

# 离通用量子计算机又近一步,我国学者取得新突破—— 量子世界的“结绳记事”

本报记者 何冬健 通讯员 周 炜 孔晓睿

“结绳记事”这一上古时期的信息存储方式,在今天将有望用在通用量子计算机上——近日,浙江大学物理学院宋超、王浩华研究组与清华大学邓东灵研究组合作首次在超导量子芯片上实现了斐波那契任意子的模拟,并成功对其进行了编织(braid)操作。

现代物理学家尝试通过编织(braid)实现抗干扰的拓扑量子计算,仿佛一场古今智慧的不期而遇。

团队介绍,这一实验的成功,意味着人们向构建通用、容错的量子计算机又迈出了坚实一步。

## “结绳记事”的启发

不同于采用“1”或“0”的二进制数据模式,量子计算机“秒杀”传统计算机的奥秘在于量子比特的两个独特效应:量子叠加和量子纠缠。

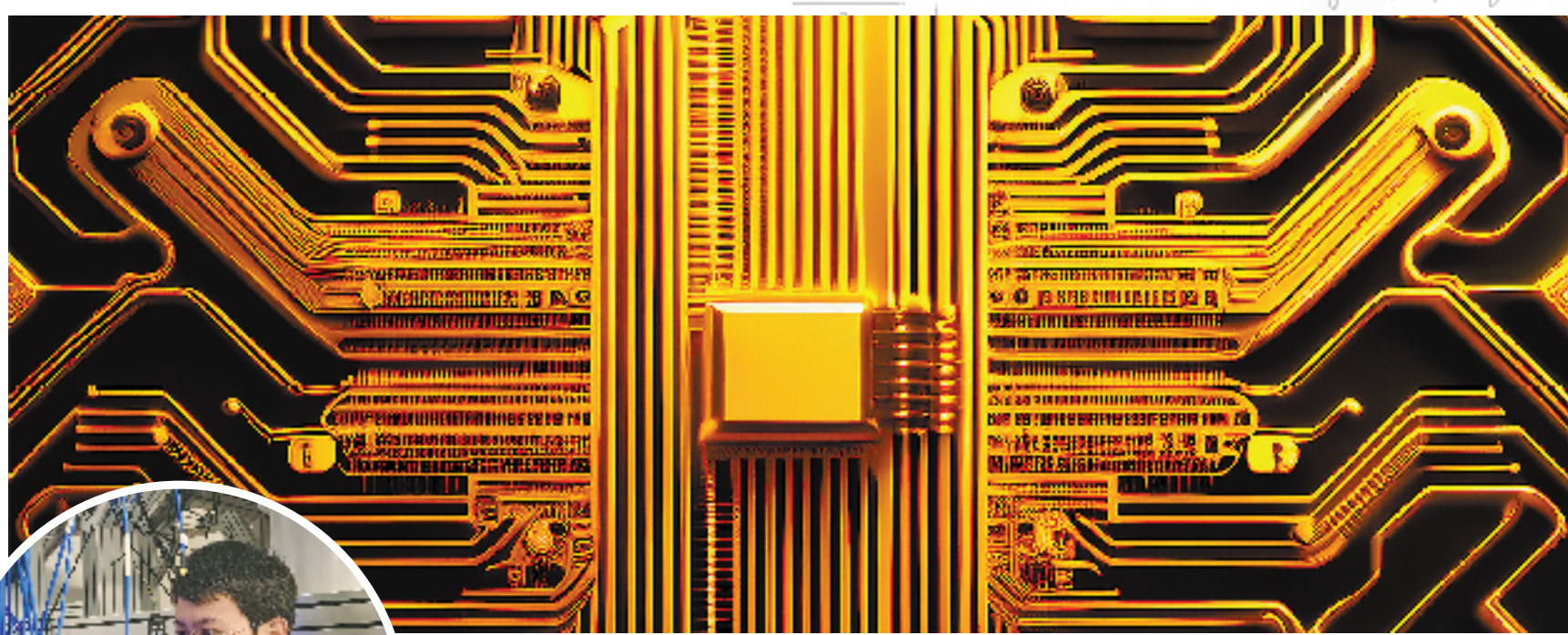
量子叠加能够让一个量子比特同时具备0和1的两种状态,量子纠缠能让一个量子比特与空间上独立的其它量子比特共享自身状态,从而实现量子并行计算。打个比方,如果把量子比特的可能状态看作是地球表面上的一点,北极是二进制中的1,南极是0,两极之间的所有点就是0和1的所有可能叠加。量子比特能在整个球面上自由漫游,使量子计算机获得了它们独特的能力。

遗憾的是,这种叠加态极其脆弱,与环境(包括构成计算机本身的一些材料)之间非常微小的杂散作用也能破坏这种状态,就像开一辆动力十足但时不时会熄火的汽车。如果量子比特不能与环境有效隔离,这些扰动就会给计算带来差错。

结绳记事,为现代物理学和量子计算提供了一个令人惊讶的模型。

科学家们将量子状态和物理系统的拓扑性质巧妙地联系起来——拓扑量子比特。它如同在编成“辫子”的绳子上进行计算。不过所用的绳子不是普通绳子,而是物理学家所钟情的世界线(world line)。世界线代表着粒子在时空中的运动。就连粒子也不是人们第一时间会想到的电子和质子,而是一类在二维平面中“跳舞”的粒子——非阿贝尔任意子(Anyon)。

试想一下,如果在三维世界中交换两个一模一样的小球两次,系统会回到原先的状态;而在二维世界中,交换两个任意子两次,系统的状态会发生改变,并可被实验探测到,就像对操作产生了“记忆”一样。如果垂直于它们活动的平面画一条时间轴,它们的“舞步”会留下一条连续向上的轨迹,这便是世界线;两个任意子交换位



团队成员、浙江大学物理学院博士生徐世波在调试设备。受访者供图



李贺康正完善超导量子芯片。受访者供图



团队成员、浙江大学物理学院博士生王可在实验中。受访者供图

置时,两条世界线会交叠出一个纽结。

2004年诺贝尔物理学奖得主、麻省理工学院物理学教授弗兰克·维尔切克指出,当引入更多的世界线并将其拉长时,存储的信息会指数级增加,即使受到外界扰动,它们的基本结构也能保持不变——因为其拓扑结构没变。跟随着古印加文明(注:即“结绳记事”)赋予的灵感指引,我们有可能制造出一台拓扑量子计算机,它可以挑战对其他计算机来说甚是棘手的计算。

如同“结绳记事”,量子信息将在非阿贝尔任意子的编织过程中被记录下来,且具有很好的抗噪能力。在拓扑这个特殊的“保护伞”下,来自环境的微小扰动难以影响量子计算的状态,我们可以放心地把信息交给它们。

## 模拟斐波那契任意子

在本项研究中,合作团队尝试模拟的是斐波那契任意子。

我们在高中数学中学习过斐波那契数列,斐波那契任意子与其息息相关,它的量子维度为黄金分割数1.618,拥有更加复杂的统计性质,其实验实现更为困难。

所谓模拟,是指在超导量子芯片上创造一个量子波函数,来实现目标粒子的特征。可以把它想象成一个粒子在“角色扮演”,波函数描绘的是角色的发型、服饰、长相等等“量子特征”。

浙江大学物理学院博士生徐世波介绍,模拟的依据是著名物理学家文小

刚提出的“弦网凝聚”理论。该理论认为:空间本身并不是空的,而是由量子比特组成的“量子比特海”,基本粒子是量子比特海中的气泡和涡旋,而斐波那契任意子存在于由许多根弦组成的弦网液体(你不妨把它想象成一碗由“弦”组成的意大利螺丝面,“面条”之间能相互连接、分叉、形成网络)中,它们通常出现在一根弦的两端。

这意味着工作的挑战在于:模拟并不是直接构造出粒子,而是首先要模拟衍生出斐波那契任意子的“弦”。“弦网液体”的基本单元是一个六边形的蜂窝状结构,而用于模拟的量子比特芯片是四方形的点阵结构。为此,清华大学邓东灵研究组提出实验方案,通过巧妙的倾斜设计,让多个量子比特的活动整体呈现出六边形网格特征,并用一个量子比特来对应“蜂窝”边上的一条“弦”。通过操控量子比特的状态,可以将“弦”连成特殊的“网”。

在实验中,研究人员成功模拟了两对斐波那契任意子。研究发现,长程纠缠作为量子拓扑态的基本性质,就像上古时期的“结绳”一样,为信息提供了一个抗干扰的存储空间。

## 打造通用的量子计算机

打造一台通用的量子计算机,仅仅抗干扰是不够的,还要有足够种类的逻辑门来执行操作。

“经典计算机之所以是通用型的,是因为所有的计算可以通过逻辑门的组合来完成。”徐世波介绍,如同经典计算机,量子计算机也需要一些特定种类

的逻辑门来组合形成所有的量子操作。

然而,通往非阿贝尔拓扑有序态的征途充满了挑战,之前所有模拟的非阿贝尔任意子通过编织操作所实现的逻辑门均不具备通用量子计算的能力。2023年,该团队完成了非阿贝尔任意子中的伊辛任意子(Ising anyon)的模拟,发现它并不能构建足够种类的逻辑门。因此,他们在伊辛任意子的基础上又做了斐波那契任意子的模拟。

团队正是在浙江大学杭州国际科创中心李贺康博士制备的超导量子芯片上打开、关闭甚至挪动量子世界的“弦”,这些操作可以实现斐波那契任意子的编织,从而实现量子计算机中的逻辑门。

有了不同的逻辑门操作,我们就能像编辫子一样,在量子世界实现不同的操作组合。当“辫子”的数量和长度增长,“辫子”可存储的信息也会指数级增加,即使受到外界扰动,信息也不会丢失或改变——因为受到了拓扑保护。

空间量子科学实验卫星“墨子号”、第三代自主超导量子计算机“悟空”……当前,我国量子计算技术持续突破。畅想未来,通用的量子计算机将更好发展新质生产力,实现对传统计算和各个行业领域应用的突破,从而提高生产效率、创造价值和推动经济发展。

斐波那契任意子的成功模拟,向通用容错量子计算迈出了坚实一步,为探索奇异的非阿贝尔拓扑态提供了新方法。宋超也特别说明,这仅仅是对于斐波那契任意子的模拟,它们还未受到拓扑保护。“为实现容错,还需要开发主动纠错等技术,仍然还有许多工作等待我们去完成。”

## 科技速递

### 气候变化影响 海藻分布范围

一项新研究发现,气候变化可能导致海藻和海洋生物的全球分布范围缩减。该研究为气候变化对海洋生物产生普遍影响提供了新证据。

海藻和海洋生物都是构建海洋生态系统的植物,在全世界沿海地区提供重要的生态和社会经济功能,如促进沿海生物多样性、参与海洋碳循环、促进碳封存和减缓气候变化等。然而,气候变化严重威胁这些植物的生态功能及其栖息地。

芬兰赫尔辛基大学和欧盟委员会联合研究中心等机构研究人员对共计207种海藻和海洋生物在不同气候变化条件下预估的分布情况进行建模,并在全球范围内模拟了它们未来的分布。结果显示,到2100年,气候变化可能导致全球多地的海藻和海洋生物的本地多样性平均下降3%至4%,其中在欧洲大西洋沿岸和波罗的海等中纬度和高纬度地区,海藻或海洋生物多样性将严重受损。

### 7月“天象大片” 等你来赏

昂星团伴月、年度最小太阳、火星合天王星、水星东大距、冥王星冲日、月掩土星、宝瓶座δ南流星雨极大等“天象大片”定档,7月等你来赏。

7月3日起至24日,每隔几日便有一部“天象大片”。

7月5日,年度最小太阳将现身天宇。“北京时间当天13时,地球将经过远日点,这是一年中地球距离太阳最远的时刻。此时,太阳视直径为全年最小,也就是‘最小太阳’。”天津市天文学会理事、天津科学技术馆天文科普专家宋媛媛说。7月15日,太阳系的两颗行星——火星与天王星“相合”,二者近距离相伴,上演“星星相吸”。7月22日,水星将迎来今年第二次东大距。7月24日,矮行星冥王星将迎来冲日。

### 暴雨、热浪 在全球多地频发



今年以来,暴雨、洪涝、热浪和干旱等极端天气气候事件在全球多地频发,造成巨大经济损失。世界气象组织近日表示,此类事件已成为新常态,温室气体排放导致的气候变化是主要原因。

世界气象组织气候专家阿尔瓦罗·席尔瓦表示,近几十年来,热浪和强降水等极端天气事件发生频率和强度都在增加。今年以来,亚洲、非洲、欧洲和北美洲的热浪已造成严重损失,对人类健康和福祉构成重大威胁。

在不同时间和空间尺度上,厄尔尼诺和拉尼娜现象等多种气候因素都可能助推极端天气气候事件,但人类活动引起的气候变化是主要原因,也是极端天气气候事件发生频率和严重程度不断增长的长期背景。

席尔瓦说,尽管从去年延续至今年的厄尔尼诺现象现已结束,但世界气象组织最新发布的季节性预报显示,7月至9月,非洲、欧洲、亚洲绝大部分地区和北美洲、中美洲和加勒比海、南美洲热带大部分地区气温将高于平均水平,加剧热浪和野火发生的风险。

### 巴西发现小型 远古爬行动物化石

巴西科研人员近日在英国《自然·科学报告》杂志发表研究报告说,在巴西首次发现一种类似鳄鱼的小型远古爬行动物化石。这种爬行动物生活在三叠纪中晚期,比现今已知第一批恐龙还要早数百万年。

报告作者、巴西圣玛丽亚联邦大学古生物学家罗德里戈·米歇尔说,此次发现的化石包括一个完整的头骨、11块脊椎骨、骨盆和一些肢骨,属名为“Parvosuchus aurelioi”的远古爬行动物,是伪鳄类的一种。

Parvosuchus生活在2.52亿年前地球上最严重的一次物种大灭绝发生后的进化革新时期,在恐龙最终成为地球霸主之前,有多个爬行动物类群在竞争。股薄鳄科最后一批动物在第一批恐龙出现前约700万年灭绝。(均据新华社)

## 浙江科学家发现打败癌症新路径 让肿瘤细胞先老去

本报记者 朱 平 通讯员 王 蕊 张文明

抗衰老是人类永恒的话题,在大家试图找到延缓细胞衰老密码的同时,有一群人却逆向思维,把目光投向了加速老化,只是他们的目标是:肿瘤细胞。

近日,浙江大学转化医学研究院、浙江大学医学院附属第一医院吕志民教授、许大千研究员以共同通讯在《Nature Communications》(《Nature Communications》)在线发表文章,揭示了代谢酶FBP1调控端粒长度与细胞衰老决定肿瘤生长的新机制,为肿瘤治疗新策略和新药物开发提供新思路。

如何诱导肿瘤细胞衰老,达到治疗肿瘤的效果?记者采访了该文第一作者、吕志民团队成员李敏老师。

在回答这个问题前,李敏先做了关于端粒的“名词解释”。“这个名词在大众视野中或许不常见,但在科学领域,端粒赫赫有名。”李敏介绍,2009年,三位科学家因发现端粒和端粒酶是如何保护染色体的这一研究成果,获得诺贝尔生理学或医学奖,这也是许多人第一次听说端粒这个词。自此,端粒与衰老及肿瘤之间的奥秘逐步进入大众的视线。

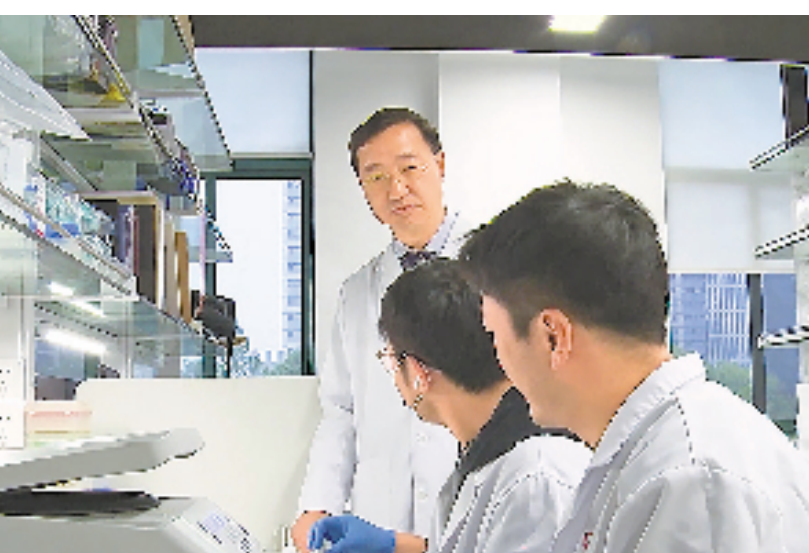
在细胞中,染色体像丝带一样承载着基因遗传的信息,而丝带两端各有一

段“保护装置”,来确保细胞内DNA的完整稳定,这种保护装置就是“端粒”,它就像是安全帽一样,保护着我们的基因组。

端粒是位于染色体末端的DNA序列和蛋白质结构,在细胞分裂过程中会逐渐缩短,当端粒变得过短时,细胞会因为无法分裂而进入老化状态直至死亡。可以说,端粒的长短与人体衰老过程错综复杂地联系在一起,并作为一个重要的癌症标志而突出,被称为“生命时钟”,端粒的缩短也被认为是细胞衰老的生物学标记。

那么,又是谁影响了端粒?李敏告诉记者,目前科学界已经发现,端粒的长度延续是由端粒反转录酶(TERT)以端粒酶RNA(TEC)为模板,在染色体的单链末端添加端粒DNA的重复序列来完成。也就是说,端粒酶可以有效维持端粒的长度,延长细胞的寿命。

实际上,大多数正常的体细胞具有有限的端粒酶活性,所以容易衰老,而肿瘤细胞往往具有过高水平的端粒酶活性,可以克服端粒长度的磨损,并维持无限的细胞分裂,形成癌症。大多数癌细胞通过激活端粒酶来维持端粒长度,另一小部分肿瘤细胞则通过端粒



吕志民教授(后排)和团队成员在实验中。受访者提供

延长替代机制来维持端粒的长度。

作为世界肿瘤代谢领域的专家,吕志民教授一直聚焦肿瘤代谢相关的研究,二十余年来,在找寻答案的过程中,层层穿透肿瘤代谢奥秘,让肿瘤细胞内外部盘根错节的调控机制逐渐明晰。

“吕教授率先证明了多种代谢酶具有蛋白激酶活性、蛋白磷酸酶活性,证明了许多代谢酶有着调控基因表达等

重要的非代谢功能。”李敏说,正是基于这些研究,团队顺着肿瘤细胞糖代谢机制这条藤蔓,开始寻找正常细胞和肿瘤细胞中,端粒反转录酶(TERT)的核转位及其所依赖的端粒酶功能是否受到差异调节。

团队通过研究发现,人体中,代谢酶FBP1主要表达于肝脏和肾脏,却在几乎100%的透明细胞肾细胞癌中普

遍缺失,在肝癌细胞和其他类型的癌症中也经常下调,可见,它的缺乏很可能促进了肿瘤进展。

随后,在临床样本中,他们又发现,端粒反转录酶TERT和代谢酶FBP1表达水平呈负相关,也与肝癌、肾癌患者的不良预后呈负相关。在动物实验中,研究人员通过脂质纳米颗粒靶向递送代谢酶到小鼠肿瘤组织,发现显著抑制了肿瘤生长,同时伴随端粒反转录酶TERT的磷酸化降低,以及细胞衰老标志物表达的增加,小鼠的生存期得到延长。

李敏在介绍团队研发的过程,听上去如丝般顺滑,其实中间也有众多波折,就拿发表文章这件事来说,团队做了充分实验,拥有了足够数据来支撑自己的研究观点,但到了同行评议这一关,国际评审专家还是给出了非常多的问题,李敏说,仅回复这些专家提问,就用了二三十页的文档,一个个问题去详细解释,最终得到了同行专家的认同。

通过发现代谢酶FBP1在调控细胞衰老方面的重要作用,探究脂质纳米颗粒靶向递送代谢酶到肿瘤组织的可能性,李敏表示,这些新发现,为人类攻克肿瘤提供了还有一种新思路,虽然从实验室转化到临床还有一个很长一段路要走,但团队很有信心,这一天不会太远。