

走向统一的自然力

超弦理论：四种自然力走向统一的一种尝试(V)

厉光烈¹ 刘 明²

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 湖北第二师范学院物理与机电工程学院 430205)

4. 自然力实现统一了吗?

首先, 让我们回顾一下“自然力走向统一”的认识历程。

在自然力“走向”统一的过程中, 对力的认识, 经历了三次飞跃: 第一次, 从“定性”到“定量”, 即从墨翟的“力, 形之所以奋也”到牛顿的“力与运动的改变成正比”, 也就是说, 从对自然现象的观察、描述到实验、理论研究, 其间, 伽利略通过斜面实验来研究落体运动并第一次用数学公式来表述物体的运动规律, 随后开普勒借助第谷的观测资料发现了行星绕日运动三定律, 为牛顿发现力学三定律和万有引力定律、创建经典力学, 奠定了实验和理论基础。

第二次, 从“超距”到“近距”, 即从牛顿发现万有引力的“超距作用”到法拉第和麦克斯韦引入场来描述电磁力的近距作用, 其间, 奥斯特的“电动生磁”、安培的“有序分子电流产生磁性”和法拉第的“电磁感应”, 为麦克斯韦借助矢量分析写出电磁场方程、创建电磁理论, 奠定了实验和理论基础, 而赫兹发现电磁波则验证了麦克斯韦的电磁理论, 另外, 他还证实了麦克斯韦关于“光就是电磁波”的预言。应当指出: “超距作用”意味着力的传递是不需要时间的, 其速度为无限大, 因此, “空间”和“时间”是相互分离的, 时空是 3+1 维(即三维空间加上一维时间)的, 时空观是绝对的; “近距作用”意味着力的传递是需要时间的, 电磁力是通过光来传递的, 光速是有限的, 后来, 爱因斯坦引入光来定义“同时”, 发现了“同时的相对性”, 创建了相对论, 指出“空间”和“时间”是相互联系的, 时空是 4 维的, 时空观是相对的; 他还引入“光子”来传递电磁力, 将“力”与“粒子”

建立了联系, 人们开始不仅探索“自然力的统一”而且探索“自然力”与“物质基本组分”的统一。尽管爱因斯坦自己并不承认, 或者说, 他并未意识到, “光子”的引入已经使对运动的描述从“宏观”过渡到“微观”、从“经典”跃迁到“量子”, 即从牛顿和爱因斯坦的“因果决定论”到哥本哈根学派的“量子决定论”, 相应地, 时空观也从爱因斯坦狭义和广义相对论所决定的“相对时空观”到海森伯不确定原理所给出的“量子时空观”^①。

第三次, 从“现象”到“本质”, 即从墨翟和牛顿的“力是运动变化的原因”到杨振宁的“对称性决定相互作用”——强、弱和电磁力来自于规范对称性而引力则由时空对称性所决定; 时空则从“3+1 维”或“4 维”到“10 维”或“11 维”, 即对粒子的描述从“点”(海森伯不确定原理使这个“点”变得模模糊糊以至于有可能隐藏多余的维数)到“弦”再到“膜”, 施瓦兹、萨斯坎德、威腾和马尔达西那等创建超弦/M 理论, 尝试统一描述物质基本组分及作用于其间的四种自然力。

这三次飞跃, 概括地说, 就是力(3+1 维时空)→场(4 维时空)→对称性(多维时空)。物理上, 它们反映了科学研究的三步曲: 观测→实验→理论。具体地讲, 就是从观察自然现象、归纳运动规律到通过实验检验(证实或证伪)观察所得的运动规律, 再到借助数学工具定量描述这些运动规律进而从理论上揭示现象的本质。数学上, 它们总与引入优美的崭新的数学思想密切相关: 伽利略首先用代数公式来描述实验发现的物理规律; 牛顿引入微积分来细致地描述物体的运动并用几何学来研究引力, 发现了牛顿第二定律和万有引力定律; 麦克斯韦用矢量分析写出了电磁场方程; 爱因斯坦用 4 维时空和黎曼几何创建了狭义和广义相

对论；杨振宁等将么正群引入描述强力和弱力的规范场揭示了力的本质是对称性；威腾等引入卡拉比-丘流形将超弦理论中的 10 维时空改造成现实的 4 维时空使统一描述物质基本组分及作用于其间的自然力成为可能……哲学上，它们，也可以说是“自然力走向统一”的每一步，都为唯物辩证法的三大规律：“对立统一律”、“量变到质变”和“否定之否定”提供了有力的佐证，例如，广义相对论与量子力学融合为超弦/M 理论，反映了“对立统一律”；耦合常数的“跑动”导致引力之外的三种自然力的强度逐渐趋于一致体现了“量变到质变”；而拉格朗日的经典决定论→哥本哈根学派的量子决定论→霍金的“黑洞的信息丢失”和牛顿的绝对时空→爱因斯坦的相对时空→超弦理论的多维时空则充分体现了“否定之否定”，等等。

另外，还应指出的是，在日常生活中，人们十分熟悉的力：马拉车的力、人打狗的力，还有原子弹爆炸的力，实际上，都不是自然力，而是有效力，前（两）者是有效电磁相互作用——分子力；后者是有效强相互作用——核力。正是这些有效相互作用为物理学带来了广泛的应用，前者造就了物理学的最大分支学科——凝聚态物理；后者不仅导致原子弹爆炸结束了第二次世界大战而且产生核能缓解了能源危机。

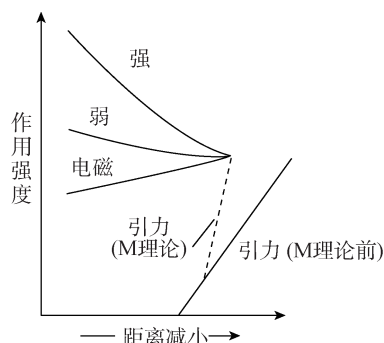
进而，让我们来讨论超弦/M 理论实现自然力的统一了吗？

前面提到，耦合常数的“跑动”可以导致引力之外的三种自然力的强度逐渐趋于一致。在 M 理论出现之前，弦论学家已经证明，如果选择最简单的卡拉比-丘流形，引力作用差不多也能像右图中的实线那样与其他三种力接近融合，再借助一些数学技巧适当选择卡拉比-丘流形，还可以尽量避免偏离。但是，这样的事后调整显然不能让物理学家满意，因为现在谁也不知道怎么准确预言卡拉比-丘流形的具体形态，依靠那些与卡拉比-丘流形的具体形态密切相关的理论是很危险的。超弦理论第二次革命之后，威腾考察了在弦耦合常数不一定很小的情况下力的强度会有什么变化。他发现，引力的变化曲线会像右上图中的虚线那样逐渐倾向于与其他力融合，并不需要特别选择卡拉比-丘流形。这使得大多数弦论学家对超弦/M 理论有可能实现自然力的统一持乐观态度。前面曾经

提到，在施特劳明格和瓦法成功地给出了贝肯斯坦-霍金熵的微观统计解释之后，霍金对弦论的态度由原先的质疑变为大力的支持，他甚至说过：“理论物理学的末日已经为期不远了”。他指的是，超弦理论已经把物理学全部统一到一个单一的理论之中。

那么，超弦/M 理论是否就是统一描述物质基本组分及作用于其间的自然力的终极理论呢？

费曼并不这样看，他说：“爱因斯坦曾经认为，他的统一理论即将大功告成，但关于原子核他几乎一无所知，怎么能完成这个统一呢？今天，大量的东西我们没有弄清，对这一点没有给予充分的重视，却认为已经接近取得答案，怎么可能呢？”“我不喜欢的是，他们计算不了任何东西，他们不能检验自己的想法，我对任何不符合实验的东西都不喜欢。”“ μ 子与电子的质量之比精确等于 206，为什么？”虽然他讲这番话是在超弦理论第二次革命之前，现在，马尔达西那猜想已经可以用来计算与粒子物理实验相关的一些物理量，但是作者仍然认同他的以下两点看法：其一，就目前的认知水平来说，谈论终极理论仍为时尚早；另一，作为终极理论，超弦/M 理论不仅要能与粒子物理标准模型相联系，而且要能解释标准模型无法解释的一些实验事实。



在 M 理论中，四种相互作用自然融合在一起（引自《宇宙的琴弦》图 14.2）

在第五讲“夸克·标准模型·强弱电大统一”一节中，我们在介绍乔治-格拉肖 $SU(5)$ 大统一模型时，曾将其与粒子物理标准模型作了一一对应的联系：

“由此构成了 24 个 $SU(5)$ 矩阵，与之对应，有 24 个规范场：其中一半对应于 8 个胶子场、3 个中间玻色子 ($W^\pm$ 与 Z^0) 场和 1 个光子场；另一半则是在夸克和反轻子之间引起 5 种基本变换的 12 个 X 粒子场。”虽然在超弦理论第二次革命中萨斯坎德与另外

三个人已将无限大动量坐标系和光锥规范引入 M 理论提出了超弦 /M 理论的矩阵理论,使其可与费曼的部分子模型相联系,借助马尔达西那猜想还可用来计算与粒子物理标准模型有关的一些实验中的观测量,但是,从事超弦 /M 理论研究的专家告诉我,到目前为止,超弦 /M 理论还不能够与粒子物理标准模型作上述那样的联系,更不用说用它去解释像“ μ 子与电子的质量之比精确等于 206”那样的实验事实。因此,现在就说超弦 /M 理论已经是能够“统一描述物质基本组分及作用于其间的自然力”的终极理论,确实为时尚早。

另外,超弦 /M 理论能否作为终极理论,还需要实验来做最终的裁决。鉴于超弦 /M 理论所描述的是普朗克尺度 (10^{-35} 米) 包含有卷缩的多余维的超微世界,因此,要验证超弦 /M 理论就得将实验探针深入到卡拉比-丘流形内部,也就是说,要将我们的视野从目前能够达到的最小尺度 (10^{-18} 米) 深入到接近普朗克尺度,两者相差 17 个量级。正像引发原子弹爆炸的核力是有效强相互作用一样,现今被认为是基本相互作用的强力、弱力、电磁力和引力,当人们的认识深入到更深的层次之后,很有可能会变成了该层次的“自然力”的有效相互作用,因此,现今的自然力——强力、弱力、电磁力和引力未必就是超弦 /M 理论所描述的普朗克尺度的超微世界中的自然力。果真如此,超弦 /M 理论当然无法联系现今的物理实际——与现今自然力有关的粒子物理标准模型和宇宙大爆炸模型。因此,超弦 /M 理论,在未被实验证实之前,它只能被看作是统一自然力和物质基本

组分的一种尝试。随着实验探针越来越深入超微世界,或者越来越接近宇宙边缘,很有可能还会发现新的更为基本的“自然力”,还得探索与这些“自然力”相关的新物理。因此,不仅我们这一代人,也许今后若干代人,都未必能够真正实现自然力的统一,“自然力走向统一”的历程还将继续下去。

“大道无形”,终极理论应当极其简单,爱因斯坦曾经说过:他的统一场论在数学形式上应该像质能关系式那样简洁明了。超弦理论的研究对象,由四维时空中的无形的“点”到 10 维时空中的有形的“弦”,再演化为 11 维时空中的各种维度的“膜”,越来越复杂,而作为其场论真空的卡拉比-丘流形更是变化无穷,因此,与之相应的弦论、膜论和 M 理论只可能是研究过程中出现的“基础理论”,而不可能是能够描述物质基本组分及作用于其间的自然力的“终极理论”。

人类对自然现象的认识、对“终极理论”的追求只能是一个不断进步、不断积累的趋近真理的极限过程。太阳终究会有燃尽的一天,人类也必将伴随地球的毁灭而消亡,以人类有限的生命,去认清无穷变化的宇宙,创建解释一切自然现象的“终极理论”,很可能只是一个崇高的理想。

①量子时空观:不确定关系中的 t 和 x 代表时间和空间,而 E 和 p 则用来描述物质及其运动,因此不确定关系极好地描述了在微观世界里时空与物质及其运动密切相关,而导致宇宙大爆炸的极其巨大但仍然有限的能量则意味着: Δt 不可能严格为零,即宇宙大爆炸后、时空分离时,时间不是从零开始的而是量子化出现的,时空量子的尺寸很可能是用普朗克时间 (10^{-43} 秒) 和普朗克长度 (10^{-35} 米) 来度量的。

封底照片说明

量子计算机模拟幽灵粒子

在量子力学领域,看似广袤空寂的宇宙真空中,却充满了无数幽灵般的粒子。这些粒子在有与无的两种状态间变化反复。量子力学认为,在微观层面宇宙呈现的是一个模糊的超现实世界,而虚拟粒子对包括一个粒子和一个反粒子,它们在真空条件下时隐时现,并对周围环境产生影响。量子计算机可以呈现在地球环境下难以形成的高能状态下粒子的行为,这张图是

奥地利物理学家首次利用量子计算机模拟在真空中基本粒子对的形成过程,这将有助于科学家们进一步探索粒子世界。目前,高能物理的许多任务都是由大型粒子对撞机来完成,但量子计算机模拟技术可以与之间相互印证,还可以有新的发现。量子计算机模拟还能帮助科学家研究宇宙从中子星的内核及宇宙大爆炸后等高能状态下的问题。(李之 / 供稿)