

全息的宇宙

撰文/蔡荣根

所谓全息，即全部信息，本意指在二维照片底版上记录了三维物体的全部信息。通常的照相底版上只记录了光的强度，而全息照相不仅能记录光的强度，还记录了光的相位，所以可以用相干光从中提取三维物体的全部几何信息。但你可曾想过，我们身处的宇宙也是张全息图。

说宇宙是张全息图，是指宇宙具有类似全息图的性质。这一发现源于黑洞物理的研究。黑洞是一类特殊的天体，其引力非常强，以至于连光也被吸引住了。所以黑洞是“黑”的，人们无法看到。从数学上讲，黑洞指的是爱因斯坦广义相对论引力场方程的一类特殊解，是时空的一个区域，其边界叫视界。任何物体穿过视界进入黑洞后，就不能再返回到外部世界了。所以黑洞视界是一张单向膜，将黑洞的内外隔离开来。

自然界丰富多彩，变化万千。但物质间的基本相互作用只有4类：引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。强相互作用和弱相互作用是短程力，只存在于核子内。引力相互作用和电磁相互作用是长程力，我们日常生活能感知的自然现象均由其形成。牛顿于1687年提出了万有引力定律，统一了地上的引力现象和天上行星的运动规律。而在1915年，爱因斯坦发现，事实上自然界并不存在引力，所谓引力其实是时空弯曲的效应。爱因斯坦的广义相对论将时空的弯曲和时空中的物质分布联系在一起，蕴含着丰富的哲学思想。在解释爱因斯坦广义相对论时，著名物理学家惠勒曾说：

“时空中的物质告诉时空如何弯曲，而弯曲的时空告诉物质在其中如何运动。”著名理论物理学家朗道曾评价广义相对论“可能是最漂亮的理论”。

1973年，贝肯斯坦发现一个黑洞必须具有熵，不然在涉及黑洞的物理过程中会违背热力学第二定律（熵增加定律）。他证明了黑洞的熵必须正比于黑洞视界的面积。1974年，霍金证明黑洞其实并不“黑”，一个黑洞会以黑体热辐射的形式向外辐射能量，其温度正比于黑洞的表面引力。贝肯斯坦、霍金等人的工作证明，黑洞其实是一个热力学体系，它有质量、温度、熵等热力学量，这些热力学量满足热力学的三大定律。

一个体系的熵是其微观自由度的刻画。在热

力学统计物理中，熵是一个广延量，即它正比于其体积：一个体系体积越大，其熵越大。而一个黑洞的熵却正比于其表面积，而非体积。这一特殊的性质暗含着深刻的内涵，它揭示出引力具有非同一般的性质——全息。引力具有全息性质这一概念是在1993年由诺贝尔物理奖获得者特霍夫特提出的。1994年，美国斯坦福大学的物理学家萨斯坎德进一步阐述了这一思想。所谓引力的全息性质，是指一个引力体系其有效自由度正比于其体系表面，就好像分布在其表面上一样。如果这样，我们的宇宙就是一张全息图，其自由度（所有性质，包括动力学过程）完全可以在一个全息屏上描述。

实现引力全息原理的第一个漂亮例子，由马尔达西那在超弦理论中提出。1997年底，通过研究超弦理论的非微扰孤子（D-膜）的性质，马尔达西那发现一个在反德西特（AdS）时空（一类带一个负宇宙学常数爱因斯坦引力场方程的解）上的量子引力理论等价于在这个反德西特时空边界上的共形场论（CFT）。这就是所谓的AdS/CFT对偶性。一个典型的例子是在一个五维反德西特时空（直积一个五维的球）上的IIB超弦理论等价于这个反德西特时空边界（一个四维平坦时空）上的一个超对称杨-米尔斯场论。稍后，著名超弦理论家威腾等构造了一个数学关系，联系了反德西特时空中的量子引力理论和反德西特边界上的共形场论。这个关系有时被称为AdS/CFT对偶性字典，因为它映射了两个理论之间的一一对应关系。

引力全息性质的发现是过去二十余年引力及其相关领域最重要的进展之一，引领了人们对引力认识质的飞越。它一方面揭示了引力的本质属性，另一方面根据AdS/CFT强弱对偶性，人们可以利用引力理论研究强耦合物理系统的性质，而这些性质是无法用传统的微扰量子场论方法获得的。研究引力的全息性质及其在其他领域中的应用是近年的主要发展方向。例如，将AdS/CFT对偶性应用于低能量子色动力学、凝聚态物理等，都取得了一些有意义的结果和重要的进展。其他重要研究课题包括理解渐近德西特时空、渐近平坦时空的全息性质，将引力全息性质用于宇宙学的考察，研究引力全息性质和量子信息的关系，时空的重构等。



蔡荣根，中国科学院院士，中科院理论物理所研究员、副所长（主持工作）。1995年在复旦大学取得博士学位。现兼任中国物理学会引力和相对论天体物理学学会主任，国际广义相对论和引力学会理事，亚太物理学会天体物理、引力和宇宙学分会副理事长，金砖国家引力、宇宙学和天体物理学会理事长。研究领域为引力理论和宇宙学，在引力的全息性质及其应用、黑洞物理、暗能量、早期宇宙学、引力波等方面发表论文超过240篇，他引1.2万余次。曾获国家自然科学二等奖、汤森路透全球高被引科学家奖等奖项。