个影响离子量子比特相干时间的重要因素是环境噪声：磁场噪声和信号源的相位噪声。动态解耦是抑制此类噪声的标准手段<sup>[12-14]</sup>。我们可以将噪声在频域内进行分解，动态解耦的技术可以看做是噪声的带通滤波器，使环境噪声中大部分的频率部分自己抵消，只留下某些特定的频率部分通过。通过控制动态解耦序列的施加时间，能够控制带通滤波的频率和带宽。在研究了系统的环境噪声之后，我们设定带通频率为2.5 Hz，这是噪声谱中最小部分的频率，同时着重抑制了50 Hz, 100 Hz, 150 Hz的噪声，抑制了10个数量级以上。为了施加上千个动态解耦序列，以抑制环境噪声，我们还尝试各种方法以优化了单量子比特门，并使用随机化基准测试技术测量得到单量子门保真度为99.994%<sup>[15]</sup>，最大程度减少量子门操作误差对相干性的影响。但即使拥有如此高保真度的单量子门，在施加了上千个动态解耦操作之后，单量子比特门的误差也将导致量子相干性的丢失。因此我们采用了更加鲁棒的动态解耦序列KDD<sup>[16]</sup>，以抑制量子操作误差带来的影响。综合以上所有技术，我们制备了6个初始量子态，并分别测量了相干时间。如图2所示，对于 $|\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\rangle$ 态，相干时间为 $4740 \pm 1760$  s，对其他4个态 $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$ 、 $|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle$ 、 $|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle$ 、 $|\uparrow\rangle - i|\downarrow\rangle$ ，相干时间为 $667 \pm 17$  s<sup>[17]</sup>。另外，还对储存过程进行了量子过程层析，结果如图2(b)所示。量子过程层析结果表明我们的储存过程对于任何基矢展开下的量子态都成立。这个性质是实现量子储存的必要条件，因为只有这样才能在量子储存过程中不丢失任何相位信息。

此工作近期发表于《自然·光学》杂志<sup>[17]</sup>。我

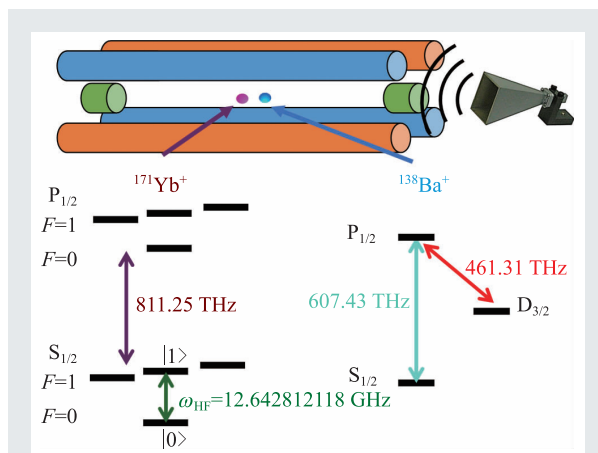


图1 离子阱装置示意图。同时囚禁了两种不同的离子于同一离子阱中，分别为 $^{138}\text{Ba}^+$ 离子和 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子，间距 $10\ \mu\text{m}$ 。用于冷却和探测两种不同离子的激光分别覆盖了两个离子的区域。两个离子会每隔大约5分钟交换一次位置，我们没有观察到不同位置导致的量子态探测或者单量子比特操作的区别

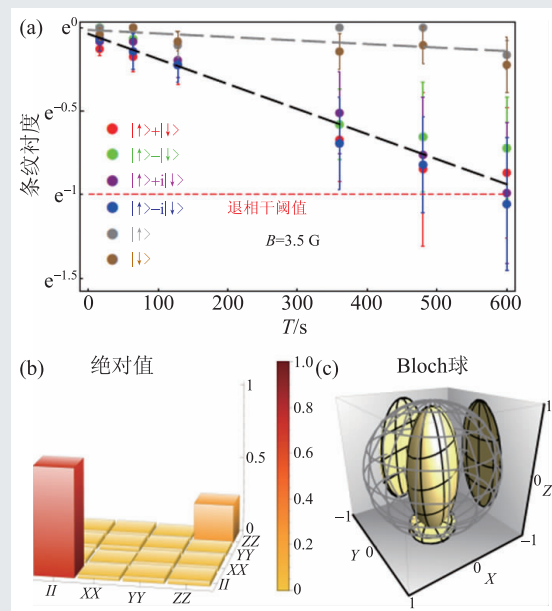


图2 (a)6个量子态的相干时间测量结果。通过拟合得出：对于 $|\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\rangle$ 态，相干时间为 $4740 \pm 1760$  s，对 $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$ 、 $|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle$ 、 $|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle$ 、 $|\uparrow\rangle - i|\downarrow\rangle$ 这4个态，相干时间为 $667 \pm 17$  s；(b)8分钟储存的量子过程层析结果。量子过程包含了量子态初始化、8分钟的量子储存和量子态测量。恒等操作是这个量子过程的主要部分， $\chi_H = 0.699 \pm 0.058$ ；(c)Bloch球上的态演化。灰色网格表面表示初始态，黄色的表面代表8分钟储存之后的态

们注意到系统中单量子比特的相干时间并没有原理上的限制，可以通过安装磁屏蔽系统或使用更

好的信号发生器继续提高单量子比特的相干时间。这一成果展示了单量子比特储存的可能性,也展示了许多量子控制技术中的应用。毫无疑问,我们的技术可以应用于多量子比特系统,从而实

现多量子比特储存区域,成为基于离子阱量子计算机的关键技术<sup>[6]</sup>。另外,也可用于通过离子光子纠缠实现的量子网络<sup>[18]</sup>,作为离子光子纠缠过程的保障。

## 参考文献

- [1] Saeedi K *et al.* Science, 2013, 342: 830  
 [2] Zhong M *et al.* Nature, 2015, 517: 177  
 [3] Fisk P *et al.* IEEE Trans. Instrum. Meas., 1995, 44: 113  
 [4] Harty T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 220501  
 [5] 严马可, 金奇兔. 物理, 2013, 42(04): 230  
 [6] Kielpinski D, Monroe C, Wineland D J. Nature, 2002, 417: 709  
 [7] Lekitsch B *et al.* Sci. Adv., 2017, 3: e1601540  
 [8] Debnath S *et al.* Nature, 2016, 536(7614): 63  
 [9] Zhang J *et al.* Nature, 2017, 551(7682): 601  
 [10] Epstein R J *et al.* Phys. Rev. A, 2007, 76: 033411  
 [11] Wesenberg J *et al.* Phys. Rev. A, 2007, 76: 053416  
 [12] Khodjasteh K *et al.* Nat. Commun., 2013, 4: 2045  
 [13] Biercuk M J *et al.* Nature, 2009, 458: 996  
 [14] Souza A M, Álvarez G A, Suter D. Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 240501  
 [15] Knill E *et al.* Phys. Rev. A, 2008, 77: 012307  
 [16] Souza A M, Álvarez G A, Suter D. Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 240501  
 [17] Wang Y *et al.* Nature Photonics, 2017, 11(10): 646  
 [18] Duan L M, Monroe C. Rev. Mod. Phys., 2012, 82: 1209

## 暗物质或因宇宙中某种不稳定所致

希格斯场的不稳定性可能导致原初黑洞的形成。这类黑洞也许正在充当暗物质。

理论家推测希格斯场正处亚稳态,因而我们的宇宙可能位于希格斯深渊的边缘。如果希格斯场隧穿至“真正的”基态,将释放巨大能量。这有点危言耸听,



## 物理新闻和动态

或许其他未知物理过程还会保障宇宙在历史上稳定。不过,导致暗物质的形成亦可能是希格斯场不稳定性的宇宙学后果之一。这一构想认为,暗物质其实就是宇宙早期经过不稳定希格斯场涨落而形成的那些黑洞。虽然原初黑洞早被提出,但是这样的暗物质假设不需要超出标准模型的物理学。

物理学家早就意识到宇宙可能处于“伪真空”。这一想法最近显得尤为迫切,是因为基于希格斯质量测量值的计算表明希格斯场很可能存在更低的能态。通过分析希格斯场不稳定性的影响,西班牙 Catalan 高等研究院 José Espinosa 等发现:相关过程可能有助于造就导致星系结构形成的暗物质。研究组计算了宇宙早期暴胀阶段希格斯场的涨落。在一定假设前提下,这些涨落将成为形成  $10^{15}$  kg 原初黑洞的种子,其密度符合当今宇宙暗物质的要求。

(徐仁新 编译自 *Physics*, 23 March 2018)