

量子化时空

Lee Smolin

我们感觉空间和时间是连续的，但是如果令人称奇的圈量子引力理论是正确的话，时空实际上是以离散形式存在的。



100 多年前，绝大多数人和科学家认为物质是连续的。尽管自古以来一些哲学家和科学家曾经推测如果把物质分解到足够小的块，就会发现它们是由微小的原子组成。几乎没有人认为能够证实原子的存在。今天我们已经得到了单个原子的图像，也研究了组成原子的粒子。物质的粒子性已经是过时的新闻了。

在最近几十年中，物理学家和数学家想知道空间是否也由离散块组成的。它是连续的，就像我们在学校里学到的那样，还是更像一块布，由根根纤维编织而成？如果能探测到足够小的尺度，我们是否能看到空间的“原子”，它们的体积不能被分割成更小的形态？对时间来说，情况又怎样呢？自然界是连续变化的，还是世界以一系列微小的步伐来进化，就像数字计算机那样？

过去 16 年这些问题已经有了长足的进展。一个名字奇怪的“圈量子引力”理论预言空间和时间的确是由离散部分构成。这个理论框架下的计算所揭示的图像简洁而优美。它加深了我们对黑洞和大爆炸等令人费解现象的了解。最棒的是它是可检验的。它预言能让我们探测到空间原子的实验在不久的将来可以实现，如果真存在空间原子的话。

量子

我和同事在费力解决物理学中一个长期存在的问题：“是否存在提出量子引力理论的可能性”，从而发展了圈量子引力理论。为了解释为什么它是重要的问题，以及它与空间和时间的粒子性有什么关系，我必须先谈点儿关于量子理论和引力理论的东西。

在 20 世纪前 25 年，量子力学的理论已经用公式阐明，这是与证实物质由原子组成紧密相关的发展。量子力学的方程要求某些量，比如原子的能量，只能以特定、离散的单元存在。量子力学成功预测了原子、基本粒子以及组成它们的力的属性和行为。科学史上从未有理论比量子力学更成功。它奠定了我们了解化学、原子和亚原子物理学、电子学甚至生物学的基础。

在量子力学公式化的几十年里，阿尔伯特·爱因斯坦构建了他的引力理论——广义相对论。在他的理论中，引力的产生是空间和时间（统称时空）被存在的物质扭曲的结果。打个不准确的比方是将一个保龄球放橡胶膜上，同时有一个弹球在旁边滚来滚去。保龄球代表太阳和月亮，膜代表空间。保龄球在橡胶膜上造成一个深深的凹陷，凹陷形成的斜坡使弹球向较大的保龄球偏斜，就好像某个力（引力）向那个方向拉它。类似地，任何物质或能量聚集都会扭曲时空的几何构型，使其他粒子和光线向它偏转，这种现象我们称为引力。

量子理论和爱因斯坦的广义相对论已经分别被实验奇迹般地充分证实了。但还没有实验探索到两种理论都预测有明显效应的领域。问题在于量子效应在小尺度范围最为显著，而广义相对论效应需要大的质量，因而需要极其特殊的环境才能将二者结合在一起。

伴随这个实验数据空白的是一个很大的概念性问题：爱因斯坦的广义相对论是完全经典的，亦即非量子化的。物理作为整体逻辑上应该是一致的，必须有一个理论在某种程度上将量子力学和广义相对论结合起来。这个长久寻找的理论叫做量子引力论。因为广义相对论处理的是时空的几何构型，量子引力理论另外也是时空的量子理论。

物理学家已经提出了相当多的数学方法将经典理论转换成量子理论。许多理论物理学家和数学家已经着手将这种标准方法应用在广义相对论上。早期的结果令人灰心。二十世纪六七十年代进行的计算似乎表明量子理论和广义相对论不能成功地结合在一起。因此，看来需要一些新的基础性东西，比如没有包含在量子理论和广义相对论中的附加假设和原理，新粒子和场，或者新的统一性。也许通过适当的附加或者利用新的数学公式，可以发展出一个类量子理论，在非量子范围内成功近似出广义相对论。为了避免破坏量子理论和广义相对论的成功预言，除了量子理论和广义

相对论都预期起明显作用的极端条件下，完整理论中的新事物不应该在实验中看到。沿着这个思路，试过很多不同的方法，比如扭子理论，非对易几何，超引力等的理论。

物理学家比较熟悉的一个方法是弦论，它假设空间除了我们熟悉的三个维度外还有六或七个维度，这些迄今都还完全观测不到。弦论也预言存在大量新的基本粒子和力，但迄今还没有可观测的证据。一些研究者认为弦论包含在称为 M 膜理论中[参见 Michael J. Duff 著“曾名‘弦’的理论”，《科学》，1998 年 5 月]。不幸的是，一直没有给出这个推测得出理论的准确定义。因此，很多物理学家和数学家认为必须研究其他替代理论。我们的圈量子引力理论就是发展最完善的替代理论。

大漏洞

1980 年代中期我们中的几个人，包括现在宾夕法尼亚州立大学的 Abhay Ashtekar，马里兰大学的 Ted Jacobson 和马赛地中海大学的 Carlo Rovelli，决定重新研究量子力学能否利用标准方法与广义相对论耦合在一起。我们知道 1970 年代的否定结果有一个严重漏洞。无论我们多么精细地去测量它，这些计算假设空间几何是连续和光滑的，这就像人们发现原子之前对物质所想像的情况一样。我们的一些教师和导师已经指出，如果这一假设错误，那么过去这些计算将是不可靠的。

因此，我们在没有假设空间是光滑和连续时，开始寻找一个方法来计算；坚持不做任何超出已被实验检验过的广义相对论和量子力学以外的假设；特别是我们将广义相对论的两个关键原理保留在我们计算的核心中。

第一个被称作背景无关性原理。该原理认为时空的几何构型不是固定的，相反它是变化、动态的量。为了找到这个几何构型，必须解出包括物质和能量所有效应的方程。顺便提一下，现在用公式描述的弦论，并不是背景无关性的，因为描述弦的方程建立在已定义的经典（也就是非量子）时空中。

第二个原理有个让人难忘的名字：微分同胚不变性，它与背景无关性紧密相关。这个原理指出，与广义相对论之前的理论不同，人们可以任意选择任何坐标系来映射时空和建立方程组。时空中的某点仅仅是由该点在物理上发生了什么来定义，而不是通过它在一套特殊坐标系中的位置来定义（没有什么坐标系是特殊的）。微分同胚不变性功能强大，是广义相对论的重要基本原理。

通过量子力学的标准方法仔细将这两个原理结合起来，我们提出一种数学语言，使我们可以通过计算来判断时空是连续还是离散的。令人高兴的是，计算揭示出空间是量子化的。我们建立了我们环形量子理论的基础。顺带说明，名词“圈”来源于理论中的一些计算是怎样引入划分时空的小圈。

这些计算已经被许多物理学家和数学家用一系列方法重新做过。从此以后的多年里，对圈量子引力的研究已经发展成为一个相当大的研究领域，包括世界各地许多参与者。大家的齐心协力给了我们对我将描述时空图像的信心。

我们的理论是最小尺度上时空结构的量子理论。因此为了解释这一理论如何运用，我们要考虑在一个小区域或体积内它能预言到什么。在处理量子物理问题时，准确指定要测量什么物理量是必要的。为此，我们考虑某个以边界 B 标示的区域[见 页]。该边界可以用某些物质来确定，比如铸铁壳；或通过时空本身的几何形状确定，就像黑洞的视界那样（在该表面内即使光线也逃不出黑洞引力的束缚）。

如果我们测量这个区域的体积，会发生什么？同时遵循量子理论和微分同胚不变性可能出现的结果是什么？如果空间几何连续，该区域就可以是任意大小而测量，而结果是任意正实数；特别是它可以依人的意愿尽可能接近零体积。如果几何结构是粒子性的，测量结果就是一系列离散数字，而不能小于某个可能的最小体积。这个问题类似于问一个原子核的电子轨道能量有多少一样。经典力学预言一个电子可以携带任何数量的能量，但量子力学却只允许它携带特定数量的能量，不会出现这些数值之间的能量值。这种差别就像测量某些连续流过的东西和某些可数的东西之间的差别，比如 19 世纪水的概念和水中原子。

圈量子引力理论预言空间就像原子一样：体积测量实验会得出一组离散数据。空间体积以离散块存在。我们可以测量的另一个量是边界 B 的面积。应用该理论的计算能得出了明确的结果：表面积也是离散的。换句话说：空间是不连续的，它只是以面积和体积的特定量子单元而存在。

体积和面积的可能值以称为普朗克长度的量为单位来测量。该长度与引力的强度、量子的大小和光速有关系，它用于测量不再连续的空间几何构型的尺度。普朗克长度非常小： 10^{-33} 厘米；可能的最小非零面积大约是普朗克长度的平方： 10^{-66} 平方厘米。最小的非零体积大约是普朗克长度的立方： 10^{-99} 立方厘米。因此该理论预言在每立方厘米空间中有 1099 个原子体积。量子体

积如此之小，以至于每立方厘米中的这种量子数比可见宇宙中的立方厘米数（ 10^{85} ）还要多。经典事实怎样起源于量子时空仍然在研究中。



经典事实怎样起源于量子时空仍然在研究中。

宇宙

除了对诸如高能宇宙射线这种特定现象做出预言外，圈量子引力为我们打开了一扇崭新的窗口，通过它，我们可以研究深层的宇宙学问题，比如宇宙起源之类。我们可以利用这个理论研究大爆炸刚结束之后的最初时期。广义相对论预言时间有一个开端，但这个结论忽略了量子物理学（因为广义相对论不是量子理论）。德国格勒姆马克思·普朗克引力研究所的 Martin Bojowald，最近的圈量子引力计算表明，大爆炸实际上是个大的反弹，在反弹之间宇宙在迅速地缩小。理论学家正努力做出关于早期宇宙的预言，也许它可以在将来的宇宙观测中得到验证。在我们有生之年看到大爆炸之前的时间证据并非没有可能。

同样深奥的一个问题关注的是宇宙常数：一个正或负的能量密度可以弥散在“空的”空间中。最近对远距离超新星和宇宙背景微波的观测强烈地表明，这个能量的确存在，而且是正数，它加速了宇宙膨胀[参见 Jeremiah P. Ostriker 和 Paul J. Steinhardt 所著《精髓的宇宙》，《科

学》，2001年1月]。圈量子引力引入正能量密度没有任何问题，1990年这个事实就被证明了。当时京都大学的Hideo Kodama写出了方程，描述含有正宇宙常数字宙的确切量子态。

很多未定的问题仍然要用圈量子引力来回答，一些是需要澄清的技术问题。我们想要彻底理解狭义相对论怎样在极高能量下做出修改。迄今我们在这个问题上的思考并没有与圈量子引力的计算紧密相连。另外，我们想知道，经典广义相对论在长度远大于普朗克长度时，在所有情况下都是该理论的良好近似。现在我们仅知道在描述某些相当弱的引力波在平直的时空中传播的状态时，该近似是合适的。最后，我们还想知道，对于统一性，圈量子引力是否说明了什么。包括引力在内的不同的力，是否都是一种单一、基本力的某一方面？弦论是基于统一性的特殊概念，但我们也有想法通过圈量子引力得到统一性。

圈量子引力在物理学的发展中占据非常重要的地位。它是可以论证的广义相对论的量子理论，因为它在量子理论和相对论基本原理之外，没有做任何额外假设。它不同寻常的出发点是提出了通过自旋网络和自旋泡沫描述不连续性的时空，这出自该理论本身的数学，而不是特别引入了假设。

尽管如此，我讨论的一切还都是理论性的。虽然有我在这儿描述的一切，真实空间仍然可能是连续的，无论我们探测的尺度多么小。物理学家可能必须转向更极端的假设，比如弦论。因为这是科学，最终实验会做出裁断。好消息是这个结论可能不久就会出现。