



弦理论是当前物理学前沿领域的挑战性研究课题之一。
它尝试解释额外维度、量子涨落和黑洞。它声称所有物质的基本对象不是粒子，而是弦。

微百科丛书

弦

THE LITTLE BOOK OF
STRING THEORY

Steven
S. Gubser

理论

[美] 斯蒂文·S. 古布泽 著
季燕江 译



重庆大学出版社

弦理论

图书在版编目 (CIP) 数据

弦理论 / (美) 斯蒂文·S. 古布泽
(Steven S. Gubser) 著; 季燕江译. — 重庆: 重庆大学出版社, 2018.4
(微百科丛书)
书名原文: The Little Book of String Theory
ISBN 978-7-5689-1050-7

I. ①弦… II. ①斯… ②季… III. ①理论物理学—普及读物 IV. ①041-49

中国版本图书馆CIP数据核字 (2018) 第069555号

弦理论

XIAN LILUN

[美] 斯蒂文·S. 古布泽 (Steven S. Gubser) 著
季燕江 译

策划编辑: 敬 京 张家钧
责任编辑: 陈 力
责任校对: 邬小梅
装帧设计: 韩 捷

*

重庆大学出版社出版发行

出版人: 易树平

社址: (401331) 重庆市沙坪坝区大学城西路21号

网址: <http://www.cqup.com.cn>

北京盛通印刷股份有限公司印刷

*

开本: 890mm×1240mm 1/32 印张: 7.25 字数: 134千

2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5689-1050-7 定价: 56.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题, 本社负责调换
版权所有, 请勿擅自翻印和用本书制作各类出版物及配套用书, 违者必究

THE LITTLE BOOK OF STRING THEORY

Copyright 2010© by Steven S. Gubser

Published by Princeton University Press.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher.

版贸核渝字(2013)第286号

引 言



弦论是一个谜。它是所谓的万有理论，只是还没有得到实验的验证。它是如此深奥，讨论的都是额外维度、量子涨落以及黑洞。世界怎么会是这样的？万物为什么不能简单一点？

弦论是一个谜。它的参与者们（我也是其中之一）承认，他们还未透彻理解这个理论，但一个接一个的计算却带来了出人意料的漂亮且有关联的结果。从弦论的研究中，人们不由地产生了一种感觉：世界怎么可能不是这样的？这种深刻的真理怎么可能不与现实联系？

弦论是一个谜。它把很多天才研究者从其他迷人的领域吸引了过来，比如从已经有工业应用的超导领域。很少有科学中的其他领域能吸引到如此多的媒体关注。而且它还有大声叫嚣的反对者，他们反对弦论学说的传播并把弦论的成就驳斥为是与实验科学完全无关的。

简单来说，弦论声称所有物质的基本对象不是粒子，而是弦。弦就像小橡皮筋，但非常细而且非常强。一个电子实际上被设想为一根弦，它在长度非常小的尺寸上振动并旋转着，这个尺寸如此之小以至于我们用最先进的粒子加速器都无法探测到。在一些版本的弦论里，一个电子是一个弦的闭合的圈。在另一些版本里，它是弦的一个部分，具有两个端点。

让我们简要地回顾一下弦论的发展历史。

弦论有时被描述为一个颠倒的理论。颠倒的意思是在人们没有理解其结果的深刻含义之前，就推出了理论的相当不错的片段。在 1968 年，人们第一次得到了一个描述弦是如何相互弹开的漂亮公式。这个公式被提出的时候甚至没有任何人意识到它与弦论有关系，这样做是因为在数学上很有趣。人们可以摆弄、检验和扩展它，而无须深入了解它。在这个例子里，深入的理解实际上是随之而来的，包括弦论的洞见，而弦论的洞见又包括用广义相对论描述的引力。

在 20 世纪 70 年代和 20 世纪 80 年代的早期，弦论

濒临被遗忘的边缘。其最初的目标是解释核能，却并不成功。当它与量子力学结合时，又会产生不自洽性，人们称之为反常。反常的一个例子是，如果存在类似中微子但带电的粒子，那么特定类型的引力场会自发地产生电荷。这是糟糕的，因为量子力学需要宇宙在类似电子的负电荷和类似质子的正电荷之间保持严格的平衡。所以，在1984年，当证明弦论里不存在反常时，这个消息就成了一个大解脱。此后，弦论就被认为是潜在的可以用来描述宇宙的一个候选理论。

这个显赫的技术成果开启了“第一次超弦革命”：一个激动人心、让人发狂的活跃时期，尽管它并没有实现它自称的目标，即创造一个万有理论。当时我还是一个小孩，住所离阿斯本物理中心不远，该中心是弦论研究的一个策源地。我记得人们嘟囔着超弦理论是否能够在超导超级对撞机上得到验证，而我在想着关于超级的一切。嗯，超弦指的是考虑了超对称的特殊性质后的弦。那么超对称说的是什么呢？稍后我将努力在本书中清楚地给出解释，但现在，让我们先满足于两个非常片面的陈述。第一，超对称和不同自旋的粒子有关。粒子的自旋就好像是一个陀螺的自旋，粒子永远都无法停止自旋。第二，超对称的弦论是我们所理解的最好的弦论。与之相比，非超对称的弦论需要26个维度，而超对称的弦论只需要10个维度。自然，我们不得不承认，即便是10个维度，仍然多出了6个，

因为我们能感知的只有三个空间的维度和一个时间的维度。作为使弦论成为一个描述真实世界的理论的努力的一部分，我们需要想办法去除那些额外的维度，或找到它们的用途。

在 20 世纪 80 年代剩下的时间里，弦理论家为发现万有理论激烈地竞争。但他们对弦论并没有充分的了解。研究结果表明，弦并不是全部的内容。理论中还需要膜的存在：可以在几个维度上延长的对象。最简单的膜是一张薄膜，就像鼓的表面，一张薄膜在两个空间的维度上延长。它是一个可以振动的表面。还有 3-膜，它可以充满整个我们可以感受到的三维空间，并在弦论所需要的额外的维度上振动。还可以有 4-膜、5-膜……一直到 9-膜。所有这些开始听上去好像有很多是需要消化的，但我们有坚实的理由相信，如果不考虑所有这些种类的膜，你就无法对弦论有感觉。有些理由和“弦对偶”有关。一个对偶是两个表面看起来不一样的对象或观点间的一种关系。一个最简单的例子就是一个棋盘。一种观点认为棋盘是红色背景上的黑色方块；另一种观点则认为棋盘是黑色背景上的红色方块。两种观点（都精确地）提供了一个关于棋盘外表的充分描述。它们不一样，但可以通过红色与黑色之间的互换把它们联系起来。

20 世纪 90 年代中期，人们基于对弦对偶和膜的作用的理解掀起了第二次超弦革命。人们再次努力把这种新的理解用于构建一个可以被称为万有理论的理论框架。这里

的“万有”意思是我们理解和已经验证过的基础物理的所有方方面面。引力研究是基础物理的一部分。电磁场和原子核研究也是。还有，比如电子、质子和中子等构成所有原子的粒子物理研究。尽管弦论的构造可以用来重构我们所知道的世界的粗略轮廓，但它距离一个全面成功的理论还有一些难以克服的困难。那时，我们对弦论了解得越多，就意识到我们不知道的也越多。所以，看起来还需要开展第三次超弦革命。但迄今我们还没有等来。相反，目前的情形是弦理论家正用他们现有的理解层次去勉强应付，利用弦论针对现在或即将发生的实验作出部分描述。其中最有力的努力是沿着将弦论和高能对撞（比如，质子或重离子对撞）联系起来的展开。我们希望我们所探索的联系可能与超对称的思想，或额外维度，或黑洞视界，或同时与以上三者都有关。

现在该讨论弦论的现状了，但让我们先暂时偏离主线，考虑一下我刚刚提到的两种对撞。

感谢日内瓦附近被称为大型强子对撞机（Large Hadron Collider, LHC）的大型实验设施，质子对撞很快将成为实验高能物理学的主要焦点。大型强子对撞机能将沿相反方向运转的粒子束中的质子加速并使它们以接近光速发生头对头的对撞。这类对撞是混乱且不可控制的。实验物理学家要找的是一个罕见事件，一次可以产生出一个极重且不稳定的粒子的对撞。一个尚在猜测中的粒子，被

2013年3月14日，欧洲核子研究中心宣布，此前在实验中探测到的新粒子确认是希格斯玻色子。探测到这种粒子的概率非常小，大约需要一万亿次质子与质子的对撞才能探测到一次。——译者注

称为希格斯玻色子（Higgs boson）^①，它被认为是电子质量的来源。超对称预言了很多其他粒子，如果它们被发现了，这将是弦论走在正确轨道上的一个清晰的证据。还有一个极小的可能性，质子与质子对撞将会产生微型的黑洞，随后它的衰变将会被观察到。

在重离子对撞实验中，一个金或铅的原子被剥掉它所有的电子，然后让它在进行质子与质子对撞的机器里旋转起来。当重离子发生头对头的对撞时，它甚至比一次质子与质子的对撞还混乱。据说质子和中子将会融进它们的组分（即夸克和胶子）里。然后夸克和胶子会形成一种流体，它会膨胀、冷却，最终凝结回粒子，这些粒子将被探测器观察到。这种流体被称为夸克-胶子等离子体。它与弦论的联系取决于将夸克-胶子等离子体和一个黑洞的对比。奇怪的是，能与夸克-胶子等离子体对偶的那种黑洞并不在我们日常经验中的四维空间里，而是在一个弯曲的五维空间中。

需要强调的是，弦论和真实世界的联系是推测性的。超对称可能根本就不存在。大型强子对撞机中产生的夸克-胶子等离子体实际上并不太像一个五维黑洞。令人激动的是，弦理论家正在投下他们的赌注，他们与其他形形色色的各种理论家一起，正屏住呼吸等待可能证明或击碎他们希望的实验发现。

本书将逐步建立现代弦论中的一些核心概念，包括对对撞机物理学潜在应用的进一步讨论。弦论有两个基础：量子力学和相对论。在此基础上，弦论已在好几个方向上发展起来了，但我们很难对它们（甚至是其中的一小部分）作出恰当的评价。本书讨论的主题代表了弦论的一个切片，它很大程度上避免了理论中更加数学化的一面。主题的选择也反映了我的偏好和偏见，甚至可能也反映了我对这个学科理解的局限性。

我写作本书的另一个选择是，我将讨论物理学而不是物理学家。这意味着我将尽力告诉你弦论是什么，但我不会指出是谁发现了它们（事先说一句，这里面的发现大多数都不是由我完成的）。要讲清楚把某个思想恰当地归于某人是困难的，让我们先问问是谁提出了相对论。阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein），是不是？是——但如果我们仅仅停留在这个名字上，我们将错失很多东西。比如，亨德里克·洛伦兹（Hendrik Lorentz）和亨利·庞加莱（Henri

Poincaré) 在爱因斯坦之前都曾做过重要的工作；赫尔曼·闵可夫斯基 (Hermann Minkowski) 引入了极其重要的数学框架；大卫·希尔伯特 (David Hilbert) 独立完成了广义相对论中的一个关键部分。还有几个更重要的早期人物，比如，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell)、乔治·菲茨杰拉德 (George FitzGerald) 以及约瑟夫·拉莫尔 (Joseph Larmor) 也值得一提。此外，还有一些晚近的探索者，比如，约翰·惠勒 (John Wheeler) 和苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar)。量子力学的发展就更加复杂了，因为这一领域缺少一个像爱因斯坦那样的人物——其贡献凌驾于所有人之上。相反，这是一个迷人的多种多样的群体，包括马克思·普朗克 (Max Planck)、爱因斯坦、欧内斯特·卢瑟福 (Ernest Rutherford)、尼尔斯·玻尔 (Niels Bohr)、路易斯·德·布罗意 (Louis de Broglie)、维尔纳·海森堡 (Werner Heisenberg)、埃尔文·薛定谔 (Erwin Schrodinger)、保罗·狄拉克 (Paul Dirac)、沃尔夫冈·泡利 (Wolfgang Pauli)、帕斯卡尔·约旦 (Pascual Jordan) 和约翰·冯·诺依曼 (John von Neumann)，他们都作出了至关重要的贡献——而且特别有趣的是，他们的意见往往并不一致。要把弦论中广袤的概念恰当地归于合适的人名下则更加不可能。我认为试图这样做实际上就已经偏离了我的主要目标，即介绍这些

概念本身。

本书前三章的目的是介绍那些对理解弦论至关重要的概念，但它们本身并不是弦论的一部分。这些概念——能量、量子力学和广义相对论——它们（迄今）比弦论本身更重要，因为我们知道，它们描述了真实的世界。第4章，我介绍了弦论，这是进入未知领域的一步。而在第4章、第5章和第6章中，我将尽可能使弦论、膜和弦对偶看起来更加合理和顺理成章，事实上，它们迄今仍是有待验证的关于现实世界的描述。在第7章和第8章中，我讨论了近些年来科学家将弦论和高能粒子对撞实验联系在一起的尝试。超对称、弦对偶和五维空间中的黑洞，所有这些都出现在弦理论家为理解在粒子加速器中什么正在发生和什么将要发生而做的尝试中。

在本书的不同地方，我会引用物理量的数值：比如，核裂变反应所释放出的能量的数值，或一名奥运百米运动员在奔跑时所经历的时间膨胀的大小。我这么做的部分原因是考虑到物理学是一门定量的科学，这里物理量数值的大小是重要的。但对一个物理学家来说，往往最感兴趣的是物理量的近似大小，或数量级的大小。所以，比如我提到奥运百米运动员经历的时间膨胀大约是 $1/10^{15}$ 秒，尽管更精确的估计，基于运动员的速度是 10 米 / 秒，应该是 $1/(1.8 \times 10^{15})$ 。对那些希望看到比我在本书中描述过的计算更精确、更清楚，而且 / 或过程更详尽的读者，可

以访问这个网址：<http://press.princeton.edu/titles/9133.html>。

弦论将向什么方向发展？弦论允诺会统一引力和量子力学。它允诺可以提供一个能包含所有自然界中力的单一理论。它允诺一个对时间、空间和尚未发现的额外维度的新理解。它允诺能为看起来很不一样的概念，比如黑洞和夸克-胶子等离子体，建立起联系。它确实是一个很有“前途”的理论！

弦理论家如何兑现现在他们领域内的允诺？事实上，很多都已经兑现了。弦论确实提供了一个以量子力学为开始、以广义相对论为结束的优雅的推理链条。我将在第4章中描述这个推理的框架。弦论也确实提供了一个描述自然界中所有力的权宜图景。我将在第7章中勾勒这个图景并告诉你把它变得更精确会碰到的一些困难。然后我还将在第8章中解释，弦论计算已经被用于比较重离子对撞实验中的数据了。

本书不以解决任何弦论的争论为目标，但我会提及，许多的分歧不过是观念之争罢了。当弦论得出一个重要的结论时，支持它的人会说：“太棒了！要是能更如此这般就更棒了。”反对它的人会说：“真可惜！要是能如此这般才会让我印象深刻。”最后，双方（至少，对各自阵营里更严肃和更了解情况的成员而言）的观点在本质上差别

并不大。几乎所有人都同意基础物理学中深藏着一些谜题，而弦理论是所有认真尝试解决这些谜题的理论中的领先者。当然，我也同意很多弦论的允诺还有待兑现。

1 能量.....

1.1 / / / 长度、质量、时间和速度 / 3

1.2 / / / $E=mc^2$ / 6

2 量子力学.....

2.1 / / / 不确定性 / 14

2.2 / / / 原 子 / 17

2.3 / / / 光 子 / 23

3 引力和黑洞.....

3.1 / / / 黑 洞 / 32

3.2 / / / 广义相对论 / 39

3.3 / / / 黑洞不黑 / 42