

## 用量子纠缠编织时空

(中国科学院理论物理研究所 王少江、李理 编译自 Clara Aldegunde. *Physics World*, 2022, (9): 33)

借助一些简化模型和数学工具，理论物理学家们的工作揭示出宇宙的时空结构来自于量子纠缠(图1)。这种新颖的观点可能是人们朝着量子引力和长期寻求的“万物理论”迈出的颇具希望的第一步。

纠缠是一种纯粹的量子现象。处于量子纠缠中的粒子，无论相隔多远，当其中一个粒子的状态发生变化，另一个将立刻受到影响。这种强烈的相关性似乎超越了空间和时间，例如，一旦知道一个粒子的自旋，就能马上确定另一个粒子的自旋。也许，正是基本粒子之间的这种深层量子联系将空间和时间连接在了一起。

在爱因斯坦的广义相对论中，引力被描述为时空的几何性质，而物质的能量和动量分布直接决定了时空的曲率。虽然广义相对论取得了巨大的成功，它仍然只是一个经典理论。物理学家长期以来一直在寻找一个自洽的理论来统一描述引力和量子力学。一个诱人的方案就是上面提到的时空结构本身可能起源于量子纠缠。

1998年1月，Juan Maldacena提出了AdS(反德西特)/CFT(共形场论)对偶，即具有负的常曲率的AdS时空中的引力理论等价于其边界上的量子理论。虽然AdS时空跟真实的宇宙十分不同，但是通过研究这个简化版宇宙中时空和量子力学之间的对偶性，我们有了一个正确的出发点来回答物理学中最基本的问题：时空最终是由什么组成的。

上面的对偶性是全息原理的具体实现。全息原理的概念是由Gerard 't Hooft在1993年提出：一个引力系统的独立自由度由它的边界面积来测度。一个典型的例子就是黑洞的热力学熵不是正比于黑洞的体积，而是决定于黑洞的表面积。就像电视屏幕的二维像素阵列可以给出三维图像一样，时空也可以用这个“全息面”在数学上用更少的维度来描述。全息原理表明，三维空间可以通过场来穿插连接，当以正确的方式构建时，就会产生额外的第四个维度，从而产生时空。低维全息面(三维量子描述)将作为四维体空间的边界，而这个四维的体空间正是由边界上的量子纠缠所产生(图2)。美国理论物理学家Ted Jacobson在1995年的研究工作表明，更多的纠缠意味着全息面的各个部分连接得更紧密，这使得时空结构更加难以变形，并导致更弱的引力。事实上，如果从我们称之为“全息面”的量子力学描述中去掉所有的纠缠，我们也就没有了时空。纠缠熵是对两个系统之间纠缠程度的度量，理论物理学家已经能够直接将其与体空间的一个极小曲面的面积联系起来，后者与纠缠熵成正比。因此，当我们让全息面上的纠缠趋于零时，大部分体空间区域(时空

存在的地方)也会消失。这是一个强有力的论据来说明时空在本质上是量子的，并通过全息面的不同部分之间的纠缠联系在一起。

量子比特是具有两种(或更多)可能状态的量子系统。经典比特可以取值0或1，但量子比特所具有的量子特性使其可以处于叠加态。如果把这些量子比特纠缠在一起，知道其中一个的状态就意味着知道另一个的状态。这个概念可以很容易地扩展到任意数量的量子比特的集合。将每个量子比特与其邻近的量子比特纠缠会产生一个二维网络，进一步纠缠这样的二维网络就会产生三维几何结构。这就联系了前面't Hooft的想法，因为发生纠缠的量子比特在它们存在的维度之外又“创造”了一个新的维度，这也就解释了全息原理中引入的体空间及其边界的存在。但是，考虑全息面上两个遥远的子区域纠缠在一起形成它们之间的时空体，信息从一个子区域瞬间传播到另一个子区



图1 用量子纠缠编织时空

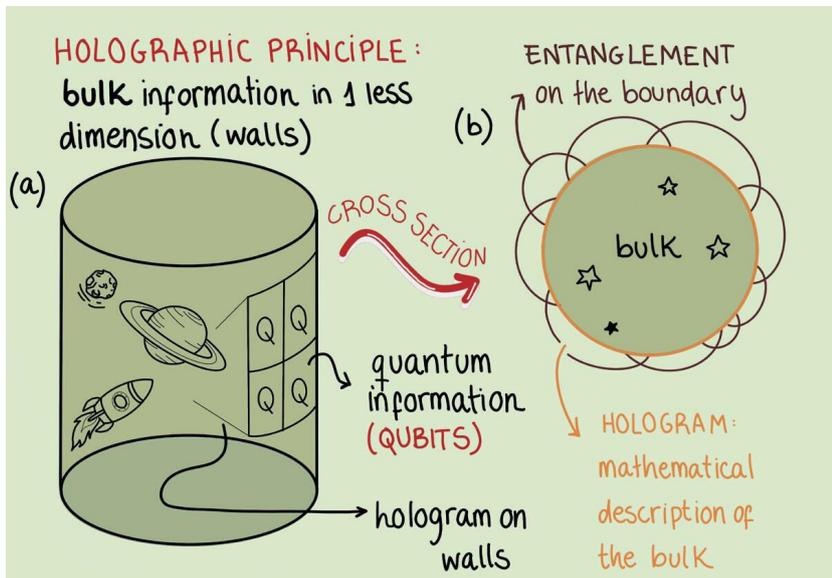


图2 (a)全息原理在AdS/CFT对偶中的示意图,高维时空中的信息储存在低维边界上的量子比特;(b)边界上的量子纠缠连接了全息图的不同部分

域,这不就意味着超光速吗?事实上,光速仍然是物理的极限。我们可以这样来理解:纠缠并不发生在时空中,它创造了时空。就像岩石或橙子是由原子组成的,但它们并不表现出原子的物理特性。所以构成空间的元素不需要是空间的,但如果以正确的方式来组合,就会具有空间特性。

美国斯坦福大学Monika Schleier-Smith教授和他的团队正尝试在实验室中对高度纠缠的量子系统进行精确操控,看看是否会呈现出某种时空。在2017年,美国布兰迪斯大学的物理学家Brian Swingle发现,由纠缠构建的具有正确性质的几何体必须遵循引力场的运动方程。在Schleier-Smith的实验室中,他们正在尝试精确控制原子之间的纠缠,以便能够逆转它们的相互作用,希望可以在实验室中创造出时空。CFT模型通常过于复杂,很难用现有的数学工具处理,因此尝试在实验室中找到它的引力(AdS)对偶可能是更好的选择,这仍然需要发现

比目前理论上研究的系统更加简单的系统。

为了能够通过实验检验上面提出的时空起源的想法,我们可以换一种思路,探索如何通过控制量子纠缠来产生满足广义相对论场方程的时空几何对应物。研究发现所需要的纠缠几何形成树状结构,其中每对纠缠的原子都与另一对纠缠在一起,这种单独的、低层次的纠缠最终构建成一个完全纠缠的系统,进而产生时空体空间。在实验室中观测这种呈现时空的关键是用光来囚禁原子以引起纠缠,然后使用磁场控制它们。为了实现这一点,在实验中真空腔周围布满了镜子、光纤和透镜,真空腔中的铷原子被冷却到绝对零度以上几分之一度,然后使用特别调制的激光和磁场控制纠缠。这种设置似乎真的在实验室中创造了全息——人们可以在量子尺度上逆转时间。它将可能为Swingle的理论提供实验支持,更重要的是让科学家能够检验量子力学和引力之间的联系,离统一现代

物理学更近一步。

这条线索是否会引导我们走向量子引力和万有理论这一物理学家的终极目标呢?世界各地的许多物理学家目前正在开展研究,并报以十分积极的态度。把纠缠理解为一种几何结构可以使我们能够将其与引力进行比较,并检查它与广义相对论中爱因斯坦场方程的对应关系,从而解决现代物理学最大的难题之一。尽管如此,我们必须依赖太多假设才能将量子纠缠与时空结构的形成联系起来。这里要解决的第一个问题是如何将纠缠跟广义相对论中的度规张量联系起来,后者包含有关时空几何结构的所有信息。一旦完成这一步,我们就可以从这个时空模型推导出爱因斯坦场方程,从而解释在简化的AdS宇宙中引力是如何从纠缠中产生出来的。AdS模型的另一个关键问题是它的几何结构跟我们真实的正在膨胀的宇宙相距甚远,因此需要进行必要的调整来将这些发现扩展到真实的宇宙。

尽管存在这些尚待解决的问题,这个玩具宇宙还是为我们提供了许多重要的见解。例如,体积和面积在AdS和我们的宇宙中都以相同的方式随尺度变化。为了进一步阐明纠缠和时空的联系,一个自然的想法是考虑更复杂的时空结构,无论是在数学上(例如使用张量网络来表示黑洞),还是在实验上(因为Schleier-Smith到目前为止只创建了简单的时空结构)。有趣的是,即使当纠缠熵达到平衡之后的很长一段时间,黑洞内部虫洞的体积仍然会随着时间继续增长,这暗示着仅仅考虑纠缠还并不足够编织出全部的时空结构。