

# 时空从哪里来？

## ——介绍理论物理学对时空起源的探索

本报记者 常丽君 综合外电

时空从哪里产生？由什么构成？是来自低维世界的全息投影，还是各种关系作用下的因果集合？许多研究人员认为，物理学不仅要能解释时空的表现，还要能解释时空本质的起源，否则物理学的任务就不算完成。

“想象一下，假如有一天你醒来，发现自己生活在计算机游戏里。”加拿大英属哥伦比亚大学物理学家马克·范拉姆斯东克说。这听起来像是科幻电影的情节，但这正是他对现实的一种理解方式。如果这是真的，那“我们周围的一切——整个三维的物理世界——就是一场幻觉，由来自某个地方的二维芯片上的编码信息所产生的幻觉”。这构成了我们的三维空间宇宙，一种从低维底片上发出的全息投影。

即使拿通常的理论物理学标准来衡量，这种“全息理论”也相当奇怪，但范拉姆斯东克是少数前卫的研究人员之一，他们认为通常的理论尚不够奇怪。无论是现代物理学的两大支柱——广义相对论和量子力学（广义相对论把万有引力作为一种时空弯曲，而量子力学是原子领域的统治法则），还是描述基本一维能量线的弦理论，都没有对时空本身的存在给出任何解释。如果没有其他的，这种“全息理论”也不失为一种解释。

范拉姆斯东克和他的同事们认为，物理学如不能解释时空是如何以及从哪里产生的，它的任务就不算完成。时空可能从某种更基本的东西产生，这种东西尚未命名，至少需要构造一个像“全息”那样大胆的概念。他们认为，这种从根本上对现实的重新定义，是解释黑洞核心那个无限致密的“奇点”怎样扭曲了时空构造的唯一方式，这超越了所有的认知。或者说，研究人员怎样才能把原子尺度的量子理论和行星尺度的广义相对论统一起来，有一个东西长期阻碍了理论学家的构建工作。

“所有的经验都告诉我们，我们对现实不该有两种显著不同的构想，它必然是一

个庞大的包含所有的理论。”美国宾夕法尼亚大学物理学家阿贝·阿什特卡说。

找到一个庞大的理论是一项艰巨挑战。为此，《自然》杂志探索了现代几种较有前途的前进路线——一些新兴的观点以及对它们的检验。

### 热力学万有引力

人们可能会问的一个最明显的问题是，这种努力是否徒劳？是否真的有什么东西比时空更基本？证据何在？一个令人兴奋的线索来自上个世纪70年代早期取得的一系列不寻常的发现。当时，量子力学和万有引力与热力学开始紧密结合在一起，这一趋势日益明显。

1974年，英国剑桥大学的斯蒂芬·霍金证明，黑洞周围空间存在着量子效应，这使得黑洞向外发出辐射，就好像它很热一样。其他物理学家也很快得出结论，这种现象在宇宙中其实相当普遍。即使在真空中，正在加速的宇航员会感到他自己像是被包围在热水浴中。虽然对目前火箭可达到的加速而言，这种效应太微弱了而无法被觉察到，但这或许是个基本原理。如果量子理论和广义相对论是正确的——这二者都被众多实验所证实——那霍金辐射的存在似乎是理所当然。

第二个重要发现也与此密切相关。根据标准热力学理论，一个物体要辐射出热量必须降低熵值，这也是检测其内部量子状态的一种数量方法。所以黑洞也是如此：甚至早在霍金1974年发表其论文之前，现在以色列耶路撒冷希伯来大学任职的雅各布·贝肯斯坦就曾证明了黑洞拥有熵值。但二者之间还是有差异的。对于大部分物体来说，它们的熵与物体所含原子数目成比例，也就是和体积成比例；但黑洞的熵却与其事件视界的表面积成比例。事件视界是光无法逃逸的界限，这就好像黑洞的表面是其内部信息的某种编码，正像

以二维全息编码的形式来表现三维图像那样。

1995年，美国马里兰大学物理学家泰德·雅各布森将二者的发现结合起来提出一种假设：空间中的每个点上都有一个微小的“黑洞视界”，并服从熵与面积关系。结果他发现，这在数学上就变成了爱因斯坦的广义相对论方程——只用了热力学概念，而没有用时空弯曲理论。

“这好像涉及到了某种深入万有引力起源的东西。”雅各布森说。尤其是，热力学定律的本质是一种统计表现，即大量原子和分子运动在宏观上的平均，所以该计算结果也意味着，万有引力也是统计上的表现，是对时空的某种看不见的成分的一种宏观近似。

2010年，荷兰阿姆斯特丹大学的弦理论学家埃里克·韦林德证明了时空成分的统计热力学——无论它们最终是什么，都会自动产生牛顿的万有引力定律。

而在另一项独立研究中，印度浦那国际天文与天体物理学中心的宇宙学家萨努·帕德曼纳班指出，爱因斯坦方程可以改写成另一种等同于热力学定律的形式——就像万有引力的许多其他替换理论一样。帕德曼纳班最近正在扩展热力学方法，试图以此解释暗能量的起源及其在宇宙中的量级。暗能量是推动宇宙加速膨胀的一种神秘力量。

要想用实验来验证这些想法是非常困难的。就好像水看起来是光滑完美的流体，但如果用显微镜深入观察到能看见水分子的程度，也就是不到1纳米，情况就会完全不同。据此人们估计，时空虽然看起来是连续的，但如果小到普朗克级别，大致是10的负35次方米，比一个质子还小约20个数量级，情况也可能完全不同。

但这并非不可能。人们经常提到一种方法可以检验时空的结构是否为离散的，就是寻找高能光子延迟。在遥远的宇宙角落，由某个宇宙事件（比如超新星爆发）

抛射出大量γ射线，这些高能光子到达地球可能会产生时间上的延迟。事实上，这些波长最短的光子能感觉到它们所穿越的太空旅途是由某种微小的、崎岖不平的成分构成，正是这种崎岖不平略微延缓了它们的行程。

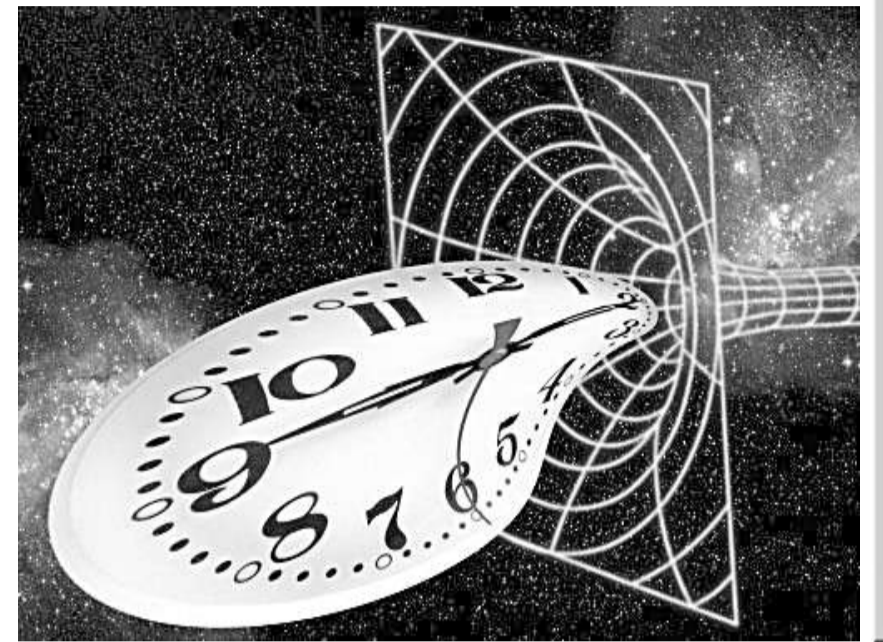
今年4月，意大利罗马大学量子引力研究员乔瓦尼·阿麦利诺-卡梅利亚和同事在一次γ射线爆发记录中，发现了这种光子延迟的线索。阿麦利诺-卡梅利亚说，这些结果还不是最后定论，他们打算进一步扩展研究，观察宇宙事件中产生的高能中微子的旅行时间。他说，如果这些理论无法被检验，“那么对于我来说，它们就不是科学，而是宗教信仰，我对此并不感兴趣。”

其他物理学家也在寻求实验的证明。比如在2012年，奥地利维也纳大学和英国伦敦帝国学院的科学家提出了一项“桌面实验”，实验中用到一种能在激光驱动下来回运动的显微镜。他们认为，当光从镜面反射时，普朗克尺度的时空间隔会产生能探测到的变化。

### 圈量子引力

即使这种理论是正确的，从热力学的角度来看，时空的基本构成也可能什么都不是。姑且这么说，如果时空由某种东西编织而成的，那织造它的“线”又是什么？

目前一个还算实际的答案就是圈量子引力(loop quantum gravity)理论。该理论是上世纪80年代中期由阿什特卡等人发展而来，将时空构造描述为就像一张展开的蜘蛛网，网线上携带着它们所通过区域的量子化的面积和体积信息。每根网线的末端最终一定会连在一起而形成圈状——正如该理论的名字——但这与更著名的弦理论的“弦”没什么关系。弦理论的“弦”在时空中来回运动，而圈量子引力的“网线”则构成了时空本身：它们携带的信息定义了周围时空构造的形状。



由于这种圈是量子的，所以该理论也定义了一个最小面积单位，非常类似于在普通量子力学中，对氢原子一个电子的最小基本能量态的定义。这种面积量子是大约一个普朗克单位那么大的一个面。要想再插入一根面积更小的“线”，它就会跟其余的“网线”断开。它不能与任何其他东西连接，只好从时空中退出。

定义了最小面积带来了一个令人欣慰的结果，就是圈量子引力不能被无限挤压到一个无限小的点。这意味着在大爆炸瞬间以及在黑洞中心，它不会产生那种打破爱因斯坦广义相对论方程的奇点。

2006年，阿什特卡和同事报告他们利用这一优势进行了一系列模拟，他们用爱因斯坦方程的量子版本反演了时钟倒转，以可视化形式展示了大爆炸之前发生了什么：宇宙如预期那样反向演化，回溯到大爆炸时。但在它接近由圈量子引力定义的“网线”时，一股斥力进入奇点迫使其打开，成为一个隧道，通向另一个先于我们宇宙之前而存在的宇宙。

今年，乌拉圭大学物理学家鲁道夫·甘比尼和美国路易斯安那大学的乔奇·普林也报告了相似的黑洞模拟。他们发现，当一个观察者深入到黑洞核心时，遭遇到的不是奇点，而是一条狭窄的时空隧道，通向空间的另一部分。

“排除了奇点问题是一项重大成就。”阿什特卡说，他正和其他研究人员一起辨认那些留在宇宙微波背景上的特征标志。宇宙微波背景是宇宙在婴儿时期迅速膨胀残留的辐射。那些标志则可能是由一次反弹留下来的，而不是爆炸。

圈量子引力论还不是一个圆统一的理论，因为它没有包括任何其他的力量，而且物理学家们也还未能说明，正常时空是怎样从这种信息网中出现的。对此，德国马克斯·普朗克万有引力物理学研究所的丹尼尔·奥利提希希望在凝聚态物理学中寻找灵感。他在物质的过渡阶段生成了一种奇异相态，这种相态可以用量子场论来描述。宇宙可能也经过类似的变化阶段，奥利提希和同事正在寻找公式来描述这一过程：宇宙怎样从一系列离散的圈过渡到光滑而连续的时空。“我们的研究还处在初期阶段，还很困难。我们就像是鱼，游在难以理解的时间之流的最上游。”奥利提希说。探索的艰难使一些研究人员转而追求另一种更抽象的过程，由此提出了著名的因果集合论(causal set theory)。

### 因果集合论

因果集合论由加拿大周界研究所物理学家拉斐尔·索尔金创立。该理论提出，构成时空的“基本之砖”是简单的数学上的点，各点之间由关系(links)连接，每个关系指示着从过去到未来。这种关系是因果性表现的本质，意味着前一个点会影响后一个点，但反过来不行。最终的因果网就像一棵不断生长的树，逐渐形成了时空。“你可以想象为，时空是由于这些点而出现的，就像温度是由于原子而出现的那样。”索尔金说，“但要问‘一个原子的温度是多少?’是没有意义的，要有一个整体的概念才有意义。”

上世纪80年代末时，索尔金用这一框架估算了可见宇宙可能包含的点的数量，推导出它们应该能产生一种小的内在能量，从而推动宇宙加速膨胀。几年后，人们发现宇宙中存在一种暗能量，证实了他的猜想。“通常人们认为，从量子引力做出的预测是不可检验的，但这种情况却可以。”伦敦帝国学院量子引力研究员乔·汉森说，“如果暗能量的值更大，或是零，因

果集合论就成为不可能。”

### 因果动力三角

虽然很难找到支持证据，因果集合论还是提供了其他一些可检验的预测，一些物理学家利用计算机模拟得到了更多结果。其中一种理论观点可追溯到上世纪90年代初，大致上认为，普通时空由某种未知的成分构成，这些成分是微小的块体，淹没在混乱的量子涨落的海域中，随后这些时空块自发地粘合在一起而形成更大的结构。

最早的研究是较令人失望的，荷兰内梅亨大学物理学家雷内特·罗尔说。时空的“基本之砖”是一种简单的超级金字塔，即三维四面体的四维形式。通过模拟的粘滞规则让它们自由结合，结果就成了一系列奇幻的“宇宙”，有的有太多维度而有的太少，它们自己会折叠起来或破碎成碎片。“就像是一场自由混战，任何东西无法恢复原状，类似于我们周围所看到的一切。”罗尔说。

但是，像索尔金、罗尔他们的发现增加了改变一切的因果性。毕竟时间维度与三维的空间维度不同，罗尔说，“我们不能在时间中来回旅行。”所以她的研究小组对模拟做了改变，以保证后果不会跑到原因的前面。然后他们发现，时空小块开始持续地自行组装，成为光滑的四维宇宙，其性质和我们所在的宇宙类似。

有趣的是，这一模拟还暗示了在大爆炸之后不久，宇宙在婴儿时期只有二个维度：一维空间和一维时间。还有其他尝试推导量子引力方程的实验也得到了同样预测，甚至还有人提出，暗能量的出现是我们的宇宙正在发展出第四空间维度的一个信号。其他人还证明了，在宇宙早期的二维阶段可能形成一些花纹，类似于我们在宇宙微波背景上所看到的那样。

### 全息论

与此同时，范拉姆斯东克在全息理论的基础上，对时空的产生提出了另一种完全不同的设想。黑洞以一种类似全息的方式在其表面存储了所有的熵，美国普林斯顿高级研究院的弦理论学家胡安·默尔德希纳最早给这一理论构建了一个明确的数学公式，并在1998年发表了其全息宇宙模型。在该模型中，三维的宇宙内部包含了弦和黑洞，只受万有引力控制，而它的二维边界包含了基本粒子和场，服从普通量子法则而无需万有引力。

此假说中的三维空间的居民，永远也看不到这个二维界限，因为它在无限遥远的地方。但这不会影响其教学存在：发生在三维宇宙中的任何事情，都可以通过二维边界的方程相等地描述出来，反之亦然。

2010年，范拉姆斯东克研究了当边界上的量子粒子发生“纠缠”时，会发生什么情况。测量其中一个不可避免地会影响另一个。他发现，如果边界上两个不同区域的每个粒子纠缠持续地降低到零，那么二者之间的量子相关性就会消失，相应地三维空间开始逐渐自身分裂，就像一个细胞的分裂，直到最后，这两者之间的细微连接会突然断裂。在二维边界保持连接时这一过程不断重复，使三维空间一次次地反复分裂下去。所以，范拉姆斯东克推测说，在实际效果上，三维宇宙是由边界上的量子纠缠而保持结合在一起的，从某种意义上说，量子纠缠和时空是同一回事。或许，像默尔德希纳说的那样：“这表明量子是最基本的，时空是从它而产生。”

如果时空不是最基本的，那最基本的是什么？物理学家探索了几种可能的答案。

**1、热力学万有引力**  
万有引力方程可以由热力学推导而来，无需用到时空弯曲。宏观尺度上的万有引力只是某种未知时空“原子”性质的平均体现。

**2、圈量子引力**  
宇宙是互相交叉的量子线构成的网络，每根量子线都携带着其附近空间的大小和形状的量子信息。此图画了网络上的一个封闭表面，其体积由它所包含的交叉点决定，面积由穿过它的量子线的数目决定。

**3、因果集合论**  
构成时空的“基本之砖”是一种类似于点的“事件”，形成了由因果关系互相连接的不间断的网络。前面的事件可以影响后面的，但反过来不行。

**4、因果动力三角**  
根据计算机模拟，基本的量子实体近似于一种微小的多边形，当它们自发地组装成更大的时空片时，服从量子法则。

**5、全息论**  
三维宇宙包含了黑洞和弦，只受万有引力控制；而它的二维边界则包含了普通粒子，只服从标准量子场论。发生在内部三维宇宙中的任何事件都可以由二维边界的过程描述出来，反之亦然。