

量子十问之七

量子模拟到底是啥?

郭光灿[†]

(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

[†] email: gguo@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190406

随着计算机技术的发展,人类利用计算机来模拟现实世界的能力越来越强大:现在飞机和汽车性能的测试、核试验,都可以在超级计算机的赛博空间中进行;甚至,当前热门的人工智能研究,也可以看成是计算机对人类行为的模拟。但是,用计算机模拟现实世界就总是这样无往而不利吗?

事实上并不是这样,当这些超级计算机来研究微观世界的量子力学问题的时候,原来强大的计算能力马上就变得捉襟见肘。在由量子力学规律所支配下的微观世界中,物理系统的所有信息都包含在系统的波函数里,如果我们能够精确地知道系统在某个时刻的波函数,原则上,也就知道了这个系统在该时刻的所有性质。但是精确地描述波函数是一个浩大的工程。以我们所知道的最简单的量子系统——两能级系统(通常是一个电子或者一个光

子所描述的系统)为例,要描述这个系统的一个量子态,需要2个自由参数;描述由两个这样的粒子所构成的系统,则需要14个自由参数;如果描述 N 个两能级系统所构成的复合系统的量子态,则需要 4^N-2 个自由参数。如果 N 稍稍增加,这将是一个非常庞大的数字,于是,计算这样一个由相互作用的粒子所构成的量子系统的波函数随时间的演化,则变得异常困难,以至于目前人类最强大的计算机只能计算30多个两能级粒子所构成的系统。

美国物理学家费曼最早认识到这方面的困难,并给出了解决的方案。通常,如果想知道一个物理系统的运行和演变,一种方式是:我们知道描述这个系统运动的基本方程,然后通过数学计算出系统每个时刻的变化;第二种方式就是做实验,创造一个和我们已知物理系统相同条件的系统,让它在相同的规律下演进、变化,通过对实验结果的观察来获得我们想要的信息。费曼猜想,既然世界的底层规律是符合量子力学的,如果没有能力数值求解,可以创造一个人工的、符合量子规律的有效系统,使得这个有效系统所满足的量子力学方程同我们的求解对象完全一致,于是,可

以通过控制这个人工的量子力学系统,在这个人工系统上直接做实验,读出实验结果即为我们所欲求得的解。费曼的这个想法,进一步演变为数字式的量子模拟(即:建造一台量子计算机,在量子计算机上,用量子比特来构建模拟对象,模拟系统的性质)和模拟式的量子模拟(即:直接在人工系统中构建所模拟的有效量子系统,它与数字式量子模拟的区别雷同于数字电路与模拟电路的区别)。

通过研究发现,量子模拟除了擅长模拟量子多体系统随时间的演化,还有可能模拟目前尚没有办法求解的强关联多体系统,而这两类问题是困扰多个学科分支(如:凝聚态物理、量子统计力学、高能物理、原子物理、量子化学等)的拦路虎。除此之外,通过量子模拟还有可能构建某些理论上预言、但是自然界尚未发现的新型的“虚拟”量子材料,来展现量子世界的神奇应用(如拓扑量子计算);或是在量子模拟器中模拟目前真实物理设备所达不到的物理条件,演示已经被理论预言,但是从未在真实世界中观测到的物理现象;或是创建用于求解某些特殊类型的数学难题的专用机器(超越目前超级计算机所能达到的最快求解速度),等等。

目前,潜在的能够实施上述功能的量子模拟系统主要有:超冷原子气体系统、离子阱系统、超导电



人工智能(图片来源于网络)

路系统、光子系统等。

光学系统可以实现多自由度的编码方式、高精度的操作和测量，并可以有效地屏蔽环境对系统的影响，是量子信息研究领域的重要体系。在这里，我们将介绍几个基于线性光学系统实现的有趣的量子模拟例子，以展现量子模拟的具体过程和应用。

具有非阿贝尔量子统计特性的马约拉纳费米子是科学家们孜孜以求的神秘粒子。有人猜测中微子可能是一种马约拉纳费米子，可是要交换两个中微子验证其量子统计特性是极其困难的。近年来的理论研究表明，凝聚态系统中的马约拉纳零模是具有马约拉纳费米子特性的准粒子，它是实现长时间量子存储和拓扑量子计算的理想载体。实现马约拉纳零模的交换是确定它的统计特性以及实现拓扑量子计算的关键步骤。尽管在凝聚态系统中实验物理学家们进行了长期的探索研究，也已找到一些表明马约拉纳零模存在的证据，但依然没有实现关键性的交换操作和量子统计特性的研究。

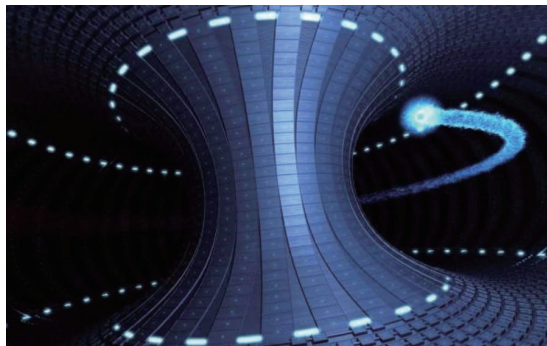
量子模拟的方法就可以用来克服这个困难：虽然待模拟的系统无法用现有的技术实验实现，但量子模拟器及其测量结果却可以获取待模拟系统的信息。相关研究组巧妙地设计出一个基于耗散的线性光学量子模拟器，利用它有效地产生Kitaev模型(存在马约拉纳零模的最简单模型)中的马约拉纳零模。该量子模拟器包含四个量子比特(三个工作比特加一个辅助比特)。对辅助比特的后选择测量对应于实现系统中的耗散演化。这些耗散过程提供了对应工作比特之间的有效相互作用，从而可以有效地移动马约拉纳零模，并完成两个马约拉纳零模的交换操作。通过进一步提高光量子模

拟器的模拟能力，研究组还实现了对两条Kitaev链上四个马约拉纳零模交换的模拟。通过操作算符变换，将支持四个马约拉纳零模的费米系统映射到一个六粒子的自旋系统，并利用光子的空间模式对自旋系统进行编码。而不同

马约拉纳零模之间的交换仍然通过一系列耗散过程来实现。两条Kitaev链上的四个马约拉纳零模可以编码一个量子比特。利用交换过程，研究组成功地模拟了具有拓扑保护特性的编码比特上的Hadamard门和 $-\pi/4$ 相位门。这两个量子门是非对易的，这也就验证了交换后几何相位的非阿贝尔特性。

马约拉纳零模系统并不能通过交换实现普适的拓扑量子计算。为实现普适操作，研究组在该耗散光量子模拟器上通过将两个马约拉纳零模移动到同一位置并施加适当的实时演化，实现了 $\pi/8$ 相位门。从而构造并完成完备的单比特门操作。并且他们还通过在不同的位置上施加相位噪声和反转噪声，验证不同量子门操作的拓扑保护性质。

量子模拟还可以用来研究基础量子物理问题。宇称-时间(PT)对称理论是由美国物理学家Bender等人于2002年对量子力学进行推广而提出的。Bernder等人认为量子力学中哈密顿量的厄米性假定要求过严，可以放宽到用PT对称性假定代替，即假定哈密顿量具有空间-时间反演对称性。根据这一理论，我们所知道的量子世界只是PT世界的一种特殊情况(具有厄米性)。然而最近的理论表明，在复合系统中的局域PT对称的模型中，也就是一个子系统用PT理论描述，而另一个子系统用传统量



量子模拟实验显示时光旅行(图片来源于网络)

子力学描述，有可能存在超光速通信。

相关研究组在实验上模拟了一个这样的PT世界。他们将纠缠光子对分发到两个相距25 m的实验室中构建非局域量子模拟器。其中一个光子满足局域PT对称理论描述，另一个光子则在传统的量子理论框架下演化。研究组通过构造一个开放的量子系统，利用传统的量子门操作以及后选择来实现局域的PT对称演化。由于模拟过程中需要后选择，实际成功的PT演化只有50%的概率。量子模拟的结果表明，利用量子纠缠“幽灵般的超距作用”，光子的PT对称演化能使信息以超过1.9倍的光速从一个实验室传输到另一个实验室。然而考虑实际的情况，PT对称系统的演化只是整个厄密系统(包括成功部分和失败部分)的一部分，只有一半的成功概率。因此总体信息的传输速度是不能超过光速的，这也为实验所证实。

利用线性光学系统还可以模拟麦克斯韦妖式算法冷却和拓扑不变量的直接观测等诸多理论预言的新奇特征。随着操控光子数目的不断增加，以及对光子不同自由度同时操控技术的进一步发展，线性光学系统将在复杂量子现象的模拟中发挥越来越重要的作用。与线性光学系统相类似，其他量子模拟的物理体系的实验技术也在不断的发展，并被用于研究各种物理现象。