

数理化名人

文 文 / 编

绝妙的发现

为人类发展做出了巨大贡献的发现

远方出版社



数理化知识探索

数理化名人



绝妙的发现

文文/主编

远方出版社

责任编辑:戈 弋

封面设计:秋 雨

数理化知识探索·数理化名人
绝妙的发现

主 编	文 文
出 版	远方出版社
社 址	呼和浩特市乌兰察布东路 666 号
邮 编	010010
发 行	新华书店
印 刷	北京华盛印刷厂
开 本	850×1168 1/32
字 数	3000 千
版 次	2004 年 8 月第 1 版
印 次	2004 年 8 月第 1 次印刷
印 数	5000
标准书号	ISBN 7—80595—979—X/G·340
本册定价	11.20 元

远方版图书,版权所有,侵权必究。
远方版图书,印装错误请与印刷厂退换。

前 言

一项科学发现最明显的根源来自它的发现者，即科学家。因此，从科学家的个性和生平方面来认识和理解科学，也是一种古老和原始的方法。

人类的智慧是无穷的，在同大自然的搏斗中，在长期的历史演化变迁中，我们的祖先不断战胜自我，创造了一个又一个奇迹，也为我们留下了丰富宝贵的经验财富，他们那种挑战自然、永不服输的精神，使我们不由得为之惊叹！历史的车轮滚滚向前，人类已经迈向二十一世纪！人类的科学知识，社会的文明进步，差不多都是在探索中慢慢前进。而这些都和科学家们是分不开的。正是因为有了他们，文明才有了进步。他们是人类文明的使者，是科学技术的领路人。为了更详细的了解这些科学家们，我们着手编写了《数理化名人故事》这套丛书。

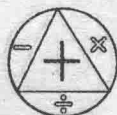
《数理化名人故事》主要讲述了科学家的个性、生平及其发明。从中，我们可以看到科学家走过的道路。我们已经进入了一个新的时代，我们还要面对许多问题，解决这些问题需要不断

的思索和行动,科学家们走过的道路有助于我们直面挑战,不畏任何困难。前面的景观无比壮丽,我们又为何要离开这条道路呢?我们要沿着这条路走下去。

编者

目 录

第一章	从弦论到 M-理论	(1)
第二章	经典的极致	(10)
第三章	超对称和超引力	(25)
第四章	第一个十五年	(44)
第五章	第一次革命	(60)
第六章	黑暗时代	(82)
第七章	先声	(102)



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的出现。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(1925/26)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,到费曼(Feynman),薛温格(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,数十甚至数百人的努力。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阿伯拉汗(Max Abraham),米(Gustav Mie)试图改正牛顿万有引力,爱因斯坦的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。弦论起源于一九六零年代的粒子物理,当时的强相互作用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



数理化名人



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，粒子与粒子散射振幅满足一种奇怪的性质，叫做对偶性。1968年，一个在麻省理工学院工作的意大利物理学家威尼采亚诺 (Gabriele Veneziano) 翻了翻数学手册，发现一个简单的函数满足对偶性，这就是著名的威尼采亚诺公式。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。伯克利大学的铃木 (H. Suzuki) 据说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，所以从来没有发表这个公式。所有弦论笃信者都应为威尼亚采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。在后来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的理论，弦论的没落可以认为是弦论有可能后来被作为一种统一所有相互作用的理论运气，更可以说是加州理工学院史瓦兹 (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份，史瓦兹和他的合作者法国人舍尔克 (Joel Scherk) 也不会灵机一动地将一种无质量，自旋为 2 的弦解释为引力子，将类似威尼采亚诺散射振幅中含引力子的部份解释为爱因斯坦理论中的相应部



绝妙的发现



份,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)的大脑同时做了同样的转换,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,却需要足够的想象力和勇气,一个好的物理学家一辈子能做一件这样的工作就足够了。

Gabriele Veneziano

我们说的史瓦兹的运气同时又是弦论的运气是因为史瓦兹本人的历史几乎可以看成弦的小历史。史瓦兹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,弦本身经过两次“革命”。经过第一次“革命”,弦成为一种流行。一些弦论专家及一些亲稍派走的很远,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),欧州核子中心理论部主任爱利斯(John Ellis)是这一派的代表。显然,这些人在那时是过于乐观,或者是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



数理化名人



有其他自由度,如纯粹的点状粒子,两维的膜等等。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,著名的威顿(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”。表明他的悲观是他的一句名言:“弦论是二十一世纪的物理偶然落在了二十世纪”。(这使我们想到一些十九世纪的物理遗留到二十一世纪来完成,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。这个问题并不象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顿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,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)已出现于第一次“革命”之前。英国人奥立弗(Olive)和芬兰人曼通宁(Montonen)已在1977年就猜测在一种特别的场论中存在电和磁的对称性。熟悉麦克斯维电磁理论的人知道,电和磁是互为因果的。如果世界上只存在电磁波,没有人能将电和磁区别开来,所以此时电和磁完全对称。一旦有了电荷,电场由电荷产生,而磁场则由电流产生,因为不存在磁荷。而在奥立弗及曼通宁所考虑的场论中,存在多种电荷和多种磁荷。奥立弗—曼通宁猜想是,这个理论对于电和磁完全是对称的。这个猜想很难被直接证明,原因是虽然磁荷存在,它们却以一种极其隐蔽的方式存在:它们是场论中的所谓孤子解。在经典场论中证明这个猜想已经很难,要在量子理论中证明这个猜想是



绝妙的发现



难上加难。尽管如此，人们在 1994 年前后已收集到很多这个猜想成立的证据。狄拉克早在 1940 年代就已证明，量子力学要求，电荷和磁荷的乘积是一个常数。如果电荷很小，则磁荷很大，反之亦然。在场论中，电荷决定了相互作用的强弱。如果电荷很小，那么场论是弱耦合的，这种理论通常容易研究。此时磁荷很大，也就是说从磁理论的角度来看，场论是强耦合的。奥立弗—曼通宁猜想蕴涵着一个不可思议的结果，一个弱耦合的理论完全等价于一个强耦合的理论。这种对偶性通常叫做强弱对偶。

有许多人对发展强弱对偶作出了贡献。值得特别提出的是印度人森(Ashoke Sen)。1994 年之前，当大多数人还忙于研究弦论的一种玩具模型，一种生活在两维时空中的弦，他已经在严肃地检验 15 年前奥立弗和曼通宁提出的猜测，并将其大胆地推广到弦论中来。这种尝试在当时无疑是太大胆了，只有很少的几个人觉得有点希望，史瓦兹是这几个人之一。要了解这种想法是如何地大胆，看看威顿的反应。一个在芝加哥大学做博士后研究员的人在一个会议上遇到威顿。威顿在作了自我介绍后问他——这是威顿通常作法——你在做什么研究，此人告诉他在做强弱对偶的研究，威顿思考一下之后说：“你在浪费时间”。另外一个对对偶性做出很大贡献的人是洛特格斯大学(Rutgers University) 新高能物理理论组的塞伯格。他也是 1989~1992 之间研究两维弦论又叫老的矩阵模型非常活跃的人物之一。然而他见机较早，回到矩阵模型发现以前第一次超弦革命后的遗留问题之一，超对称及超对称如何破坏的问题。这里每一个专业名词都需要整整一章来解释，我们暂时存疑留下每一个重要词汇在将来适当的时候再略加解释。弦论中超对称无处不在，如何有效地破坏超对称是将弦论与粒子物理衔接起来的最为重要



的问题。塞伯格在 1993~1994 之间的突破是,他非常有效地利用超对称来限制场论中的量子行为,在许多情形下获得了严格结果。这些结果从量子场论的角度来看几乎是不可能的。

科学史上最不可思议的事情之一是起先对某种想法反对最烈或怀疑最深的人后来反而成为对此想法的发展推动最大的人。威顿此时成为这样的人,这对他来说不是第一次也不是最后一次。所谓塞伯格-威顿理论将超对称和对偶性结合起来,一下子得到自有四维量子场论以来最为动人的结果。这件事发生在 1994 年夏天。塞伯格飞到当时正在亚斯本(Aspen)物理中心进行的超对称讲习班传播这些结果,而他本来并没有计划参加这个讲习班。纽约时报也不失时机地以几乎一个版面报导了这个消息。这是一个自第一次弦论革命以来近十年中的重大突破。这个突破的感染力慢慢扩散开来,大多数人的反应是从不相信到半信半疑,直至身不由己地卷入随之而来的量子场论和弦论长达 4 年的革命。很多人记得从 94 年夏到 95 年春,洛斯阿拉莫斯 hep-th 专门张贴高能物理理论文的电子“档案馆”多了很多推广和应用塞伯格-威顿理论的文章,平淡冷落的理论界开始复苏。塞伯格和威顿后来以此项工作获得 1998 年度美国物理学会的海因曼奖。

真正富于戏剧性的场面发生在次年的三月份。从八十年代末开始,弦的国际研究界每年召开为期一个星期的会议。会议地点每年不尽相同,第一次会议在德克萨斯 A&M 大学召开。九三年的会议转到了南加州大学。威顿出人意料地报告了他的关于弦论对偶性的工作。在这个工作中他系统地研究了弦论中的各种对偶性,澄清过去的一些错误的猜测,也提出一些新的猜测。他的报告震动了参加会议的大多数人,在接着的塞伯格的报告中,塞伯格在一开始是这样评价威顿的工作的:“与威顿刚



绝妙的发现



才报告的工作相比,我只配做一个卡车司机”。然而他报告的工作是关于不同超对称规范理论之间的对偶性,后来被称为塞伯格对偶,也是相当重要的工作。史瓦兹在接着的报告中说:“如果塞伯格只配做卡车司机,我应当去搞一辆三轮车来”。他则报告了与森的工作有关的新工作。

95年是令弦论界异常兴奋的一年。一个接一个令人大开眼界的发现接踵而来。施特劳明格(Andrew Strominger)在上半年发现塞伯格-威顿94年的结果可以用来解释超弦中具有不同拓扑的空间之间的相变,从而把看起来完全不同的“真空”态连结起来。他用到一种特别的孤子,这种孤子不是完全的点状粒子,而是三维的膜。威顿95年三月份的工作中,以及两个英国人胡耳(Chris Hull)和汤生(Paul Townsend)在94年夏的工作中,就已用到各种不同维数的膜来研究对偶性。这样,弦论中所包含的自由度远远不止弦本身。

在众多结果中,威顿最大胆的一个结果是10维的一种超弦在强耦合极限下成为一种11维的理论。汤生在95年一月份的一篇文章中做了类似的猜测,但他没有明确指出弦的耦合常数和第11维的关系。威顿和汤生同时指出,10维中的弦无非是其中1维绕在第11维上的膜。汤生甚至猜想最基本的理论应是膜论,当然这极有可能是错误的猜想。史瓦兹在随后的一篇文章中根据威顿的建议将这个11维理论叫成M-理论,M这个字母对史瓦兹来说代表母亲(Mother),后来证实所有的弦理论都能从这个母亲理论导出。这个字母对不同的人来说有不同的含义,对一些人来说它代表神秘(Mystery),对于另外一些人来说代表膜论(Membrane),对于相当多的人来说又代表矩阵(Matrix)。不同的选择表明了不同爱好和趣味,仁者乐山智者乐水,萝卜青菜各有所爱。总的说来,M-理论沿用至今而且还



数理化名人



要用下去的主要原因是，我们只知道它是弦论的强耦合极限，而对它的动力学知之甚少，更不知道它的基本原理是什么。理论所的弦论专家朱传界说对于 M-理论我们象瞎子摸象，每一次只摸到大象的一部份，所以 M-理论应当叫做摸论。当然摸没有一个对应的以字母 M 打头的英文单词，如果我们想开 M-理论的玩笑，我们不妨把它叫作按摩理论，因为按摩的英文是 massage。我们研究 M-理论的办法很像做按摩，这里按一下，那里按一下。更有人不怀好意地说，M 是威顿第一个字母的倒写。

1995 年的所有的兴奋到 10 月份达到高潮。加州大学圣巴巴拉分校理论物理所的泡耳钦斯基 (Joseph Polchinski) 发现弦论中很多膜状的孤子实际上就是他在 6 年前与他的两个学生发现的所谓 D-膜。字母 D 的含义是 Dirichlet，表示 D-膜可以用一种满足狄雷克利边界条件的开弦来描述。施特劳明格用到的三维膜就是一种 D-膜。这个发现使得过去难以计算的东西可以用传统的弦论工具来做严格的计算。它的作用在其后的几年中发挥得淋漓尽致。又是威顿第一个系统地研究了 D-膜理论，他的这篇重要文章的出现仅比泡耳钦斯基的文章迟了一个礼拜。威顿非常欣赏泡耳钦斯基的贡献，他在于哈佛大学所作的劳布 (Loeb) 演讲中建议将 D-膜称为泡耳钦斯基子，很可惜这个浪漫的名称没有流传下来。

讲到这里，我们已给读者一个关于 M-理论的模糊印象。下面我们将从引力理论和弦论的基本东西谈起，这将是一个非常困难的工作。我们不得不假定读者已有了大学物理的基础，即便如此，一些概念也很难用大学已学到的东西来解释。我希望读者给我时间，也希望读者直接在每个贴子后面提问题，如果一些东西我没有讲清楚。弦论或 M-理论还在它发展的“初级



绝妙的发现



阶段”，如果追根究底，有些问题还没有很好的回答。例如这么一个简单的问题：到底什么是弦论，什么是 M-理论？如果能吸引那怕是一两个读者自己继续追问这个问题从而最终成为一个弦论专家，我已达到目的。



第二章 经典的极致

如果说现代物理开始于量子物理,经典物理则终结于爱因斯坦的广义相对论。广义相对论的时空观无疑彻底改革了牛顿的时空观,但牛顿本人很清楚他的时空观的局限。爱因斯坦用相对论的因果律代替了牛顿的绝对时与空中的因果律,所以说爱因斯坦的时空概念与因果概念仍然是经典的,广义相对论是经典物理的极致。

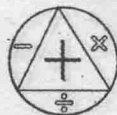
这个经典物理中的最高成就一直拒绝被量子物理所改造。所有相信弦论的人都认为引力已被成功地量子化,至少在微扰论的层次上。一些执著于几何是一切的人则认为还不存在一个成功的量子引力理论,他们在一定程度上承认弦论的成功,霍金(S. Hawking)以及特霍夫特(G. 't Hooft)可以被看成这方面的代表,虽然前者较之后者更积极地支持弦论。我们希望在本章的结尾时看到,弦论家的观点和弦论同情者的观点都有一定道理。而第三派则采取鸵鸟政策,认为引力还是原来的引力,星星还是那颗星星,这样有助于他们继续发表各色各样的理论。

我们假定读者已学过狭义相对论,甚至一点广义相对论,这样我们就可以相对自由地从不同角度来看广义相对论。

广义相对论的基本原理是等效原理:在引力场中,在时空的任何一点都可以找到一个局部惯性系,物理定律在这个局部惯性系中与没有引力场时完全相同。爱因斯坦本人更喜欢将局域引力譬喻成局部加速所引起的结果。这样,局部惯性系类似于黎曼流形中一点的切向空间,加速则可以用一个二次的座标变



绝妙的发现



换来消除。引力可以用黎曼几何中的度规来描述，在一个局域惯性系中，度规变成狭义相对论中的闵氏度规。爱因斯坦进一步说，如果引力效应可以用一般的座标变换来消除，则该引力场完全等价于无引力场。如此则一个非平庸的引力场必须具有曲率。爱因斯坦的引力理论是标准的场论，而他相信物理的基本要素就是场，这是他高度评价麦克斯韦工作的原因。

一个试验粒子在引力场中的运动轨迹是测地线，而运动方程可以由变分原理得到。这个变分原理说，连结时空两点的粒子轨迹使得总的粒子的固有时成为极大——粒子的固有时是欧氏空间中测地线长度在闵氏空间中的推广。这种几何变分原理早就用在光学中，光的轨道使光程取极小值，这是费马原理。当地球环绕太阳运动时，人们可以想象，太阳产生的引力场使得太阳周围的时空发生一点点弯曲，从而使得地球的测地线发生弯曲。在时空中，这个测地线并非是闭合的。一般说来，它在空间中的投影也不是闭合的，这样就有了水星近日点进动——这里，时空同时弯曲起了关键作用。同样，一个无质量的粒子如光子在引力场中的测地线也是弯曲的，尽管光的固有时总是为零，测地线的变分原理稍稍有点复杂。爱因斯坦在广义相对论完成之前就预言了光线在引力场中的弯曲，他仅用了等效原理，这等价于仅仅用了度规的时间份量，这样算出的弯曲角度是正确结果的一半。同样，要算出正确的结果，必须计及空间的弯曲。

决定时空曲率的是物质的能量和动量分布，这就是爱因斯坦著名的引力场方程。在方程的左边是一种特殊的曲率，现在叫做爱因斯坦张量。在方程的右边是能量—动量张量。爱因斯坦经过断断续续八年的努力，在 1915 年年尾才最终写下正确的场方程。（从 1907 到 1911 有三年半的时间，他发表了关于经典辐射理论的文章，关于狭义相对论，关于临界弥散，甚至尝试