

## 将宇宙维系在一起的可能是 量子幽灵作用

Brian Swingle是斯坦福大学一名研究人员,当他还在MIT修读物质物理学专业研究生时,非常偶然的参加了几堂关于弦论的课程以丰富自己的学习经历。虽然开始时他很少留意课堂上碰到的一些概念,但随着学习的深入,他发觉自己的研究与黑洞物理和量子引力的弦论方法之间竟然存在意外的高度相似。他的研究工作是使用张量网络来预测奇异材料的性质。“我意识到它们之间有些深层的东西在起作用”,他说道。

张量出现在物理学的各个分支中,是可以同时代表多个数的简单数学结构。例如,速度矢量就是一个简单的张量,同时表示运动的速度和方向。一个系统一般由多个具有相互作用的部分构成,比如构成物质的大量的亚原子之间复杂的相互作用通常就采用张量过程来解析。把复杂的张量编成网络连在一起,可以简化系统的计算过程。

越来越多物理学家开始认识到张量网络在宇宙学研究中的巨大价值,Swingle正是其中之一,可以用于解决关于时空本质的争论是张量网络的价值之一。帕萨迪纳市加州理工理论物理系John Preskill教授注意到许多物理学家开始关注量子纠缠与微小尺度上的时空几何之间可能存在深刻联系。前者的量子纠缠正是一直困扰爱因斯坦的超距幽灵作用,而后的微小尺度上的时空几何则在60年前被物理学家John Wheeler描述为翻腾着的香槟泡沫。“如果你探测普朗克量级(可能是最小距离了)尺度下的世界,它与我们所熟悉的时空可能完全不同。”Preskill说道,“它将再也不是一个真实的几何时间了,而是别的东西,一种事物的本源的东西。”

“那个更根本的图像到底是什么?”物理学家们继续与这个棘手的问题纠缠着,他们越来越相信这个图像可能与量子信息有关。“当我们谈论信息编码时,通常意味着可以将一个系统划分为几个部分,不同的部分之间存在一些关联,我可以通过观察一个部分来获得另一部分的一些信息,这正是纠缠的本质。”Preskill说道。

通常说的时空的“编织物”是一种比喻,让人联想到将不同的独立纤维编织在一起形成一个平滑的连续整体,时空中的纤维就是基本量子。“纠缠是时空的编织物”,Swingle说道,“纠缠将系统维系在一起,也使得集体性质不同于个体的性质。不过为了观察有趣的集体行为,我们还是需要理解纠缠是如何分布的。”

张量网络提供了一种数学工具来满足这一需求,时空是复杂系统中的一系列相互关联的节点。在这个复杂系统中,各个独立的量子信息像乐高积木一样嵌合在一起,纠缠是将网络连在一起的胶合剂。我们想要理解时空,就必须首先思考纠缠的几何性质,即系统中信息是如何编码在相互作用的巨量节点之间的。

### 多体,单网络

给一个复杂量子系统建模不是一个容易的事情,即使是对超过两个相互作用个体的一个经典系统进行建模也相当具有挑战性。当牛顿在1687年发表《自然哲学的数学原理》时,他考察

的许多问题中就有一个是所谓的“三体问题”。计算两个物体的联合运动相对而言比较简单,比如地球和太阳,只需要考虑两者之间相互的万有引力;但如果加入第三个物体,比如月亮,原本相对直接并有精确解的问题就会变为一个本质上属于混沌的问题。这时,想要对他们的运动进行长期的预测,就需要强大的计算机来对系统演化进行近似模拟。一般而言,系统的个体越多,计算就越困难,至少在经典物理中困难程度是呈线性或近似线性方式增加的。

现在设想由几十亿个原子构成的量子系统,所有原子都和其他原子通过复杂的量子方程相互作用,计算的困难程度将随着系统中的粒子个数增加而指数化增长,这种情况下再用蛮力解析计算肯定是不可能了。

比如一块金子,它由几十亿个原子构成,每个原子都与其他所有原子相互作用,从它们的相互作用中,金属的许多经典性质,比如颜色、强度和电导率得以体现。“原子是极小的量子力学对象,把原子放在一起,奇妙的事情就会发生。”Swingle说道。只有在原子这个尺寸上,量子力学的规律才开始显现。物理学家需要精确地计算这块金子的波函数(波函数是一个可以描述整个体系的一个完整态),可以想象这个波函数将是一个多么复杂的多头怪物。

即便上面那块金子只有100个原子,而每个原子也只有一个要么朝上要么朝下的量子“自旋”,所有的可能态也有 $2^{100}$ 多种,大概一个1后面跟30个0。每加一个原子,问题的复杂性就以指数形式增长。“如果你把整个可见宇宙都装满我们已有的最好的数据存储材料和能够买到的最好的硬盘,也只能储存大约300个自旋的波函数完整态。”Swingle说,“这些信息就在那儿,但并不都具有物理实在,没有人测量过所有这些数字。”

张量网络可以帮助物理学家压缩波函数包含的其他信息,将目光聚焦在那些可以在实验中测量的波函数性质上,比如观察给定材料是如何弯曲光线的,或者它是如何吸收声音的,或者它的导电性如何等物理性质。张量是一个“黑匣子”,装进一堆数字但只给出一个不同的结果。所以也有可能只输入一个简单的波函数,比如许多无相互作用的电子,每一个都在最低能态上,然后在系统中不断运转张量,直到形成一个诸如几十亿个相互作用的原子的金块这样巨大而复杂的体系的波函数,其结果将是由一个直观的图表来表示这个复杂的金块,很像20世纪中期发明的费曼图,它极大地简化了物理学家表示粒子相互作用的方式。一个张量网络就像时空一样有几何形状。

实现这一简化过程的关键原则就是“局域性”,即假设任何给定的电子都只是和它附近的电子进行相互作用。众多电子中的每一个都与相邻电子相互纠缠从而在网格中产生一系列的“节点”。这些节点是张量的,而纠缠将它们联系在一起,这样复杂的计算就比较容易可视化,有时它可以把问题简化到非常简单的计算。

有许多不同类型的张量网络,其中最有用的一种是多尺度纠缠重整化拟设(MERA)。其工作机制可以这样描述:设想一个

一维的电子线,标志为A、B、C、D、E、F、G、H的8个独立电子,分别表示量子信息的基本单元(量子比特),它们之间通过最近的量子比特之间的纠缠来形成链接。A与B纠缠,C与D纠缠,E与F纠缠,G与H纠缠,这在网络中形成了高一级的链接,此时,AB与CD纠缠,EF与GH纠缠,从而得到网络中的更高级链接。最后ABCD与EFGH纠缠得到最高级链接。“某种程度上,可以说我们利用纠缠构建了多体波函数”,德国约翰尼斯·古腾堡大学的物理学家Román Orús在2014年的一篇文章中评论到。

网络已经证实了从多体之间的复杂相互作用中如何诞生出一个简单的几何结构,物理学家对于张量网络(尤其是MERA)将打开通往量子引力的道路深信不疑,极为兴奋。Swingle等一批科学家希望利用这种生成几何,找出某个机制,可以从离散的量子信息比特中生成一个平滑连续的时空。

### 时空的边界

凝聚态物理学家在发展张量网络时无意中发现了可生成的额外维度,该技术从一维体系中生成了一个二维体系;而引力理论物理学家从全息原理出发,正尝试减去一个维度,即从三维发展到二维。

20世纪70年代,物理学家Jacob Bekenstein指出黑洞内部的信息被编码在其二维表面区域(“边界”),而不是在其三维空间中(“体”)。20年后,Leonard Susskind和Gerard 't Hooft将这一想法拓展到了整个宇宙中,将它和全息图联系在一起,指出我们宏伟的三维宇宙是由一个二维的“源代码”生成的。1997年,Juan Maldacena发现了一个可以运行的具体的全息图例,用一个玩具模型证实一个没有引力的平坦空间等价于有引力存在的鞍状空间。这种关联被物理学家称之为“二元性”。

温哥华哥伦比亚大学的弦理论家Mark Van Raamsdonk将全息概念比喻为一个二维电脑芯片,其中包含的代码可以生成一个视频游戏中的三维虚拟世界,我们就生活在那个三维游戏空间中。某种意义上说,我们生活的空间是幻象的,由一副短暂的图像投影在稀薄的气体中。正如Van Raamsdonk强调的那样,“在你的电脑中仍然有一个真实的物质对象储存着所有的信息”。

这个想法在理论物理学家中得到了广泛的认同,不过他们仍然无法明白低维空间如何精确地储存时空几何结构的信息。问题的关键在于我们谈论的存储芯片必须是一种量子计算机,其中经典的编码信息0和1被量子比特所替代。后者可以同时是0、1和中间的任何态。那些量子比特之间必定通过纠缠相互关联,即一个量子比特的态由它的相邻量子比特所决定,这样真实的三维世界才可以被编码。

纠缠对时空的存在至关重要,这是由现在在伊利诺伊大学香槟分校的Shinsei Ryu和京都大学的Tadashi Takayanagi在2006年给出的结论,当时他们还是博士后研究员,他们因此工作分享了2015年物理学新视野奖。“那个想法就是指时空几何的编码方式与存储芯片的不同部分之间纠缠方式息息相关”,Van Raamsdonk解释到。

受他们的工作以及Maldacena后来的一篇文章的启发, Van Raamsdonk在2010年提出了一个思想实验来证明纠缠在时空形成中扮演的关键作用:试想如果存储芯片被切做两部分,并消除两部分量子比特之间的纠缠,会发生什么? Van Raamsdonk发现时空开始自己撕裂,其方式就像拉伸一块口香糖的两端,随着两部分的分开中间变得狭窄,像被压过一样。不断将存储芯片分成越来越小的小片将解开时空的结构,到最后只剩下相互之间没有关联的微小独立碎片。“如果你拿走纠缠,时空结构也就瓦解了”,Van Raamsdonk说,“如果你想构造出时空结构,那么你最好从以特定方式纠缠在一起的量子比特开始。”

Swingle将时空的纠缠结构和全息原理与张量网络关联起来,再加上Van Raamsdonk的上述思想,两者结合后就可以将

问题的另一关键点放入图景中:通过全息,弯曲的时空结构非常自然地由张量网络的纠缠中生成。“时空是量子信息的一种几何表述”,Van Raamsdonk说。

时空几何结构看上去到底是什么样呢?在Maldacena的马鞍状时空例子中,它看上去就像著名的图形艺术家埃舍尔在20世纪50年代后期和60年代早期的一系列圆极限作品中的一幅。埃舍尔长期对秩序和对称感兴趣,1936年他游历西班牙的阿尔罕布拉宫时,从摩尔建筑里典型的重复镶嵌图案里找到了灵感,之后他将那些数学概念在他的艺术作品中表达出来。

他的圆极限木版画是双曲几何的一种表现。二维空间中的负曲率空间被扭曲圆盘所表示,就像将地球仪平整投影到一副二维地图上时会扭曲各大洲一样。例如在“圆极限IV——天堂与地狱”(图1)中描绘了许多天使与魔鬼的重复图形。在真实的双曲空间中,所有的图形都将是一样的尺寸,但在埃舍尔的二维表述中,边缘处的图形看上去要比中心处的图形更小更扭曲。一个张量网络的示意图也呈现出与Circle Limit系列惊人的类似。Swingle在对他有重大影响的弦理论课堂上意识到,这是深层关联的一种视觉表现。

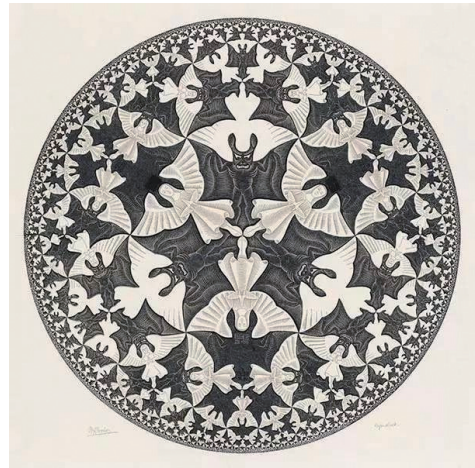


图1 圆极限IV——天堂与地狱

目前为止,张量分析局限在特定的时空模型中,比如Maldacena的工作,他的模型并没有描述我们居住的宇宙,一个不断加速膨胀的非马鞍状的宇宙。物理学家仅能在少数特殊情况下进行两种模型的对应转换。理想情况下,他们希望拥有一部描述这种转换的宇宙词典,而这部词典应该是被直接推导而来,而不是通过一些近似理论得到。

“对于这些二元性,我们处在一个奇妙的境界中,每个人都似乎同意其重要性,但目前还没人知道如何推导出它们”,Preskill说,“也许张量网络的方法可以使我们前进更多。虽然现在我们只找到了一个玩具模型,这是一个前进的标志,也是一个强烈的暗示,我们已经抓住了一些东西,有一天我们可能可以说‘啊!词典就该这样推导出来’”。

过去几年,Swingle和Van Raamsdonk已经合作将他们在这一领域的工作从静态时空结构拓展到相应的动力学结构:讨论关于时空如何随时间改变,又如何为响应这些改变而弯曲。目前为止,他们已经成功推导出了爱因斯坦方程即等效原理,这为时空动力学以及时空几何可以从纠缠量子比特中生成提供了证据。这是一个好的开端。“什么是时空?”这听上去完全是一个哲学问题,要能真正回答这个问题,找到一个具体的可以计算时空的方案对物理学家来说实在太妙了,但愿这一天不会太远。

编译/雨遇

(责任编辑 王丽娜)