



# 超弦理论及其进展

卢建新

中国科学技术大学交叉学科理论研究中心, 合肥 230026

E-mail: [jxlu@ustc.edu.cn](mailto:jxlu@ustc.edu.cn)

2008-12-03 收稿, 2009-01-07 接受

国家自然科学基金(批准号: 10588503, 10535060)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815401)资助项目

**摘要** 综述了超弦/M 理论的意义、重要性及其发展过程中的两次革命以及已经取得的成绩, 评述了该领域目前的研究现状和发展趋势, 探讨了该理论的研究如何帮助我们认识和理解一个量子引力理论以及包括引力在内的相互作用统一理论所需要满足的要求和条件. 该理论的研究也在一定程度上揭示了时空的本质和模糊性、相互作用的本质和模糊性, 以及在考虑非微扰效应下经典和量子之间存在的可能模糊性, 由此为该理论的进一步研究和完善给予启示.

**关键词**  
量子引力  
统一理论  
超弦/M 理论

## 1 研究的动机

物理学中有待解决的基本问题之一是如何实现引力的量子化, 并将引力与自然界其他三种基本相互作用——电磁力、弱相互作用力和强相互作用力统一起来. 尽管量子引力离我们日常生活以及目前人工加速器所能达到能标下的物理现象的研究甚远, 但人类从未停止过对未知世界以及由此而提出的一些基本问题的好奇和探索. 正是这种好奇的驱动力使得我们对周围世界运行规律的了解不断深入, 人类也因此丰富了自己的视野, 从中获得了巨大的收益. 量子引力与宇宙的起源所涉及的一些基本问题, 如时空的本质和相互作用本质等紧密相关, 特别要理解如黑洞熵的本质、黑洞奇点、宇宙学奇点问题以及近期宇宙学观察发现的暗能量本质问题, 都需要理解引力的量子行为. 另外, 相互作用的统一也需要引力的量子理论, 很难想象一个经典引力可以与另外三种量子相互作用统一在同一个理论框架内. 超弦理论是人们经历了无数次不成功尝试而获得的一种包括引力在内的量子统一理论, 是目前量子引力理论的最佳候选者. 超弦理论至少在量子微扰意义上是自洽的, 实现了量子引力的一些基本要求, 如自然地 20 世纪两大物理支柱——量子力学和广义相对论有机结合起来, 从理论上实现了包括引力在内

的四种相互作用力的统一, 并且在远远高于量子引力的普朗克能标( $10^{19}$  GeV)即紫外也是有限的. 特别要提到的是, 近期对非微扰弦理论的研究揭示了一个更大理论的存在, 即所谓 M 理论的存在性. M 理论如果成功, 它一定会导致一场人类对时空本质、时空维数、相互作用本质、暗能量本质等革命性的认识, 其深刻程度不亚于 20 世纪的两场物理学革命: 量子力学和广义相对论. 该理论的成功对我们了解宇宙的起源和演化必将起着促进作用. 另外, 精确宇宙学时代的到来以及欧洲核子中心大型强子对撞机(LHC)即将运行为检验该理论提供了一定的实验基础, 更为其进一步发展提供了实验指导. 超弦/M 理论的研究也为其他科学分支提供了新的思路和方法, 如解释凝聚态物理中分数量子霍尔效应, 并加深了我们对一些基础数学如几何与拓扑学的认识, 导致了一些新数学的发现. 正如加州理工学院弦理论家 Ooguri 于 2008 年 7 月在欧洲核子加速器中心(CERN)召开的国际超弦会议所做会议总结中提到的, 超弦理论不仅是一个统一物质及其相互作用的候选理论, 它也是一个模型, 对我们已知的四维世界的引力、手征费米子、规范相互作用、对称性破缺等提供了很好的描述, 特别它教给我们一个自洽的量子引力理论所具备的特征及要求; 它还是一个工具, 例如通过该理论获得的 AdS/CFT 对应可以对很多强相互作用系

统,如夸克-胶子等离子体、强子物理、凝聚态物理中的量子相变、冷原子系统等的应用;最后它还是一种语言,如在普朗克能标时量子引力变得重要,此时时空将不存在,必须从更基本的结构导出,因此我们需要一个全新的更基本的语言来描述这一结构。换言之,超弦理论所起的角色不仅是一个上述意义下的候选者,也是一个模型,是一个工具,更是一种全新的语言。

## 2 微扰超弦理论简史

人们对弦理论重要性的认识始于1968年<sup>[4]</sup>。在1968~1973年这段期间,研究发现强相互作用粒子(称为强子)的散射振幅的高能行为可用一个一维弦的动力学来描述。在弦理论中,我们通常说的‘粒子’对应于弦(如同二胡弦但其长度极短)的不同振动模式。换句话说,通常意义下组成物质和传递相互作用的粒子可用一根弦统一起来,进一步这也暗示着弦理论应具有统一包括引力在内的四种相互作用的潜力,并由弦之间的相互作用来实现。弦可以有两种拓扑结构:开弦和闭弦。开弦具有两个端点,在时空中随时间自由演化给出一个两维的世界叶面。闭弦是一个没有端点的闭合圈,在时空中自由演化给出一个在拓扑上等价于柱面的两维面。在1973~1974年这段时间,量子色动力学对强相互作用高能行为的成功描述使该领域绝大多数研究人员放弃了进一步研究弦理论。当时全世界仅有两到三人仍致力于对该理论的研究。到1974年,他们发现闭弦的粒子谱中包括一个无迹对称张量(在四维时空中对应自旋为2)的无质量粒子模。从过去对量子引力的研究知道,此粒子对应的是传播引力相互作用的载体,称为引力子。进一步研究表明,任何在量子力学意义上自洽的弦理论必然包含闭弦,即包括引力相互作用,因此弦理论至少是一个描述引力的量子理论,而不是像人们早期想象的那样仅仅描述强相互作用。这也说明弦的尺度应为非常小的普朗克尺度,约为 $10^{-35}$  m,同时它还要求一种新的对称性,称为超对称,即自然界中的两种粒子(称为波色子和费米子)之间的一种对称性。在所谓超弦第一次革命期间(1984~1985年),人们发现存在五种量子力学意义上自洽的微扰弦理论,其中有的超弦理论如杂化弦还明显包含规范自由度,因而包括了除引力外的其他三种相互作用。因此弦理论不仅将引力量子化,给出有限的计算结果

(不像通常量子场论计算中有无穷大出现),而且理论本身的自洽性自然地将引力和其他三种相互作用统一起来。换句话说,超弦理论中四种相互作用的统一不是人为的要求,而是理论本身不自相矛盾的必然结果。

## 3 微扰弦理论的困惑

上述微扰弦理论的成功当时极大地引起了人们对该理论的兴趣,并得到了一些诺贝尔物理奖获得者如 Gell-Mann 和 Weinberg(及近期 Gross)等人对该理论研究的强力支持,一些当今著名的理论物理学家,如 Witten 等人和一大批有志青年也积极投入该理论的研究。

微扰超弦理论的成功似乎表明,我们已发现了描述自然及其相互作用的终极统一理论。但仔细地考察这些理论发现有如下的疑问。

( ) 如果统一理论的确存在,它应是唯一的(因为我们只有一个现实世界)。但我们有五种在理论上不同却都自洽的微扰弦理论,而不是一种,并且它们在微扰理论框架内的重要性并没有什么不同。也就是说,我们无法在微扰理论框架内选择其一而排除其他四种超弦理论的存在。显然,这是一个疑问。解决这一矛盾的可能性有二:一是尽管这5种微扰超弦理论在表面上不同,但它们实际上是等价的。另一种可能性是尽管每一种微扰弦都将量子力学和广义相对论统一起来,但它们都不是最终的统一理论,而仅仅是一个更基本的、目前还未知的理论的不同方面。建立上述任一种可能性都要求我们对弦理论的非微扰性质进行研究。

( ) 5种微扰弦的自洽性都要求十维时空和时空超对称(一种联系玻色子和费米子之间变换的对称性),其自然能标为 $10^{19}$  GeV。在可以预见的将来,我们不可能建造一个人工加速器能够产生如此高的能量而对弦理论进行直接检验。因此,最小检验就是要求至少某种微扰弦理论能够给出我们四维时空下可观察的物理,如粒子物理的标准模型。我们可以从微扰弦理论导出一个几乎与低能粒子物理标准模型相同,但做不到完全相同。这一结果至少表明,如果超弦理论的确可用于描述自然,微扰弦理论是不完整的,我们需要考虑弦理论的非微扰贡献。换句话说,我们的现实世界如果与弦理论有联系,那一定是与非微扰弦理论相关。

( ) 另一个显然的问题是, 一个极限理论能否成为描述自然的终极理论? 对于一个终极理论来说, 除了一些可能的基本常数, 如光速、普朗克常数和弦张力加上可能的初始值(或边界条件)外, 其他的量应由该理论的动力学所决定. 特别的是, 该理论的真空态应由其动力学决定. 而微扰弦理论从一开始就假定时空平坦并要求弦的相互作用强度很小以使弦微扰展开有效, 因此假定了弦真空及相关性质. 这些假定与终极理论的要求相悖. 换句话说, 所有微扰弦理论都是极限理论, 它们因而不可能成为终极理论.

( ) 如果微扰弦理论的确是描述我们世界的终极理论, 那十一维超引力理论似乎与描述现实世界无关. 我们知道五种微扰弦的低能极限给出相应的超引力理论, 而更低维的超引力理论对应于紧致化的超弦低能理论. 如果微扰弦的确是全部的故事, 我们就无法对十一维超引力的存在给出解释. 但如果我们将十一维时空的一维空间维数看成为一个极小的圆圈, 十一维超引力这时就给出其中一种超弦(称为 IIA 弦)的低能有效理论. 而此小圆圈的半径与此弦理论的相互作用强度成正比. 由此我们看出, 十一维超引力应与这种弦的非微扰理论的低能理论有关. 换句话说, 我们只有了解弦理论的非微扰性质才能解释十一维超引力.

由此我们得出结论, 必须对弦非微扰性质进行研究才能解决上述疑问, 并且如果超弦理论成功, 我们的现实世界最有可能与非微扰弦理论相关.

#### 4 超弦第二次革命

尽管我们描述一般体系的微扰动力学有系统的方法, 但对相应非微扰性质及其动力学的处理手段却很有限, 通常都是基于相应系统的一些特殊性质而做一些非常有限的探讨. 对超弦理论非微扰性质的探讨也不例外. 每种微扰超弦理论的低能极限与当时已知的相应的十维超引力理论一一对应, 这似乎也为相应的超引力理论作为低能有效理论的地位和重要性找到了答案. 但超引力理论本身的建立早于微扰弦理论, 完全基于玻色子和费米子之间的一种称为超对称性的局域化所致(如果爱因斯坦不发现广义相对论, 超对称变换与时空变换的联系及相应局域化的考虑也会导致广义相对论的建立). 特别相应的、建立在对称性基础上的超对称代数与弦耦合常

数(更一般地与真空选取)无直接关联, 这暗示着超引力理论本身不应仅仅被看成为微扰弦的低能有效理论, 而应该非微扰弦理论的低能有效理论, 且相对微扰弦它应包含更多的非微扰信息. 正是这样的理解和认识使得我们有基础和机会去探讨弦的非微扰性质. 这其中最简单、非平庸的就是探讨弦的非微扰态或孤子谱. 研究发现非微扰弦理论除了包括一维的弦外, 还有二维面, 三维体等高维客体通称为膜<sup>[2-4]</sup>. 这一发现给当时弦理论研究领域的人们一个惊奇, 完全超出了当时弦理论家们的想象.

在此以前, 国际上研究超弦理论主要集中在美国各主要大学和一些研究机构, 而按类似思路研究超膜(其空间维数大于 1)的主要集中在欧洲, 特别是英国的一些主要大学. 当时研究超弦理论的主流认为超弦与空间维数大于 1 的超膜是不相关的理论, 它们之间是没有联系的. 这是因为当从其二维世界叶角度, 超弦理论可看成为(1+1)维世界叶上的共型场论, 并具有一个特殊的共型对称性. 该对称性使得超弦世界叶上的引力与超弦本身的动力学自由度完全退耦. 从而超弦世界叶可以在给定有限大小的区域内设为平坦, 使得该共型场论的量子化变成一个(1+1)维具有多个自由标量场简单系统的量子化. 对于超弦来说, 只要时空维数取为 10, 共型对称性及上述相关的一些性质在量子意义上也得到保持. 加上时空超对称的要求(除掉弦理论中的快子态), 超弦理论成为在微扰意义上完全自洽、有限的量子引力理论. 而对于其他膜, 我们无法做到类似超弦理论意义下的微扰量子化. 这就是当时人们认为一维弦与高维膜无关的主要理由.

从非微扰超弦的低能有效理论, 即‘超引力理论’发现的 NSNS 5-膜和一类现称为  $D_p$  膜(其中  $p = 0, 1, 2, \dots, 9$  代表相应膜的空间维数)首次揭示了弦与其他膜是紧密相关的, 只是它们之间的联系是建立在非微扰意义上的. 这些膜都保持一半时空超对称性, 从而被称为 1/2 BPS 稳定态. 其中具有 5 个空间维数的 NSNS 5-膜就是通常所熟悉意义下弦的孤子, 如该膜的质量与弦的耦合常数平方成反比关系.  $D_p$  膜是一类新的非微扰弦特有的非微扰态, 例如其质量与弦耦合常数本身而不是其平方成反比关系. 这些非微扰态是从非微扰弦的低能有效理论中发现的, 它们保持一定的超对称性, 使得其质量等于相应的守恒荷, 即质量取到了所谓 Bogomol'nyi-Prasad-Sommer-



field (BPS)不等式的下限值,对应的就是所谓的稳定的BPS态.这种态的特点是:如果一个理论的某种近似理论存在这种解或态,那么它们一定也是完整理论的解或态,且从近似理论获得这种态的质量是精确的,没有高阶修正.例如,从非微扰弦理论的低能有效理论获得的这些非微扰BPS态,尽管其相应的位形可能有量子修正,但由此位形算出的质量却是精确的,不会有任何量子修正,这些态也是完整非微扰弦理论的态.

这一发现也为前面提到的微扰弦理论中存在的各种问题或困惑找到了答案或部分答案.如果我们的现实世界与非微扰弦相关,即与较大的弦耦合常数区域相关,那么这些新发现的膜的动力学就不可忽略,特别当弦耦合常数 $g > 1$ 时,这些膜的动力学甚至比弦的动力学还重要.这可以从上述提到的膜的质量与弦耦合常数的关系来理解.如果我们设定弦的基本长度 $l_s = 1$ ,在这种选择下弦的能量标度 $m_F = 1$ ,NSNS 5-膜的能标度 $m_{\text{NSNS5}} = g^{-1/3}$ ,而一般 $D_p$ 膜的能标度 $m_{D_p} = g^{-1/(1+p)}$ .这些能标度刻画的是相应动力学客体的动力学自由度具有重要动力学效应时对应的能量标度.由此可以看出,当弦的耦合常数数量级为1时,这些膜的能标度与弦的能标度同数量级,即相应的激发具有等同的重要性.但当弦的耦合常数大于1时,膜的能标度比弦还要小,也就是膜的动力学自由度比弦的还要轻,因此具有更重要的动力学效应.换句话说,只要我们的现实世界与非微扰弦相关,那么这些膜的动力学效应就不可忽略,这暗示着五种微扰弦理论在非微扰意义上可能并不独立,十一维超引力可能与非微扰IIA弦相关,同时也在一定程度上说明了为什么微扰弦本身不能给出低能下的粒子物理标准模型(因忽略了很多动力学自由度的贡献).当取弦的耦合常数 $g \rightarrow 0$ 时,除弦的能标与其耦合常数无关外,其他膜的能标都变成无穷大,相应的动力学自由度都变得无穷重,因此其动力学冻结并与弦的动力学自由度退耦.这样最轻的动力学自由度完全来自弦,所有的动力学完全由弦来描述.这也解释了为什么仅对弦存在微扰理论而其他膜没有.另一个极端情况是 $g \rightarrow \infty$ ,这时D0膜的能标最小,且所有其他膜的能标相对D0膜的都为无穷大,因此都冻结而退耦.这说明当弦耦合常数为无穷时,表述M理论的动力学客体是D0膜,这也是后面提到的M理论矩阵表述的基础.

这些高维膜的发现帮助我们建立五种弦理论和十一维超引力之间的各种对偶或等价关系<sup>[5-9]</sup>.例如考虑非微扰效应后,非微扰IIA弦对应的就是一个以十一维超引力作为低能有效理论的非微扰理论,而且该理论包括称为M2和M5膜等作为该理论基本动力学客体,其弱耦合极限给出的就是通常的微扰IIA弦理论;Type I SO(32)弦理论与SO(32)的杂交弦之间也是一种强弱对偶关系,即一个在强耦合区域的弦理论可以用一个完全等价的弱耦合的弦理论来描述,反之亦然;IIB弦是强弱自对偶的,换句话说,IIB弦在强耦合区域对偶等价于在弱耦合下的自身;E8×E8杂交弦与十一维非微扰理论的联系也是一种强弱对偶关系,只是这时不像该理论与IIA弦之间那样强弱对偶是通过弦耦合常数与紧致圆圈半径的大小来表征,这里是通过与紧致线段的长度大小来刻画的.再考虑到IIA弦与IIB弦以及SO(32)杂交弦与E8×E8杂交弦之间的T-对偶等价性(即一个理论紧致在一个小空间上等价于另一个理论紧致在大空间上,反之亦然),我们就将五种弦理论和十一维理论在非微扰意义上完全联系等价起来.这样我们就在微扰弦理论原有的统一量子力学和广义相对论的基础上将一维弦与其他超膜联系起来,同时也将所有的超膜统一在一个理论框架内,且这些超膜作为该理论的基本动力学客体,由此预言了一个更大理论的存在,即目前称为M理论的存在性<sup>[5-9]</sup>(近年来非微扰弦方面取得的重大进展称为第二次超弦革命).早期发现的5种微扰弦理论和十一维超引力仅作为M理论的不同极限理论.M理论的这些成功回答或部分回答了前面提到的有关微扰弦存在的疑问.同时,M理论中这些天衣无缝的对偶关系及该理论其他的美妙关系使得从事该理论研究和对该理论有深刻了解的研究人员深信,即使我们目前不能完全肯定对现有M理论的认识和理解完全正确,我们研究的大方向和思路是可取的,有助于该理论完整描述的建立.这也是目前唯一得到公认的探索途径.可以说,超弦理论的第一次革命统一了量子力学和广义相对论,发现了量子自洽的五种微扰弦理论,而第二次革命统一了5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.对该理论的研究揭示了相互作用、时空以及经典和量子的一些本质、暗示它们的模糊性和非基本性.例如,闭弦和开弦对D-膜的等价表述暗示着常规引力与规范相互作用的联系,暗示着相互作用的

模糊性。另外这种等价表述下经典的闭弦计算结果可以看成开弦的单圈量子效应是否也隐含着经典和量子的某种模糊性。弦理论中时空的非对易性应该是量子引力的自然结果，隐含着时空的非基本性或模糊性，这在M理论的矩阵表述中是显然的。另外，弦/M理论预言了额外维和超对称性的存在，首次为一些黑洞熵提供了微观解释<sup>[10-12]</sup>，该理论的AdS/CFT对偶关系<sup>[13-15]</sup>（一个定义在AdS时空上的弦理论与一个规范理论的等价关系）为解决量子色动力学的强耦合行为，如夸克-胶子等离子态、强子物理等提供了新的途径。

## 5 挑战及近期进展

尽管上述种种成功，我们目前对该理论的了解还非常有限，尤其是其固有的非微扰行为，M理论本身理论框架还没有被完全建立。该理论目前的状态与量子色动力学有相似之处，我们对其强耦合的非微扰区域知之甚少，可以说该理论强耦合的定义如何也不完全清楚，例如动力学自由度，甚至基于局域场论的自由度概念在这里是否适用也是个问题。我们目前还面临着一些其他挑战，如弦/M理论的真空问题<sup>[16-19]</sup>：弦/M理论有各种真空态，这些真空的集合统称为弦景况(string landscape)，基于其有效理论的保守估计（这种估计的正确性还有待于探讨），有约 $10^{500}$ 这样的真空，且每个真空附近的物理常数如宇宙学常数不一样，有大有小。近期宇宙学观察告知，我们的宇宙具有一个小的正宇宙学常数，它支配着目前宇宙的加速膨胀，构成了宇宙中主要物质组分（暗能量组分），如何从众多的真空中选择我们现有的真空并给予第一原理性的解释，是弦/M理论需要回答的问题。另外，回答暗能量的起源和本质问题也是弦/M理论作为基本量子引力统一理论所不可回避的。用弦/M理论描述宇宙早期行为，如暴涨行为是该领域目前热点研究方向之一<sup>[20,21]</sup>，突破了原认为的不可能性，取得了相当大的进展，实现了符合观察的一些宇宙学模型。这些基于弦理论的宇宙学模型的特征预言是宇宙极早期的张量扰动远小于标量扰动，这两者的比值远远低于可探察水平，但不违背目前的由观察得出的极限 $r < 0.3$ 。未来的观察可能给不出下限但也可能给出该比值的下限为 $r \sim 10^{-2} \sim 10^{-3}$ ，如果是后者的话，至少会给现有的弦宇宙学模型提出挑战。另外，弦宇宙学模型可以描述最新观察发现的有关功率谱可能的非高斯性。精确宇宙学时代的到

来为实验检验弦/M理论提供了一定的可能，同时也为其进一步发展提供了实验指导。

现有的基于弦理论相关构造，如KKLT构造给出的弦宇宙学模型之所以给出暴涨时期相对标量扰动来说如此小的张量扰动（给出这两者的比值 $r \sim 0$ ），是源于暴涨时期的哈勃常数值不应超过引力子超对称伙伴(gravitino)的质量<sup>[21]</sup>。基于粒子物理有关超对称破缺的唯一象考虑，该质量不应超过通常认为的超对称破缺能标，即 $m_{3/2} \sim O(1 \text{ TeV})$ 。正是这一较低能标的约束使得目前的弦宇宙学模型几乎没有张量扰动。

至今最佳解释弱电统一能标与普朗克能标巨大差异的标度等级问题仍然是通过超对称自发破缺。基于长寿命亚稳态的动力学超对称破缺是目前弦理论及超对称规范理论的研究热点之一<sup>[22-26]</sup>。通常的超对称自发破缺总伴随着一个所谓R-对称性的出现。但这种整体对称性的出现会造成规范场的超对称伙伴(gaugino)难以获得质量，也无法避免实验上没有观察到的轻R-轴子(R-axions)。近期研究发现，基于所谓亚稳态的动力学超对称破缺对应的只是近似的R-对称性，因此有可能避免上述问题的出现<sup>[22]</sup>。要使得这种动力学超对称破缺具有现实意义，该破缺应是自发的，且在场空间该亚稳态要远离真正的超对称真空，从而使得从亚稳态到超对称真空的隧穿被极大的压制，给出亚稳态的寿命大于宇宙的年龄<sup>[26]</sup>。

从唯象角度来说，要使得规范场超对称伙伴获得质量，R-对称性在超对称破缺标度上应该破缺，这种破缺可以是自发或明显的，或两者都有。但如果该对称性破缺是自发的，就会导致被实验上否认的轻R-轴子的出现。由此我们要求R-对称性破缺是明显的。当有引力存在时，我们不可能有整体的R-对称性存在，即R-对称性是明显破缺的，因此不会造成很大困难。具体要看在超对称及R-对称性破缺标度下，相应的模型是否能给出足够大的R-轴子的质量，从而可以逃脱实验的探察。在引力退耦的情况下，我们就必须在相应的场论中引入明显破缺R-对称性的项。从超对称破缺与R-对称性的联系，这必然隐含着该情形下超对称破缺基态是亚稳的。换句话说，对具有现实意义的动力学超对称破缺，亚稳态是不可避免的。目前该方面的研究主要是构造满足所有要求同时具有现实意义基于亚稳态的动力学超对称破缺模型<sup>[27]</sup>。

弦/M理论当今国际研究热点的另一个重要方向是利用AdS/CFT或引力/规范对偶去计算 $N=4$ 超对称规范理论的输运系数,如各种黏滞系数、传导系数等<sup>[28]</sup>,硬探针效应如拖曳力的计算及量子色动力学(QCD)的强耦合行为如QCD真空性质、高温夸克-胶子等离子体性质,已经取得了相当的成功,例如利用该对偶关系计算发现,超对称规范理论在强耦合区域的黏滞系数与熵的比值非常小,接近理想流体<sup>[29,30]</sup>,重味夸克穿过强耦合规范理论的能量损失,与RHIC的实验结果定性一致<sup>[31,32]</sup>等.即将运行的LHC为弦/M理论对夸克-胶子等离子体和其他可能的强耦合QCD行为的应用提供了更好的实验基础,希望由此对弦/M理论本身的发展也提供一定的实验指导.

弦/M理论自身的发展最近也取得了可喜的进展<sup>[33~40]</sup>.完整建立该理论的难点之一是我们目前对该理论固有的非微扰性质了解甚少,这是因为,与微扰的情形不同,我们没有一个一般的方法去处理固有的非微扰性质.在弦/M理论中,一些表面上为非微扰的情形通过某种对偶关系可以将之转化为微扰的情形,从而可以用熟知的微扰方法加以研究,但也存在一些固有的非微扰情形,如该理论中的M2, M5和NS5-膜的动力学,我们没有一般的非微扰方法去研究它们的相关性质,但对应的动力学了解弦/M理论深刻内涵至关重要.近期,该领域的研究人员发现了多个M2膜的低能非微扰共型理论,通过相应的AdS<sub>4</sub>/CFT<sub>3</sub>对应以及从AdS<sub>5</sub>/CFT<sub>4</sub>对应已获得的知识和经验,可为研究该膜的固有非微扰动力学行为打开窗口.该研究也有可能为研究弦/M理论的固有非微扰性质提供了曙光.

近期的研究热点还涉及如de Sitter空间的量子引力问题,四维时空下 $N=8$ 超引力的有限性问题,基于弦理论研究的一些启示如AdS/CFT对应而发展起来的一套定义在扭曲空间上(twistor space)可应用于计算规范和引力理论微扰振幅的全新技术, Kerr/CFT对应等.

## 6 超弦/M理论在中国的研究现状

中国在超弦第一次革命和第二次革命都未能在国际上起到应有的作用.我们对该理论的研究与国际水平及我们的周边国家如印度、日本、韩国相比还有一段距离.M理论现有的状态为我们提供了又一次

赶上的机遇.近年来,国内一些活跃的年轻研究人员以及在该理论研究上做出了具有国际水准工作的回国人员都在努力改变国内目前在该领域的研究现状,并在弦/M理论本身的发展、微扰弦散射振幅的圈图计算及其对QCD圈图计算的应用、弦/M理论相关的宇宙学暴涨及暗能量模型方面和利用AdS/CFT研究强耦合QCD等方面取得了一定成绩.

中国科学技术大学为中国超弦/M理论领域培养的人才最多,目前国内该领域及相关方向的主要研究人员中,大多数毕业于中国科学技术大学.自2002年以来,中国科学技术大学在国内率先成立了以研究该理论及相关方向的交叉学科理论研究中心,积极开展相关方向的学术交流,与中国科学院理论物理所的同仁们一道为推动国内在该领域的发展起了积极的推动作用,几乎参与了该领域及相关领域所有国际研究热点,并取得了一定的成效,缩短了我们与国际和周边国家研究水平的差距.我们也是国内唯一能系统开设弦/M理论相关研究生课程为学校,为其他研究单位相关研究生的学习创造了条件.在国际上我们较早开展研究与时间相关背景下的非对易开弦和D膜的动力学行为<sup>[41]</sup>,在AdS/CFT对应方面,也是较早用可积自旋链计算规范理论中算子混和反常维数<sup>[42]</sup>及相关的AdS/CFT对应的检验以及引力/规范对应<sup>[43~49]</sup>.

利用弦/M理论的有效理论即超引力理论研究该理论中非微扰、非稳定膜的动力学是我们开展的另一主要研究,也是国际上开展这方面研究的主要研究组.尽管这方面的研究目前还没有得到国际同行的广泛重视,如同本文作者在超弦第二次革命前夕参与的从超引力理论中发现非微扰1/2 BPS膜情形相似,但我们深信这种研究应该会给出M理论重要的非微扰信息.如前面提到的,之所以有这种可能是因为超引力理论是非微扰超弦/M理论的低能有效理论,也是非微扰的.由于这里涉及的系统不是BPS系统,我们必须小心解释所获得的相应系统的动力学行为及相关性质,哪些仅仅是超引力的结论,哪些是M理论本身的非微扰信息.我们具体研究了相应快子凝聚<sup>[50~53]</sup>动力学及可能的与开弦和闭弦快子凝聚相关的不同动力学相行为<sup>[54,55]</sup>及相关一些工作<sup>[56~59]</sup>,取得了一些阶段性成果.特别我们发现黑洞的高维推广黑膜实际上是相应BPS膜与D0膜束缚态与相应反束缚态组合的这样一种系统,且当黑膜的空间方向为



尺度相当的紧致膜时, 它可以通过所谓的闭弦快子凝聚使得具有奇点的黑膜经历一个改变拓扑的相变, 而成为一个没有奇点、规则的时空bubble, 提供了一种解决黑洞(黑膜)奇点的途径<sup>[55]</sup>.

结合宇宙学观察, 中国科学技术大学交叉学科理论研究中心研究人员基于弦理论及相关方面的一些结果和假设, 如时空非对易性、非局域性、高阶导数修正、全息性假设、弱引力猜想等, 提出了一系列宇宙学暴涨模型<sup>[60-63]</sup>, 讨论相关的性质<sup>[64-66]</sup>和对已有宇宙学模型的限制<sup>[67,68]</sup>, 以及单场暴涨的正非高斯性<sup>[69]</sup>.

中国科学技术大学交叉学科理论研究中心作为亚太地区 and 国内在超弦/M理论及相关领域主要学术交流平台之一从一开始就注重与国际、国内同行的学术交流, 来访人员在这里完成了数十篇研究工作, 做出了一些重要的研究成果, 如最早将膜位形用到加速宇宙膨胀的讨论<sup>[70]</sup>和全息暗能量宇宙学模型<sup>[71]</sup>.

研究引力的量子化及其与其他相互作用力的统一是自爱因斯坦以来国际理论物理学家的梦想, 也是人类寻求了解自然基本规律的追求, 已有几十年的历史. 要在更深层次上理解近期宇宙学观察和暗能量需要一个基本的量子引力理论. 超弦/M理论作为目前仅有的能够实现量子引力理论基本要求的候

选者, 其本身的研究已揭示了一个量子引力理论所必须满足的条件. 另外该理论的研究也向我们揭示了时空的模糊性、基本相互作用的模糊性以及当考虑非微扰效应时经典和量子之间也存在一定的模糊性等. 我们深信对其深入的研究特别是结合宇宙学观察和即将运行的 LHC 结果是非常有必要的. 这一结合不仅对 M 理论的自身发展有着指导作用, 同时对理解和解释宇宙学观察也会有很大的促进作用.

从事超弦/M理论研究对研究人员的基本素质和数理基础要求很高. 该理论的研究自然地涉及到理论物理、宇宙学和基础数学的交叉与融合. 长期坚持这方面的研究会为整个民族培养一批高级交叉学科基础研究人才, 为提高整个民族的基础研究水平会起到积极的促进作用. 超弦/M理论研究涉及的是物理学中一些基本问题, 因而也是年轻学生和学者感兴趣的主题. 另外, 该理论的研究所产生的新思想和技术会大大活跃研究人员的研究思路和方法. 因此开展该理论的研究会激发年轻学生对科学的兴趣和热忱, 其深远的影响更是难以估计. 超弦/M理论的研究无论是从其自身的重要性, 还是从中国研究人员的另一次机遇及对中国基础研究培养高级人才、提高整体研究水平来说, 都应是我们应当积极参与的研究领域, 应在国际上占据一席之地.

## 参考文献

- Schwarz J H. The early years of string theory: A personal perspective. arXiv: 0708.1917
- Duff M J, Khuri R, Lu J X. String solitons. Phys Rept, 1995, 259: 213—326[doi]
- Callan C G, Harvey J A, Strominger A. Supersymmetric string solitons. arXiv: hep-th/9112030
- Polchinski J. Dirichlet-branes and Ramond-Ramond charges. Phys Rev Lett, 1995, 75: 4724—4727[doi]
- Duff M J, How P S, Inami T, et al. Superstrings in  $D = 10$  from supermembrane in  $D = 11$ . Phys Lett B, 1987, 191(1-2): 70—74[doi]
- Townsend P K. The eleven-dimensional supermembrane revisited. Phys Lett B, 1995, 350(2): 184—188[doi]
- Witten E. String theory dynamics in various dimensions. Nucl Phys B, 1995, 443(1-2): 85—126[doi]
- Hull C H, Townsend P K. Unity of superstring dualities. Nucl Phys B, 1995, 438(1-2): 109—137[doi]
- Polchinski J. String duality—A colloquium. Rev Mod Phys, 1996, 68: 1245—1258[doi]
- Strominger A, Vafa C. Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy. Phys Lett B, 1996, 379(1-4): 99—104[doi]
- Dabholkar A. Exact counting of black hole microstates. Phys Rev Lett, 2005, 94(24): 241301—241304[doi]
- Dabholkar A. Black hole entropy in string theory: Going beyond Bekenstein and Hawking. Int J Mod Phys D, 2006, 15: 1561—1572
- Maldacena J M. The large  $N$  limit of superconformal field theories and supergravity. Adv Theor Math Phys, 1998, 2: 231—252
- Gubser S S, Klebanov I R, Polyakov A. Gauge theory correlators from noncritical string theory. Phys Lett B, 1998, 428: 105—114[doi]
- Witten E. Anti-de Sitter space and holography. Adv Theor Math Phys, 1998, 2: 253—291
- Bousso R, Polchinski J. Quantization of four form fluxes and dynamical neutralization of the cosmological constant. JHEP, 2000, 0006: 006
- Kachru S, Kallosh R, Linde A, et al. De Sitter vacua in string theory. Phys Rev D, 2003, 68: 046005[doi]

- 18 Douglas M R. Basic results in vacuum statistics. *Compt Rend Phys*, 2004, 5: 965—977[[doi](#)]
- 19 Polchinski J. The cosmological constant and the string landscape. arXiv: hep-th/0603249
- 20 McAllister L, Silverstein E. String cosmology: A review. *Gener Relat Grav*, 2008, 40: 565—605[[doi](#)]
- 21 Kallosh R, Linde A. Testing string theory with CMB. *JCAP*, 2007, 0704: 017
- 22 Intriligator K A, Seiberg N, Shih D. Dynamical SUSY breaking in meta-stable vacua. *JHEP*, 2006, 0604: 021[[doi](#)]
- 23 Murayama H, Nomura Y. Gauge mediation simplified. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 151803[[doi](#)]
- 24 Kitano R, Ooguri H, Ookouchi Y. Direct mediation of meta-stable supersymmetry breaking. *Phys Rev D*, 2007, 75: 045022[[doi](#)]
- 25 Intriligator K A, Seiberg N. Lectures on supersymmetry breaking. *Class Quant Grav*, 2007, 24: S741[[doi](#)]
- 26 Intriligator K A, Seiberg N, Shih D. Supersymmetry breaking, R-symmetry breaking and metastable vacua. *JHEP*, 2007, 0707: 017[[doi](#)]
- 27 Gaiotto A, Katz A, Komargodski Z, et al. Dynamical SUSY and R-symmetry breaking in SQCD with massive and massless flavors. *JHEP*, 2008, 0810: 092[[doi](#)]
- 28 Baier R, Romatschke P, Son D T, et al. Relativistic viscous hydrodynamics, conformal invariance, and holography. *JHEP*, 2008, 0804: 100[[doi](#)]
- 29 Kovtun P, Son D T, Starinets A O. Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 111601—111604[[doi](#)]
- 30 Buchel A. Bulk viscosity of gauge theory plasma at strong coupling. *Phys Lett B*, 2008, 663: 286—289[[doi](#)]
- 31 Gubser S S. Drag force in AdS/CFT. *Phys Rev D*, 2006, 74: 126005[[doi](#)]
- 32 Herzog C P, Karch A, Kovtun P, et al. Energy loss of a heavy quark moving through  $N=4$  supersymmetric Yang-Mills plasma. *JHEP*, 2006, 0607: 013[[doi](#)]
- 33 Bagger J, Lambert N. Modelling multiple M2's. *Phys Rev D*, 2008, 75: 045020[[doi](#)]
- 34 Bagger J, Lambert N. Gauge symmetry and supersymmetry of multiple M2 branes. *Phys Rev D*, 2008, 77: 065008[[doi](#)]
- 35 Bagger J, Lambert N. Comments on multiple M2-branes. *JHEP*, 2008, 0802: 105[[doi](#)]
- 36 Gustavsson A. Algebraic structure on parallel M2-branes. *Nucl Phys B*, 2009, 811(1-2): 66—76
- 37 Gustavsson A. Self-dual strings and loop Nahm equations. *JHEP*, 2008, 0804: 083[[doi](#)]
- 38 Schwarz J H. Superconformal Chern-Simons theories. *JHEP*, 2008, 0411: 078
- 39 Mukhi S, Papageorgakis C. M2 to D2. *JHEP*, 2008, 0805: 085[[doi](#)]
- 40 Aharony O, Bergman O, Jafferis D L, et al.  $N=6$  superconformal Chern-Simons matter theories, M2-branes and their gravity duals. *JHEP*, 2008, 0810: 091[[doi](#)]
- 41 Cai R G, Lu J X, Ohta N. NCOS and D-branes in time-dependent backgrounds. *Phys Lett B*, 2003, 551: 178—186[[doi](#)]
- 42 Wang X J, Wu Y S. Integrable spin chain and operator mixing in  $N=1,2$  supersymmetric theories. *Nucl Phys B*, 2004, 683: 363—386[[doi](#)]
- 43 Wang X J, Hu S. Intersecting branes and adding flavors to the Maldacena-Nunez background. *JHEP*, 2003, 0309: 017[[doi](#)]
- 44 Wang X J, Hu S. Green's functions of  $N=1$  super Yang-Mills theory and the radius/energy relation. *Phys Rev D*, 2003, 67: 105012[[doi](#)]
- 45 Chen B, Wang X J, Wu Y S. Integrable open spin chain in super Yang-Mills and the plane-wave/SYM duality. *JHEP*, 2004, 0402: 029[[doi](#)]
- 46 Dai J, Wang X J, Wu Y S. Dynamics of giant-gravitons in the LLM geometry and the fractional quantum hall effect. *Nucl Phys B*, 2005, 731: 285—308
- 47 Wang X J. Spinning strings on deformed  $AdS_5 \times T^{1,1}$  with NS B-fields. *Phys Rev D*, 2005, 72: 086006[[doi](#)]
- 48 Dai J, Wang X J, Wu Y S. BPS R-balls in  $N=4$  SYM on  $R \times S^3$ , quantum hall analogy and AdS/CFT holography. *JHEP*, 2006, 06: 060[[doi](#)]
- 49 Song Y. Phase transition dynamics and its Alpha's corrections. *Phys Rev D*, 2007, 76: 106014[[doi](#)]
- 50 Lu J X, Roy S. Supergravity approach to tachyon condensation on the brane-antibrane system. *Phys Lett B*, 2004, 599: 313—318[[doi](#)]
- 51 Lu J X, Roy S. Delocalized, non-SUSY p-branes, tachyon condensation and tachyon matter. *JHEP*, 2004, 0411: 008
- 52 Lu J X, Roy S. Non-SUSY p-branes delocalized in two directions, tachyon condensation and T-duality. *JHEP*, 2005, 0506: 026
- 53 Bai B, Lu J X, Roy S. Tachyon condensation on the intersecting brane-antibrane system. *JHEP*, 2005, 08: 068[[doi](#)]
- 54 Bai H, Lu J X, Roy S. Intersecting non-SUSY p-brane with chargeless 0-brane as black p-brane. *JHEP*, 2007, 01: 094[[doi](#)]
- 55 Lu J X, Roy S, Wang Z L, et al. Intersecting non-SUSY branes and closed string tachyon condensation. *Nucl Phys B*, 2009, 813(1-2): 259—282[[doi](#)]



- 
- 56 Lu J X, Roy S. Static, non-SUSY p-branes in diverse dimensions. JHEP, 2005, 02: 001
- 57 Lu J X, Roy S. Fundamental strings and NS 5-branes from unstable D-branes in supergravity. Phys Lett B, 2006, 637: 326—330[[doi](#)]
- 58 Lu J X, Roy S. Non-SUSY p-branes, bubbles and tubular branes. Nucl Phys B, 2007, 763: 170—182[[doi](#)]
- 59 Lu J X, Ning B, Roy S, et al. On brane-antibrane forces. JHEP, 2007, 08: 042
- 60 Chen B, Li M, Wang T, et al. Inflation with high derivative couplings. Mod Phys Lett A, 2007, 22: 87—94
- 61 Chen B, Li M, Wang Y. Inflation with holographic dark energy. Nucl Phys B, 2007, 774: 256—267[[doi](#)]
- 62 Cai Y F, Li M, Lu J X, et al. A string-inspired quintom model of dark energy. Phys Lett B, 2007, 651: 1—7[[doi](#)]
- 63 Xue W, Chen B, Wang Y. Generalized space-time noncommutative inflation. JCAP, 2007, 0709: 011
- 64 Li M, Wang Y. The measure for the multiverse and the probability for inflation. JCAP, 2007, 0706: 012
- 65 Li M, Wang Y. A stochastic measure for eternal inflation. JCAP, 2007, 0708: 007
- 66 Li M, Lin C, Wang Y. Some issues concerning holographic dark energy. JCAP, 2008, 0805: 023
- 67 Cai Y F, Wang Y. Is noncommutative eternal inflation possible? JCAP, 2007, 0706: 022
- 68 Huang Q G, Li M, Wang Y. Eternal chaotic inflation is prohibited by weak gravity conjecture. JCAP, 2007, 0709: 013
- 69 Li M, Wang T, Wang Y. General single field inflation with large positive non-gaussianity. JCAP, 2008, 0803: 028
- 70 Ohta N. Accelerating cosmologies from S-branes. Phys Rev Lett, 2003, 91: 061303—061306[[doi](#)]
- 71 Li M. A model of holographic dark energy. Phys Lett B, 2004, 603(1-2): 1—5[[doi](#)]
- 

## String/M-theory and its progress

LU JianXin

The Interdisciplinary Center for Theoretical Study, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**We report the significance of string/M-theory and the two revolutions in the course of its development as well as its major achievements, review its current status and trends, and discuss how the study of this theory can deepen our understanding of a quantum gravity theory and reveal the conditions which a consistent unified theory including gravity must meet. Current progress of this theory has revealed, to certain extent, the nature of space-time and its fuzziness, the nature of interactions and their fuzziness, and the possible fuzziness between classical and quantum descriptions when non-perturbative effects are taken into consideration. These may guide the further progress and lead to the completion of this theory.**

quantum gravity, unified theory, string/M-theory