

弦论小史 (三)

李 淼

我在《超弦史话》一开始就描述了弦论第二次革命开始的情形，多年后的现在回顾起来，也还是充满刺激。弦论第二次革命发端于 1994 年中的两篇文章：威滕和塞伯格 (Nathan Seiberg) 关于超对称规范理论的文章，以及胡尔 (Christopher Hull) 和汤森 (Paul Townsend) 关于弦论中的所谓 U 对偶的文章。在美国，第一篇影响的效应是即时的，甚至纽约时报都在第一时间报道了这个进展。一时之间，网上的物理文库充满了关于超对称场论的文章。与威滕和塞伯格工作的遭遇相反，起初没有太多人重视胡尔和汤森的工作。从某种角度看，西方 (特别是美国) 理论工作基本上为少数几个学术牛人主导，而真正影响深远的原创工作最初往往被忽视。不仅是胡尔和汤森的工作，更早的印度人森 (Ashoke Sen) 等人关于弦论中对偶的工作也是如此，另外还有前面提到的关于膜的工作。

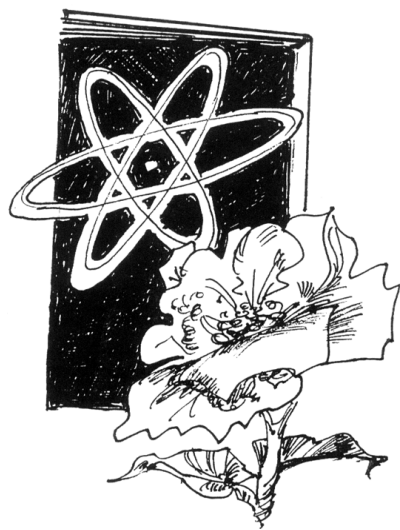
到了次年三月，威滕在弦论大会上做了一个爆炸性的报告，其中总结了他关于弦论中各种对偶的研究。直到此时，人们才如梦方醒，原来弦论的动力学这么美妙、这么丰富。弦论对偶的研究立刻冲破了多年以来的停滞。此后直到 1997 年马德西纳

质分子降解。

电离辐射对生物和医学研究做出了重要贡献。农业上，昆虫辐射不育技术在害虫的防治上应用前景广阔；辐射诱变育种将辐射诱变与基因技术、空间技术相结合，可产生许多优良突变品种。基础研究方面，近年来许多科研手段都与放射性同位素的应用密切相关。例如用放射性同位素作为示踪原子标记 DNA、RNA，可研究基因表达和细胞分裂；放射性磷同位素标记可研究植物对磷肥的吸收、代谢和分布情况等。近年来生物大分子结构和功能的研究也几乎都要借助于放射性同位素。同位素示踪在生态环境监测、污染物与环境的相互作用机制研究上也起到了重要作用。电离辐射在医学领域的应用更是广泛。例如我们熟悉的 X 射线透视、CT 的原理都是利用机体不同组织对 X 射线的吸收差异。近年研发的核磁共振 (MRI) 技术则是利用原子核在

(Juan Maldacena)

关于全息原理的工作，弦论中出现了很多新概念，弦论的发展以月为单位计算，这是一个最为美好的时段。



弦论二次革命的历史以及第一次革命的历史告诉我们，在理论研究中，真理往往不属于当时的研究主流，用一句大家都很熟悉的话来说，就是真理往往掌握在少数人手中。这些少数人在多数时间内被主流忽视，直到某个契机出现，人们才发现过去的主流研究和这些真知灼见比起来完全可以忽略不计。我在博客中经常谈谈我关心的一些时下研究，包括弦论和宇宙学。有人会问我，李老师你怎么只谈宇宙学不谈弦论。我的回答是，你要我谈现在的所谓“主流”，我看不出有什么值得谈的，如果不谈主流，我的眼光还没有好到可以看出被大家忽略的重要工作。

回到二次革命，先谈谈对偶。对偶这个概念在弦论中并不陌生，例如在早期的对偶共振模型中，

磁场内共振而产生影像的一种诊断方法，MRI 具有分辨率高、扫描层面薄、无影像重叠等优点，目前已成为影像医学中颇受欢迎的检查手段之一。医学诊断还经常采用前面讲到的同位素示踪方法，检测脏器的形态、功能，对某些化学元素进行超微量分析等。由于电离辐射对细胞具有较强杀伤力，而肿瘤细胞对辐射的敏感程度比正常细胞高得多，所以放射线治疗癌症已成为一种重要手段。例如 ^{131}I 能够集中在甲状腺中，它辐射的 β 射线可有效破坏甲状腺癌组织； ^{60}Co 产生的 γ 射线、电子加速器产生的高能电子束则用于治疗多种癌症。此外，许多不耐热的药品和试剂、生物材料都采用辐射消毒，大型 ^{60}Co 源和电子直线加速器都能有效杀灭微生物。

(高原，中国科学院遗传与发育生物学研究所 100190；于玥，中国科学院高能物理研究所理论物理研究中心 100049)

粒子散射振幅的不同道之间的对偶就有了，这和存在无限多个不同种类的粒子参与相互作用有关。这种对偶和后来发现的一些对偶完全不同，后来发现的对偶是弦论在不同背景之下的等价关系。例如，最早被发现的这类对偶是 T 对偶，最简单的情况是一个空间维度被紧化。在这个时空背景之下的弦论完全等价于在另一个不同背景之下的弦论，后者也是一个空间维度被紧化，但这个紧化的维度半径不同于前者紧化维度的半径。为什么这两个完全不同空间上的弦论是等价的呢？直观的原因是，每个紧化空间为我们带来两类无限多个弦态，分别是动量模和绕数模（动量模就是弦在这个维度上给定动量的态，这个动量是量子化的；而绕数模对应于弦在这个维度上缠绕的态，缠绕次数同样也是量子化的），当两个不同维度的紧化半径有一个关系时，它们的动量模和绕数模可以互换。T 对偶还有一个比较“抽象”的原因，我们知道，一个微扰弦论完全决定于弦的世界面上的共形场论，包括其弦态谱和弦态之间的相互作用。当两个紧化空间的半径满足一定条件时，它们对应的共形场论完全等价。T 对偶告诉我们，空间在弦论中不是一个绝对概念，而是与你用什么测量有关。如果用动量模测量，就得到一个空间；如果用绕数模测量，就得到另一个空间。至于用什么模测量，取决于什么模是最轻和最稳定的。

胡尔和汤森的工作极大推广了 T 对偶。首先，在 T 对偶之外，还存在一种强弱对偶，人们将这种对偶称作 S 对偶，这里的 S 和早期用这个字母来表示对偶下的变换有关。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，即使知道稳定的粒子谱，也很难计算其间的相互作用，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描述，在这个理论中，所有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。弦论中有很多不同的 S 对偶，最著名的就是 IIB 型弦论在 10 维时空中的自对偶：一个 IIB 型弦论对偶于另

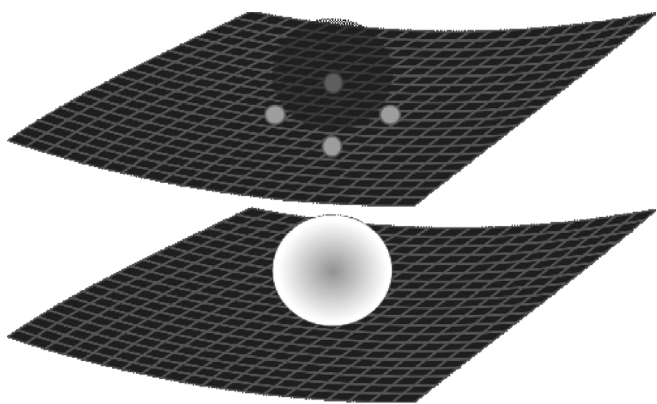
一个耦合常数是前者倒数的 IIB 型弦论。这种对偶要求理论中不仅存在称为基本弦的物体，还存在另一种叫做 D 弦的物体。在一个理论中，如果基本 x 弦相互作用强度很小，那么 D 弦的相互作用强度就很大，这个理论等价于另一个 IIB 型弦论，在第二个弦论中，原来理论中的 D 弦论变成了基本弦。我们看到，无论是 T 对偶还是 S 对偶，都要求弦论中存在丰富的物体，在对偶变换下，这些物体之间变来变去。

T 对偶的操作和 S 对偶的操作往往不可交换，这样，这些操作系列就会产生新的对偶，所有这些对偶被胡尔和汤森称为 U 对偶，这里 U 是英文统一的第一个字母。在威滕以及后来其他人的工作中，这些对偶得到了进一步检验和支持，也有一些新的对偶被发现。那时几乎每隔几天就会出现一篇令人惊奇的论文。所有这些工作都向我们揭示，过去的关于膜的工作不应该被我们忽略，因为那些膜成了对偶成立的基本要求。

膜的研究出现在 20 世纪 80 年代末期，那时弦论研究的主流是拓扑场论和低维弦论（如两维弦论），只有少数人（基本上是来自欧洲以及有着欧洲背景的理论家）开始将注意力转移到膜的研究。其实，膜是粒子和弦的简单推广。粒子是零维物体，弦是一维物体，类似肥皂泡膜的是二维物体，还是三维和三维以上的膜。当然，弦论中膜的性质和肥皂膜很不一样，它们在早期被当作基本物体来研究，其地位和弦完全一样。在弦论中，这些膜以孤子解的面目出现，当然它们不是“子”，是膜，解的形式很像场论中的孤子。这些解有两个重要特征，其一是，它们都是光滑的解，没有奇异性；其二是，它们相应的能量密度都和弦论中的耦合常数成反比。这两个特点都很重要，第一个特点说明它们是弦论中的合法物体，第二个特点告诉我们当弦论是弱耦合的时候，这些物体都很重。自然，我们不能指望无限大的膜在物理过程中会出现，但有限大的膜却可能出现，这些有限大的膜既可出现于非紧化的时空，又可以出现于紧化的空间（从而在非紧化的时空中看起来是一个点）。当膜的能量密度很大时，它们在弦论的动力学中就不起重要作用，这和弦论作为微扰论是自给自足的事实吻合。

几乎与欧洲学派同时或稍后，泡钦斯基 (Joseph Polchinski) 及其学生在 1989 年发现，仅仅从微扰

弦论的 T 对偶出发, 就能推演出一类膜的存在, 这类膜在 6 年后被称为 D 膜。这个名字其实并不好, 因为 D 是狄雷克利的简称, 和膜定义中的技术细节有关。事后证明, D 膜就是孤子膜中的一大类。D 膜在二次革命中起到了独一无二的重要作用, 原因是 D 膜的定义使一些困难的计算变得很容易。例如, 如果将几个孤子膜放在一起, 我们不知道如何描述这些膜的低能过程 (例如, 量子引力的效应可能会起作用, 因为膜之间的距离非常小), 而 D 膜的图像则告诉我们, 这些膜的低能动力学完全由膜之间的开弦所决定, 这些开弦的低能内容就是一些超对称量子场论, 这个事实又将超对称场论中的对偶与弦论的对偶联系起来。所以, D 膜可用于研究弦论之间的对偶, 并将本来的一些半定量的结果定量化。



D 膜一个始料不及的应用是黑洞的量子性质。霍金和贝肯斯坦 (Jacob Bekenstein) 的研究工作证明, 黑洞并不黑, 而且带有统计熵, 一直以来无人能够找出黑洞统计熵的微观起源。D 膜出现后, 斯特劳明格 (Andrew Strominger) 和瓦法 (Cumrun Vafa) 发现, 不同的 D 膜可用于建造一些特殊黑洞, 这些特殊黑洞叫做极端黑洞, 因为这些黑洞的温度等于零但熵却不为零。D 膜的构造告诉我们存在一些低能的自由度, 当我们计算这些自由度时发现它们的确和黑洞的熵有关。既然大家认为黑洞的量子性质是一个量子引力理论应该解释的, 现在弦论可以解释一类黑洞的熵, 所以斯特劳明格和瓦法的工作被看成弦论是正确量子引力理论的一大证据。后来, 关于极端黑洞的工作被推广到很多其他情形, 包括稍微偏离极端的情况。在偏离极端之后, 黑洞就有了温度, 从而产生霍金辐射, 弦论也可用于计算微观层次上的霍金辐射。

D 膜还有其他应用, 例如用于研究量子场论、宇宙学, 例如现在流行的 D 膜暴涨论。D 膜还启发

粒子唯象学家发明了一些新的唯象模型, 包括所谓的膜世界、兰道尔和桑卓姆的第四维, 等等。在弦论内部, D 膜的黑洞研究直接导致了马德西纳猜想, 后者在 1997 年之后一直统治着弦论研究的主流。如果大型强子对撞机能够发现任何与 D 膜有关的东西, 例如大额外维, 我觉得早期研究膜的那些人 (特别是泡钦斯基) 将成为最有荣光的人。

在二次革命初期, 所有关于对偶和 D 膜的研究其实围绕着一个中心问题, 就是一个新理论的发现, 这个理论由于种种原因被称为 M 理论。各种不同的弦论不过是 M 理论在不同情况下的表现而已。M 理论存在于一个与超对称相容的最高维时空, 即 11 维时空。这个时空比弦论还多了一维, 这一维在弦论中的解释是动力学生成的空间维度。例如在 IIA 型弦论中, 当耦合强度变大时, 一些零维的 D 膜 (即 D 粒子) 变得越来越轻, 它们可解释成一个新生成维度上的动量模。其他 D 膜和非 D 膜都可以用 M 理论中的两种基本膜来解释, 一种有两维空间、一种有五维空间, 这些膜称为 M 膜。这些膜的性质很神秘, 一直没有研究清楚。最近一些工作似乎是 M 膜方面的突破, 目前引起越来越多人的关注。而 10 年前, 只有将 M 理论降成弦论、将 M 膜降成 D 膜, 才能研究它们的性质。

从纯粹理论角度, 我们对 M 理论的了解可以说还非常原始。我们知道这个理论应该存在, 因为它的存在性与弦论以及弦论的对偶一致, 却不知道如何用数学语言表述这个理论的逻辑结构。这种尴尬的局面在物理学史上从来没有出现过。我们熟悉的物理学发展模式是, 要么实验将我们引向新概念和新的物理结构, 要么旧理论与现实发生矛盾迫使我们修改它。现在的情况是, 我们已经知道存在一些逻辑上自洽的量子引力理论 (即多种多样的弦论), 但并不知道这些理论和现实世界的联系。不仅如此, 这些理论之间并不互相独立, 统一在一个未知的逻辑框架下, 这个逻辑框架叫做 M 理论, 虽然还没有人能够写出一个数学上完整的 M 理论。

弦论家在 10 年前别无选择, 只能从逻辑上尽量了解 M 理论的一些动力学, 以期有一天能够完整写出 M 理论的表述, 再进一步研究它与现实世界的关系和其他有趣的物理推论。1996 年, 想这么做的人并不多, 因为那时大家都在忙于寻找更多弦论对偶的例子, 以及研究 D 膜的动力学性质。当时在罗格

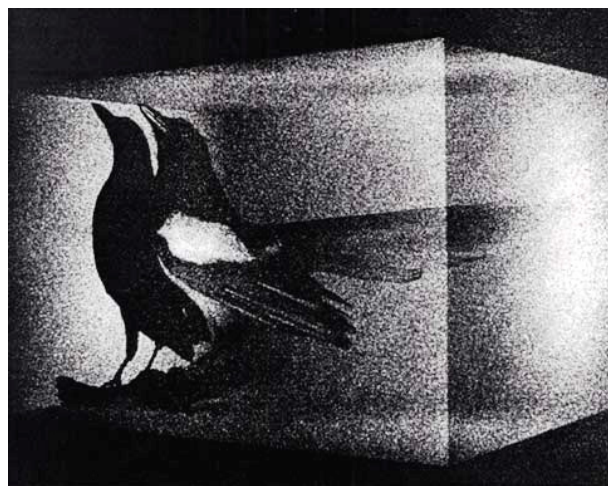
斯大学的几位有眼光的人开始寻找 M 理论的逻辑结构，有班克斯 (Thomas Banks) 和申科 (Steven Shenker)。他们和另外两位弦论家开始觉得 D 膜可能被用来构造 M 理论，因为那时大家普遍觉得 D 膜可能是弦论中所有的自由度，因为很多黑洞都可用 D 膜构造。1996 年 10 月，一篇用矩阵理论表述 M 理论的文章出笼了，很多人将信将疑，因为文章中的一些基本想法看起来既不新奇、也不熟悉。

矩阵理论的一些概念，如无限动量参照系，对资历稍短的弦论研究者的确不够熟悉，因为这个概念脱胎于 20 世纪 60 年代强子的部分子模型。在 60 年代，由于强相互作用看起来很复杂，而高能散射实验中的这种过程又有一些标度律出现，费曼建议，在这些过程中，可以假想有很多部分子参与相互作用，每个部分子带有一个基本的向前动量。如果我们假想给一个强子以无限大的动量，那么这个强子可以看成由无数个部分子组成。后来人们发现，费曼的部分子其实就是夸克和胶子。矩阵理论的提出者之一萨斯坎德 (Leonard Susskind) 就是部分子研究的积极参与者之一。所以，在矩阵理论中，他应该是无限动量参照系的提出者。与部分子模型类似，在 M 理论的矩阵理论中，带有基本向前动量的自由度是一个 M 理论的部分子，如果我们将动量方向的那个空间紧化，成为一个圆，这个部分子不是别的，正是 D 粒子，即空间为零维的 D 膜。矩阵理论的大胆之处不仅是利用无限动量参照系，还假定 D 粒子之间的相互作用完全是 D 膜的低能相互作用，这些相互作用完全可以用矩阵动力学描述。简单地说，理论中有 9 个矩阵，当这些矩阵可以同时对角化的时候，矩阵的对角元就是 D 粒子在垂直于动量方向 9 个空间方向上的坐标 (M 理论中有 10 个空间方向)。当然，D 粒子还有自旋，所以在 9 个矩阵之外，还有一些费米矩阵。

我前面说这个理论又不够新奇，有两个原因。一是 D 粒子的低能动力学大家都知道；二是这个理论在很久以前还以另一个面目出现过，那是 20 世纪 80 年代末一些人研究膜的时候。那时候，人们意识到除弦之外，膜很难被量子化。在两维膜的情况下，一些人发现，如果将膜离散化，膜上的坐标就变成了矩阵，这完全是后来的 D 粒子动力学。所以在提出矩阵理论的时候，很多人觉得这个理论一来不新鲜，二来似乎只能描述 D 粒子和两维膜。但是，班

克斯等人大胆地猜测，矩阵理论描述 M 理论在平坦时空时的一切动力学。不久，一些支持矩阵理论的证据陆续出现，直到今天，我们还没有矩阵理论是错误的反例。

1 年以后，马德西纳提出一个更为大胆的猜测，其中平坦时空换成了所谓反德西特时空。反德西特时空与平坦时空不同之处在于，它是弯曲的，无质量粒子可从内部在有限时间内到达边界，而有质量粒子永远不能到达边界，同时，这个时空的对称性也很大。由于无质量粒子可以在有限时间到达边界，平坦时空中的散射矩阵不再存在，取代它的是边界上的关联函数。马德西纳在做出他的大胆猜测时并不知道边界上的关联函数是可观测量，但他还是猜测，反德西特时空上的量子引力理论完全等价于边界上的量子场论。后来两组人 (包括威滕) 指出，边界上的关联函数不是别的，正是边界上量子场论中的关联函数。反德西特时空中的一些动力学和这些关联函数有着微妙关系 (直到今天，我们还没有完全理解这些关系)，这些关系可看成一个深刻原理的具体实现，这个原理就是量子引力的全息原理，早在 3 年前为萨斯坎德和特霍夫特所提出，后者是从黑洞的量子力学性质推测全息原理的。



马德西纳的猜测很快得到了更多支持，所有研究均未发现与其相悖。马德西纳猜测比矩阵理论更有用的地方是计算相对直接，这个猜测还将很多看起来互不关联的领域联系起来。首先是弦论和量子场论的关系，本来人们以为弦论是全新的理论，完全不同于量子场论，但在反德西特时空中，弦论看来不像我们直觉以为的那样有无限多个自由度，它其实等价于边界上的量子场论。其次，这个猜测将引力与场论联系起来，例如引力子在某种意义上

对偶于场论中的能量动量张量，黑洞则对偶于场论中的热平衡系统。再者，这个引力与场论的对偶也将引力与粒子的唯象理论联系起来，例如，量子色动力学很可能有引力对偶，在这个对偶中，每个色单态（如介子、重子和胶子）都有相应的引力描述，这几乎实现了 20 世纪 60 年代末弦论的理想：用弦论描述强相互作用。今天，很少有人怀疑量子色动力学与弦论的对偶，因为马德西纳猜测已可用于计算一些实验中测量的量，如 RICH 实验中出现的夸克胶子等离子体中的一些物理学参数。

在马德西纳提出其猜想时，并未出现后来的那么多概念和想法。那时，他只有 D 膜的一些计算可以利用。一方面，D 膜可以用来计算黑洞辐射，这些计算是场论中的计算，一方面，离 D 膜很近的时空几何得到简化，就是反德西特空间。这个时空上的对称性同时又是 D 膜上量子场论的对称性，也就是超共形不变性。这些零散但很重要的证据使他提出这个猜测，当然，矩阵理论的成功对他也起了不少作用，因为马德西纳猜测中的场论也可看作一类广义矩阵理论，这些场论中的场往往是矩阵，就像规范理论中的场是矩阵一样。近几年来，马德西纳还利用其猜测将一些几何与简单矩阵联系起来。所以，某种意义上，几何就是矩阵，虽然我们还不知道如何将最一般的几何与矩阵联系起来。

虽然矩阵理论（特别是马德西纳猜测）获得了很大成功，但是必须说我们对弦论以及 M 理论的结构还非常不了解，因为这些成功只针对于一些特殊时空。特别地，宇宙学告诉我们，我们的时空是随时间演化的，在过去存在一个大爆炸，从而存在一个时空奇点，我们还不知道如何用弦论严格研究这类时空。不得不说，这是目前阻碍弦论发展的主要困难之一。虽然存在这些困难，过去 10 年的发展还是让弦论充满活力，因为我们已经可以将它用于一些比较实际的问题，如强相互作用。

现在，我们应该回到这个系列开始提到的乌云了，就是弦论作为量子引力理论对暗能量能够说什么。很遗憾，在这个问题的态度上，弦论家分为两派，一派认为，弦论在近几年的发展已经解决了这个问题，而另一派的观点完全相反。那么，最近几年和宇宙学相关的弦论发展是什么呢？这就是所谓弦景观的发现。一些人发现了许多亚稳态时空，每个这样的时空都对应一个宇宙学常数，并且，都有

一个不同的粒子谱和粒子之间的相互作用形式。这些亚稳态就像一个巨大景观中的低谷一样，而这里的景观与地球上的景观又有不同，因为涉及到很多物理场，所以景观是高维的。有人假想，如果宇宙开始于这个景观中的一点，通过永恒暴涨机制，宇宙就会派生出很多因果无关联的区域，每个区域中的物理学由景观中的一个低谷所决定。换句话说，宇宙不同的区域加起来会访问几乎所有的景观、所有的亚稳态。持有这种观点的人认为，我们处在宇宙中众多区域中的一个，它恰恰有很小的宇宙学常数（暗能量），这么小的宇宙学常数允许星系和恒星的形成，从而允许人类这样的智慧生命形成。这种观点就是人择原理：通过人的存在倒推人类存在的原因，从而倒推我们不能通过寻常科学方法解释的事实和现象。

这里我们不打算陈述我们对人择原理的看法，而是讨论一下弦景观的处境。首先必须说明，弦论还没有发展到可以严格处理宇宙学中的问题，所以弦景观存在的证明（即使用物理学的标准来看）也是不够严谨的。其次，永恒暴涨理论也存在一些理论问题，目前研究者对永恒暴涨是否存在意见不一。假如永恒暴涨不能实现，那么宇宙就不可能实现弦景观中的所有亚稳态（假定弦景观是存在的），我们也就不能解释为什么宇宙中会出现我们所处的这样一个区域。再退一步，假定弦景观是存在的，永恒暴涨也能发生，在假定我们这个世界的宇宙学常数可以实现的前提下，能够解释其他物理学常数（例如电子电荷）么？我想，即使是弦景观的鼓吹者，在这个问题上也不会乐观。放弃解释物理学参数，我们就得放弃弦论研究的最初目标之一：理解这个世界为什么会这样，而不仅仅是它就是这样。我对弦论所持的态度是，等待实验做出最终的裁决。好在宇宙学观测在不断发展，我们在有了两朵乌云之外，还会积累更多的观测数据；好在欧洲核子中心的大型强子对撞机即将启动，我们期望这个也许是人类历史上最后或者倒数第二个巨型放大镜会给我们带来微观世界的重要信息。也许很快有那么一天，弦景观的支持者们将是胜利的预言家，或者，弦景观的反对者将是胜出的传统科学的捍卫者。不论是什么结果，我都乐观其成，我只相信实验才会最终揭示真相。

（安徽省合肥市中国科学技术大学 230026）