

超弦与 M 理论

常 哲

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1. 弦与相互作用统一理论

20 世纪物理学的两个最伟大成就是量子论与相对论。量子场论描述微观世界的基本粒子及其相互作用。广义相对论作为引力理论描述像星体、星系、黑洞及宇宙一类大尺度、巨质量体系。理解一般物理系统要么利用量子场论,要么求助于广义相对论,不会交叉动用这两个不同的理论体系。但是的确存在一些极端物理情景既涉及巨质量(需要广义相对论)又牵连极小距离尺度(需要量子场论),这类体系的正确理解必须建立在一个广义相对论与量子场论相互协调的框架内,换句话说就是需要量子引力理论。典型的例子就是所谓的时空奇异问题(singularities),包括黑洞的中心点、大爆炸前的宇宙状态等。不幸的是量子论与广义相对论并不相互包容:广义相对论的任何量子修正计算都无法得到有意义的物理结果。或者说广义相对论是一个不能重整化的理论。问题的本质可以追溯到在普朗克尺度量子场论已经难以很好描述粒子之间的相互作用。超弦理论试图用在普朗克尺度修改广义相对论性质的办法解决量子场论与广义相对论两大基本理论体系的不相容问题。弦理论的基本出发点是:自然界的基本构成不是点粒子而是尺度为普朗克长度大小的一维弦,弦的不同振动模式则构成我们观测到的粒子谱。这种物理图像的基本变更更使得引力与量子场论可以自然地融合在一起。超弦理论是目前量子引力理论的惟一候选者。超弦的量子理论没有紫外发散,弦振动谱包含引力子(无质量、自旋为 2 的基本粒子)。因此可以说弦理论提供了一个包含引力与其他相互作用的有限量子理论。但是,超弦理论还存在不少亟待解决的问题。首先,弦理论是一个 10 维时空而不是 4 维物理时空中的自恰理论;其次,自恰的超弦理论并不像我们希望的那样是自然界惟一的描述 4 种基本相互作用的大统一理论,而是存在 5 种不同的弦理论,即第一型弦理论、第二型 A 弦理论、第二型 B 弦理论、SO(32) 杂化弦理论、 $E_8 \times E_8$ 杂化弦理论。

2. 时空紧致化与大额外维空间

第一个问题的解决办法称为紧致化,取 9 个空间

自由度中的 6 个为紧致化小尺度空间。当紧致化空间比今天的高能加速器达到的尺度还小时,我们的世界就表现为 3+1 维物理时空(见图 1)。当然并非所有的 6 维紧致流形都可以用来作紧致化。弦紧致化理论中最重要的一类流形被称为 Calabi-Yau 流形。



图 1 空间紧致化

由于 Calabi-Yau 流形并不惟一,每一种 9+1 维弦理论通过紧致化对应很多种不同的 3+1 维弦理论。这些 3+1 维理论中的几种模型非常接近现实物理世界,特别是包含:SU(3) \times SU(2) \times U(1) 规范群、手征费米子、3 代夸克与轻子以及 N=1 超对称。但是到今天为止还没有人找到一种与观测物理世界(包括各种基本粒子的质量)完全定量一致的紧致化方案。近 20 年来这方面的努力一直没有中断过。近期弦紧致化方面最引人瞩目的工作与所谓的大尺度额外维空间有关。在通常的弦紧致化方案中引力与规范场都来源于闭弦,实验对 4 种相互作用规律在小距离尺度上的检验给出紧致空间尺度的上限。例如,对 QED 的检验到 $(\text{TeV})^{-1}$ 尺度就意味着紧致空间尺度不能比 $(\text{TeV})^{-1}$ 更大,否则我们的计算就需要使用高维 QED 理论。最近几年有关 D-膜理论的研究取得重大进展,弦理论家们逐渐认识到 D-膜可能是自然界弦图像中的重要组成部分,规范场有可能生存在 D-膜上。这样一来 6 个空间方向就可以紧致到一个流形 K,过流形 K 的某一给定点存在一些与未紧致化方向平行的 D3 膜(见图 2)。所有的已知物质场与规范场都生存在这些 D3 膜上,而引力则来源于 10 维空间的闭弦。这类基于 D 膜理论的紧致化图像改变了大家熟悉的卡卢查-克莱茵

理论。这里紧致化空间尺度大小不影响规范场,物质与规范场总是存在于 $3+1$ 维时空。对紧致空间尺度上限的惟一限制来源于对小尺度引力的平方反比关系的检验。使基本引力尺度降低到其逻辑最低极限,并利用各种途径把这种极限推移至 TeV 水平。这就需要引进尺度为 1 费米的紧致化空间。对高能物理学家来说这类空间是巨大尺度的额外维空间。在 D-膜理论发展之前是不敢奢望这么大尺度未知空间的。如果的确如此,超弦理论的尺度也将在 TeV 附近,未来高能加速器就可以看到弦。也许超弦理论主导理论物理的时代很快就会来到,长期孜孜不倦刻苦工作而又饱尝无实验数据支持的责难与压力的超弦理论家们的面前会出现一片灿烂前景。如果这些不是转瞬即逝的海市蜃楼的话,粒子物理的标准模型就必须修改,早期宇宙的演化图像也需要更新。在新世纪到来之际,人类也许正处在一个崭新的时空观、粒子间相互作用与引力相融的大门口。爱因斯坦晚年的大统一梦想正在越来越接近实现。历史能否重现上个世纪物理与技术大变革的场面,即将建成的新一代高能加速器会给出回答。

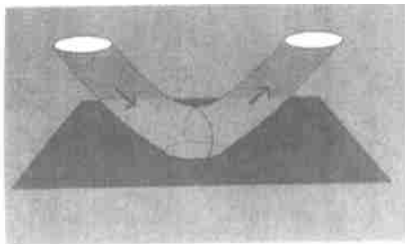


图2 通常的4维时空是10维物理时空的D3膜

3. 对偶性与 M 理论

弦理论的惟一性问题可以通过对偶性方法而得到解决。对偶性最开始是作为假设而被引入弦理论的,实际上到现在这些假设也没有得到严格的证明。但是由于已经通过各种各样的非平凡检验,在该领域工作的大多数人都相信弦理论中的对偶性的确是

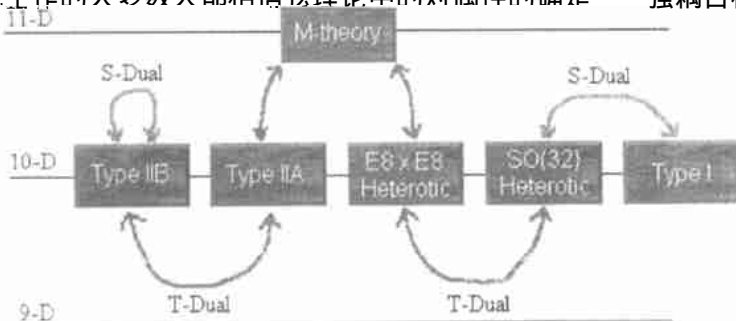


图3 不同弦理论之间的对偶性

存在的。所谓的对偶性是说两个或多个明显不同的弦理论实际上是等价的(见图3)。对偶关系有两个最重要的特点:

(1) 通过对偶映射一个弦理论中的基本粒子在另一个弦理论中表现为复合粒子。基本粒子与复合粒子的分类变得毫无意义,因为这依赖于选择哪个特殊的理论来描述该系统。

(2) 对偶性通常把一个强耦合理论与一个弱耦合理论联系在一起。如果 g 与 g' 分别表示两个理论的耦合常数,对偶变换使得它们之间满足简单关系 $g = g'^{-1}$ 。因此按耦合常数 g 进行的微扰展开在对偶理论中包含 g 的非微扰效应。特别是一个理论中的树图(经典)结果给出对偶理论中的微扰求和与非微扰效应。很明显对偶性是弦量子论而不是其经典极限的性质。为人们所熟悉的对偶有好几种,包括:

① 第二型 A 弦理论与第二型 B 弦理论之间的对偶。

② $E_8 \times E_8$ 与 $SO(32)$ 杂化弦之间的对偶。

③ $SO(32)$ 杂化弦与 $9+1$ 维第一型弦理论之间的对偶。

④ 紧致在 4 维环面 T^4 上的 $E_8 \times E_8$ 与 $SO(32)$ 杂化弦与 $K3$ 表面上的第二类 B 型超弦理论之间的对偶。

⑤ 紧致在 6 维环面 T^6 上的 $E_8 \times E_8$ 与 $SO(32)$ 杂化弦的自对偶,即耦合常数为 g 的理论等价于耦合常数为 g^{-1} 的理论。

⑥ 第二型 B 超弦理论是自对偶理论。

上面提到的几种对偶性可以分为两类: T-对偶指紧致在半径为 R 的圆上的一种理论与另一个紧致在半径为 $1/R$ 的圆上的理论之间的等价。所以 T-对偶联系的两个理论一个紧致在很小的圆上而另一个紧致在一个很大的圆上(甚至完全不紧致),但却描述相同的物理; S-对偶讨论一种理论的强耦合极限与另一种理论的弱耦合极限之间的等价性。

通过各种紧致化下不同弦理论之间的对偶性,我们可以得到弦理论的一个大统一图像:存在一个现在被称为 M 理论的 $10+1$ 维单一理论, M 理论在不同的极限下表现为不同的弦理论。例如,我们把 11 维的 M 理论紧致到一个小圆上(图4)可以得到第二型 A 超弦理论;把 11 维的 M 理论紧致

到一个很短的线段上(图5)则得到 $E_8 \times E_8$ 的杂化弦理论。M 理论的低能极限是 $10 + 1$ 维超引力理论。有关 M 理论的研究工作还处于初级阶段,至今甚至 M 理论的定义也还不明确。但一般认为起码在无穷动量系 M 理论可以由矩阵理论来描述。M 理论的出现一度使某些理论物理学家乐观地认为我们现在正处于一个与 20 世纪初量子论发展初期非常相似的阶段。

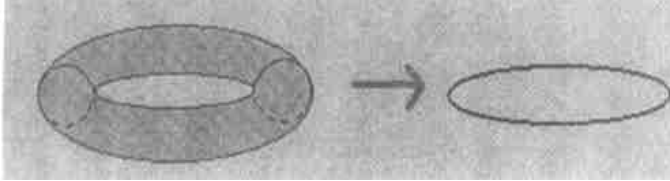


图4 紧致在小圆上的 11 维 M 理论等价于 10 维弦理论

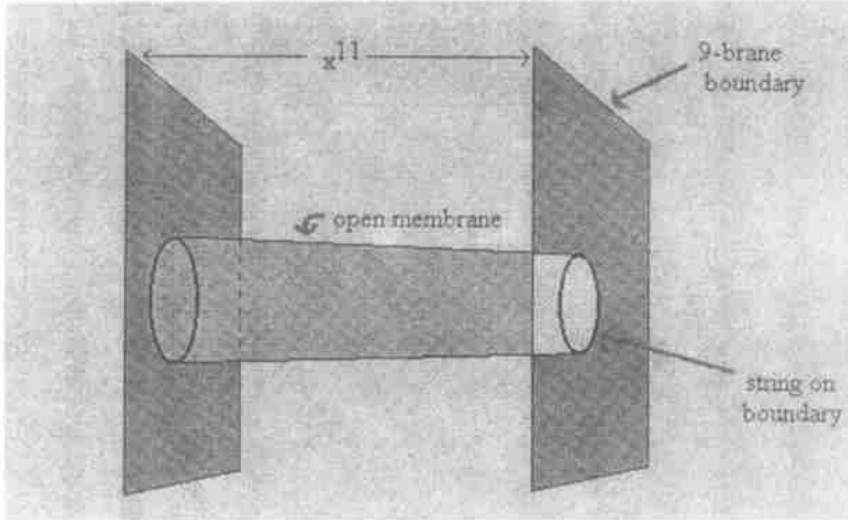


图5 紧致在短线上的 11 维 M 理论等价于 10 维弦理论

4. AdS/ CFT 对应

一种 Anti-de Sitter (AdS) 空间中的第二类 B 型超弦与其边界上的共形场论 (CFT) 之间的对偶性假设,成为最近几年弦理论界最引人瞩目的研究课题。这种对偶性也被称为马尔达纳斯 (Maldacena) 假设。AdS/ CFT 对应给出规范场与超弦物理可观测量间的明确对应。规范场与弦理论的关系一直是理论物理学家非常关心的一个问题。实际上弦理论的引入初期并非像现在的大统一理论,而是一个强子相互作用理论,可以很好地描述强相互作用的一些性质。以后由于 QCD 理论的巨大成功才淡出强子物理领域。如果仔细考察 $SU(N)$ 规范场的大 N 展开形式,就可以发现与弦理论的微扰展开具有相同的形式。这种形式的等同不是偶然的。随着对偶性的深入研究,逐渐清楚弦理论可能是 QCD 的对偶理论。物理

学家们希望这种对偶性可以准确描述 QCD 强耦合区物理。实际上利用简单的超引力计算已经得到包括夸克禁闭、真空、胶球质量及拓扑极化在内的很多有趣结果,并且定性地与强耦合格点 QCD 相同。使理论物理学家感到惊奇的是,AdS/ CFT 对应给出的胶球激发态质量与基态质量之比在定量上也与格点 QCD 的结果非常一致。这使得超弦理论(或其低能近似:超引力)成为继格点 QCD 之后又一种计算胶球、混杂态的有用工具。由于超弦理论处理高维空间的线性方程远比格点 QCD 的计算简单,所以容易得到更多更好的结果。

AdS/ CFT 对应研究的出发点是第二类 B 型超弦理论中大 N 极限下 N 个重合 D3 膜。在大 N 极限下该系统有两个对偶表述,首先是弦理论(或超引力理论)经典运动方程的一个解;其次是作为一个 D-膜体系。两种描述的等价性要求导致马尔达纳斯提出如下猜测: $AdS_5 \times S^5$ 上的第二类 B 型超弦理论等价于 $3 + 1$ 维 $N = 4$ 的超对称 $SU(N)$ 规范场理论。这类超弦理论的物理格林函数与 AdS_5 边界上的 $N = 4$ 的超对称 $SU(N)$ 规范场理论中协变算子的关联函数之间存在一一对应关系。AdS/ CFT 对应有多种推广形式,基本模式为:流形 M 上的超弦(或 M) 理论等价于流形 M 的边界 ∂M 上的量子场论。量子场论的具体形式取决于流形 M 与所

讨论的超弦理论。

理解 AdS/ CFT 对应最困难的地方是它讨论的是不同维数时空上的两个量子理论之间的对偶性,而不像通常熟悉的高维经典理论与低维量子理论之间的等价性。AdS/ CFT 对应的关键是高维量子理论是超引力,很多人认为量子引力的几何不是通常几何而是非对易几何。非对易几何蕴涵一类特殊的指数正规化方案,导致非对易几何体系的世界熵远远小于通常几何体系的世界熵。这构成所谓全息原理的物理基础。AdS/ CFT 对应是全息原理的一个具体实现。最近,非对易几何与弦理论关系的研究已成为该领域最重要的研究方向之一。

5. 中国的超弦理论研究

早在对偶理论的发展初期,我国物理学家就加

入了弦理论的研究工作。郭硕鸿教授在文革期间非常困难的环境中在国内首先系统介绍了超对称与弦理论。从20世纪80年代初期开始,也就是所谓的第一次弦革命时期,中国科学院理论物理所、高能物理所、北京大学、清华大学、复旦大学、浙江大学、西北大学等单位都相继开展了超弦理论研究。他们在弦量子化、代数结构、共形场论、圈图计算、紧致化等方面都作出了国际水平的高质量工作,得到国际同行的认可。1989年5、6月间召开的北京香山《弦理论与量子引力》国际会议是对这阶段研究工作的一次重要检阅与总结。包括格布斯、瓦砧、扎莫咯德契可夫等在内的几十位国际著名弦理论家参加了大会,显示我国的弦理论研究已经在国际上产生了影响。

90年代以后,在国外接受系统训练的一批青年专家陆续回到国内。他们大都在弦理论的某一领域卓有成就,且与国外研究机构有密切联系。在老一辈理论物理学家指导下,我国的青年物理学工作者正逐渐成为国际超弦理论研究领域的一支重要力量。在一些重要研究方向已经独立作出重要成果,例如:

- ⑧ 典型域上的分析与 AdS/CFT 对应;
- ⑧ 非对易几何与 M 理论;
- ⑧ 超引力系统的严格解;
- ⑧ Randall-Sundrum 模型
- ⑧ D-膜与非对易几何
- ⑧ 矩阵理论

⑧ 对偶性与塞伯格-威滕理论

⑧ 黑洞熵与霍金辐射

值得指出的是这些研究工作大都与国家杰出青年科学基金的支持有关,这项基金已经连续几届支持了多位在弦理论领域工作的青年物理理论工作者。这使得我国的弦理论研究可以跟随国际研究潮流,并作出出色成绩。

与国家整体大环境相关,我国的弦理论研究虽然经过很多人的共同努力取得了一批优秀成果,但整体上还与国际先进水平有很大差距。周围国家,印度已经产生大师级人物,研究队伍至少比我们大一个量级,形成了良好的研究环境;日本、南朝鲜最近几年在弦理论研究领域也投入了很多的人员与经费,取得很快发展。如果我们不奋起直追、增加支持力度、改善研究环境、组织壮大并稳定高水平的研究队伍,就很难参与国际竞争并取得一席之地。

“十五”期间是我国发展壮大的重要时期,也是弦理论发展的关键几年。我们要力争赶上弦理论快速发展这班车。基金委今年发布的理论物理及其交叉学科发展研究指南把超弦理论定为量子场论最重要的研究方向。要以此为契机组织好队伍,广泛吸引年轻人参加,定期举办国际、国内讨论会。在一两个能影响全局的重要研究方向进行攻关,发挥我们的优势。只有作出有特色的重要工作才能取得应有的国际地位。

科苑快讯

《自然》披露 ISI 统计数据错误

据《科学时报》报道英国《自然》杂志在社论中披露了提供论文引用统计数据的机构——位于美国费城的科学信息研究所(Institute for Scientific Information,简称 ISI)在数据统计中出现错误的事实。社论说:“对于那些主要依靠这些统计数据来对科学表现进行评价的机构和人来说,这种情形令人担忧。”

在ISI公布的引用率最高的热门论文排行榜上,去年由国际人类基因组测序组发表的人类基因组序列测序结果的论文却榜上无名。这一奇怪的现象促使《自然》杂志社对ISI的引用数据的统计数据进行了调查。调查发现,该机构的相关统计数据还有多处不准确的地方。

《自然》社论说:“对于部分研究人员来说,监测

论文的引用统计数据和学术期刊的‘影响因子’是一项非常严肃的工作。比如,许多德国大学都要对其科学家发表论文的期刊的影响因子进行统计,其中涉及到的有关数据直接影响到研究人员和所在部门研究经费的申请。在世界范围内,引用统计数据越来越广泛地被用作评价科学家工作质量的一个省事的标准。

“具有文献计量学分析专长的研究人员们长期以来都在指出统计数据中存在着潜在的错误,在他们的研究中,常常会花相当长的篇幅来保证他们研究中使用的数据确凿无误。但是,当引用统计数据在那些非专业人士的手中时,这种严谨性往往就被抛到九霄云外。比如说,将不同学科期刊的影响因子进行对比是没有意义的,因为不同学科论文的引用状况是不同的。但是,为了对科学家们的表现进行评价,这种比较方法还经常被使用。

(卞吉 编)