

超弦理论的几个方向

李 淼

(中国科学院理论物理研究所, 教授 北京 100080)

〔摘要〕 简述目前超弦理论中比较受到研究者较多关注的几个方向, 特别是超弦宇宙学以及观测宇宙学的最新进展对理论提出的挑战。

〔关键词〕 超弦理论 引力 宇宙学

〔中图分类号〕 041

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)11-0016-04

A FEW DIRECTIONS IN STRING THEORY

LI Miao

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A few active directions in string theory are described in this paper, in particular, string cosmology and challenges to theorists posed by recent results in observational cosmology.

Key Words: string theory, gravity, cosmology

CLC Number: 041

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)11-0016-04

1 引言

超弦理论从上世纪 60 年代末被发现到今天, 已经有了 36 年的历史。经过了几个转折, 发展到今天, 成了最流行的量子引力理论。许多人研究弦论是出于对引力量子化的追求, 也有一部分人研究弦论是想统一引力与其它相互作用力, 更有一部分人因为弦论对目前的数学有很大帮助才有兴趣来了解和研究弦论。

经过许多人的努力, 弦论被发展成为一个自治的、统一的量子引力理论。说弦论是一个自治的理论, 是因为弦论不仅是一个传统上通过微扰定义的理论, 在非微扰的层次上也存在。弦论的统一归功于过去 10 年的发展, 特别是 1994 年至 1998 年之间的所谓弦论第二次革命的许多概念上的飞跃, 使得人们发现过去看起来很不相同的弦论其实是同一个理论在不同极限下的不同表现。

然而弦论的首要目的是研究现实世界, 在这一点上离成功还有很大的距离。在弦理论的框架下有没有可能计算粒子标准模型中的许多参数, 有没有可能计算最近几年宇宙学观测所发现的宇宙学常数? 这些问题还是目前学界争论的焦点。

弦论在近几年的发展, 完全遵循了过去几十年来的模式: 在一段快速发展之后, 由于一些传统难题和新提出的问题相当困难, 进入了缓慢但稳定的发展时期。很难预言这个时期会持续多长。但从以往的经验来看, 不会过很长时间, 就会有新概念的形从而引发新一轮的高速发展。没有一个人能预言这些新概念和新突破是什么, 因为新的进展总是大多数人意想不到的。我们回顾一下近几年来新的发展,

就是要总结一下已经存在的发展方向, 理顺思路, 为接受甚至发现新的突破点作准备。

2 快子和不稳定膜

快子就是那种表面上看起来以超过光速运动的粒子。在场论中, 快子的存在并不破坏狭义相对论, 因为这样的粒子不稳定。同样, 快子所对应的场也不稳定。例如, 一个快子标量场的势能有一个局域的极大点, 场在这一点附近不稳定, 会向势能更小的方向滚动。在物理理论中, 经常会遇到不稳定的模式, 这些模式其实就是快子。

弦论在 1994 年至 1998 年之间的巨大进展主要归功于对一些绝对稳定模式的研究。由于这些模式的存在, 人们可以对比表面上不同其实是等价的理论, 因为在等价的理论中只有绝对稳定的模式是可以对比的, 不稳定模式的衰变需要计算, 这样的计算在一个理论中可能比较简单, 而在另一个理论中也许是不可能的。但是, 绝对稳定模式的存在需要超对称的存在。在我们的世界中, 超对称并不存在, 或者在很大程度上是破缺的, 所以, 研究不稳定模式是非常重要的事情。

最早进行这一研究的是印度人森(A. Sen), 森自 1998 年就开始了他的系列研究^[1]。那时他关心的是弦论中没有受到超对称保护但却是稳定的态, 典型的例子是杂化弦中的一个粒子。由于这个理论与型 I 开弦理论等价, 所以该粒子应该能在型 I 理论中找到。森发现, 其实这个粒子有一个复杂但很漂亮的构造。在型 I 弦论中, 存在一种稳定的孤子弦解, 就是通常人们所说的 D 弦。D 弦和反 D 弦放在一起形成一个不稳定系统, 虽然这个系统不稳定, 但其有效理论中有

收稿日期: 2004-09-18。

作者简介: 李淼, 男, 1962~, 北京市中国科学院理论物理研究所 (100080), 主要研究方向为超弦理论、量子引力及宇宙学, Email: mli@itp.ac.cn。

一个孤粒子解,这个解就是杂化弦中出现的那个粒子。

这个发现引发森对更为一般的 D 膜-反 D 膜系统的研究,以及不稳定 D 膜的研究。所有这些系统的共同特征是不稳定性,从而系统中存在快子。这些快子和 D 膜上其它激发态一样,是开弦的态。快子通常由虚质量来刻画,这个质量是弦论中的能量标度。由于弦论中的无限多个有质量的粒子的质量都由弦论能量标度所决定,我们会简单地推断:如果想精确地描述快子系统,我们必须考虑无限多个粒子的效应。很奇怪地,快子其实有一个简单的有效动力学,与无限多个粒子并没有太大关系。因为这个简单动力学描述的存在,我们就可以方便地研究不稳定膜的动力学了,例如不稳定膜是如何衰变的。

不稳定膜的研究不仅涉及弦论本身的一些重要问题,如对偶性以及最一般物理态的动力学,在宇宙学中也可能有重要的应用。很多人用 D 膜反 D 膜系统构造暴涨宇宙学模型。在这个模型中,宇宙中除了通常的三维空间和一维时间之外,可能存在更多的空间维度。D 膜和反 D 膜充满了我们的三维空间,但可能和其余空间垂直。开始的时候,D 膜和反 D 膜之间的位形不一定完全重合,D 膜反 D 膜之间存在的吸引力将它们渐渐地拉近。由于 D 膜反 D 膜之间的吸引力所对应的势能不为零,使得宇宙学加速膨胀从而导致暴涨。最后,D 膜和反 D 膜的碰撞使得这些膜湮灭衰变成相对论性粒子,这就是暴涨宇宙学模型中要求的重新加热,我们的宇宙中的能量和物质起源于这个加热时期。另外一种可能是,开始的时候 D 膜和反 D 膜完全重合,但因为某种原因快子处于其势能的高处,这样快子的不等于零的势能使得宇宙加速膨胀。当快子完全衰变成其它粒子的时候,暴涨结束。在这个模型中,我们并不很清楚宇宙的再加热是如何发生的。

比不稳定膜困难的是闭弦的快子问题。在许多闭弦理论中也存在快子,例如最早被构造的玻色弦理论。在这个理论中,没有费米子,只有玻色子,因此时空的维度很大,是 26 维。这个理论是不稳定的,在弦的激发态中存在快子。这个快子的有效动力学比不稳定 D 膜上快子的有效动力学要复杂得多。有人猜测,当这个快子完全衰变后,时空就不再是 26 维的,而可能是 10 维的,这样弦论就是超对称弦论了。另外一种猜测是,快子衰变的结果是一个两维的时空,在这个时空中,弦论依然是玻色弦论,不过快子消失了。更有一种猜测认为快子衰变的结果是一个 27 维的时空,这个 27 维的理论很类似于 11 维 M 理论,是玻色弦论的强耦合极限。到底哪种猜测是对的,还是一个都不对,需要我们真正理解了闭弦的快子动力学以后才能作出判断。

3 全息原理和可积系统

全息原理是基于黑洞的量子性质提出的一个新的基本原理,凡是包含量子引力的理论都必须遵从这个原理。

早在 20 世纪 70 年代初,贝肯斯坦(J. Bekenstein)就发现,黑洞应该有一个宏观的熵,熵值正比于黑洞视界的面积,反比于普朗克长度的平方。对于黑洞的一个外部观察者来说,黑洞所占据的空间由它的视界所决定。假想一个含有很大质量的系统坍缩成黑洞,原系统所占的体积一定大于视界的大小所决定的体积,而原系统的边界面积也大于视界面积,所以黑洞的熵小于原系统边界的面积(乘以一个常

数)。如果热力学第二定律在坍缩的过程中是成立的,这样原系统的熵小于黑洞的熵。两个不等式导致一个新的不等式,就是一个系统的熵小于它的边界的面积。这就导致了全息原理:一个系统原则上可以由它的边界上的一些自由度完全描述。

全息原理在马德西纳(J. Maldacena)猜测中第一次被实现。这个猜测说,当弦论或者 M 理论的时空背景是反德西特(anti-de Sitter)空间的时候,它的任何动力学都可以有一个低一维的场论来实现,也就是说,弦论完全等价于一个低一维的场论。由于反德西特空间的对称性,场论中的对称性要大于原来的洛伦兹对称性,这个比较大一些的对称群叫做共形对称群。当然,人们可以通过改变反德西特空间内部的几何来消除这个对称性,从而使得等价的场论没有共形对称性。

马德西纳猜测虽然没有得到完全的证明,但很多计算表明这个猜测是正确的。这个猜测可以从两个角度来研究,最简单的就是只研究反德西特空间的经典引力,其对应的场论描述并不一定是经典的,是场论中的一种特殊的极限;第二个角度是不但研究反德西特空间上的经典引力,还研究量子涨落的效应,但即使利用弦论,这样的计算也是十分困难的。所以,大多数研究马德西纳猜测的工作局限于前者。直到最近几年,人们才开始研究这个猜测中的弦论效应。

因为反德西特空间上的弦论的计算很复杂,所以这些新的计算也是在一个极限下作出的。在这个极限下,反德西特空间过渡到一个新的时空(叫做 pp 波背景),在这个时空背景中,人们可以精确地计算弦的无限多个态的谱,反映到对偶的场论中,我们就获得场论中一些算子的反常标度指数^[2]。通常,在一个有着强相互作用的场论中计算一个算子的标度指数也是一个困难的问题,幸运的是,人们利用一些技巧可以完成这个计算,所得的结果与弦论的计算一致。这个技巧是基于场论中算子的构造以及场论的哈密顿量的简化。后来人们发现,算子的这种构造与过去将弦看作是一小段一小段的弦的微单元(bits)的组合很类似。当然,弦并不是由有限个微单元组成的,要得到通常意义下的弦,我们必须取一个极限,在这个极限下,每个微单元的长度趋于零,而微单元的数目趋于无限大,使得弦本身对应的物理量如能量动量是有限的。在场论的算子构造中,如果我们要得到 pp 波背景下的弦态,我们恰好需要取这个极限。

所以,在这个特别的例子中,通过全息原理的场论描述,我们重新获得了过去弦的微单元模型。至于微单元模型是不是一个普适的构造,我们并不清楚。但是在 pp 波这个特殊情况下所获得的结果是第一次对弦论中的全息原理的具体实现,不但如此,人们还发现,在这个背景之下,对应的场论描述很可能是一个可积系统。

4 弦宇宙学

1998 年至 1999 年之间,型 Ia 超新星的数据分析使得两个独立的小组得出一个惊人的结论:我们的宇宙不但在膨胀中,还在加速膨胀中^[3]。早在广义相对论的创立之初,爱因斯坦就将他的理论应用到宇宙学中,发现他的方程不允许有静态宇宙,那时他还相信宇宙是静态的。这个结果非常容易理解,因为万有引力是吸引力,宇宙要么在引力的作用下坍缩,要么作减速膨胀。为了得到一个静态的宇宙,爱因斯坦在他的方程中引入一个很简单的项,这就是宇宙学常

数项。这一项的作用是为引力提供一部分排斥力,在这个排斥力和原来的引力的平衡下,宇宙可能是静态的。

当然,后来的哈勃的观测表明,宇宙不是静态的,而是在膨胀。从哈勃的发现到上世纪末,人们一直认为宇宙虽然在膨胀,膨胀的速率在减小,也就是说引力在我们的宇宙中占主导地位。但是由于测量膨胀速率以及减速度需要精确地测量宇宙尺度上遥远的天体,哈勃常数一直没有得到准确的测量,减速度更是难以测量。型 Ia 超新星是宇宙尺度上的天体,同时又可以作为标准烛光,所以直到几年前减速度才被发现原来应该是加速度。

其实,即使当宇宙学界的主流认为宇宙是减速膨胀的时候,已经有一些人认为宇宙中应该有很大一部分能量我们至今还没有观察到,就是所谓的暗能量。这种暗能量的一个特别的形式是真空中,真空能是相对论性不变的,所以为爱因斯坦的宇宙学常数提供了一个物理上的起源。根据暴涨宇宙论,宇宙在早期经过一个极快的加速膨胀时期,这个时期直接导致后来的宇宙在空间上是平坦的。爱因斯坦理论要求,一个空间是平坦的宇宙中的能量密度必须达到一个临界值。可是,到了上世纪 80 年代末,许多人认识到,物质所含的能量密度(包括所谓的暗物质)没有达到临界密度,所以有些人推测宇宙中应该存在一种暗能量,这种暗能量的状态方程不同于物质的状态方程;特别是因为暗能量的压强是负的,所以导致斥力而引起宇宙加速膨胀。

宇宙学观测得到的暗能量的能量密度当然非常小,占总能量密度的 70% 左右,也就是每立方米有 1 个质子。用自然单位制,能量密度的量纲是能量的 4 次方,暗能量所对应的能量是 1‰ 电子伏特。

暗能量如果是宇宙学常数,那么能量密度要么是不变的,要么变化很慢。宇宙学常数这个问题是个非常老同时非常困难的问题。自从量子场论被确立为描述除了引力外所有其它相互作用力的理论之后,人们一直为一个基本问题所困惑:量子场论中存在零点能,这个零点能是无限大。在讨论粒子相互作用的时候我们可以忽略零点能;但任何形式的能量都和引力耦合,零点能也不例外。毫无疑问,物理世界中和引力耦合的零点能非常小,不然我们早就能通过引力现象观察到零点能了。消除无限大零点能的办法是引入最小距离,如果这个最小距离是普朗克长度,所得到的零点能非常大,与观测值差了 120 个量级;用能量来对比,也差了 30 个量级,这就是宇宙学常数问题。

自从 1998 年直接观测暗能量以来,新的实验如 WMAP 对暗能量有间接的支持^[4]。这几年来,实验和数据分析的工作不断出现,理论模型当然更多,可惜至今还没有一个为多数专家接受的理论。理论上的困难毫不奇怪,因为暗能量的问题涉及到基本理论的最基础的部分。仅仅从最简单的理论估算与实验值的巨大差别这一点,我们就能得出结论:我们对量子场论和引力的结合是多么地无知。

尽管理论上还存在巨大的困难,研究超弦的人已经开始提出弦论中的暗能量模型。一种观点认为,既然暗能量的密度和临界密度接近,那么暗能量本身就应该和宇宙的尺度有关。用我们前面解释过的全息原理,可以将暗能量与宇宙尺度联系起来^[5]。一个简单的看法是,如果我们认为暗能量就是零点能,这个零点能对应的短距离截断(紫外截断)不能任意地小,最小值应该由视界的尺度决定,而后者是红

外截断;如果紫外截断太小的话,给定的红外截断之内就可能形成黑洞,从而用来计算零点能的方法也就失效。当然,这只是一个简化后的图像,真正的机制还有待发现。

另外一个模型与上面的观点完全相反,认为暗能量的大小是随机的,我们观测到的值之所以这么小是因为人类的存在,这就是所谓的人择原理。人择原理的应用需要假定一些物理常数如宇宙学常数不是真正的常数,而是可变的,这样,宇宙中存在许多不同的区域,每个区域中的一些物理常数与其它区域中的不同。如果要产生类似人类这样的智慧生物,物理常数不能非常任意。温伯格在上世纪 80 年代末做过一个研究:假设星系的存在是产生智慧生物的前提,那么要形成星系就会给宇宙学常数一个很大的限制。他的计算结果是,宇宙学常数不能超过临界密度的 100 倍。和量子场论的计算结果相比较,这是一个很好的结果了。弦论能不能为人择原理提供一个应用的场合?最近的一些研究说明不但可以,而且是目前为止人们所知道的最理想的应用人择原理的理论框架。弦论中的这些发现可以用一个技术名词来概括,即是“弦景观”。其图像表明,弦论中存在许许多多不同的“真空”,这些真空是一个极大的景观中的极小局域。弦景观类似一个山脉,有山峰和山谷,而极小就是山谷,在一个山谷的最低点,宇宙学常数的值和另一个山谷最低点的值不同,并且,这些值可以无限地接近我们观测到的值。

如果相信弦景观,我们就必须研究这个景观的大小,有多少山谷,宇宙学常数以及其它物理学常数在这些山谷中的分布,然后找出那些物理学常数很接近我们物理世界的山谷。这么做并不能保证我们能够用弦论作出一些精确的预言,因为很有可能存在一些非常类似我们的世界的山谷,这些山谷只是在不可观测的微小细节上与我们的世界不同。真是这样的话,弦论就会有一个悲观的前景。如何避开这个黯淡的前景将是弦论的发展动力之一。

2003 年公布的 WMAP 小组对微波背景辐射的分析结果昭示了精确宇宙学时代的来临^[4]。通过对微波背景辐射的各向异性的更为精确的观测,人们第一次将许多重要的宇宙学参数确定到只有 10% 的误差范围内。除了支持暗能量的存在之外,这个实验在很大程度上检验了暴涨宇宙学的预言。现在达到的共识是,暴涨宇宙学对微波背景辐射以及早期密度涨落的预言是正确的,而后者与宇宙大尺度结构的形成有直接关系。

宇宙在非常早的时期有一个暴涨阶段,在这个阶段中宇宙被一个缓慢变化着的标量场能量所主导,从而快速地膨胀。在膨胀的同时,标量场的量子涨落导致宇宙空间的曲率涨落,并且因为加速膨胀的关系被固定了下来。在暴涨结束后,这些涨落逐渐地进入我们的视野并且引起物质的成团以及微波背景辐射的各向异性,后者的具体特征与暴涨时期的动力学有关,当然也与后来的宇宙演化有关。所以,我们可以从微波背景辐射的各向异性读出极早期的宇宙历史,特别是引发暴涨的基本标量场的具体动力学。当然,目前的观测还不足以让我们确定关于标量场的太多的参数。有一点可以确定,这是一个慢慢滚动的标量场,它在暴涨时期沿着势能曲线作缓慢的滚动。

慢滚的标量场在粒子模型中非常特别,因为标量场的势能中必须含有很小的无量纲参数,这在粒子模型中是不自然的,人们常常将这类问题称作微调问题。这个自然性问

Weinberg 角反常现象的理论解释

丁 勇¹ 马伯强²(北京大学物理学院, 博士研究生¹; 长江特聘教授、博士生导师² 北京 100871)

〔摘要〕 标准模型在过去 20 年中经历了大量的实验检验, 已被人们所接受。Weinberg 角(或称弱角)是标准模型中一个极其重要的物理量, 它的精确值对于检验标准模型有着至关重要的作用。2002 年, NuTeV 实验组报道了他们测量到的 Weinberg 角的值与在其它电弱过程中测量到的该角的值不同。这一反常现象引起了人们极大的关注, 无论能否在标准模型内解释这种现象, 对粒子物理都将是一个推进。为了解释这种反常现象, 本文在标准模型的框架下, 推导了核子海中奇异-反奇异夸克分布不对称对 Paschos-Wolfenstein 关系的修正, 并计算了光锥介子-重子波动模型和手征夸克模型下, 奇异-反奇异夸克分布的不对称性, 考查了这种不对称性对 Weinberg 角测量值的影响。结果表明, 核子海中奇异-反奇异夸克分布的不对称性所引起的修正, 能够在很大程度上降低 NuTeV 测量到的 Weinberg 角的值与标准模型预言值之间的差异, 可以作为 NuTeV 反常现象的一种合理的解释。

〔关键词〕 Paschos-Wolfenstein 关系 温伯格角 核子海 奇异反奇异夸克分布不对称

〔中图分类号〕 0572.2 〔文献标识码〕 A 〔文章编号〕 1000-7857(2004)11-0019-04

THEORETICAL EXPLANATIONS FOR THE WEINBERG ANGLE ANOMALY

DING Yong MA Bo-qiang

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Weinberg angle (or weak angle) is so important that it can partly confirm the Standard Model (SM), which has been widely

收稿日期: 2004-09-25。

作者简介: 丁勇, 女, 1974~, 北京大学物理学院(100871), 主要研究方向为粒子物理, E-mail: dingyding2001@163.com。

题一直是一个没有解决的问题。最近, 有人在弦论中成功地构造了满足微调条件的标量场, 但是这个构造还是很特别, 也就是说构造本身就带来一个自然性问题。

除了解决暴涨标量场势能的自然性问题之外, 弦论还需要面对的一个问题是, 今后的微波背景辐射的更为精确的观测有没有可能揭示一些关于量子引力的信息以及弦论效应的信息? 近年来已经有了一些研究, 例如, 暴涨时期的快速膨胀可能放大了非常小的距离上的物理效应, 使得宇宙大尺度结构的关联函数以及微波背景涨落的关联函数偏离了“标准”暴涨模型的预言。笔者曾经和学生一起计算过时间与空间的不对称性对微波背景辐射的影响, 发现这种影响可能已经在 WMAP 实验的结果中体现出来了。

宇宙学毫无疑问是将来检验弦论是否是一个正确的理论的重要领域之一, 也许是最重要的领域, 所以, 我们在未来的 10 年到 20 年中会目睹弦论与宇宙学交叉研究的飞速发展。

5 总结

以上大略地描述了近几年来弦论在一些方向上的发展, 由于版面的关系, 还有若干有趣的发展没有提及。重要的不是面面俱到地总结各方面的发展, 而是透过某些发展看到未来的潜在发展方向。当然, 预言科学的任何一个学科的未来发展是危险的, 因为科学史告诉我们最重要的发现

往往是不可预见的。尽管如此, 一些重大的未来发现还是可以已经从已经存在的一些线索中看到。坦率地说, 唯一让笔者有信心的方向就是弦论宇宙学, 或者更广义地说, 微观物理在宇宙学中的应用和验证。无论是暗能量问题, 还是暴涨宇宙时期的微观物理过程在宇宙范围中的体现, 在今后许多年都将是弦论学者和宇宙学家以及其它相关领域的研究者们的热门研究课题。

参考文献 (References)

- [1] A Sen, Rolling tachyon dynamics in open string theory[J].JHEP, 2002(0204):048, hep-th/0410103
- [2] D Berenstein, J. M. Maldacena and H. Nastase. Strings in flat space and PP waves from N=4 superyang-mills[J].JHEP, 2002(0204):013
- [3] A G Riess et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant [J]. Astron. J., 1998 (116): 1009; In: S. Perlmutter et al. Measurements of omega and lambda from 42 high red shift supernovae [J]. Astrophys. J., 1999(517):565
- [4] C L Bennett et al. First year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: determination of cosmological parameters[J]. Astrophys. J. Suppl., 2003(148): 1
- [5] M Li. A Model of holographic dark energy. hep-th/0403127, to appear in Phys. Lett. (责任编辑 胡春华)