

# 量子十问之八

## 量子也有存储U盘?

郭光灿<sup>†</sup>

(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

2018-09-12收到

<sup>†</sup> email: gguo@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190508

存储器的功能就是把信息存储起来,直到需要用的时候再读出。信息的存储是人类文明传递的重要手段,也是现代信息技术的一个核心环节。伴随着人类历史的发展,信息存储的介质也在不断变化。语言是人类最初的交流方式,大脑是信息存储的最早介质。它使得人类能够持续生存与进化。从语言到文字是人类文明进步的一个转折点,信息可以脱离人本身以文字等形式保存起来并传递下去。人们先后使用过石头雕刻、绳子打结、书本、磁盘、光盘等各种形式的存储器。

现代数字信息处理是基于二进制计算机的,所以经典的存储器都是存储比特的,也就是存储两种经典状态之一:0或者1。大量比特的组合构成我们所需要的信息。经典存储器随处可见,包括电脑、手机内的内存、硬盘,以及便携式U盘等。

由经典信息走向量子信息的时代,量子存储器是必不可少的基础

器件。对比经典存储器的功能,量子存储器应当是可以存储量子状态的,也就是 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的任意量子叠加状态。 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 是两种最基本的量子态,对应经典的0和1,其区别是量子态可以叠加,比如有 $|0\rangle+|1\rangle$ ,  $|0\rangle-|1\rangle$ ,  $|0\rangle+i|1\rangle$ 等各种状态。

量子存储器在量子信息科学中具有许多重要的功能:

### (1) 建立大尺度量子网络

量子网络是长程量子通信和分布式量子计算的载体,它可以基于量子纠缠建立起来。单个光子是量子纠缠、量子信息的理想载体,然而单个光子在光纤网络中传输面临指数级的损耗,单光子穿越100 km光纤的几率是百分之一,而穿越500 km光纤的几率则降至100亿分之一。一个典型的解决方案是量子中继,其基本思想是把大尺度网络分割成多段小尺度网络。比如500 km的量子纠缠传输可以分解为5段100 km的短程纠缠,在短程纠缠依次成功建立的前提下,再利用纠缠

交换建立远程纠缠。这里的问题是,每个100 km的纠缠建立的时间一般是不同步的,比如第一段可能在0.05 s建立,第二段可能在0.02 s建立,第三段又可能在0.1 s建立,等等。这就需要量子存储器去同步这个过程,每个节点的纠缠一旦成功建立则存储起来,等到所有节点都成功建立时,存储器之间进行纠缠交换最终建立远程纠缠。所以大尺度量子网络要解决的核心问题就是高性能量子存储器的物理实现。

### (2) 构建量子计算机

和经典计算机一样,通用量子计算机也需要量子存储器(内存)实现复杂的计算功能。依据具体计算芯片的不同,该存储器要存储相应的量子信息载体。以线性光学量子计算为例,多光子是一种基本的计算资源,可是直接产生多光子非常困难:某时刻获得一个光子的几率是 $P$ ,则同时获得 $N$ 个光子的几率是 $P^N$ 。目前 $P$ 值大约为10%,故无法产生几十个光子的纠缠态。利用量子存储器可以把这种低效率的光子源转变为确定性(即 $P$ 接近100%)的光子源。比如存储器的寿命是产生光子所需要一次操作时间的100倍,那么就可以在存储器寿命范围内,做最多100次重复尝试发射光子直到成功,从而把一个 $P=1\%$ 几率的光子源转变为确定性光子源,并进一步获得多光子源。



电脑硬盘和便携式U盘(图片来源于网络)

### (3)实现量子U盘

以上提到的应用中量子存储器的寿命一般在秒量级及以下, 存储器都是固定在某个地点配合光子来实现诸多功能。2015年, 科学家发现稀土离子掺杂晶体的自旋态量子相干寿命长达6小时。这是量子系统相干寿命的最高水平, 并且有望进一步提升至几天的量级。该结果对量子信息科学发展具有深远的影响。

比如我们可以把单个光子存储进存储器中, 并且在存储寿命范围内, 利用汽车、高铁、飞机等运输工具把存储器运输到任意指定地点, 这就实现了量子U盘的功能。这是一种革命性的量子通信方案, 因为原则上可以实现对量子纠缠物体的经典搬运。量子通信将不再依赖光纤布网, 任何经典交通工具能到达的地方, 量子U盘携带量子纠缠就能到达。它将是一种高灵活性且相对低成本的点对点量子通信方式, 有望在身份认证、签名、量子密码、量子信息共享等各领域取得应用。

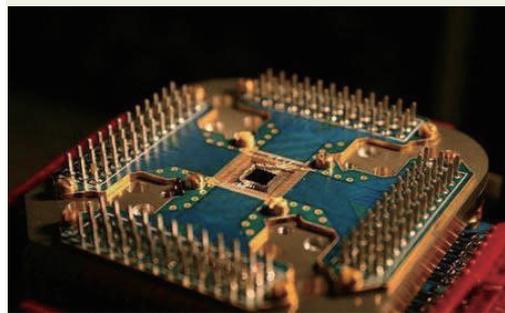
值得一提的是量子存储器的容

量问题, 经典存储器一般以比特为单位, 现在的经典存储器可以达到TB( $2^{40}$ 字节)的量级。经典存储器一个存储单元只存储一个比特, 所以存储器的容量实际上就是经典存储单元的个数。量子存储器由于量子相干性的特点, 它的一个存储单元可以一次性存储 $N$ 个量子比特, 也就是 $N$ 个模式。有研究表明, 固态量子存储器的存储容量可达100个量子比特。这个容量已经远大于地球上所有经典存储器之和。

综合来看, 由于量子信息不可复制且不可放大, 量子存储器在量子信息中的地位比经典存储器在经典信息中的地位更加重要。国际上有许多研究组在从事量子存储器的研究, 比较主流的物理系统是冷原子、热原子以及稀土离子掺杂晶体。目前量子存储器的各项独立指标都有比较好的结果, 然而综合指标仍然距离量子中继的要求相差较远。量子计算需求的量子存储器综合指标相对低一



量子网络(图片来源于网络)



量子存储器(图片来源于网络)

些, 但这种存储器的实际应用需要伴随量子计算研究的突破。

量子U盘研究当前面临的主要挑战是, 如何把单个光子高效率地存储进长寿命的自旋态中以及提高实际系统运输中的抗环境噪声能力。伴随以上研究的逐步推进, 量子U盘有望率先进入实用环节。

## 读者和编者

### 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅2年《物理》杂志, 将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章, 476页精美印刷, 定价68元, 值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

#### (1) 邮局汇款

收款人地址: 北京市中关村南三街8号中科院物理所, 100190  
收款人姓名: 《物理》编辑部

#### (2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行  
户名: 中国科学院物理研究所  
帐号: 112 501 010 400 056 99

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话: 010-82649470; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn