

# 对称与不对称, 哪个更根本

耿 建

## 一、物理学中的对称及启示

对称就是指物体相同部分有规律的重复。对称变换亦称对称操作, 是指使对称物体(或图形)中的各个相同部分, 作有规律重复的变换动作。德国女数学家艾米·诺特(Emmy Noether, 1882~1935)指出: 如果运动规律在某一变换下具有不变性, 必然存在一个对应的守恒定律。

爱因斯坦建立狭义相对论的开创

性论文《论动体的电动力学》开头是这样写的: 大家知道, 麦克斯韦电动力学(像现在通常为人们所理解的那样)在用于运动物体时, 就要引起一些不对称, 而这种不对称似乎不是现象所固有的。他这里所说的不对称, 指的是闭合导体(如螺线管)相对磁体运动时, 若磁体运动螺线管不动, 则螺线管中产生的感



应电流是涡旋电场作用的结果; 若磁体不动、螺线管运动, 则螺线管中的产生感应电流是洛伦兹力作用的结果。前者是感生电动势、后者是动生电动势, 从经典电动力学的观点来看, 二者的产生机制完全不同。而从相对运动角度来看, 又是不应该的。正是基于这种考虑, 爱因斯坦力图彻底改造整个经典物理学的框架结构, 导致狭义相对论这一经典物理学宏

伟蓝图上的最后一章成为经典物理的集大成之作。显然, 对称性考虑在爱因斯坦建立狭义相对论的道路上是一个重要突破点和路标。这也可看作诺特定理的典型例证。

## 二、对称性与守恒定律

物理规律对称性指的是某一变换下物理规律保

验证了的, 目前没有第五种长程力的任何证据。极小质量粒子在空间中是容易激发的, 至少可能造成像引力波辐射那样的能量辐射, 但在脉冲双星引力辐射中似乎没有发现额外损失。暗能量的假设长期忽视了小质量标量场在空间尺度上会发生变化可能造成的影响。既然它是个极小质量的场, 总是假定它在全空间均匀而不会振荡传播, 这在理论上并不成立。

“暗能量”方式解释当今宇宙加速膨胀, 几乎也无法避免使用精细调节参数手段的问题。同样无法解释 why now 问题。比起 cc 面临的问题, 它没有丝毫改进。

一种看法认为, 只要确切测出暗能量在时间上有变化, 那么它一定不是宇宙学常数, 必是新的标量场缓变行为。其实就是真空能也不一定绝对不变。例如, 四次偶势的自发破缺真空能量可被表达为粒子耦合常数和质量这两个参数的组合。既然粒子耦合常数和质量都可以跑动, 那么真空能也是可以跑动的, 也许只是很缓慢的对数跑动。宇宙膨胀和能标跑动之间肯定有着某种关联, 但是它们之间的关系目前尚不清楚。宇宙的特征能标是什么? 因此,

即使确切测出暗能量在时间上有细微变化(或者说, 态方程不绝对为  $-1$ ), 也不能排除有效 cc 的可能性。

弦理论的确导出极大数量的真空, 这些真空总体的能级间距极为密集, 但又被较高较厚的壁垒相互隔开(以致具有极长寿命), 这就是 Landscape 概念, 为有效 cc 的人择奠定了相当合理的理论基础。今天我们观测到的有效 cc 之所以小且与物质密度同量级, 是人择原因。

要想在弦理论中把众多因数合成的有效 cc 设为零, 并找到极小质量的标量粒子去解释“暗能量”, 反而是件非常困难的事情。

因此, 我们应该采用奥卡姆剃刀原理(即能用简单原理解释的现象, 就不要用复杂假设去解释它)删繁就简, 在没有彻底否定不为零有效宇宙学常数方案之前, 可以不必太费心思地去考虑那些过于离奇的假设。

(章德海, 北京市中国科学院研究生院 100049; 孙成一, 陕西省西安市西北大学现代物理研究所 710069)

持不变的特性。例如惯性系(时空是独立的、均匀的、各向同性的), 牛顿力学定律和万有引力定律的数学形式在宏观低速经典力学中经过伽利略变换保持不变(力学相对性原理)。设  $K'$  系相对于  $K$  系作匀速直线运动, 这里时空均匀、平直而对称。  $K$  系一个粒子沿  $X$  轴正方向运动方程是  $ma_x = m d^2x/dt^2 = F_x$ , 由伽利略变换  $t = t'$  和  $x = x' + vt$ , 有  $dt = dt'$ 、 $a_x = d^2x/dt^2 = d^2x'/dt'^2 = a'_x$ 。上式表明,  $K$  系内物体的加速度等于  $K'$  系内物体的加速度, 而牛顿力学中的质量是不变量, 故  $F_x = F'_x$ , 所以  $K$  系和  $K'$  系中的牛顿定律形式相同, 物理方程具有伽利略协变性。但当物体速度  $v$  接近光速时, 物体质量是变化的, 物体在运动方向上长度收缩, 站在伽利略变换的立场上, 这意味着时空的均匀性和各向同性受到破坏, 时空的非均匀性、非对称性使物理定律在不同惯性系中表现形式不一样, 发生了对称破缺。例如光在真空中的速度是  $c$ , 而在其他惯性系中则为  $c + v$  或  $c - v$ , 伽利略变换与光速不变性不协调。爱因斯坦修正伽利略变换, 提出洛伦兹变换, 重新构建时空均匀性、对称性, 使所有物理定律在不同惯性系中经洛伦兹变换后数学形式保持不变, 物理方程具有洛伦兹协变性(深一级对称), 这就是狭义相对性原理。在  $v \ll c$  的情况下, 洛伦兹变换式就转化为伽利略变换式。力学相对性原理、狭义相对性原理都是局限于惯性参考系, 然而自然界不存在这样的参考系, 宇宙是一个浩瀚的引力场, 具有引力的空间不是惯性空间, 因此存在引力的空间并不均匀, 相对性原理不适用于这样的空间(对称破缺)。为了解决这一问题, 爱因斯坦在广义相对论中引入等效原理。等效原理认为, 加速系中的加速度等效于引力场中的引力加速度(强等效原理), 这相当于引入一个相反作用抵消引力场对时空均匀性的破坏(或者说引入一个相反弯曲空间抵消原空间的弯曲), 时间空间均匀了、各向同性了, 相对性原理仍然成立, 即物理定律适用于任何一种运动参考系。换句话说, 就是物理方程应当具有广义协变性(新一级对称性)。但是, 由于引力场的中心对称性, 这样构造出来的惯性空间只能是局部的(弱等效原理)。

从上面的例子可以看出, 在一定条件下表现出来的良好对称性, 在新条件下可能显现出对称性破缺。自然现象中的很好对称性可能反映出其背后物理机制本身就具有这种对称性, 但也有可能物理机

制没有这么高的对称性。不断发现和探索对称破缺及其与条件的联系, 可以逐步加深对世界的认识。

有了守恒定律后, 物理学家眼中的自然界变化就呈现出简单、和谐、对称的特征, 也就变得易于理解了。所以科学家对守恒定律有一种特殊的热情和敏感, 人们极不情愿推翻那些受到公认的守恒定律, 这就进一步提升了对称性在人们心中的地位。我们无法设想: 在没有对称性的世界中, 物理定律也变动不定, 那该是多么混乱而又令人手足无措!

对对称性的依赖源自对简单性的追求。宇宙之美是按照最简单原则构造出来的。“宇宙是按照最优化系统的进化路线发展起来的。宇宙的进化方向与环境之间的最佳匹配, 就构成了一种简单性的美。”简单性是物理学家们长期追求的一个目标, 美的理论应该以最简单的形式描述最广泛的物理现象。爱因斯坦认为: “……一切科学的伟大目标, 即要从尽可能少的假说或公理出发, 通过逻辑的演绎, 概括尽可能多的经验事实。”被誉为近代科学革命开端的哥白尼日心说之所以能被公认, 一个非常重要的原因就是因为它比托勒密的地心说简单。简单的一种表现形式就是结构上的对称性。

### 三、对称与不守恒的物理规律

自然界呈现了以对称性为特征的各种美, 再加上在探索未知领域时利用对称性所取得的成就, 对称性的观念也就在不知不觉中根植于我们的头脑。诺特定理更使人坚信每一个对称性的背后一定有一个守恒定律。但事实并非如此简单, 最著名的就是微观粒子的宇称不守恒。

所谓宇称就是指一个基本粒子与它的“镜像”粒子完全对称。人在镜中的影像和真实的自己总是完全相同——包括容貌、装扮、表情和动作。同样, 一个基本粒子与其“镜像”粒子的性质完全相同, 其运动规律也完全一致, 这就是“宇称守恒”。假如一个粒子顺时针旋转, 其镜像粒子从镜中看起来就是逆时针旋转, 但是这个旋转的所有定律都是相同的, 因此镜内镜外粒子宇称守恒。按照诺特定理, 与空间反射不变性(所谓空间反射, 一般指的是镜像)对应的就是宇称守恒。牛顿运动定律就是严格符合宇称守恒的。事实上除了弱力, 宇称守恒理论的确在其他所有领域都得到了验证。但是 1956 年, 李政道和杨振宁大胆断言:  $\tau$  和  $\theta$  是完全相同的粒子(后来被称为  $K$  介子), 但其运动规律在弱相互作用环境中

却不一定完全相同。通俗地说,这两个相同的粒子如果互相照镜子的话,其衰变方式在镜内镜外居然不一样!用科学语言来说,“ $\theta - \tau$ ”粒子在弱相互作用下宇称不守恒。紧接着,华裔实验物理学家吴健雄用两套实验装置观测钴 60 的衰变,她在极低温(0.01K)下用强磁场把一套装置中的钴 60 原子核自旋方向转向左旋,把另一套装置中的钴 60 原子核自旋方向转向右旋,这两套装置中的钴 60 互为镜像。实验结果表明,两套装置中的钴 60 放射出的电子数差异很大,而且电子放射方向也不互相对称。实验结果证实弱相互作用中宇称不守恒,1957 年李政道和杨振宁因此荣获诺贝尔物理学奖。

更为重要的是,并非只有弱相互作用宇称不守恒。微观世界的基本粒子有三种基本对称方式:一种是粒子与反粒子对称,即粒子和反粒子适用定律相同,叫做电荷(C)对称;一种是空间反射对称,即同一种粒子之间互为镜像、运动规律相同,叫做宇称(P)对称;一种是时间反演对称,即若颠倒粒子运动方向,粒子运动相同,叫做时间(T)对称。自从宇称守恒定律打破后,科学家很快又发现,粒子和反粒子的行为也不完全一样!后来竟发现时间本身也不具有对称性!1998 年末微观世界首次爆出违背时间对称性的事件——欧洲核子研究中心的科研人员发现,正负 K 介子在转换过程中存在时间上的不对称性,K 反介子转换为 K 介子的速率要比其逆转过程(K 介子转变为反 K 介子)快。1956 年,科学家得到一个重要定理——CPT 总是守恒的,因此单独的 C 不对称、P 不对称、T 不对称或 CP 不对称等,就意味着我们必须将宇宙要作为一个统一整体来认识而非割裂成一些独立部分。但或许也如近代微生物学之父巴斯德所说:“生命向我们显示的乃是宇宙不对称的功能。宇宙是不对称的,生命受不对称作用支配。”居里夫人也曾说:“非对称创造了世界”。对称破缺也许是宇宙和大自然和谐运转的法则。

#### 四、对称与不对称,哪个更根本

李政道先生指出:“艺术和科学,都是对称与不对称的巧妙组合”。就物质世界本身而言,其对称必导致统一性,而对称破缺则导致多样化。只对称,没有对称破缺,也就只有统一性、没有多样化,就谈不上美妙,甚至也谈不上多姿多彩之间的协调和谐,在这一层面也可以说对称破缺是信息之源。

对称性赋予自然界统一的共性,使整个自然界和谐有序;而对称破缺则赋予自然界差异,打破了对称性平衡、静止、稳定、单调和不变的原有序序,使自然界多姿多彩、充满活力。现实世界的存在和演化正是对称性与对称破缺的辩证统一:艺术界极其重视完美对称性中微小破缺的价值,物理学界从上世纪 60 年代开始深刻认识到对称性破缺的重要性。

不对称也许是说自然对某一方面有所偏爱,事事处处都要达到绝对平衡对称就不会产生“万物之灵”。道理其实很简单:虽然对称性反映不同物质形态在运动中的共性,但是只有对称性被破坏才能使其各具特性。正如德国哲学家莱布尼茨所说,世界上没有两片完全相同的树叶。仔细观察树叶中脉(即树叶中间的主脉)的细微结构,你会发现就连同一片叶子两边叶脉的数量和分布、叶缘缺刻或锯齿的数目和分布都是不同的。科学研究还发现,不对称原质的新陈代谢活动能力,比起左右对称的化学物质至少要快 3 倍。由此可见,不对称性对生命进化有着重要意义。自然界的发展,正是对称性不断减少的过程。

宇宙大爆炸假说和粒子物理学大统一理论进一步描绘了宇宙演化从完全对称到逐步丧失对称性的过程。大爆炸最初瞬间存在完整的对称性,夸克和轻子不可分,强、弱和电磁作用相统一。随着温度的下降,对称性逐渐破缺,强相互作用分化出来,剩下弱相互作用和电磁作用的对称性(即弱电统一)。宇宙继续冷却到目前的温度范围时,弱电统一也破缺了,宇宙丧失了大部分对称性,只留下正负电荷等少数对称性。

其实不仅是自然界,绝对的对称即使在崇尚完美的人类文明中也并不讨好。一幅看来近似左右对称的山水画,能给人以美的享受。但是一幅左右完全对称的山水画却呆板而缺少生气,与充满活力的自然景观相比根本无美可言;太极图的反对称也给人更多遐想。正如杨振宁所说:“我和许多同事们都相信,崭新的想法还可能会导致对称性概念沿着尚未开拓过的方向上继续衍生发展出去。”

在思考对称与不对称的过程中,我们的认识将逐步进入更深的层面,从而更接近自然存在的本质,也许这才是更有意义的。

(江苏省南通市天星湖中学 226010)