

超弦——大自然的“琴弦”

The Superstring——The “String” of Nature

桂起权¹ 贺天平²

(武汉大学哲学系,教授¹ 武汉 430072; 山西大学哲学系,博士生²)

一、弦理论的基本思路概要

记得有一位哲学家说过,“你要知道梨子……,就要……。而你若要知道原子的组织同性质,就得实行物理学和化学的实验”。现代科学告诉我们,包括梨子在内的世界万物都由原子所组成,而原子又由电子与夸克所构成。然而,根据最新的超弦理论,所有这些粒子实际上又都可以分析为在超微小尺度上振动着的一根闭合的弦。也就是说,一切物质,作为其终极实在的不是点状的粒子,而只是细线状的小环。被人们认作粒子的,实质上都像一根无限纤细的橡皮筋,或似一根振荡、跳动的丝线。在超弦理论中,把这种作为宇宙万物结构与功能的最小单元称作弦。图1即为此示意图——一个普通的梨子,通过逐级分解(并放大),可以显示出越来越小的结构组分,最终归结为处在一定振动方式上的弦。

科学家始终以追寻各种自然力的统一和物质基本组成的统一为崇高理想。正因为如此,爱因斯坦才付出了整个后半生的精力艰难地探索统一场论。只是当时时机、条件还不够成熟,人们对4种基本相互作用了解得太少,强力与弱力都尚未登上科学的历史舞台。爱因斯坦是过早地走到了他的时代的前头。不过在50多年之后,爱因斯坦的统一理论

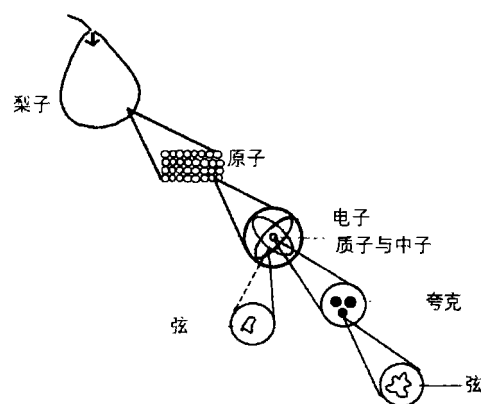


图1 一个普通梨子的内部结构组分, 可以从原子一直分解到电子、夸克和弦

的理想又重新成为注意力的焦点。现在越来越多的学者趋于相信,弦理论最有可能提供囊括一切自然力和物质的解释框架。例如,弦理论认为,现已观测到的基本粒子性质(见表1)和4种基本的相互作用的表现方式(见表2)无非是在表明,作为宇宙最小结构与功能单元的基本弦存在着多种不同的振动模式。

弦理论的研究,使人不能不想起古希腊毕达哥

出了 Oracle 8i Spatial, 提供了对象—关系数据模型, 在关系型数据库基础上引入面向对象技术, 以关系型数据库管理属性数据, 以面向对象技术处理地理空间数据, 实现了属性数据和空间数据的一体化管理, 提高了地理空间数据的运算效率。因此, 采用对象—关系型数据库 (ORDB) 管理海量空间数据应该是 Web GIS 较为理想的数据库管理平台。

参考文献

- [1] 方裕, 周成虎等. 第四代 GIS 软件研究, 中国图像图形学报, 2001, 6(A) (9), 817~823
- [2] 赵需生, 杨崇俊. Web GIS 的设计与实现, 中国图像图形学报, 2000, 5(A) (1), 76~79
- [3] 罗英伟, 汪小林等. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(8), 790~795
- [4] 赵需生, 赵鲁等. <http://www.digitalearth.net.cn/>

- [5] 伍健. 分布式构件化 Web GIS 空间数据管理研究. 北京大学硕士论文, 2000-6
- [6] 丁力, 汪小林等. 中国图像图形学报, 2001, 6(A), (11), 76~79, 1101~1106
- [7] 冯玉才编著. 数据库系统基础 (第二版). 武汉: 华中理工大学出版社, 1993
- [8] 周成虎, 李军. 地球空间元数据研究. 地球科学, Vol. 25(6), 579~585
- [9] 陈述彭, 鲁学军, 周成虎编著. 地理信息系统导论, 北京: 科学出版社, 1999
- [10] 龚健雅著. 整体 GIS 数据组织与处理方法. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1993
- [11] 李慕华. 分布式 Web GIS 构件化的研究和实现. 北京大学硕士论文, 2002-6
- [12] 常燕卿. 大型 GIS 空间数据组织方法初探. 遥感信息, 2000(2), 28~31 (责任编辑 王宏章)

拉斯的研究传统。众所周知,琴弦都有共振频率,即弦所倾向的振动频率,也就是人耳所听到的各种音调和和声。现在,弦理论里所谓的“环”也恰有类似的性质。毕达哥拉斯学派认为,自然界的秩序之所以富有意义,是因为自然规律中包含着数学核心。宇宙基本结构的奥秘就在于数的和谐,而按柏拉图的解释,则是特指的基本对称性。传说毕达哥拉斯等人是在研究声乐和器乐知识的过程中发现这一点的。他们发现,若当几条同质弦长度互成简单整数比时,它们在振动时将发出和谐的声音。毕达哥拉斯学派当时就确信,天体在运行时,因体积、速度及相对距离的差异而各自发出特殊的音调,从而会造成和谐的“天体乐章”。这一思想为随后开普勒发现行星运动三定律带来了决定性的启示。这在科学史上是有案可稽的。

毕达哥拉斯的研究传统在现代原子物理和粒子物理学中又重新发挥了某种有益的作用。瑞士学者巴尔麦在 1884 年发现了氢光谱系列的数字规律 $\lambda = b \frac{m^2}{m^2 - 4}$ 。对此,美国学者韦斯科夫在《20 世纪物理学》一书中评论说:“毕达哥拉斯的观念在这里再生:原子的频率谱代表着一系列特征值,它好像是那个原子的典型‘谐音’;‘天体谐音’重新又出现在原子世界之中”。1980 年以后,原子世界的谐音又在夸克的层次上重新出现。弦理论中的“弦”在共振频率处的振动,所产生的不是耳朵所能欣赏的音乐,而是生成一个个基本粒子。这些粒子的质量和力荷的大小,表现为相应的不同类型的基本自然力,且都由基本闭合弦的共振模式所决定。

二、从原子到夸克

在探讨宇宙基本结构方面,古希腊有两大研究传统至今仍影响着现代自然科学的发展道路,即除了上文所说的毕达哥拉斯传统(确信“数是万物之本原”)之外,还有原子论传统。这两大传统在一定程度上又是相互渗透与融合的。

大家都熟悉的是,由公元前 5 世纪古希腊哲学家留基伯与德谟克利特师徒俩所首创的原子论。原子论认为:世界是由原子与虚空构成的;物质是由极其微小的、不可再分的最终单位原子所组成的;原子是永远不灭的,且各有一定形状、大小与质量;世界上复杂多样的事件,均可以用原子的不同排列和运动来解释,正如无论古希腊的悲剧或喜剧都是用 24 个希腊字母写成的那样。对于近现代许多颇为成功的科学理论而言,原子论这一研究传统的影响几乎无所不在。近代科学中如道尔顿的化学原子论、麦克斯韦与玻耳兹曼的气体分子运动论,现代科学中如普朗克的量子论、爱因斯坦的光子说、玻尔的原子的模型,乃至整个粒子物理学,都没有例外。

1932 年以查德威克发现中子为契机,海森伯与伊凡宁柯也于当年分别独立地提出了原子核由质子与中子组成的模型,再结合玻尔的原子的模型,周期表上诸多元素的原子就都可以被成功地归结为电子绕核运行的小型太阳系。于是科学家们长久以来梦寐以求的自然界“物质的统一”似乎有望了。有一段时间,物理学家真以为电子、质子、中子就是希

表 1 基本粒子性质

第1族		第2族		第3族	
粒子	质量	粒子	质量	粒子	质量
电子	0.00054	μ 子	0.11	τ 子	1.9
电子中微子	$< 10^{-8}$	μ 子中微子	< 0.0003	τ 子中微子	< 0.033
上夸克	0.0047	粲夸克	1.6	顶夸克	189
下夸克	0.0074	奇夸克	0.16	底夸克	5.2

腊人所追求的最终的不可分的“实在”了。可是,到 1964 年盖尔曼却又进一步提出夸克模型,认为质子、中子是由夸克所组成的。并且在 1968 年,由斯坦福直线加速器中心的实验室初步证实了盖尔曼的上述猜想:质子由两个上夸克和一个下夸克组成,中子由两个下夸克和一个上夸克组成。于是拥护原子论传统的科学家又振奋起来,宇宙万物似乎都可以还原为电子、上夸克和下夸克的组合。当然,还应当补充第四种粒子——中微子,因为 1956 年雷恩与柯万找到了中微子存在的确凿的实验证据。这 4 种粒子都应当看作为基本粒子,因为从实验上完全看不出它们还能分解为更小单位的任何可能性。

可是,看来科学家以为已达至物质最大简单性的结论又要落空了。因为在宇宙射线中和在高能粒子加速器中新的粒子层出不穷,粒子的清单越来越长了。以上 4 种基本粒子中的每一种,都已发现了与自己同类的新成员:(1)与电子性质相似的还有 μ 子和 τ 子;(2)相对应地,中微子也分 3 种;(3)夸克还有另外 4 种——粲、奇、顶、底夸克(而且每一种夸克又分为 3 种用来说明强力作用方式的“色”荷,因此总共可细分为 18 种夸克)。不过,物理学家的使命感,正在促使他们透过物理世界复杂纷繁的现象,清理出秩序和规律。表 1 所列举的正是物理学家对杂多的基本粒子进行分辨和归类的一种模式,这是原子科学家们多年艰辛研究成果的结晶。实物粒子正好分成 3 组,通常被称为族。每一族包括 2 个夸克和 1 个电子或电子的伙伴,以及相对应的中微子。

三、4 种基本的相互作用

从日常生活的眼光看,自然界好像存在无数种作用力。然而,从科学的观点看,所有这些作用都可以还原到 4 种最基本的力:引力、电磁力、强力(即强核力)与弱力。

引力是人们最熟悉的,也是唯一对宇宙间任何物体都起作用的力,所以牛顿称之为万有引力。质量越大的物体,引力越大,牛顿率先用数学公式对引力作了精确描述。在牛顿力学的框架中,反作用与作用是同时发生的,引力能超越距离瞬间传递。1915 年爱因斯坦的广义相对论革新了牛顿的引力论,光线穿过强大引力场时发生的弯曲,被解释为引力场连同时空结构本身的共同弯曲。电磁力是第二种人们所熟悉的力,1831 年法拉第发现电磁感应,后来,凭借他丰富的想象力,又发明了“穿过空间的力线”与“场”的新概念,并最终由麦克斯韦用方程组的形式,以精确的数学表达式揭示了电、磁、光之间的内在联系,并预言了电磁波的存在。时至今日,只要手机“嘀、嘀、嘀”一响,甚至连小孩子都能感受到电磁波实实在在存在。虽然电磁作用要比引力的强度大得多,但由于大的物体内部电荷的正负相消,以致从宇宙的大尺度范围看,引力总是比

电磁力更大。

强力与弱力是亚原子水平的(即,在原子核的尺度以外不起作用,因此皆属短程力),而在日常生活中它们是不可能直接观测到的。强力也叫强核力,它把3个夸克“胶合”在质子或中子内部,又把质子和中子约束在原子核之中。弱力又称作弱相互作用,它作用于所有的夸克和轻子间(轻子系各类电子、中微子的统称),在放射性衰变中能改变夸克的“味”,如使上夸克变为下夸克,等等,其强度比电磁力小得多,但又远远大于引力。

20世纪物理学家已经弄清楚,四大基本相互作用有两个共同点:一是在微观层次上,每一种力都与1个粒子相关联,那个粒子就相当于最小的作用单元,即力元。电磁场的最小单元是光子,弱力与强力场的最小单元则分别是弱规范玻色子(包括W及Z粒子)与胶子。人们猜想,引力场的最小单元是引力子,实验家们已经确定了前3种力的粒子的存在和具体性质(见表2)。

表2 4种基本的相互作用力

力	力的粒子	质量
强力	胶子	0
电磁力	光子	0
弱力	弱规范玻色子(W,Z)	86.97
引力	引力子	0

四、追求自然力的统一

早在1850年法拉第就企望通过实验来检验电与引力之间可能存在联系的猜想,可是那时的技术条件还不成熟。关于统一引力与电磁力的认真的理论尝试是在1919年,那一年的日食观测证实了光线弯曲,使爱因斯坦名声大振。受此激励,波兰数学家卡鲁扎将爱因斯坦的引力场方程从四维扩展到五维。他写信告诉爱因斯坦说,通过在五维时空中表述引力,人们可以从一个统一的理论中同时导出爱因斯坦引力论和麦克斯韦的电磁理论。对此,爱因斯坦先后写过3封信作了答复。卡鲁扎不能解释五维自由度与现实世界的实际感受不一致,多余的自由度到哪里去了?1926年瑞典物理学家奥斯卡·克莱因对此给出了一个巧妙的“卷缩解释”。好比一条软水管中间打了个结,远看是一个点,近看却是一个环。额外的自由度之所以看不到,是因为蜷缩到一个十分小的尺度上去了。对此,后人合称为卡鲁扎—克莱因理论。基于水管比喻与卷缩解释,有时宇宙被戏称为“管子宇宙”。

上世纪60年代初,格拉肖等人注意到,弱力与电磁力在深层次上存在诸多相似性。60年代后期,温伯格、萨拉姆各自独立地发现了弱力的信使粒子(W和Z)存在质量自发产生机制,可以不破坏弱力内在的规范对称性。后来,温伯格、萨拉姆、格拉肖因建立电弱统一理论而分享了1979年的诺贝尔奖。更进一步的大统一理论的主要特点则是将电磁力、弱力和强力这3种力的源的特性混合在一起。于是,标志电弱作用的轻子与强力的源即夸克联系起来。在高能时3种力将归并为同一种力,夸克与轻子也将一体化。

所有这些统一理论成功的关键在于,它们均满足了规范对称性。对于规范对称性数学上是用群论

来描述的,每一种对称性的命名都与产生它的群相适应。例如,圆环绕轴转动时那种最简单的对称性,对应的群称作么正群,记作 $U(1)$;电磁力满足 $U(1)$ 对称性;电弱作用则对应于 $SU(2)$ 与 $U(1)$ 两个群的联合,其中S含有特殊之意;强力则对应于 $SU(3)$ 。

由于抽象的数学对称性对于揭示物理世界的奥秘往往有示向作用,因此探索新的对称性已成为物理学家认识世界的一种重要手段。物理世界中每个守恒定律总是对应着一种对称性。几何对称性制约着物理客体的动力学行为,空间和时间的平移不变性意味着动量和能量的守恒,转动对称性则意味着角动量守恒。对称性是自然秩序的一种象征。

“超对称”大体上说是指高度抽象的一类特殊的几何对称。例如电子(属于费米子)需要转动 720° 才复位,而光子(属于玻色子)只要转 360° 就能复位。“超对称”转动的几何操作,可以提供共同描述上述两种粒子的统一框架。不过此时,在通常的四维时空之外,必须附加额外的维数。

正如海森堡在《20世纪物理学中概念的发展》一文中所指出:物理学的现代发展又从原子论重新回到了毕达哥拉斯—伯拉图传统。柏拉图立体的基础是三角形。现代物理学中的粒子,其基础是基本对称性的数学抽象。同样,在弦理论的发展过程中,抽象对称性原则起到了重要的启示作用。

现在,4种基本力已有望得到统一。在十一维的卡鲁扎—克莱因理论中,只存在1种最基本的引力,而电磁力、弱力、强力都不过是该引力的衍生生物。所以,经扩充后的卡鲁扎—克莱因时空卷缩理论,就能在一个统一框架下对自然界所有的力给出一个完全几何化的理论描述。

五、弦理论的来龙去脉

弦理论的最直接起源可追溯到1968年。当时,许多物理学家都致力于解释粒子加速器在高能碰撞中产生的强子粒子(称作强子)的性质。维尼齐亚诺率先作出一个重要突破,他从纯粹数学目的出发,竟意想不到地发现,欧拉 β 函数居然能准确地描述出强子的大量性质(包括强子的质量与自旋间的联系等规则),同时却又不明白 β 函数内涵的真正物理意义是什么。到1970年,情况有所突破,南部阳一郎、尼尔森与苏斯金终于揭开了欧拉公式所隐含的物理奥秘。原来,欧拉函数恰是微观弦振动的数学表示。如果用一维振动弦来模拟夸克之间相互作用产生的束缚力,那么这种情况下,核强力就能精确地用欧拉函数来描述。弦好比两个夸克小球之间的“橡皮筋”,而从物理意义上看,“橡皮筋”比两端的夸克更重要——早期的弦理论即由此而诞生。

1974年以来,作为点粒子量子场论的量子色动力学(QCD)也飞速发展,它在描述强力方面取得了惊人的成功,并表现为更有效的解释工具,一时间使弦理论作为强子模型黯然失色。于是弦理论虔诚的研究者施瓦兹和谢尔克只好另谋出路。结果他们发现,尽管早期弦理论作为强力理论有困难,出现了强核区所不该有的奇怪粒子——自旋为2的零质量粒子,但是“他山之石,可以攻玉”。因为它正好精确地描述了引力子——引力的信使粒子。他们意识到弦理论的重心应当转移,从强核力转向引力。于

是,他们郑重提出,或许弦理论事实上就是一种引力理论,甚至可能是一个包罗万象的理论。但是,这一重新起步困难不少,也很少有人响应。

经过同道者10年艰苦奋斗,上述大胆设想才赢得广泛的认同。1984年,格林与施瓦兹所发表的里程碑式的论文创建了超对称的十维弦理论,颇有说服力地证明,曾让早期弦理论困惑的有关量子力学的矛盾全都是可以消解的。事实上,他们得心应手地处理了所有的数学上的自洽性问题,诸如超光速的快子、由点粒子模型所引起的无穷大、对称性反常、高维自由度与超对称的引入等等。他们甚至还证明,弦理论有足够能力去容纳4种基本力。这篇奠基性论文在3年间引发了1000多篇相关的研究文章。这些研究趋向表明,以往标准模型的许多特征,在统一理论的宏大结构中将会作为自然的结果被合乎逻辑地推导出来。这就是所谓第一次超弦革命。这次革命一下子把弦理论推到了粒子物理研究最前沿,成为弦理论发展史中的真正转折点。现在所谓超弦理论,就是1984年所创建的超对称十维弦理论及其后来的修订版的简称。惠藤发现,十维应当修正为十一维,因为在小耦合常数下作近似处理时丢失了1个维。根据与卷缩解释同样的道理,看似一维弦的线状结构实际上是二维膜面状结构。

十维理论的基本特征是,大都具有左-右不对称,而不对称往往可能导致守恒律被破坏与不自洽的可怕后果。它曾一度被看作一种反常。然而,格林与施瓦兹却在1984年发现,在超弦框架中有望找到“反常相消”的好办法。这就是说,在一开始构造理论时对称性的选择就可以有无穷多的可能性。因而,总有可能从中挑选出一种或少数几种特殊的对称结构,使得表达式中的反常可奇迹般地抵消掉,而其它的选择则不满足这一条件。

可是,作为弦理论结构的核心元素的超对称结构并不唯一。实际上,同时存在着5种满足超对称性的弦理论:Ⅰ型理论,ⅡA型理论,ⅡB型理论,杂化O(32)型理论和杂化E₈×E₈理论。人们当然指望关于宇宙的最深刻最基本的认识,即真正的科学解释只有1个,多了反而不知所措。正像老子所说,“少则得,多则惑”。当然,我们在此亦可设想:看似极不相同的5种弦理论,也许只是同一个根本理论的不同表现形式而已。实际上,“五合一”也是惠藤的想法。

第一次超弦革命之后的年月里,又出现了许多深不可测的疑难使盲目乐观者一下子变得情绪低落起来。到1995年3月,惠藤在弦理论年会上发表了一篇点燃第二次超弦革命火种的演讲。他明确地把“对偶性”确立为研究超弦的纲领性思想。关于对偶性的最鲜明的例子是:用英语讲授牛顿理论与用汉语讲授牛顿理论,在语言表达上看起来差别极大,而在实质性内容上却完全一致。而更专业化的对偶性的例子则是:对同一物理实在的不同描述确实会产生不同的数学分析方法,同时会产生在物理上相异却又互补的认识。在超弦理论中,弦除了振动之外,还有一种特有的缠绕式运动。后一种运动强烈地影响着所缠绕的空间维的几何性质。研究者发现,弦的振动能反比于蜷缩维的半径,缠绕却能正比于蜷缩维的半径。令人惊奇的是,蜷缩维半径小于普朗克尺度,而且,在“减小的管子宇宙”中所发生的物理过程,从

理论上说,与半径大于普朗克尺度且仍在“增大的管子宇宙”中的物理过程,绝对是完全相同的!进一步说,蜷缩维半径互为倒数(R与1/R)的两个宇宙中的弦理论,可以作互为等价的描述!这被称之为大一小半径的对偶性。对偶性的另一个著名例子是对偶的卡-丘形态互成镜像对称关系。在弦理论中多余维度不是随意蜷缩起来的,而是有严格限制的。数学家卡拉比与丘成桐找出了在高维度空间中合格的蜷缩形态,因此称作卡-丘形态(或卡-丘空间)。典型的多维卡-丘空间包含“孔洞”,就像面包圈似的。孔洞的边界交叉、重叠,孔洞的分布、褶皱形态,决定着弦的振动模式,相应地也决定着基本粒子的具体性质。

让人惊奇的是,弦理论家发现,同一个物理宇宙,可以通过两个形态极不相同的卡-丘空间来等价地进行描述。这两个对偶的卡-丘空间,就构成了镜像对称。格林与普里泽还采用拓扑学方法发展了一种环形变换的数学技巧,能生成物理上等价而在几何形态上变化极大的镜像流形。至此,镜像对称成了掌握超弦物理与卡-丘空间数学的有力的方法论工具。互为镜像的两个卡-丘空间,在数学处理上的难度往往有很大的差别。既然两者在物理上等价,我们就可以将其变换成容易处理的方式来对待了。

我们在上文中已经一再表明,毕达哥拉斯研究方式对把握宇宙结构之奥秘极有启示作用。特别是,对称性原理为认识物理世界的许多事物提供了洞察的工具。可以认真地说,在惠藤的超弦理论的对偶性研究纲领指引下,5个弦理论的确有望统一。原因如下。(1)惠藤发现,Ⅰ型弦理论的强耦合特征与杂化O型在小耦合常数下的已知特征完全一致,这就是所谓强弱对偶性。在此,对偶性原理为强耦合提供了新的分析工具:微扰法本不能处理强耦合,但若变换成对偶的弱耦合图景,就好处理了。(2)后来,胡尔与汤森又发现ⅡB型弦是自对偶的,也就是将其耦合常数(K>1)变换为它的倒数(1/K),结果完全一样。(3)回头再考虑大小半径互为倒数的对偶性,则可发现ⅡA与ⅡB型理论正好在这种对偶性下实际发生了转换,杂化O弦与杂化E弦的关系也是这样。(4)惠藤与霍拉瓦还分别发现,强耦合的ⅡA型弦及杂化E分别与十一维的超对称引力存在对偶关系。

尽管那个尚待定论的、统一的十一维超弦理论的具体特性还不很清楚,惠藤还是暂时定名其为M理论。这个用暗含“谜”意的英文字母命名的理论,也含有诸理论之“母”和“膜”的理论之意(谜—Mystery,母—Mother,膜—Membrane)。而它确实也为把5个弦理论结合在一起(外加1个十一维超引力论)提供了极有希望的基础。

最后应该说明一下,在可见的未来,弦理论、超弦理论,仅能停留在纯理论(包括数学)的探讨层面上。因为若想用高能加速器来实验验证“弦”、“超弦”的实际存在,那末,人类现有的高能加速器尚待加大1000万倍以上,这实际上几乎是不可能的。

主要参考文献

- [1][美]B·格林·李泳译.宇宙的琴弦.湖南科学技术出版社,2002
- [2][英]P·C·W·戴维斯等编.廖力等译.超弦.中国对外翻译出版公司,1994 (责任编辑 蔡德诚)