

Lectures on String/M Theory

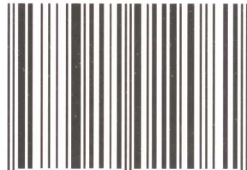
超弦 / M 理论导论

卢建新 朱栋培 编
Edited by Jianxin Lu and Dongpei Zhu

中国科学技术大学出版社
University of Science and Technology of China Press

责任编辑 张泰永
装帧设计 黄彦

ISBN 7-312-01908-0



9 787312 019081 >

ISBN 7-312-01908-0/O · 329

定价：48.00 元

2005 弦/M 理论暑期学校讲稿文集

超弦/M 理论导论

卢建新 朱栋培 编

中国科学技术大学出版社

2006 · 合肥

内容简介

物理学追求的最高目标是物质的统一和力的统一。被称为“万物之理”的弦/M 理论是目前公认的理想候选者,是世界物质科学研究的最前沿。本书是 2005 年在上海举办的关于超弦/M 理论及其最新进展的暑期学校的讲义。五位工作在研究前沿的国外知名专家就目前的热门课题和最新进展做了系统的论述,内容包括超弦与膜理论、扭结超弦、黑洞熵、额外空间维及低能等效宇宙学等。本书对理论物理和数学相关领域的高年级研究生和研究人员是很好的学习资料,对其他研究领域的科技人员也会有所启发。

图书在版编目(CIP)数据

超弦/M 理论导论/卢建新,朱栋培主编. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2006.6

ISBN 7-312-01908-0

I. 超… II. ①卢… ②朱… III. 理论物理学 IV. O41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 032847 号

中国科学技术大学出版社 出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:700×1000/16 印张:17.5 字数:310 千

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册

定价:48.00 元

前 言

2005 年 8 月 1 日至 12 日在中国上海举办了关于弦/M 理论近期进展的暑期学校。该暑期学校的主要目的在于培养该领域和相关领域的研究生和博士后，促进中国国内该方面的研究工作的开展。举办该暑期学校另一动机是纪念世界物理年和爱因斯坦狭义相对论发表 100 周年。本次暑期学校从全国高校及研究单位的申请者中选择了近 50 名学员参加，并主要得到了中国科学技术大学、中国科学院和中国国家自然科学基金委相关项目的资助。

物理学追求的最高目标是物质和力的统一，被称为“万物之理”的弦/M 理论是目前公认的理想候选者，是世界物质科学研究的最前沿。本次暑期学校聘请了五位工作在该领域研究前沿的国外知名专家作主讲。每位主讲人以系列报告的方式，深入浅出地报告了相应领域的进展。来自日本大阪大学的 Ohta 教授系统地讲解了弦理论并讨论了 p-膜及其相应动力学；美国南加州大学的 Bars 教授系统地介绍了超弦理论在扭结空间上表述的新尝试；科罗拉多州立大学 Boulder 分校的 de Alwis 教授介绍了弦宇宙学的一些发展和目前的状况；印度 Tata 研究所的 Dabholkar 教授报告了有关通过弦理论计算黑洞熵的量子修正的最新进展；最后，来自美国康奈尔大学的 Csaki 教授系统地介绍了具有额外维空间下的 TeV 物理等。本书即是这些教授们精彩教学讲义的集成，对理论物理和数学相关领域的高年级研究生和研究人员是很好的学习资料，其他研究领域的科技人员也会从中有所启发。

这次暑期学校在组织和准备方面涉及很多人，没有大家的共同努力难以顺利办成这样的学校。我们要感谢这次暑期学校的秘书们

在准备阶段和学校运行期间的努力，她/他们是：马莉、姚洁梅、林涛和朱琴。我们也要感谢部分研究生的帮助，他们是：吴荣俊、王兆龙、黄伟、肖能超和陈益飞。最后，我们要感谢组织委员会的其他成员：李淼、朱传界、蔡荣根和王小军，正是他们的努力使得这次暑期学校办得很成功。关于本书，我们感谢张鹏飞在排版上的辛勤帮助。

卢建新

中国科学技术大学
交叉学科理论研究中心
2006.6

Preface

The Summer School on the recent trends of String/M theory was held at Shanghai from August 1 through August 12, 2005. The primary purpose of this school was to help train the young Chinese students and postdoctoral fellows in string/M theory and the related mathematical physics, and promote the corresponding research in China. Concurring with this is to celebrate the International Physics Year and to celebrate the 100 anniversary of Einstein's special relativity. The school selected about 50 advanced students and postdoctoral fellows from the universities and research institutes in China and was sponsored mainly by the University of Science and Technology of China and through grants from the Chinese Academy of Sciences and the Chinese National Science Foundation.

The ultimate goal of physics is to seek the unification of matter and forces in nature. String/M-theory, once called 'theory of everything' or 'TOE', is so far the best candidate for this, and is at present the frontier of fundamental research in the basic structures and interactions of matter. This 2005 summer school proceedings consists of a series of lectures delivered by five well-known physicists in theoretical high energy physics community on the recent trends of string/M theory. The speakers gave pedagogical introductions to the current status and developments of this field, covering various topics. Prof. Ohta from Osaka University of Japan gave a basic introduction to string theory and strings and p-branes in string/M theory. Prof. Bars from the University of Southern California spoke on a new formulation of superstrings on twistor space. Prof. de Alwis from the University of Colorado at Boulder talked on the application of string/M theory to cosmology and the related compactifications. Then followed by Prof. Dabholkar from the Tata Institute of India on the new development of calculating black hole entropy using string theory. Finally Prof. Csaki from Cornell University talked about TeV physics related to extra dimensions. These lectures serve the need of entering this field for advanced graduate students and researchers in theoretical physics and the related mathematical field.

This summer school would not have been possible without the effort and dedication of a large number of people involved in both its organizing and

management. We are grateful to our school secretaries: Li Ma, Jade Yao, Tao Lin and Qing Zhu, for ensuring everything went smoothly, both in the planning stages and during the school. It is also pleasure to acknowledge graduate students: Ron-Jun Wu, Zhao-long Wang, Wei Huang, Nen-Cao Xiao and Yi-Fei Chen, for their enthusiasm and help in running the school. We also wish to thank the other members of the organizing committee: Miao Li, Cuan-Jie Zhu, Rong-Gen Cai and Xiaojun Wang, for their efforts in making the school a success. Finally the help from Pengfei Zhang in typesetting of this book is highly appreciated.

Jianxin Lu
The Interdisciplinary Center for Theoretical Study
University of Science and Technology of China
2006.6

目 录

前言.....	I
超弦/M 理论——统一理论的理想候选者（卢建新）	1
报告	
Chapter 1 Lectures on Twistor (Itzhak Bars).....	7
Chapter 2 Lectures on Superstrings and Branes (Nobuyoshi Ohta).....	55
Chapter 3 Potentials for Light Moduli in Supergravity and String Theory (Senarath P. de Alwis).....	107
Chapter 4 Black Hole Entropy and Attractors (Atish Dabholkar).....	140
Chapter 5 Lectures on Extra Dimensions and Branes (Csaba Csaki).....	172
附录 2005 暑期学校日程安排.....	266

超弦/M 理论

——统一理论的理想候选者

卢建新

中国科技大学交叉学科理论研究中心

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中其它三种基本相互作用力(电磁力、弱相互作用力和强相互作用力)统一起来。超弦理论是目前唯一能够从理论上实现这些要求的理论。它自然地将二十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。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性——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概念、时空维数、相互作用等认识的革命,其深刻程度不亚于上个世纪的两场物理学革命:量子力学和相对论,对我们了解宇宙的起源和演化必将起着促进作用。超弦/M 理论的研究也加深了我们对一些基础数学如几何与拓扑学的认识并导致一些新的数学发现。它的研究自然地涉及理论物理、宇宙学和基础数学三学科的交叉。美国权威科技情报机构 ISI 从 2001 年 7 月至今,每月选出一个最近取得显著进展并是目前重要的热门科学研究领域。在理论物理、宇宙学和基础数学各基础研究领域里,膜(branes)、黑洞(black holes)和中微子是目前被选中的三项基础理论研究课题。超弦/M 理论就是将膜作为基本的动力学客体并研究其动力学的理论,希望解决量子引力和与其它相互作用的统一,当然也包括黑洞物理所涉及的一些基本问题。

人们对弦理论重要性的认识始于 1968 年。以前在描写基本粒子相互作用的量子场论中,粒子总是被当作点粒子处理的。在 1968 年至 1973 年这一期间,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扩展体——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。弦可以有两种:开弦和闭弦。开弦具有两个端点,在时空中随时间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,在时空中演化给出一个类似于柱面的两维面。

在 1973 年至 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对弦理论的进一步研究。当时全世界仅有两到三人仍不舍此弦。到 1974 年，他们发现闭弦的粒子谱中总包含一个自旋为 2 的无质量粒子模。从过去对量子引力的研究知道，此粒子应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。弦的尺度应非常小，约为 10^{-35} 米（普朗克尺度）。同时它还要求一种新的对称性，称为超对称，即自然界中两种粒子——玻色子和费米子——之间的一种对称性。在所谓超弦第一次革命期间（1984—1985），人们发现存在五种量子力学意义下自洽的微扰弦理论。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它三种相互作用。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），而且理论上的自洽性自然地将引力和其它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。

弦理论的这些成功当时极大地刺激了人们对该理论的兴趣，引起一些理论物理学家、诺贝尔奖获得者如 Gell-Mann 和 Weinberg（及近期 't Hooft）等人对该理论研究的重视和支持，一些当今著名的理论物理学家如威腾等和一大批有志青年加入了该理论的研究队伍。

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：

1) 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）。但现有的量子微扰自洽弦理论不唯一而是有五种，并且它们在微扰框架内的重要性并没有什么不同。也就是说，我们无法在理论上选择其一而排除其它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五种微扰超弦理论在表面上是不一样的，但实际上它们是等价的。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。建立上述任一可能性都要求我们对弦理论的非微扰性质进行研究。

2) 五种微扰弦的自洽性都要求十维时空和时空超对称，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包括粒子物理标准模型的低能理论但不能完全给出它。这一结果表明如果超弦理论的确可用于描述自然，我们的现实世界一定与非微扰弦理论相关。

3) 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，其它的量应由该理论的动力学决定。特别，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是平坦的并要求弦的相互作用强度很小以使弦微扰展开有效。这些假定与终极理论的要求是相悖的。换句话说，所有微扰弦理论都是极限理论则它们因而不可能成为终极理论。

4) 在超对称的研究中还存在一个十一维的超引力。从微扰弦理论来看，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，十一维超引力就给出一种超弦的低能有效理论。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的存在。

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。如果超弦理论成功，我们的现实世界最有可能与非微扰弦有关。

正是人们对非微扰弦性质的研究从而发现：弦理论中除一维的弦外，还包括有两维面、三维体等高维客体，通称为膜。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。当时大家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。非微扰超弦理论的研究不仅在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它超膜联系起来，同时也将所有的超膜统一在一个理论框架内，预言了一个更大的理论存在。这些超膜作为该理论的基本动力学客体，特别是当弦的相互作用强度较大时（即在弦的非微扰区域），这些高维膜的动力学效应比一维弦还重要。这也从一定程度上说明了为什么微扰弦不能给出完整的低能物理（因它忽视了更重要的高维膜的动力学效应）。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，预言了一个更大理论即目前称为 M 理论的存在性。

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。早期发现的五种微扰弦理论和十一维超引力仅仅作为 M 理论的不同极限理论。 M 理论的这些成功完全回答了上述疑问。 M 理论中这些天衣无缝的对偶关系以及该理论的其它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：即使目前不能肯定现有的 M 理论形式完全正确，至少我们在研究的大方向上是正确的。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，而第二次革命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它们的非基本性。

从科学研究本身来看，研究引力的量子化及其与其它相互作用力的统一是自爱因斯坦以来国际著名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。超弦/ M 理论是目前仅有的能够实现这些理论要求的理论。由于该理论涉及的能标极高，远超出人工加速器所能达到的，我们因此不能对此理论进行直接实验验证。尽管如此，超弦/ M 理论的研究已取得一些可喜的成绩，如我们至今第一次能够为一些黑洞熵提供微统统计解释、为一般黑洞熵提供了定性微统统计解释，第一次成功地实现了量子引力的全息原理即一个高维的量子引力理论等价于一个低一维的非引力量子理论。另外， M 理论研究中所发展的技术和方法目前已被广泛地应用于构造不同的粒子物理模型、宇宙学模型甚至运用到凝聚态物理。这些技术和方法也启发了很多新的物理思想，如解决能量等级问题的 Randall-Sundrum 模型和引力局域化。该理论的研究很可能导致我们对一些基本问题的新认识如时空是不是基本的、引力相互作用是否为基本的等。不管 M 理论的最终形式是什么，弦理论第一次和第二次革命所取得的成绩和产生的影响，以及作为目前唯一的能够实现量子力学和广义相对论的统一的理论，这些都足以使我们相信我们目前从事统一理论研究的大方向是对的。

近期天文和宇宙学观察所取得的进展对 M 理论的发展会起积极的促进作用。首先我们的宇宙是一个包括宇宙不同时期信息的天然实验室。她当然也包括宇宙极早期极高能量残留的信息。我们因此可以用来检验 M 理论的一些预言，比如 M 理论中预言的各种膜和它们预言的一些效应。另外，天体观察同时也对 M 理论的发展有指导意义。比如近期观察的宇宙加速膨胀所暗示的一个很小的但大于零的宇宙学常数（或暗能量），为 M 理论目前的发展提供了指导作用。基于粒子物理或标准宇宙学模型或两者来构造模型解释近期观察，特别是暗能量的结果是一个应积极开展的研究。但要在更深层次上理解近期的天体物理学观察和暗能量，没有一个基本的量子引力理论是不行的。

超弦/M 理论是目前仅有的量子引力理论理想候选者，我们当然不能忽视对该理论的研究并与近期宇宙学观察联系起来。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、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积累和基础研究水平一定会起到积极的促进作用。超弦/M 理论研究涉及的又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课题。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另一次机遇和对中国基础研究的积累、培养高级研究人才、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，我们应在国际上占据一席之地。

M 理论本身还没有被完全建立。中国在超弦的第一次革命和第二次革命中都未能在国际上起到应有的作用。我们在该理论的研究与国际水平与我们的周边国家如印度、日本、韩国，甚至和台湾地区相比都还有一段距离。但 M 理论现有的状态也为我们提供了又一次赶上的机遇。特别是国内一些杰出的年轻研究人员和在该理论研究上具有国际水准的近期回国人员都在力争努力改变国内目前在该理论的研究现状，并取得了一定成绩。今后几年里将会有更多的在该领域做得不错的年轻研究人员加入这一行列。

我们衷心希望这次暑期学校和这本汇集本次学校五位报告人的讲稿专集，与近期其它类似的努力一样，能帮助相关领域研究生、博士后及其他研究人员进入该领域并对他们从事的一些研究工作有促进作用，更希望为将来举办更好的相关学术活动起到抛砖引玉的效果。

Chapter1 Lectures on Twistors¹

Itzhak Bars

*Department of Physics and Astronomy
University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-0484, USA*

Abstract

In these lectures I will discuss the following topics

- Twistors in 4 flat dimensions.
 - Massless particles, constrained phase space (x^μ, p^μ) versus twistors.
 - Physical states in twistor space.
- Introduction to 2T-physics and derivation of 1T-physics holographs and twistors.
 - Emergent spacetimes & dynamics, holography, duality.
 - $\text{Sp}(2, \mathbb{R})$ gauge symmetry, constraints, solutions and $(d, 2)$.
 - Global symmetry, quantization and the $\text{SO}(d, 2)$ singleton.
 - Twistors for particle dynamics in d dimensions, particles with mass, relativistic, non-relativistic, in curved spaces, with interactions.
- Supersymmetric 2T-physics, gauge symmetries & twistor gauge.
 - Coupling X, P, g , gauge symmetries, global symmetries.
 - Covariant quantization, constrained generators & representations of G_{super} .
 - Twistor gauge: supertwistors dual to super phase space. Examples in $d=4, 6, 10, 11$.

¹Lectures delivered at the “2005 Summer School on String/M Theory” in Shanghai, China, and the International Symposium QTS4, “Quantum Theory and Symmetries IV”, Varna, Bulgaria. See also USC-06/HEP-B1, hep-th/0601091

- Supertwistors and some field theory spectra in $d=4,6$.
 - Super Yang-Mills $d=4$, $N=4$; Supergravity $d=4$, $N=8$.
 - Self-dual tensor supermultiplet and conformal theory in $d=6$.
- Twistor superstrings
 - $d + 2$ view of twistor superstring in $d = 4$.
 - Worldsheet anomalies and quantization of twistor superstring.
 - Open problems.