

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 4 5

超弦史话

(第二版)

李 淼 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

中外物理学精品书系

前沿系列 · 45

超弦史话

(第二版)

李森



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

超弦史话/李淼著. —2 版. —北京:北京大学出版社, 2016. 4

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-26654-0

I. ①超… II. ①李… III. ①超弦—物理学史 IV. ①O572.2-09

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309569 号

- 书 名 超弦史话(第二版)
CHAOXIAN SHIHUA
- 著作责任者 李 淼 著
- 责任编辑 刘 啸
- 标准书号 ISBN 978-7-301-26654-0
- 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>
- 电子信箱 zpup@pup.cn
- 新浪微博 @北京大学出版社
- 电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021
- 印刷者 北京中科印刷有限公司
- 经 销 者 新华书店
- 730 毫米×980 毫米 16 开本 12.5 印张 238 千字
- 2005 年 10 月第 1 版
- 2016 年 4 月第 2 版 2016 年 4 月第 1 次印刷
- 定 价 37.00 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 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

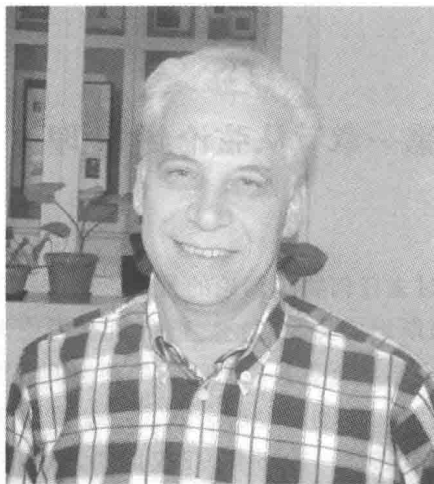
目 录

第一章 从弦论到 M 理论	1
第二章 经典的极致	8
第三章 超对称和超引力	19
第四章 第一个十五年	33
第五章 弦论的第一次革命	44
第六章 黑暗时代	58
第七章 先声	71
第八章 第二次革命——场论的发展	89
第九章 第二次革命——弦论中的对偶	100
第十章 第二次革命——D 膜	112
第十一章 弦论中的对偶(续)	124
第十二章 黑洞	137
第十三章 矩阵理论	152
第十四章 全息原理的实现	164
第十五章 结语与展望	177

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—1926年)仅仅两年之后,就有人试图研究量子场论。量子场论的研究以狄拉克(P. Dirac)将辐射量子化及写下电子的相对论方程为开端,到费曼(R. Feynman)、施温格(J. Schwinger)和朝永振一郎(S. 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,包含了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,但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(M. Abraham)、米(G. Mie)也试图修正牛顿万有引力,但爱因斯坦从原理出发的原则使得他得到了正确的理论。

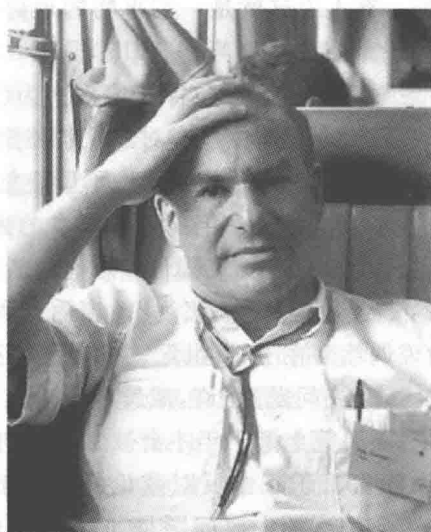
弦论发现的过程又不同于广义相对论。弦论起源于20世纪60年代的粒子物理研究。当时关于强相互作用的一连串实验表明,存在无穷多个强子,质量与自旋越来越大、越来越高。这些粒子绝大多数是不稳定粒子,所以叫做共振态。当无穷多的粒子参与相互作用时,粒子与粒子的散射振幅满足一种奇怪的性质,叫做对偶性。1968年,一位在麻省理工学院工作的意大利物理学家韦内齐亚诺(G. Veneziano)翻了翻数学手册,发现一个简单的函数满足对偶性,这就是著名的韦内齐亚诺公式。应当说,当时还没有实验完全满足这个公式。很快人们发现这个简单的公式可以自然地解释为弦与弦的散射振幅。这样,弦理论起源于一个公式,而不是起源于一个或者一系列实验。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,因而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。



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。

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(J. 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(J. 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(T. 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。



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做出极大贡献的人。

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论的小历史。施瓦茨毫无疑问是现代弦论的创始人之一。自从 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(M. Green)的工作，他与现在已在剑桥大学的格林获得了美国物理学会数学物理最高奖——2002 年度海因曼奖(Heineman prize)。

我记得，正当弦论火得不能再火，几乎每一位身在美国的粒子物理学家、宇宙学理论家都不敢忽视这个理论的时候，施瓦茨就做了很有远见的预言：“不用几年，弦论又将发展到瓶颈，又会有人站出来说，这是一个没有任何用处的理论。”时至今日，弦论确实又发展到了一个低谷。欧洲的大型强子对撞机在 2012 年夏天宣布发现希格斯粒子，希格斯(P. W. Higgs)本人以及比利时人恩格勒(F. Englert)也因为预言这个粒子获得了 2013 年度的诺贝尔物理学奖，但弦论的任何预言还没有在这个机器上被发现。也许，这一次弦论进入了一个长期低谷，甚至长到我们在有生之年都没有希望看到它被实验验证。

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(J. Ellis)是这一派的代表。显然,这些人那时过于乐观,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、2 维的膜等等。二十多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(E. Witten)与他的老师格罗斯(D. 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)也许,威腾还是有点乐观了,弦论的最坏命运可能像古希腊的原子论,需要等上两千年才会被意想不到的实验所证实。

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。二十多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 年),影响也更大、更广。有意思的是,主导第二次革命的主要思想,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。英国人奥立弗(D. Olive)和芬兰人蒙托宁(C. Montonen)早在 1977 年就猜测在一种特别的场论中存在电和磁的对称性。熟悉麦克斯韦电磁理论的人知道,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。但有了电荷,电场由电荷产生,而磁场则由电流产生,因为不存在磁荷,二者便有了区别。而在奥立弗及蒙托宁所考虑的场论中,存在多种电荷和多种磁荷。奥立弗-蒙托宁猜想是,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难上加难。尽管如此,人们在 1994 年前后已收集到很多支持这个猜想成立的证据。狄拉克早在 20 世纪 40 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-蒙托宁猜想蕴涵

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。

许多人对发展强弱对偶做出了贡献。值得特别提出的是印度人森(A. Sen)。1994年之前,当大多数人还忙于研究弦论的一种玩具模型——一种活动在2维时空中的弦时,他已经在严肃地检验十多年前奥立弗和蒙托宁提出的猜测,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,而施瓦茨正是这几个人之一。要了解这种想法是如何的大胆,看看威腾的反应。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腾。威腾在做了自我介绍后问他(这是威腾通常的做法)在做什么研究,此人告诉他在做强弱对偶的研究,威腾思考一下之后说:“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(N. Seiberg)。他也是1989—1992年间研究2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,回到了发现矩阵模型以前第一次超弦革命后遗留问题之一的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,留下这些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年间的突破是,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。这些结果从普通量子场论的角度来看几乎是不可能的。

值得一提的是,在弦论第二次革命尘埃落定数年之后,当多数弦论家还在研究弦论中的一些纯理论问题时,塞伯格又回到了超对称本身,因为那时大型强子对撞机即将运行,他希望这台机器能够发现超对称破缺之后的一些证据。这一次,我们还不知道运气是否再一次光临他。

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激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。威腾即是这样的人,这对他来说不是第一次也不是最后一次。所谓的塞伯格-威腾理论将超对称和对偶性结合起来,一下子得到自有4维量子场论以来最为动人的结果。这件事发生在1994年夏天。塞伯格飞到当时在亚斯本(Aspen)物理中心举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的篇幅报道了这个消息。这是一个自第一次弦论革命之后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四年之久的革命。很多人都会记得从1994年夏到1995年春,洛斯阿拉莫斯专门张贴高能物理理论文章的hep-th电子“档案馆”多了很多推广和应用塞伯格-威腾理论的文章,平淡冷落的理

论界开始复苏。塞伯格和威腾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 1995 年 3 月。从 20 世纪 80 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。会议地点不尽相同,第一次会议在德克萨斯农工(A&M)大学召开,1995 年的会议转到了南加州大学。威腾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,澄清了过去的一些错误的猜测,也提出了一些新的猜测。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,塞伯格一开始是这样评价威腾的工作的:“与威腾刚才报告的工作相比,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。施瓦茨在接下来的报告中说:“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。

1995 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(A. Strominger)在上半年发现,塞伯格-威腾 1994 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 3 维的膜。威腾 1995 年 3 月的工作以及两个英国人赫尔(C. Hull)和汤森(P. Townsend)在 1994 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,威腾最大胆的一个结果是,10 维的一种超弦在强耦合极限下会成为一种 11 维的理论。汤森在 1995 年 1 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。威腾和汤森同时指出,10 维中的弦无非是其中 1 维绕在第 11 维上的膜。汤森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。施瓦茨在随后的一篇文章中根据威腾的建议将这个 11 维理论叫成 M 理论,M 这个字母对施瓦茨来说代表“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”(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。当时还在中科院理论物理研究所的弦论专家朱传界(很久以前他已经转移到了中国人民大学,再过几年我自己到了中山大学)说,对于 M 理论我们像瞎子摸象,每一次只摸到大象的一部分,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,我们不妨把它叫做按摩理论,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。更有人不好意思地说,M 是威腾第一个字母的倒写。

1995 年的所有的兴奋到 10 月达到高潮。加州大学圣巴巴拉分校理论物理所的泡耳钦斯基(J. 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 的含义是狄利克雷(Dirichlet),表示 D 膜可以用一种满足狄利克雷边界条件的开弦来描述。施特劳明格用到的 3 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。又是威腾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星期。威腾非常欣赏泡耳钦斯基的贡献,他在哈佛大学所做的劳布(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,我们已给了读者一个关于 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任务。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。我希望读者有足够的耐心,如果一些东西我没有讲清楚,也许是我自己的问题,也许是理论本身的问题。弦论或 M 理论还在它发展的“初级阶段”,如果追根究底,有些问题实际上还没有很好的答案,例如这么一个简单的问题:到底什么是弦论,什么是 M 理论?如果能吸引哪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,但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。我们希望读者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。



爱因斯坦,20世纪最伟大的物理学家,影响遍及物理的所有领域。他是量子论特别是相对论的创始人,也是现代宇宙学的创始人。这张照片摄于他创造力最旺盛的时期,广义相对论就是在这个时期建立起来的。

我们假定读者已学过狭义相对论,甚至学过一点广义相对论,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域惯性系,物理定律在这个局域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比喻成局域加速所引起的结果。这样,局域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坐标变换来消除。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可夫斯基度规。爱因斯坦进一步说,如果引力效应可以用一般的坐标变换来消除,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,光行进的轨道使光程取极小值,即费马原理。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,光的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分量,这样算出的弯曲角度是正确结果的一半。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。爱因斯坦经过八年断断续续的努力,在1915年尾才最终写下正确的场方程。(从1907到1911年有三年半的时间,他发表了关于经典辐射理论、狭义相对论、临界弥散的文章,甚至尝试修改麦克斯韦方程以期得到光量子,就是没有发表关于广义相对论的文章)1915年11月25日,爱因斯坦在普鲁士科学院物理-数学部(那时的科学没有今天专业化得厉害,今天的一些物理学家往往以不能与数学家沟通为自豪)宣读了一篇题为《引力的场方程》的文章。他说:“相对论的一般理论作为一个逻辑体系终于完成。”

1915年11月,爱因斯坦每一个星期完成一篇文章。11月4日,在一篇文章中他写下不完全正确的一种场方程,该方程线性化后成为牛顿-泊松方程。11月11日,他写下另一个场方程,方程的左边是里奇(Ricci)张量,方程的右边是能量-动量

张量,他还要求度规的行列式等于1。11月18日,爱因斯坦仍然相信度规的行列式必须等于1。对爱因斯坦非常幸运的是太阳的中心力场对应的度规的行列式的确等于1——施瓦茨希尔德(K. Schwarzschild)于次年1月发现了严格解,5月即死于在俄罗斯前线得的一场病。在18日的文章中,爱因斯坦发现了两个重要效应。爱因斯坦发现的第一个效应是水星近日点进动。勒韦里耶(J. J. Le Verrier)1859年观察到的水星每百年45秒的进动完全可以用爱因斯坦的新的理论来解释。这个发现是如此令人激动,爱因斯坦此后一连几天都不能平心静气地回到物理上来。第二个发现是,他以前计算的光线弯曲比正确的结果小一半,这时他计及了度规的空间部分。11月25日,爱因斯坦写下了一直沿用至今的引力场方程。爱因斯坦放弃了度规行列式等于1的物理要求,但将它作为对坐标选取的一种条件。爱因斯坦当时还不知道场方程的左边满足比安基等式,从而方程右边自动满足能量动量守恒定律。能量动量守恒定律被爱因斯坦看成一个条件。

由于引力常数很小,引力往往在一个很大的系统中才有可观测效应。相互作用的大小通常可以用动能与势能之比来定,对于处于束缚态的系统,这个比例大约是1,所以我们常常说束缚态是非微扰的。不需要计算,我们知道地球在太阳引力场中的势能大约等于它的动能。同样,电子在氢原子中的电势能大约等于它的动能。可是电子-氢原子的原子核-质子之间的引力相互作用就非常非常小了,它与电子的动能之比大约是 10^{-40} !所以我们常常说引力是自然界中最弱的相互作用。用广义相对论的语言说,时空非常难以弯曲。看一看爱因斯坦的场方程,它的左边是曲率,右边是牛顿引力常数乘以能量-动量张量。能量-动量张量引起时空弯曲,而牛顿引力常数则很小,可以说时空的强度很大,比任何金属都要大得多。

在谈到广义相对论的实验验证时,人们常提到的是三大经典验证:引力红移、光线弯曲和水星近日点进动。时至今日,广义相对论所通过的验证远远不止这些。即使在验证还很少时,人们已经认为广义相对论是有史以来最完美和最成功的物理理论。恐怕即使今天人们还可以这样说。广义相对论的最完美之处在于它是一种原理理论,即整个理论建立在一些简单的原理之上。尽管它是一个物理理论,它的逻辑结构几乎可以媲美于欧几里得几何。它也是有史以来最成功的理论之一,它解释了所有已知的宏观的包含引力的系统,这包括整个可观测宇宙在内。其精度经常在万分之一,在等效原理情形,精度已达 10^{-13} !

广义相对论的完美主要来源于它所用的基本语言——几何。可以说爱因斯坦的直接继承人,今天仍然活跃的,即那些在gr-qc电子档案馆贴文章的人,仍然坚持用这种语言。这种语言似乎与量子力学有着本质的冲突,从而也与粒子物理学家所惯用的语言有着本质的冲突。这里我们不想强调这种冲突,但了解这种冲突的存在是有好处的。20世纪60年代之前,在相对论界和粒子物理界之间存在的对话

很少,这在一个费曼的小故事中很好地体现出来。费曼有一次去参加在北卡罗来纳州召开的相对论界的会议,出发之前他忘记了带详细地址,所以下飞机后向人打听有没有看到一些相对论专家去了何处。人家问他相对论专家是一些什么样的人,他说,就是一些嘴里不停地念叨“*gmunu*”的人。

广义相对论与粒子物理的语言冲突在温伯格(S. Weinberg)的名著《引力论与宇宙论——广义相对论的原理与应用》(*Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*)中也显示出来。温伯格尝试用粒子物理的方法重新表达广义相对论,仅取得部分成功。温伯格与费曼最早试图由自旋为2的无质量粒子及相互作用推出广义相对论,今天我们知道,人们的确可以证明广义相对论是唯一的自旋为2的无质量粒子的自洽相互作用理论。但这个证明是一级一级的证明,很难看出其中的几何原理。

广义相对论与粒子物理本质的不同还可以从引力波效应的计算中看出。早在1916年爱因斯坦就指出在他的理论中存在引力波,到1918年,他给出了引力辐射与引力系统的四极矩关系的公式。不同于电磁系统,自旋为2的粒子的辐射与偶极矩无关。电磁系统的辐射公式从来就没有人怀疑,而不同于电磁系统,引力系统的引力波辐射是否完全由四极矩公式给出长期存在争论。争论的原因是,引力是一个高度非线性理论,引力势能本身也会影响引力波辐射。爱因斯坦本人在1937年曾短暂地怀疑过引力波的存在。有趣的是,关于引力波辐射的第一级效应的争论直到1982年才完全得到解决:爱因斯坦的四极矩公式是正确的。当然,引力波辐射的效应已在脉冲双星系统中被间接地观察到,这个工作也已获得诺贝尔奖。迄今为止,引力波还没有被直接探测到,但位于美国的引力波天文台LIGO正在升级,也许2016年后能够直接观测到引力波。不过,引力波的存在已经被宇宙学家观测到了,而且他们看到的是宇宙大爆炸那一瞬间的引力波。这些时空皱纹在宇宙微波背景辐射上留下痕迹,而被美国在南极的BICEP2辐射计观测到了,他们是在2014年3月17日宣布这个轰动物理与天文学界的结果的。今后几年,引力波可能被引力干涉仪直接观测到,这将成为继最近的宇宙学中激动人心的观测之后又一令人激动的天文观测,必将极大推动相对论界与粒子物理界之间的对话。

广义相对论应用最成功的领域是宇宙学。历史上断断续续地有人考虑过用牛顿理论研究包括整个宇宙的力学体系,但从来没有一个比较完备的理论,原因之一是很难用牛顿理论得到一个与观测相吻合的宇宙模型。如果假定在一定尺度之上宇宙中的物质分布大致是均匀的,从牛顿理论导出的泊松方程没有一个有限的解。如果我们被迫假定物质的质量密度只在一个有限的空间不为零,则会回到宇宙中心论。即便如此,这个有限的引力体系也是不稳定的,终将不断地塌缩。

独立于牛顿理论的另外一个困难是奥尔贝斯(Olbers)佯谬。如果物质的主要

成分是发光的星体,那么天空的亮度将是无穷大。每颗星对亮度的贡献与它对地球的距离平方成反比,而在径向上恒星的线密度与距离平方成正比,所以总亮度以线性的方式发散。假如恒星分布在一个有限区域,尽管亮度有限,但白昼黑夜的存在说明这个亮度远小于太阳的亮度,所以这个有限区域不能太大。

现代宇宙学开始于爱因斯坦。他在1917年2月给出的宇宙学虽然不完全正确,却一举解决了上面的两个问题。爱因斯坦当然知道用牛顿理论建立宇宙论的困难,他的出发点却全然不同。爱因斯坦在许多重要工作中,往往从一个很深的原理,或者从一个在他人看来只是一种不切实际的信仰出发,而常常能够达到解决实际问题的目的。这一次他的出发点是马赫原理。马赫原理大致是说,一个质点的惯性质量在一定程度上取决于其周围的物质分布,换言之,所谓惯性系实际上就是那些相对于宇宙平均物质分布匀速运动的系统。对于爱因斯坦来说,这意味着度规完全取决于物质的密度分布,而不是密度先决定曲率,然后再决定度规。

为了实现马赫原理,爱因斯坦首先引入宇宙学原理——宇宙是均匀和各向同性的。要得到物质密度分布决定度规的结果,他发现必须修改他的场方程,这样他引进了宇宙学常数。宇宙学常数项是一个正比于度规的项,在大尺度上如果忽略曲率项,则能量-动量张量完全决定于度规。在小尺度上,宇宙学常数项可以被忽略,这样广义相对论原来的结果还成立。宇宙学常数项在牛顿理论中有一个简单的对应。可以在泊松方程中加一个正比于引力势的项,相当于给这个标量场一个质量。如果物质密度是一个常数,则引力势也是一个常数,正比于物质密度,正比系数是牛顿引力中的宇宙学常数的倒数。爱因斯坦就是从这个修正的牛顿理论出发从而避免了无穷大的困难。

爱因斯坦1917年的宇宙模型是一个封闭、静态的模型。他错误地认为在没有宇宙学常数项的情形下场方程没有满足宇宙学原理的解。他也许相信在没有物质,只有宇宙学常数的情形下也没有解。这些后来都被证明是错误的。德西特尔(W. de Sitter)在爱因斯坦的文章发表后很快就发现只有宇宙学常数情形下的解,这就是德西特尔空间。弗里德曼(A. Friedmann)于1922年发现了没有宇宙学常数的解,这是一个膨胀宇宙模型。哈勃(E. P. Hubble)于1929年发现宇宙学红移,从而证实了膨胀宇宙模型。哈勃是观测宇宙学的鼻祖,他在1924年首先证实一些星云存在于银河系之外,从而大大扩大了宇宙的尺度。爱因斯坦后来很为当初引进宇宙学常数从而没能预言宇宙的膨胀后悔,后来他终于放弃了马赫原理。爱因斯坦没能预见到宇宙学常数是可能存在的,这个他那时认为是他一生中所犯的最大错误也许会成为他的最大成就之一(他的最大成就也太多了,近年有一个获得诺贝尔实验也与他的名字有关)。我们将在讨论弦论如何对待宇宙学常数问题时再介绍最近的宇宙学常数的天文观测。

宇宙学在 20 世纪 60 年代之前是一门高雅的学问,这方面发表的文章不多,但质量很高。60 年代末彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. Wilson)偶然发现了宇宙微波背景辐射,宇宙学遂成为一门大众学问,也就是说它成为一门主流学问,大学物理系和天文系开始有了专门研究宇宙学的教授(我们不妨在这里做一下广告:我在读大学的时候,全国只有两个天文系,宇宙学专业几乎没有。现在,全国有七个天文系或学院,中山大学刚刚成立了天文与空间科学研究院,其中重点发展的方向之一就是宇宙学)。早在 40 年代伽莫夫(G. Gamow)等人已经将广义相对论与粒子物理和统计物理结合起来,预言了核合成与微波背景辐射。标准宇宙模型开始形成。大爆炸宇宙无论从什么角度看都是唤起公众想象力的最好的东西,它却是爱因斯坦理论的一个应用,一个并不是最深刻但肯定是最重要的应用。

迪克(R. Dicke)在我看来是一个很了不起的人。他对广义相对论的实验和理论都做出过很有原创力的贡献。在实验上他的贡献如等效原理的精确检验。当人们满足于宇宙学原理是一种第一原理时(爱因斯坦早期认为是马赫原理的一个推论),他开始怀疑均匀各向同性应是早期宇宙动力学过程的结果。宇宙学原理只是他提出来的标准宇宙模型不能解答的三个问题之一。另外两个问题是:为什么在宇宙早期空间曲率与物质密度相比非常非常小;为什么早期相变的遗迹几乎不可观察到,如磁单极。正是他在康奈尔大学的演讲促使古思(A. Guth)提出暴涨宇宙论(Inflation),从而一举解决了宇宙论中的三个“自然性”问题。记得 1982 年我考到中国科学技术大学做硕士研究生,那时暴涨宇宙论提出仅一年。我的老师从杨振宁的石溪理论物理研究所访问回来,刚刚写了一篇这方面的与相变有关的文章。他在很多场合宣传暴涨宇宙论,他的大弟子从剑桥回来也谈相变时的泡泡碰撞。这对一个刚刚接触理论物理的研究生来说是非常新鲜的话题。不过我心里也有点嘀咕,这个利用最新粒子物理进展的宇宙模型要解决的问题也太哲学了,有可能被观测所证实吗?过了近十年,暴涨宇宙论的第一个间接的、有点模糊的证据才出现,这就是轰动一时的柯比(COBE)实验。该实验发现宇宙微波背景辐射有非常小的大约为 $1/100000$ 的涨落,暴涨宇宙论的大尺度结构形成理论需要这么大的涨落。霍金曾说柯比实验是 20 世纪最重要的发现,这倒不免有些夸大。令人兴奋的是,最近的宇宙微波背景辐射的功率谱的测量说明宇宙是平坦的,即宇宙目前的空间曲率几乎为零,这正是暴涨宇宙论的预言之一,而功率谱曲线的形状也与暴涨宇宙论的预言一致。在我准备第二版的时候,BICEP2 的原初引力波的发现,几乎证实了暴涨论。可以预见,古思不久即将获得诺贝尔物理学奖,某些实验家也许也将获奖。

做类似宇宙微波背景辐射的功率谱的测量要花很多钱,与如今的高能物理实验相比,却又少得多。台湾大学物理系曾与台湾“中央研究院”天文研究所合作,斥