

数学和物理系统中的对偶性漫谈（二）

谢柏松 北京师范大学核科学与技术学院

在上一篇对偶性漫谈^[1]中的一开始我们说：“对偶性（Duality）始终贯穿着数学和物理学的发展，从最早的关于时间和频率、空间和波数的傅里叶变换到经典的电动力学，从相对论与量子力学到量子电动力学，从现代数学中的同调群理论，和现代物理中的超弦理论，再到黑洞物理，以及目前仍在探索的暗物质与暗能量的物理，无不闪耀着对偶性的光芒。可以这么说，对偶性原理已经成为数学和物理学的为数不多的几个基本原理之一，同时也是人们理解我们赖以生存的这个奇妙宇宙的规律的一个强有力的工具，她的意义还在发展与进一步探索之中。”

上一篇漫谈^[1]已经对一些数学系统、经典力学、相对论和量子力学以

及物质与场等的对偶性做了回顾与评述，也通过一些例子展现了她的魅力，在本篇继续漫谈中我们将对量子电动力学、弦论和超弦理论、黑洞物理学，以及目前仍在探索的暗物质与暗能量物理中的对偶性做些介绍，而且也做些仍然带有人倾向性的评述，并对其未来可能的发展方向再进行一些展望。

1. 量子电动力学中的对偶性

在文献[2]中第234页，作者介绍量子电动力学（Quantum Electrodynamics，英文简写为QED）时写道：“量子电动力学是量子场论中最成熟的一个分支。它研究的对象是电磁相互作用的量子性质（即光子的发射和吸收）、带电粒子的产生和湮没、带电粒子间的散射、带电粒子与光子间的散射等等。它概括了原子物理、分子物理、固体物理、核物理和粒子物理各个领域电磁相互作用的基本原理。可以说，它集中了所有微观电磁现象所必须遵循的普遍规律，是人类分析和解决微观电磁问题的有力武器。”

众所周知，在量子电动力学中最大的困难是在微扰论级数展开时遇到的发散问题，能否和如何做到重整化便是该理

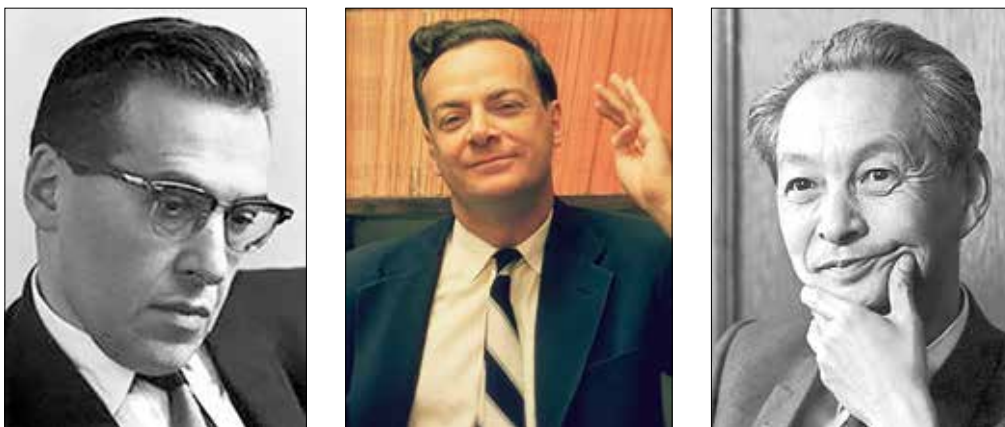


图1 1965年诺贝尔物理奖获得者施温格、费曼和朝永振一郎
(图片来自百度百科)

论方法是否有效和成功的试金石。施温格、费曼、朝永振一郎在1965年同时获得了诺贝尔物理奖(图1)的最大原因就是他们分别用微分、路径积分、多时间尺度方法同时解决了重整化的难题。显然他们三人所用方法完全不同但是相互之间存在互为对偶的内在联系,从而都能把发散量归入电荷与质量的重新定义中,达到高阶近似结果中不再遇到发散这一相同的目标,真可谓是殊途同归。重整化这一方法的最大成功是能够很好地解释兰姆位移和电子的反常磁矩等,与实验结果相符合达十几位数量级。

由费曼发展出的路径积分方法的意义已经远远超出了量子电动力学本身,首先它作为与海森堡的矩阵理论和薛定谔的波动理论相并行的第三种量子力学理论体系而备受关注,这可以看作是关于同一个量子力学理论的不同描述方法中的对偶性原理;其次由于其简洁和直观的图像化,现在费曼图(图2)和费曼积分表示已经在粒子物理、量子场论和弦论物理等受到了更加广泛的欢迎。

量子电动力学的对偶性的例子还有很多,例如由于它是处理带电粒子的,所以它保留了电动力学中的电磁对偶,它在处理诸如磁单极子问题、阿哈诺夫—玻姆效应等问题时与数学中的同伦群有对偶性,它在研究外加强场下的正负电子对产生问题用到的世界线瞬子方法时,其中的闵可

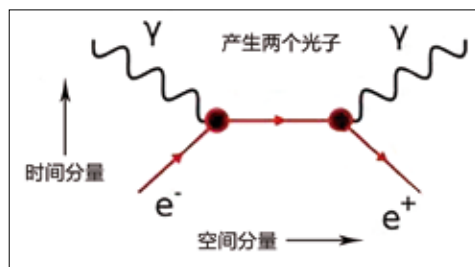


图2 描述正负电子对湮灭后产生两个光子的物理过程的费曼图

夫斯基空间中的粒子运动与欧几里得空间中的瞬子场之间的对偶,甚至是拉格朗日描述和哈密顿描述之间的纯粹数学上的对偶等等,这里不再一一列举,有些内容请参考上一篇的对偶性漫谈。

2. 弦论与超弦理论中的对偶性

众所周知,弦论是现代理论物理中最令人激动和最具有挑战性的研究领域之一,不仅因为她崭新的思想和概念,高度综合和复杂的数学技巧的必备,更重要的是她的雄心:想一举解决爱因

斯坦梦寐以求的把自然界四种相互作用力完全统一在一个完整的理论中，也即大统一理论的实现。弦论的一个基本观点是：自然界的基本单元不是像电子、光子、中微子和夸克等这一类的点状粒子，而是很小很小的线状的“弦”，带有端点的1维的线为“开弦”，没有端点的圈为闭弦，而各种基本粒子和场都认为是弦的不同振动的模所导致。

由于篇幅所限，就不讲弦论发展的历史了^[3,4]，但弦论的发展有过两次所谓“革命性的发展”时期，一次是1984—1985年，另一次是20世纪90年代中期，如果说超弦理论的第一次革命统一了量子力学和广义相对论，那么弦理论的第二次革命则统一了五种不同的弦理论和十一维超引力，预言了一个更大的M理论的存在，揭示了相互作用和时空的一些本质，并暗示了时间和空间并不是最基本的，而是从一些更基本的量导出或演化形成的。

M理论如果成功，那将会是一场人类对时空概念、时空维数等认识的革命，其深刻程度不亚于20世纪的两场物理学革命。有很多杰出的物理学家都对弦论和超弦理论的创立和发展做出了重要贡献，但物理学家兼数学家威腾（图3）的贡献无疑是最大的，特别是在弦论的第二次革命性浪潮时期。

之所以说他还是数学家，是因为他1990年获得了菲尔兹奖，该奖四年一次颁发给40岁以下解决了重要数学问题的数学家，因此威腾成了第一位获得该奖项的物理学家（也是目前唯一一位）。他对纯数学方面的研究影响深远，例如他使用琼斯多项式（Jones Polynomial）来解释陈-西门斯理论（Chern-Simons theory）。这项研究对于低维拓扑结构有深远影响，并推导出量子不变量。正如著名数学家阿蒂亚所说：“虽然他肯定是物理学家，不过他对数学的掌握很少数学家能比得上……他一次又一次超越了数学界，以巧妙的物理直觉导出新颖深刻的数学定理……他对现代数学影响巨大……凭着他物理再次成为数学的丰富灵感和直觉源头。”

由于我们的主题是对偶性，因此我们的核心关注点就是在弦论和超弦中存在的众多不同的各种对偶及其背后美妙而深刻的物理图像。她们的名字有T对偶，S对偶（即强弱对偶），U对偶，H对偶（即全息性对偶），以及ADS/CFT对



图3 弦论物理学家、数学菲尔兹奖获得者威腾（图片来自百度百科）

偶。下面让我们揭开其面纱，一一来看她们的真面目吧。

在讲各种对偶之前，我们先了解下弦的尺度大小，我们知道由于弦论是包含了引力的相对论性量子理论，所以这个大小 l_s 一定与基本常数 c （光速）、 $\hbar$ （普朗克常数）和 G （引力常数）有关，该长度也叫普朗克长度，大约 10^{-33}cm ，与之对应的普朗克质量则是约为 $10^{19}\text{GeV}/c^2$ 。

T对偶：玻色弦的T对偶是指对于额外维的两种不同几何来说，其上的物理是完全等价的，例如一个半径为 R 的圆，如果把其上的量子数 m 和绕数 n 交换，则它与半径 l_s^2/R 圆上量子数 n 和绕数 m 的物理完全一样。另外T对偶也连接着看似不同的超弦理论（10维时空），例如II型超弦的IIA和IIB理论，和两个不同的杂化超弦理论。T对偶与几何联系密切，因此对卡拉比-丘流形

的紧化和镜像对称性的猜想等都有意义。

S对偶：也叫强弱对偶，20世纪90年代中期被发现，她是连接具有两个不同弦耦合常数的超弦理论的，这两个耦合常数互为倒数关系，即 g 和 $1/g$ ，如果一个是强耦合，另一个必然就是弱耦合。例如I型超弦与 $SO(32)$ 的杂化型超弦S对偶，而IIB型超弦与其自身（但耦合常数互为倒数）S对偶。

关于强弱对偶，《超弦史话》^[4]有这样一段阐述很能说明其意义和作用：“在强弱对偶下，一个强耦合的理论完全等价于另一个弱耦合的理论。我们知道，如果一个理论中的相互作用强度很大，我们基本上失去了计算能力。我们不知道理论中表面上的粒子谱是否是真实的粒子谱，也就是说，由于相互作用很强，很多粒子是非常不稳定的，从而作为粒子本身并没有很好的定义。另外，即使我们知道了稳定的粒子谱，我们也很难计算它们之间的相互作用，很难决定束缚态，等等。在有了强弱对偶之后，我们可以用一个等价的弱耦合理论来描述，在这个理论中，所有的粒子都是接近稳定的，因为相互作用很小，衰变的时间很长。同样，束缚态的计算也比较容易。”从这段叙述中我们可以看到S对偶的威力所在，她在实际的物理研究方面能起到把复杂问题化为简单问题的转变能力。

U对偶：它是T对偶和S对偶的联合作用。

H对偶：即全息性对偶，更多的时候被称为全息性原理，早期的发现是体空间的量子引力理论可以用低维度的类光的边界面例如引力视界来等价描述。后来这一思想被推广到“体-面”对偶的各种物理系统的建模和研究中，其研究思路甚至延伸到了凝聚态物理。

全息对偶原理的引进是基于黑洞的量子物理。可以证明，给定一个空间区域，能够实现最大熵的系统是黑洞。贝肯斯坦和霍金（图4）的工作说明，黑洞的熵与其视界面积成正比，这样，一个区域所能包含的最大熵为其视界面积所限制。塔霍夫特和萨斯坎德进一步提出全息原理的猜想：“一个包含引力的动力学系统可以用其边界上的一个量子理论描述”。

众所周知，霍金最大的贡献是他在上世纪70年代发现后来以其名字著称的关于黑洞的霍金辐射。由于真空不空，根据海森堡不确定性原理，存在成对的正反虚粒子涨落。霍金指出，

如果在黑洞外产生的虚粒子对，其中一个被吸引进去，而另一个则从黑洞中逃逸，在外界看来就像从黑洞中发射出了粒子一样，这个猜想就是现今著名的“霍金辐射”。显然这个猜想一旦证实，就能够获得诺贝尔奖，但遗憾的是霍金先生今年离开了我们，但霍金本人和很多物理学家都坚信这一猜想将被证实。

值得强调的是，在全息性对偶原理的建立中，著名物理学家霍金起到了原初的推动和启发性作用，他在2014年还在探索经过黑洞视界后信息是否丢失的问题。虽然他已经离世漫步于浩瀚的星光之中，但他的科学探索精神和最具影响力的科普事业仍然是我们后辈学人和研究工作者继续前进的源头与动力。下面的第3小节，我们还将仔细地阐述和讨论关于黑洞物理的对偶性问题。

下面我们以 $EPR=ER$ 为例来说明全息性对偶原理的具体应用和体现。2013年几个研究组开始这方面的强有力的研究，首先美国普林斯顿高等研究院和斯坦福大学的研究人员^[5]指出“广义相对论包含有这样的虫洞解，此虫洞（也叫爱因斯坦—罗森桥，ER）作为黑洞的内部连接着两个遥远的黑洞。这些解可以解释为两个黑洞的最大纠缠态并因此而形成了一个复杂的EPR对，可以推测对于更一般的纠缠态类似的桥也存在”。这就是人们猜想的关于量子纠缠态与相对论虫洞之间的对偶性。接着，来自加



图4 物理学家霍金和他的科普名著《时间简史》（图片来自百度百科）

拿大维多利亚大学和美国华盛顿大学的研究人员研究了带有虫洞的爱因斯坦—波德尔斯基—罗森(EPR)对的全息性对偶问题^[6]。对最大超对称的杨—米尔斯理论中的两个色粒子形成的一个色单态的EPR纠缠对，他们构造了该EPR对的全息性对偶，即把该纠缠信息用连接着EPR对的通量管世界片上不可横越的虫洞几何来编码，从而实现了EPR=ER这个对同一物理的不同但对偶性的描述。

更进一步，麻省理工学院的研究者研究了全息施温格效应和纠缠几何之间的关系^[7]。他们证明了最近关于正反夸克纠缠对的体对偶即是在对偶场论中描述施温格对产生的隧穿瞬子的洛伦兹延拓。这一发现支持并进一步解释了EPR对的体对偶是一个在

其世界片上带有虫洞的弦，因此这反过来也就实现了纠缠对作为产生惠勒虫洞的全息性的对偶。

关于在强场下产生正反物质的施温格机制，最近几年，我们对正负电子对产生问题也进行了不少研究^[8]。虽然我们的研究没有涉及到复杂和深入的全息性原理，但其研究方法背后也隐藏了一定的对偶性原理，例如世界线瞬子技术。具体内容请参看我们的综述性文章^[8-10]及文章中最后列出的大量参考文献。值得指出的是，关于正负电子纠缠及其对偶性的问题值得进一步的深入研究。

AdS/CFT对偶：有时也叫AdS/CFT对应，它是反德西特（Anti-de Sitter）空间（里奇曲率处处为负常数的一种空间）中的引力理论和共形场论（conformal field theory）之间的对偶性。例如一个 $n+1$ 维AdS空间的量子引力理论和一个定义在这个AdS空间边界上的共形场论对偶。这里的量子引力是特指基于弦理论且有引力子的量子引力理论，而共形场论是指没有引力但有共形对称性的量子场论。所谓的共形对称性是指包括了狭义相对论的洛伦兹变换对称

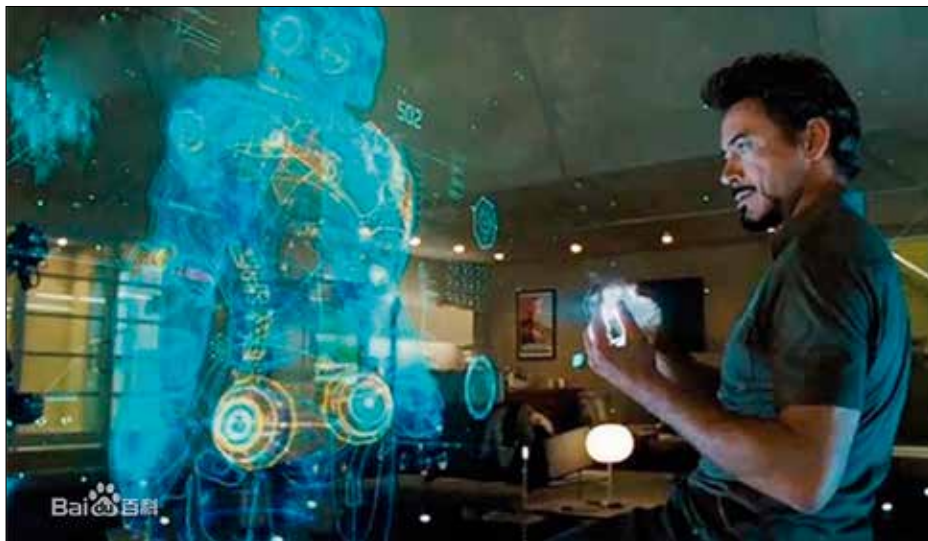


图5 基于全息性原理的虚拟现实（图片来自百度百科）

性以及包括了尺度伸缩对称性的一个更加广义的对称性。

首先AdS/CFT显然是全息性对偶的,因为有体-面对应,另外这也是一个强弱对偶。如果一方耦合强,那另一方就弱,反之亦然,通常对非微扰的强耦合的场论问题,就能通过AdS/CFT对偶到弱的AdS空间中进行求解。

说到全息性,现在蓬勃发展的虚拟现实科技也广泛采用了其原理,即利用了全息原理实现的真实的立体显示,可看到立体显示的全部特征,并有视差效应,见图5。虚拟现实是指真实幻觉(Virtual Reality,简称VR),是近年来出现的高新技术。虚拟现实是利用电脑模拟产生一个三维空间的虚拟世界,提供给使用者视觉、听觉、触觉等感官的模拟,让使用者如同身历其境一般,可以及时、没有限制地观察三度空间内的事物。从某种意义上来说,这是全息性原理在真实现实和虚拟现实之间建立起来的对偶关系,是更广泛意义层面上全息性对偶的某种技术性延伸。

3. 黑洞物理中的对偶性

关于黑洞物理中的对偶性,最著名的莫过于紫外-红外(UV/IR)对偶^[1]。相对论量子力学告诉我们,如果要探测到 Δx 大小或其尺度上的粒子,则需要能量 $E_{\Delta x} = \hbar c / \Delta x$,这说明能量是与尺度成反比的。但是根据新世纪物理学的发展,特别是黑洞物理学的发展,对其进一步分析发现事实可能不是这样,即可能不是传统的相对论量子力学给出的结果。

让我们来考虑一个假想的思想实验^[1]:考察普朗克尺度 l_p 以下情况下 $\Delta x < l_p$ 的相互作用,按照传统物理学的观点,这需要迎头碰撞上述 $E_{\Delta x}$ 高能粒子,人们有理由期待碰撞后有飞向各个方向的高能碎片粒子,并从中发现和重构非常短距离的物理世界所发生的事件。但是麻烦的问题来了,事实是在高于特别是远高于普朗克质量(因而也就对应着普朗克能量)之上的任何碰撞将会产生一个质量约为 $E_{\Delta x}$ 的黑洞,因此我们希望探测的可能非常有趣的短距离物理效应将会隐藏在半径为 R 的视界之内,这里 $R = 2GE_{\Delta x} / c^4$ 。更糟糕的是我们希望看到的碰撞产物可能不是什么高能粒子,而是一些低能的霍金辐射。而我们知道霍金辐射的能量大约是

$\hbar c / R$,显然入射能量越大,这个霍金辐射的能量就越低,因此无论建造什么样的超级对撞机,我们都很难探测到比普朗克尺度更小的物理。

事实上,随着能量 E 的提高,我们能探测的尺度也会提高,用另一种更加清晰的说法(它可以看作是时空本身的不确定性原理)即时空的不确定性的乘积是个常数,这就是著名的紫外—红外(UV/IR)的对偶性,它意味着时间越短(即频率越高),则对应着的尺度越大。这一UV/IR对偶性连接与黑洞物理的互补性有深刻的联系。关于物体落入黑洞的物理过程的互补性描述之间的巨大差异在于彼此互补参照系中的观察者有着非常不同的时间分辨率。

让我们进一步做假想的思想实验:一个质子掉进黑洞(图6)会发生什么?质子本身带有一些信息,例如它的电荷、动量、它在视界中的位置等等。从外部观察者来看,质子落入了不断增加的热的区域,就像一小片冰块被投进放满热水的澡盆里,合理的推断是它将“融化”并且在视界中不断地扩散,这种现象也可理解为当带电物体落入黑洞时,视界被拉长了。更一般的表述是储存在质子中的所有信息被迅速地弥散到了视界中,但另一方面,如果从质子本身的参照系来看,当质子下落时,并没有看到这一信息的发散情况。

那么如何调和这种互补性的描述呢?这也许对我们理解物质的高频行

为有所帮助。在不跟随质子一起下落的外界参照系中看，在质子穿越视界之前，因为Schwarzschild时间趋于无穷大，则其固有时就变得越来越趋于零，因此信息为何扩散的原因是：为了在越来越短的时间间隔中观测到质子的行为，则被观测的质子所占据的空间就不得不不断增长，因为尺度与时间间隔成反比，所以是时间的指数形式的快速增长。

4. 暗物质和暗能量物理中的对偶性

如果问21世界物理学最大的困惑和挑战是什么，那么暗物质与暗能量无疑是其中之一。或者说暗物质和暗能量是影响当今量子物理及天体物理的“两朵乌云”。

人们通过宇宙学和天文学的观测表明，宇宙从大爆炸开始迄今已有约137亿年的历史，宇宙演化史的简单示意图可参看图7。而最近几十年的观测却发现宇宙中有大量的暗物质，特别是存在大量的非重子物质的暗物质，一个典型的观测示意图见图8。

据天文学观测估计，宇宙的总质量中，重子物质约占2%，也就是说，宇宙中可观测到的各种星际物质、星体、恒星、星团、星云、类星体、星系等的总和只占宇宙总质量的2%，98%的物质还没有被直接观测到。在宇宙中，非重子物质的暗物质当中，冷暗物质约占70%，热暗物质约占30%。

暗物质（Dark Matter）是一种现有理论还无法解释因而被假想出的物质，由于不带电荷，没有电磁相互作用，所以不能用常规方法去探测，但它能干扰星体发出的光波或引力，其存在能被明显地感受到。暗物质中的“暗物质粒子”的存在有可能是量子粒子物理的弱相互作用力的大质量重粒子的极化粒子，类似于“磁单极粒子”的跃迁线性粒子。暗物质的探测在当代粒子物理及天体物理领域是一个很热门的研究领域。对于大质量弱相互作用粒子（Weakly Interacting Massive Particles，简称WIMP）来说，物理学家可能通过放置在地下实验室、背景噪声减少到极低的探测器



图6 黑洞及其周围的物质（图片来自百度百科）

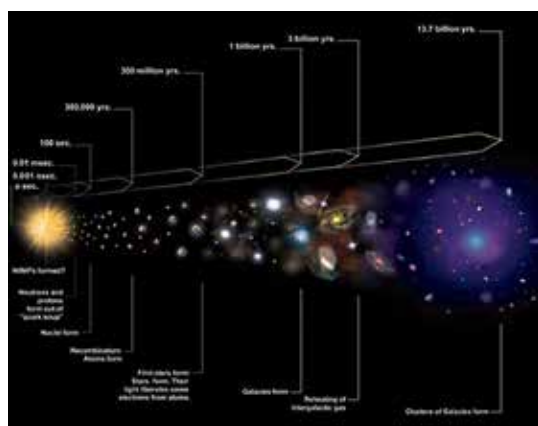


图7 宇宙演化示意图（图片来自百度百科）



图8 暗物质示意图（图片来自百度百科）

直接探测WIMP,也可以通过地面或太空望远镜对这种粒子在星系中心,太阳中心或者地球中心湮灭产生的其他粒子来间接探测。在中国的锦屏山,有目前世界上最深的深地实验室,其中一个主要的研究目标就是对暗物质的探测。

约二十年前,一项研究表明我们的宇宙正在膨胀,而膨胀的速率不是恒定或减慢,而是在加速(这项研究在2011年被授予了诺贝尔物理学奖)。显然传统的标准模型对这一现象并不能给出合理完整的解释,因此为了解释宇宙加速膨胀,人们不得不提出暗能量的猜想。

暗能量(Dark Energy)是指一种充盈空间的、具有负压强的能量。按照相对论,这种负压强在长距离类似于一种反引力。这个猜想是解释宇宙加速膨胀和宇宙中失落物质等问题中的一个最流行的方案。暗能量之所以具有负压,是因为对于通常的能量(辐射)、重子和冷暗物质,压强都是非负的,所以必定存在着一种未知的负压物质主导着今天正在加速膨胀的宇宙。关于暗物质和暗能量在宇宙中大约所占的比例请参考图9。

目前存在许多“理论”和模型来解释暗能量问题,却没有一个为大多数研究者所接受。这些模型大致可以分为以下五类^[13]: (1) 超对称/超引力,超弦理论。(2) 人择原理(anthropic principle)。(3) 调节机制。(4) 引力修正理论(改变已有的爱因斯坦的引力理论)。(5) 量子宇宙学。最近出现了第六类理论,就是所谓的(6)全息暗能量理论,下面着重谈谈这个与对偶性密切相关的理论。关于暗物质和暗能量方面的书籍和参考文献太多,科普方面的可以参考百度词条等,专业方面的本文末尾列有几篇供参考^[12-13]。

全息性原理和全息暗能量理论主要的思想和观点如下^[13]: 首先,全息原理说,一个区域的量子态都可以由这个区域边界上的自由度所描述。例如,黑洞的熵(S)正比于其视界面积(A),即 $S=A/4G$,其中G是引力常数。其次由于黑洞具有最大的熵,所以对于一个不同于黑洞的系统,其熵必定比黑洞的熵小,从而上面的等式将变成不

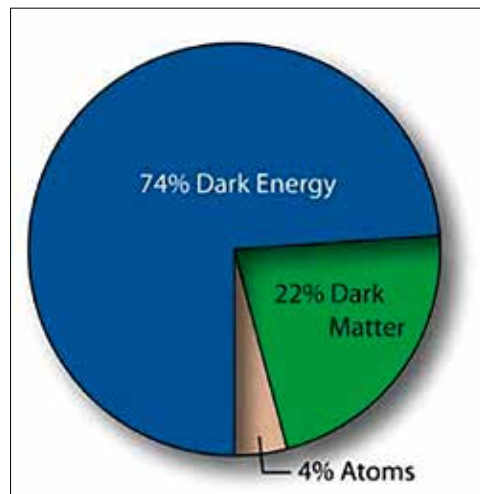


图9 宇宙构成中暗物质与暗能量的比例(图片来自百度百科)

等式 $S_{matter} \leq A/4G$ 。另外,在上世纪末,柯恩等人提出,零点能应该由一个系统的宏观截断所决定,因为如果系统的尺度足够大而零点能与之没有关系,这个系统就会坍缩成为黑洞,所以必须有个截断。他们的建议是就用宇宙学中的哈勃(Hubble)尺度作为这个截断。但后来有人提出疑问,如果这个截断是哈勃尺度的话,零点能不能满足暗能量的状态方程? 不过,李森和徐(Hsu)等人指出,如果用事件视界的半径作为红外截断,那么状态方程就与目前的观测结果相吻合。

虽然目前没有一个理论能完全解决暗物质和暗能量问题,但互补性和对偶性的思想将对问题的最后解决提供全新的视角和独特的方法。

5. 对偶性及其超越对偶性的进一步思考

我们在上一篇的漫谈中提到过（这里我们愿意再一次提及）：霍金在《果壳中的宇宙》（The Universe in a Nutshell）^[14]第三章标题下的解说词中说道“宇宙具有多重历史，每一个历史都是由微小的硬果确定的”，霍金还在开篇处引用莎士比亚戏剧《哈姆莱特》第二幕第二场主人公的心声“即使把我关在果壳，仍然自以为无限空间之王”。

上一篇的漫谈中^[1]我们说“显然，文学家和物理学家都从不同的角度对诸如小和大，多和少以及强和弱做出了不同程度但也高度相似或一致的理解。这说明所谓的对偶性可能具有普遍的哲学意义和宇宙学的意义。”既然说到了哲学和宇宙学意义，那么我们就有必要从这两方面进行一些有益的进一步的思考。

首先，就对偶的哲学意义而言，无疑它具有最大的价值和影响力，因为从逻辑上来说，一切哲学范畴里讨论的概念、方法和理论体系都是互为对立或互为补充的，例如物与心、物质与意识、客观与主观、自然与超自然、现实与超现实等等。有理由相信这些表面看起来是完全对立的东西其实是一枚硬币的两面，因此彼此之间是互为对偶的。

美国物理学家兼作家沃尔夫（Fred Alan Wolf）以古

代的思想为例，认为哲学、宗教和灵性之间实际上是没有分别的^[15]，他说：“希腊人谈论地球、天空、水和火。他们讨论一种完美的性质（第五元素），他们把它称为‘physis’，它代表了世界所有事物的灵性特征，物理学（Physics）这个词就来自于它，因此，我觉得在我们当前的意识状态中，这种桥梁是能够建立起来的，而且会非常稳固。”这说明对偶性已经从哲学的意义延伸到了更大领域和更深层次。今天的物理学者，特别是那些宇宙学研究者对神秘主义兴趣盎然，即便是严肃的物理学家也认为，在灵学和量子物理学之间存在着某种神秘的联系。例如以色列的物理学家最新的研究表明不仅有空间上的非定域性的量子纠缠，而且也存在时间上的非定域性的量子纠缠^[16]，他们成功地让从未共存过的光子发生了纠缠（见图10）。

其次，关于对偶性的宇宙学意义也许有些微妙甚至怪异，之所以这么说是因为我们的宇宙是一个包含了观察者的被观察了的宇宙，这是一个无穷嵌套的自相似性



图10 时间之纠缠
（图片来自百度百科）

结构，好比天安门上有国徽，国徽里有天安门，如此不断地循环。其实中国传统文化中的五行——金、木、水、火、土的相生相克也具有无穷嵌套的自相似性结构：连接着相生关系（木生火、火生土、土生金、金生水、水生木）的五边形内接着（隔一个顶点）连接着彼此相克五角星，五角星里又有一个小的次级的相生五边形，这个小的次级的相生五边形里又有一个更小的次级的相克五角星，如此不断地自组织、自相似、自复制，这便是分形结构，也是中国传统文化的全息对偶性原理所在（见图11）。巧合的是这种古老东方思想中天人合一的对偶性越来越体现在现代西方科学发展出的宇宙学里。

还以上述物理学家发现的时间纠缠为例，人们不禁要问这到底意味着什么？纽约城市大学的克茹尔博士，她在“令人费解的量子力学：对时间纠缠的检验”一文中^[17]说道：“这个结果的困惑，就好比是说，来自遥远过去（例如地球产生以来的时间，约90亿年）某个星光的极化状态至今仍然影响到今年冬天你通过一架业余的望远镜正在看到的另一个星光的极化。更加怪异的是，或许反过来说，你今年冬天对于一束星光极化的观察这个测量竟然以某种神秘的方式支配了光子极化态长达90亿年”。对此，除了观察者本身与观察对象之间有着隐秘的全息对偶性的理解之外，我们似乎没有更好的理论去理解。

著名物理学家，隐变量理论创始人玻姆在《后现代科学和后现代世界》一文中^[18]写道：“史蒂芬·温伯格曾说过，他越是进一步探究宇宙，宇宙看上去就越是没有什么意义，所以人类要生存下去，就必须创造出我们自己的意义。完整的整体或流动的整体。整体包含于每一部分之中。由于我们不可分割地包容在世界中，物质和意识之间不存在根本的分别，因而意义和价值不仅是世界的组成部分，也是我们的组成部分。”是的，对偶性能够架起两个互补世界的桥梁，好比在两个最大纠缠黑洞之间内部的惠勒式的虫洞。它既提供了彼此之间的联系以及关于宇宙中一切事物的超验性的可能，它实际上也提供了超越对偶性本身的一种可能性。

我们和我们所处的世界都是宇宙的产物，因此我们的求索和我们追求的数学与物理的真谛也是阴阳对偶的，太极生阴阳，阴阳归太极，这正是对偶性的魅力所在。在上一篇漫谈

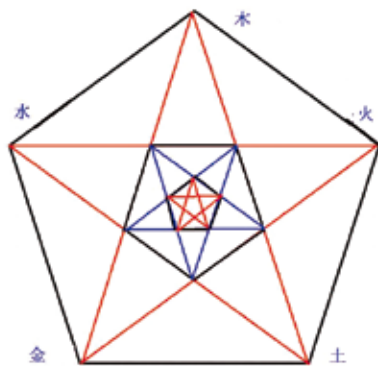


图11 五行相生相克而无限嵌套的自相似性结构

的结尾曾经写到：“我们是谁？有一个答案是：对偶的对偶是自己！”，那么现在，通过进一步的思考和感悟，也许还有一个回答：

我们自己就是对偶，对偶的对偶也是我们自己！

参考文献

- [1] 谢柏松. 数学和物理系统中的对偶性漫谈. 系统与控制纵横, 2018, 5 (1): 82-92.
- [2] 郭奕玲, 沈慧君 编著. 诺贝尔物理学奖一百年. 上海科学普及出版社, 上海, 2002.
- [3] Becker K, Becker M and Schwarz J H. String theory and M-theory: A modern introduction. Cambridge University Press, UK, 2007.
- [4] 李森. 超弦史话. 北京大学出版社, 北京, 2005.
- [5] Maldacena J and Susskind L. Cool horizons for entangled black holes. arXiv:1306.0533v2 [hep-th] 11 Jul 2013.
- [6] Jensen K and Karch A. Holographic Dual of an Einstein-Podolsky-Rosen Pair has a Wormhole. Phys. Rev. Lett. 111, 211602 (2013).
- [7] Sonner J. Holographic Schwinger Effect and the Geometry of Entanglement. Phys. Rev. Lett. 111, 211603 (2013).
- [8] Xie B S, Li Z L and Tang S. Electron-positron pair production in ultrastrong laser fields. Matter and Radiation at Extremes 2017, 2: 225-242.
- [9] 李子良, 努尔曼古丽·阿卜杜克热, 谢柏松. 超强场下真空产生正负电子对的动理学方法研究及其进展. 物理学进展, 2016, 36: 129-156.
- [10] 谢柏松, 李子良, 唐琐, 刘杰. 超强场下的正负电子对产生. 物理, 2017, 46: 713-720.
- [11] Susskind L, Lindesay J. An introduction to black holes, information and the string theory revolution: The Holographic Universe. World Scientific Publishing, Singapore, 2005.
- [12] Matarrese S, Colpi M, Gorini V and Moschella U (editors). Dark Matter and Dark Energy: A Challenge for Modern Cosmology. Springer, 2011.
- [13] 李森, 李霄栋, 王爽, 王一 (编著). Dark Energy (暗能量). 北京大学出版社, 北京, 2012.
- [14] 史蒂芬·霍金著, 吴忠超 译. 果壳中的宇宙. 湖南科学技术出版社, 长沙, 2006.
- [15] (美) J道格拉斯·凯尼恩 编撰, 熊晓霜 译. 被禁止的科学. 江苏人民出版社, 南京, 2011.
- [16] Megidish E, Halevy A, Shacham T, Dvir T, Dovrat L, and Eisenberg H S. Entanglement Swapping between Photons that have Never Coexisted. Phys. Rev. Lett. 2013, 110: 210403.
- [17] Crull E. You thought quantum mechanics was weird: check out entangled time. <https://aeon.co/ideas/you-thought-quantum-mechanics-was-weird-check-out-entangled-time>. 2018.
- [18] (美) 大卫·格里芬编, 马季方 译, 《后现代科学: 科学魅力的再现》, 中央编译出版社, 2004年.