射振幅在低能展开时展开系数所表现出的普适性。近期的研究结果表明，软引力子定理不只存在于低能展开的领头阶(即温伯格的软引力子定理)，还可存在于次领头阶、甚至第三阶。如果我们承认上述三角等价关系是普适的，那么可以期待超越领头阶的软引力子定理会对应着新的引力波的记忆效应。以此为研究动机，Strominger教授与合作者发现了一种新的引力波的记忆效应，其体现为固有观测者的一种旋转记忆效应，它对应到次领头阶的软引力子定理，会使不同偏振光线之间产生固有时的差别。该旋转记忆效应也在近期的引力波研究中通过后牛顿近似的方法得到证实。

作为一种规范不变的理论，电磁理论通常为我们提供了一个更简单、却与引力理论有相当类似性的模型。这也体现在记忆效应的研究中。Bieri和Garfinkle通过详细的渐近分析发现电磁辐射所产生的记忆效应体现为带电探测粒子速度的变化，即像是“踢”了带电粒子一下。引力理论中的三角等价关系也在电磁理论中逐渐被建立起来。在电磁理论中，互为等价的三者为领头阶的软光子定理、电磁辐射的记忆效应及电磁理论中的渐近对称性。很久以前，学者就发现软光子定理是存在于次领头阶的。这也预示着一个新的、与次领头阶软光子定理所对应的电磁理论中的记忆效应的存在。基于此，作者与欧阳昊博士、吴小宁研究员一起仔细研究了电磁理论的渐近行为，发现了一种新的电磁辐射的记忆效应。引起带电粒子速度变化的记忆效应为电场的作用，而我们发现的新的记忆效应为磁场的作用，其体现为带电运动粒子的位置变化。有趣的是，新的记忆效应具有与Aharonov-Bohm效应相同的表达式。我们进一步验证了新的记忆效应与次领头阶软光子定理的等价性，即新的记忆效应公式是次领头阶软光子定理中软因子的傅里叶变换。

无论是引力理论还是电磁理论，次领头阶软定理所对应的对称性尚存争论。一种观点认为次领头阶软定理对应着新对称性，但是如何设定理论中符合物理要求的边界条件以得到对应次领头阶软定理的渐近对称性尚不明确；另一种观点认为次领头阶软定理与领头阶软定理源自同一渐近对称性，软定理中的能量展开对应于渐近守恒荷的径向倒数展开。尽管还有这样的争论，本文中所讨论的三角等价关系使我们对相关领域的研究有了更深刻的认识。它连接了三个完全不同却又十分基础的研究领域，为我们研究引力波、散射振幅与对称性等内容提供了一个全新的视角。

获奖论文

利用子域全息复杂度探测约化保真率性质

甘文聪　舒富文

(南昌大学理学院物理系，南昌大学相对论天体物理与高能物理中心　330031)

20世纪70年代，贝肯斯坦与霍金发现黑洞熵正比于黑洞视界面积，这促使Susskind和t'Hooft提出了量子引力的一个一般性原理：一个引力系统的全部信息储存在其更低一维的表面，即全息原理。1997年，Maldacena从弦理论出发提出的反德西特时空/共形场论(AdS/CFT)对偶是全息原理的一个具体实现。AdS/CFT对偶说的是d+1维的AdS时空中的量子引力理论等价于d维平坦时空中的共形场论。这意味着量子引力理论的性质可以从非引力的共形场论理解。从这个角度讲，引力被认为是

非基本的，而是可以从其他更基本的自由度演生出来的现象，这被称作演生引力。最先的突破来自于2006年Ryu和Takayanagi提出的全息纠缠熵公式：场论纠缠熵正比于空间最小面(*RT*面)的面积。从这个角度上讲，引力系统的几何量，如长度、面积等，与场论自由度之间的纠缠有关。第二个突破来自于2009年，Swingle发现，能够有效描述无能隙临界量子多体系统(其连续极限由共形场论描述)基态的张量网络——多尺度纠缠重整化假设(MERA)的图结构与AdS时间切片的离散结构非常相似。而格点自由度之间的纠缠就隐藏在张量与张量的连接中。这进一步暗示了时空几何可以从场论演生出来。

粗粒化算符将邻近格点合并成一个格点，完成重整化的过程。这个过程最终将物理的基态转化为没有实空间纠缠的态。而反过来，从量子计算的观点来看，多尺度纠缠重整化假设可以看作是从没有实空间纠缠的参考态演化为物理态的量子线路，每个张量可以看作是该量子线路中对态进行操作的量子门。临界系统基态所具有的标度不变性在纠缠重整化的过程体现为每一层的等价性。而这正好是Ads时空几何结构所具有的性质。这进一步暗示了人们时空几何可以从场论自由度演生出来。于是人们可以进一步借助张量网络理解引力自由度与场论自由度之间的关联，从而进一步得到可以由场论的物理量所描述的引力理论的物理量。

受到张量网络与几何之间关系的启发，Susskind认为纠缠并不是故事的全部，而提出了复杂度/体积(简称CV)对偶。复杂度指的是从给定的参考态到目标态所需要的基本操作(量子门)的最小数目。张量网络即由量子门(张量)组成。所以，粗略的说，复杂度可以看成是张量网络图的大小。张量网络图所包含的张量个数越多，其复杂度越大。而由于MERA图与Ads时空时间切片一致，所以猜测，边界态的复杂度正比于Ads时空体内部最大面的体积，即CV对偶。沿着此的思路，2015年Miyaji等人发现，受到边缘扰动的d+1维共形场论的保真率正比于体内部余维为1的最大类空面的体积。在此基础上，Alishahiha提出将边界子区域的*RT*面与该子区域所围成的余维为1的最大面的体积除以$8\pi RG$定义为子域全息复杂度，并认为子域全息复杂度作为几何量也有对偶的场论物理量，并且猜测该量就是场论的约化保真率。即子域全息复杂度/约化保真率对偶。量子信息理论中的保真度量度的是两个态的相似程度。对于两个纯态来说，保真度等于两个态内积的绝对值。将两个邻近态的保真度对态的某个参数的差进行泰勒展开，展开的二阶项的系数被称为是保真率。

我们的工作是从场论和全息引力两个角度分别定量的证明了子域全息复杂度/约化保真率对偶关系。其中场论的证明中我们将边界场论的球形子域的依赖域共形映射到双曲圆柱上。此时子域的约化保真率等于双曲圆柱热密度矩阵的保真率。而双曲圆柱热密度矩阵的保真率可以由路径积分化简为双曲圆柱上有限温度两点关联函数的积分。全息引力的证明中，由于受到边缘算符扰动的共形场论可以由爱因斯坦-标量理论描述，运动方程解为Janus解。受到边缘扰动的共形场论的约化保真度的对数可以写为*RT*面所围成的区域中负的Janus解的作用量与纯Ads时空作用量的差。从而保真率正比于*RT*面所围区域的体积。

另外我们根据全息复杂度和约化保真率之间存在的等价关系，利用全息复杂度的性质研究了约化保真率的性质。特别是，对于2+1维Ads时空，其时间切片是2维的双曲空间。我们应用两维双曲空间的高斯-博内(Gauss－Bonnet)定理对全息复杂度的性质进行了研究，得到了关于双曲多边形全息复杂度的三个严格的性质。根据全息复杂度/约化保真率对偶，这些性质也同样是约化保真率的性质。这些性质使得用实验去证实全息复杂度/约化保真率对偶成为可能。另外，对全息复杂度的计算发现它正比于场论的中心荷，这意味着双曲多边形的全息复杂度也可以看作是对系统自由度的量度。在这个意义上，除了纠缠熵之外，约化保真率也可以作为重构全息几何的基石，因此，研究约化保真率与量子纠错码的关联将会是一个有趣的问题。