



*The Series of Advanced Physics of Peking University*

北京大学物理学丛书 · 理论物理专辑

# 超弦史话

李 淼 著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS



041-09

1

2005

*The Series of Advanced Physics of Peking University*

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

# 超弦史话

李 淼 著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

超弦史话/李森著. —北京:北京大学出版社, 2005. 10

(北京大学物理学丛书·理论物理专辑)

ISBN 7-301-09758-1

I. 超… II. 李… III. 理论物理学-物理学史  
IV. 041-09

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 113575 号

书 名: 超弦史话

著作责任者: 李 森 著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-09758-1/O·0666

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

出版部 62754962

电子信箱: [zpup@pup.pku.edu.cn](mailto:zpup@pup.pku.edu.cn)

印刷者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

850mm × 1168mm 32 开本 9.125 印张 226 千字

2005 年 10 月第 1 版 2006 年 7 月第 2 次印刷

定 价: 14.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积

累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

## 理论物理专辑前言

彭桓武先生在他的专著《理论物理基础》(彭桓武、徐锡申著,北京大学出版社,1998年)序中对理论物理作了精辟的阐述:

随着人们通过多次观察和实验等科学实践,对物质世界中在一定条件下一定现象之出现,获得大量可靠的感性认识,得到数据和经验规律。然后经过反复综合整理改造,形成概念,并用判断和推理的方法给以合乎逻辑的描述或解释,这样达到某种理性认识。如能以此为据对新现象有所预见且为而后的科学实验所证实,则表明这理性认识正确可靠。对越来越多方面的物质现象得到的越来越普遍的正确可靠的理性认识,便构成发展中的理论物理。

理论物理的发源可以从伽利略和牛顿对地面上物体坠落和天空中行星绕日等现象的统一解释算起。这奠定了牛顿力学,并从此动力学观点流行。这种观点和方法,结合气体的物理实验和化学实验的多个经验规律,产生并逐渐澄清原子和分子的概念,阐明了热的分子运动本质;又结合由对电磁现象的观察和大量实验所总结的一系列经验规律,特别是法拉第有关磁力线和电力线的形象思维,帮助麦克斯韦形成电磁场的概念及其动力学理论。麦克斯韦不仅利用运动将电现象和磁现象联结起来,并且从理论上预见到电磁波动现象,光的现象归结为电磁波动的现象。这预见为此后的实验证实,并为无线电通讯奠定基础。法拉第电解定律表明分子原子内部有带有一定的基本电荷的电子。有鉴于此,洛伦兹对物质中的电磁现象,提出电子论,引入带有电子运动的分子和微观电磁

场的概念,后者局部的多分子的统计平均即是麦克斯韦的宏观电磁场,这样解释了物质对光的折射率随光波长变化的色散现象。但对电子和其运动规律的较清楚的认识,则尚待从更多的近代物理实验和与其伴随的 20 世纪才发现的相对论和量子论。在相对论和量子论这两个理论中,对时间和空间,以及粒子和波,概念上比以前有所深入,有些人称之为革命,实际上不过是随着认识到更深一层次,原来认为割裂的或对立的却被发现是统一的或同一的,而回过头来看,原来的认识,在一定范围内仍是对的,或可靠的到一定的近似程度而已。

理论物理是有用的。作为工程设计原理的早已成熟的那部分理论物理更不必谈。在开展理论、实验与工程技术相结合的工作时,理论工作先行一步常可以减少实验和工程的工作量。

为了促进我国的理论物理研究,国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组决定资助出版这套《北京大学物理学丛书·理论物理专辑》。希望从事理论物理研究的科学工作者介绍国际理论物理前沿和自己的研究工作,吸引更多的年轻人投入并献身于理论物理学的研究,为营造重视基础研究、安心基础研究的大环境,为发展我国理论物理学的研究及其在国际上占有一席之地做出贡献。有关申请出版资助的情况,请参阅国家自然科学基金委员会网站中有关“理论物理专款”的通告。本专辑的出版得到了北京大学出版社的大力支持,特此感谢。

国家自然科学基金委员会  
“理论物理专款”学术领导小组  
2005 年 10 月 20 日

## 序

我在开始写本书的时候,格林(Brian Greene)在《纽约时报》长期排名靠前的畅销书《优美的宇宙》(*The Elegant Universe*)在中国还没有翻译本。这个发现是促使我写《超弦史话》的主要原因,后来,李泳翻译了格林的书,取名为《宇宙的琴弦》。这是一部很好的普及弦论的书,那时台湾有人翻译,可惜翻译者的物理和中文都不够好,格林本人请一个既懂中文又懂弦论的人看了一下,自然不同意台湾的出版商出版。我也只好打消买它十几本送人的愿望,自己着手写一本书。格林此书的读者应该是一个受有良好教育的人,不必是一个物理本科毕业生,他的书的特点是通俗易懂。

而本书的读者应该是一个物理本科毕业生,最好是有从事研究物理意向的人,所以写得比较专业,但尽量不用公式。这本书本来是在网上一节一节写的,每节大概有三千字,所以,读者不难发现这本书每三千字左右是一个逻辑上比较连贯的段落,每一节谈一个主题。感谢高怡泓先生创办的那个

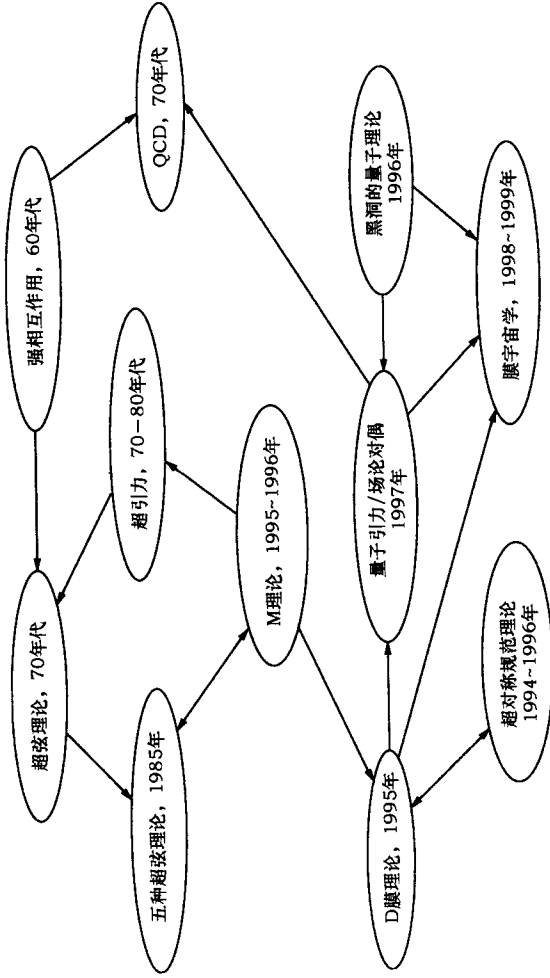
专门讨论与超弦理论相关问题的网站,因为本书一开始是在那里一节一节地上贴的。后来由于一些原因那个网站关了,但我始终以为就中文网讨论科学的专业网站而言,那是一个成功的模式。

最后,感谢《北京大学物理学丛书·理论物理专辑》的编委们邀请我将此书作为其中的一本由北京大学出版社出版。感谢责任编辑顾卫宇有益的建议和认真的校对。

李 森

2005 年 9 月

超弦史图



## 目 录

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第一章 从弦论到 M 理论 .....    | (1)   |
| 第二章 经典的极致 .....        | (11)  |
| 第三章 超对称和超引力 .....      | (27)  |
| 第四章 第一个十五年 .....       | (48)  |
| 第五章 弦论的第一次革命 .....     | (65)  |
| 第六章 黑暗时代 .....         | (86)  |
| 第七章 先声 .....           | (106) |
| 第八章 第二次革命:场论的发展 .....  | (133) |
| 第九章 第二次革命:弦论中的对偶 ..... | (150) |
| 第十章 第二次革命:D 膜 .....    | (169) |

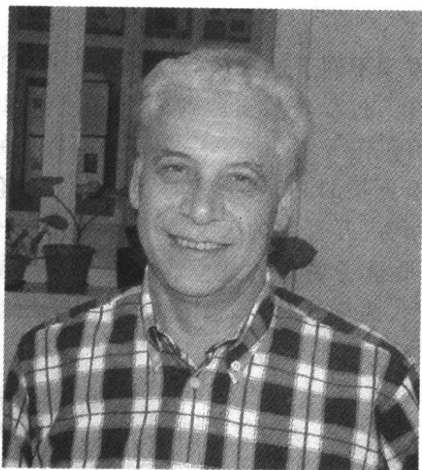
|      |                 |       |
|------|-----------------|-------|
| 第十一章 | 弦论中的对偶(续) ..... | (187) |
| 第十二章 | 黑洞 .....        | (206) |
| 第十三章 | 矩阵理论 .....      | (228) |
| 第十四章 | 全息原理的实现 .....   | (247) |
| 第十五章 | 结语与展望 .....     | (267) |

## 第一章 从弦论到 M 理论

弦论的发现不同于过去任何物理理论发现。一个物理理论形成的经典过程是从实验到理论,在爱因斯坦广义相对论之前的所有理论无不如此。一个系统的理论的形成通常需要几十年甚至更长的时间,牛顿的万有引力理论起源于伽利略的力学及第谷、开普勒的天文观测和经验公式。一个更为现代的例子是量子场论的建立。在量子力学建立(1925 ~ 1926)之后仅仅两年就有人试图研究量子场论,量子场论的研究以狄拉克将辐射量子化及写下电子的相对论方程为开端,到费恩曼(Feynman)、施温格尔(Schwinger)和朝永振一郎(Tomonaga)的量子电动力学为高潮,而以威尔逊(K. Wilson)的量子场论重正化群及有效量子场论为终结,其间经过了四十余年,数十人甚至可以说是数百人的努力。广义相对论的建立似乎是个例外,尽管爱因斯坦一开始已经知道水星近日点进动,他却以惯性质量等于引力质量这个等效原理为基础,逐步以相当逻辑的方式建立了广义相对论。如果爱因斯坦一开始对水星近日点进动反常一无所知,他对牛顿万有引力与

狭义相对论不相容的深刻洞察也会促使他走向广义相对论。尽管同时有其他人如亚伯拉罕 (Max Abraham)、米 (Gustav Mie) 试图修正牛顿万有引力, 爱因斯坦从原理出发的原则使得他得到正确的理论。

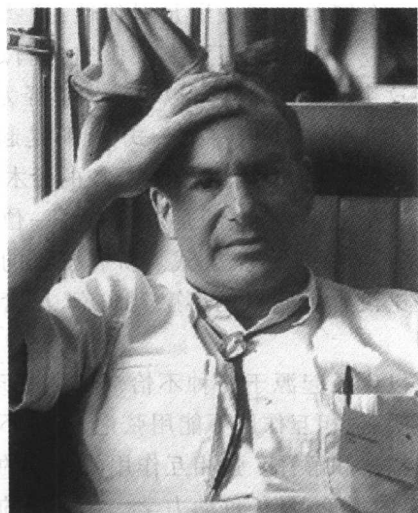
弦论发现的过程又不同于广义相对论。弦论起源于 20 世纪 60 年代的粒子物理, 当时的关于强相互作用的一连串实验表明存在无穷多个强子, 质量与自旋越来越大、越来越高。这些粒子绝大多数是不稳定粒子, 所以叫做共振态。当无穷多的粒子参与相互作用时, 粒子与粒子的散射振幅满足一种奇怪的性质, 叫做对偶性。1968 年, 一位在麻省理工学院工作的意大利物理学家韦内齐亚诺 (Gabriele Veneziano) 翻了翻数



韦内齐亚诺, 意大利物理学家, 现在日内瓦的欧洲核子中心工作, 弦论研究的开拓人。他在 1968 年发现了韦内齐亚诺散射公式, 从而开创了弦论这个现代物理学中的一个庞大分支。目前他的主要研究兴趣是极早期宇宙学, 特别是超弦宇宙学。他和他的合作者们致力于所谓的前大爆炸的研究, 试图用弦论来避免早期宇宙中的空间奇点。

学手册,发现一个简单的函数满足对偶性,这就是著名的韦内齐亚诺公式。应当说当时还没有实验完全满足这个公式。很快人们发现这个简单的公式可以自然地解释为弦与弦的散射振幅。这样,弦理论起源于一个公式,而不是起源于一个或者一系列实验。据说加州大学伯克利分校的铃木(H. Suzuki)也同时发现了这个公式,遗憾的是他请教了一位资深教授并相信了他,从来没有发表这个公式。所有弦论的笃信者都应该为韦内齐亚诺没有做同样的事感到庆幸,尽管他在当时同样年轻。

弦论又可以说是起源于一种不恰当的物理理论和实验。后来的发展表明,强相互作用不能用弦论,至少不能用已知的简单的弦论来描述和解释。强相互作用的最好的理论还是场论,一种最完美的场论:量子色动力学。在后面的某一章内我们会发现,其实弦论与量子色动力学有一种非常微妙、甚至可以说是一种离奇的联系。作为一种强相互作用理论的弦论的没落可以认为是弦论的运气,使它有可能在后来被拿来作为一种统一所有相互作用的理论,或者也可以说,是加州理工学院施瓦茨(John Schwarz)的运气。想想吧,如果弦论顺理成章地成为强相互作用的理论,我们可能还在孜孜不倦地忙于将爱因斯坦的广义相对论量子化。不是说这种工作不能做,这种工作当然需要人做,正如现在还有相当多的人在做。如果弦论已经成为现实世界理论的一个部分,施瓦茨和他的合作者法国人舍克(Joel Scherk)也不会灵机一动地将一种无质量、自旋为 2 的弦态解释为引力子,将类似韦内齐亚诺散射振幅中含引力子的部分解释为爱因斯坦理论中的相应部分,从而使得弦论一变而为量子引力理论!正是因为弦论已失去作为强相互作用理论的可能,日本的米谷明民(Tamiaki Yoneya)的大脑同时作了同样的转换,建议将弦论作为量子引力理论来看待。他们同时还指出,弦论也含有自旋为 1 的粒子,弦的



施瓦茨在早期弦论的发展中起到不可估量的作用,他不但是超对称弦论的创始人,更是不断推动弦论发展的主要人物。弦论中的几个重要发现都和他的名字分不开,最令人敬佩的是,他和萨斯坎德是超弦第二次“革命”中的两位年纪比较大但作出极大贡献的人。

相互作用包括现在成为经典的规范相互作用,从而弦论可能是统一所有相互作用的理论。这种在技术上看似简单的转变,却需要足够的想像力和勇气,一个好的物理学家一辈子能做一件这样的工作就足够了。

我们说施瓦茨的运气同时又是弦论的运气是因为施瓦茨本人的研究历史几乎可以看成弦的小历史。施瓦茨毫无疑问是现代弦论的创始人之一。自从在 1972 年离开普林斯顿大学助理教授位置到加州理工学院任资深博士后研究员,他十年如一日,将弦论从只有几个人知道的理论做成如今有数千人研究的学问。他也因此得以摆脱三年延长一次的研究员位置,终于成了加州理工学院的正教授。因为他早期与格林 (Michael Green) 的工作,他与现在已在剑桥大学的格林获得

美国物理学会数学物理最高奖——2002 年度的海因曼奖 (Heineman prize)。

按照流行的说法,弦论本身经过两次“革命”。经过第一次“革命”,弦论流行了起来。一些弦论专家及一些亲和派走得很远,远在1985年即第一次“革命”后不久,他们认为终极理论就在眼前。有人说这就是一切事物的理论(TOE, Theory of Everything),欧洲核子中心理论部主任埃利斯(John Ellis)是这一派的代表。显然,这些人在那时过于乐观,或者说对弦的理解还较浮于表面。为什么这么说呢?弦论在当时被理解成纯粹的弦的理论,即理论中基本对象是各种振动着的弦,又叫基本自由度。现在看来这种理解的确很肤浅,因为弦论中不可避免地含有其他自由度,如纯粹的点状粒子、二维的膜,等等。15年前为数不多的人认识到弦论发展的过程是一个相当长的过程,著名的威腾(Edward Witten)与他的老师格罗斯(David Gross)相反,以他对弦的深刻理解,一直显得比较“悲观”。表明这种悲观的是他的一句名言:“弦论是21世纪的物理偶然落在了20世纪。”(这使我们想到一些19世纪的物理遗留到21世纪来完成,如湍流问题。)

第一次“革命”后一些人的盲目乐观给反对弦论的人留下口实,遗患至今犹在。现在回过头来看,第一次“革命”解决的主要问题是如何将粒子物理的标准理论在弦论中实现。这个问题并不像表面上看起来那么简单,我们在后面会回到这个问题上来。当然,另外一个基本问题至今还没有解决,这就是所谓宇宙学常数问题。15年前只有少数几个人包括威腾在内意识到这是阻碍弦论进一步发展的主要问题。

第二次“革命”远较第一次“革命”延伸得长(1994—1998),影响也更大、更广。有意思的是,主导第二次“革命”主要思想,即不同理论之间的对偶性(请注意这不是我们已提到的散射振幅的对偶性)出现于第一次“革命”之前。英国人