

时空的对称性

宫自强

时空的对称性是大自然的奇妙特性之一，这种特性几乎是无处不在。例如，从宏观的角度看，人和动物的形体结构是左右对称的，植物的结构也是左右对称的，飘落的雪花的结构也是对称的。从微观的角度看，所有晶体都是对称排列的，水分子的排列也是具有严格的对称性。

对称性无论在人们的日常生活中，还是在科学研究和应用技术领域，都具有非常重要的作用和地位；它潜移默化地影响着人类的观念和思维，这点可以从人类建筑的对称结构和人的对称审美观来说明；尤其在物理科学的研究中，例如基本粒子的研究、半导体物理的研究等等，时空对称性都是处于核心地位的重要概念。

实际上对称性是有严格科学定义的。1951年德国数学家魏尔给出了如下的定义：“对一个事物进行一次变动或操作，如果此操作后，该事物完全复原，则称该事物对所经历的操作是对称的，而该操作就叫做对称操作”。

在物理科学中，时空对称性也具有严格的定义：“如果有一个物理定律经过一定的操作后，物理定律的形式保持不变，我们称该物理定律具有对称性”。由于物理操作的不同，将有不同种的对称性。研究表明，对应于每一种对称操作，都有物理学的一个守恒定律与其对应。下面我们给出比较详细的讨论。

时空对称性包括空间对称性和时间对称性。空间对称操作包括空间反射操作、空间转动操作和空间平移操作等。它们都是通过使事物的空间位置(坐标)发生数量上或符号上的变化而完成对称操作的。时间对称操作包括与空间反射类似的时间反演操作和与空间平移操作类似的时间平移对称操作等。它们是通过使与事件相关联的时间的量值和符号的改

理材料的性质(像弹性、机械力特性)；或者细胞怎样抵制环境的影响并适应环境。比如由于疾病(如癌症)引起细胞附着力与细胞之间的识别变化时，如何用特定的边界层力和细胞膜的弹性去控制细胞附着力与细胞之间的识别。正确回答这些问题，需要发展能够精确测量细胞或组织中细胞膜物理特性的物理

变而完成对称操作的。

空间左右对称性

首先我们给出左右对称操作的定义：“设 X 轴垂直于镜面，原点就在镜面上。将一半图形的坐标值 X 变成 $-X$ ，就得到了另一半图形。这 X 坐标的变号就叫做左右对称操作。”由于它与人们照镜子这一反射后成虚像的现象相同，所以又叫做镜像对称操作，或空间反演操作。也正是由于这个原因，我们又称左右对称称为镜像对称。最直观的例子就是人体对称结构中的所有左右部分，都可经过平面镜成像左右对称操作而互换，左手图像可成为右手图像，左侧图像可成为右侧图像，反之亦然。左右对称操作现已在科学技术中被广泛使用，并起到了重要作用。在物理学中，与空间反演对称性相对应的守恒量叫宇称。它描述反演操作下之行为的波函数的一种物理性质，空间反演就是将三个空间坐标同时对原点反号，若波函数反演后不变则其宇称为 1 (或称“偶宇称”)，若波函数在反演只改变符号则其宇称为 -1 (或称“奇宇称”)。宇称守恒指的是：在经过某一相互作用后，粒子系统的总宇称和相互作用前粒子系统的总宇称相等。可以证明，对应于左右对称的是量子力学中的宇称守恒定律。由于宇称的概念比较抽象，我们这里不作一般证明。

空间转动对称性

转动对称操作的定义为：“如果使一个物体绕某一个固定轴转过一个角度后，它又和原来完全一样，我们就称这个操作为转动对称操作。这种对称叫做转动对称。”由于这种对称常与固定轴的空间位置有关，故又称为轴对称。例如，对一个球体而言，它对通过其球心的任意方向的固定轴都具有对称性，而一个圆锥体只有对通过它的轴线的固定轴具有对称性。还有，

方法。仍然存在许多新的领域需要物理学家去探索。为此，科学家要克服狭义的专门化概念，继承19世纪科学的美德，在更广阔的基础上追踪科学。

(译自 Physics; 施昌勇 北京服装学院基础部 100029; 常哲 中国科学院高能物理研究所 100049)

圆柱体相对通过轴线的固定轴转过任意一个角度都可完成一次转动对称操作, 而对一个六棱柱, 至少要转过 60° 后才能完成一次转动对称操作。这说明, 转动对称的对称性具有不同的级别和程度。其中最高的级别和程度为球对称, 也叫做各向同性。下面我们来证明, 对应于转动对称的是角动量守恒定律。

空间转动对称性等价于空间各向同性, 亦即空间在各个方向的物理性质都相同。我们取一个系统作为研究对象, 系统的势函数用球坐标表示为 $E_p = E_p(r, \theta, \varphi)$, 我们让系统在空间转过一个角度 $\Delta\varphi$, 即 $\varphi' = \varphi + \Delta\varphi$, 根据空间转动对称性的定义, 应有

$$E_p(r, \theta, \varphi + \Delta\varphi) = E_p(r, \theta, \varphi)$$

根据牛顿运动定律不难得到:
$$\frac{\partial E_p}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial t} L_z$$

其中 $L_z = xp_y - yp_x$, 是沿 Z 方向的角动量。由于系统的势函数 E_p 具有空间转动对称性, 即旋转不变性, 故有

$$\frac{\partial}{\partial t} L_z = 0$$

即 $L_z = \text{常量}$ 。即角动量在与转角 $\Delta\varphi$ 所在的转动平面垂直的 Z 轴方向上的分量 L_z 守恒。

空间平移对称

空间平移对称操作的定义为: “如果使一个形体发生平移后它仍保持原形状, 我们就说该形体具有空间平移对称性。”物理学中的空间平移对称性是指: “一个物理事件, 如果该物理事件所涉及到的全部仪器、设备、操作方式及与该物理事件有关系的一切内外部因素都不予改变, 仅仅是将其平移到另一空间位置处, 那么这个物理事件可以以完全相同的方式再现。”例如任一个物理实验, 我们可以在不同的地点以完全相同的方式进行 (内外部因素都不改变), 而得到完全相同的结果。可以证明, 对应于空间平移对称的是动量守恒定律。限于篇幅, 我们不予证明, 但可以形象地描述一下。例如作匀速直线运动的质点, 它不断地进行平移操作, 但它的动量一直保持不变。

时间平移对称性

时间平移对称性即时间的均匀性。至今为止, 人们所做过的物理实验的结果, 均未发现与物理实验的开始时刻有任何关系, 同一个物理

实验, 在其他因素都不变的情况下, 今天做或明天做并不能引起实验结果的不同, 这一客观事实充分证明时间对称性的存在。可以证明, 对应于时间平移对称性的是机械能守恒定律。或者说, 机械能守恒定律是时间对称性的表现。

时间反演对称性

时间反演操作就是把物理过程中的时间参量变号, 即把 t 换为 $-t$, 变号后对物理规律的结果有不同的影响。

下面我们以自由落体为例来说明如何进行时间反演操作。对一个做自由落体运动的质点, 它的位移 s 、速度 v 、和加速度 a 与时间的关系分别为:

$$s = gt^2/2$$

$$v = gt; a = g = \text{const}$$

我们把 t 换为 $-t$, 得到:

$$s = gt^2/2; v = -gt \quad a = g = \text{const}$$

从上述公式可以知道: 对一个做自由落体运动的质点进行时间反演操作后, 它的位移仍是原值, 速度的方向与原来相反、速率不变, 加速度的大小和方向均不变。

如果我们把一次自由落体实验用摄像机摄录下来, 然后倒放, 就可以直观地观察到自由落体的时间反演操作。这时, 质点会向上运动, 而且越来越慢。这充分说明速度方向相反、而加速度方向不变的事实。由于质点的质量与时间反演无关, 由力 $F = ma$ 可知, 力 F 也是不变的。这说明牛顿运动定律具有时间反演对称性。同理可以证明, 许多物理方程和规律也具有时间反演对称性。

下面, 我们给出一个时空对称性与物理学中守恒定律的对应表。

时空对称性与物理学中守恒定律对应表

不可测量性	物理定律变换不变性	守恒定律	精确程度
时间绝对值(时间均匀性)	时间平移	能量	精确
空间绝对位置(空间均匀性)	空间平移	动量	精确
空间绝对方向(空间各向同性)	空间转动	角动量	精确
空间左和右(左右对称性)	空间反演	宇称	在弱相互作用中破缺
惯性系等价	伽利略变换 洛伦兹变换	时空绝对性 时空四维间隔 四维动量	$v \ll c$ 近似成立 精确 精确
带电粒子与中性粒子的相对位相	电荷规范变换	电荷	精确
重子与其他粒子的相对位相	重子规范变换	重子数	精确
轻子与其他粒子的相对位相	轻子规范变换	轻子数	精确
时间流动方向	时间反演		破缺(原因不明)
粒子与反粒子	电荷共轭	电荷、宇称	在弱相互作用中破缺

狭义相对论的创立与爱因斯坦的创新思维

乔灵爱 魏全香

1905年,爱因斯坦(A.Einstein, 1879~1955)发表了具有划时代意义的论文《论动体的电动力学》,创立了狭义相对论。他把力学现象和电磁现象的规律平等统一在相对性原理之下,得到一系列不同于牛顿力学的重要结论,解释了与牛顿理论相矛盾的全部实验现象,从根本上改变了传统的时空观念,解决了许多重要的物理问题。不仅如此,他思考问题、研究问题的创新思维带给人们更多的思考。追溯爱因斯坦狭义相对论思想的发展线索,透视其科学创新思维方法,将有助于我们深入理解他的科学思想,并从认识论、方法论的高度得到提升。

狭义相对论产生的历史背景

狭义相对论的产生有着深远的历史根源,正如爱因斯坦所说,“是一条可以追溯很多世纪的路线的一种自然发展的问题”。

众所周知,牛顿力学是整个经典物理学的基础。牛顿(I.Newton, 1642~1727)的《自然哲学之数学原理》(简称《原理》)不仅奠定了近代力学的基础,而且提示了近代科学的最初理论体系。就是在《原理》中他提出了绝对时间、绝对空间的概念,亦为牛顿力学提供了一个理想的惯性参考系。牛顿承袭了人们自古以来认为空间和时间与物质及其运动相对独立而无关的直觉,被大多数人所接受。他的绝对时空观统

治物理学长达近300年。

以太问题是与狭义相对论产生相关的问题,它发展的早期是就光本性的争论。17世纪上半叶,笛卡尔(R. Descartes, 1596~1650)最早提出“以太”假设。19世纪上半叶,菲涅耳(A.-J.Fresnel, 1788~1827)提出静止以太理论。依照该理论,相对于地球上的观察者将有以太风存在。从此,人们开始了探索以太风的实验(表1列举了一些著名的以太漂移实验)。

表1 著名的以太漂移实验

光行差实验	布拉德雷(1728)、阿拉果(1810)、爱里(1871)
部分曳引实验	斐索(1851)、霍克(1868)、迈克耳逊-莫雷(1886),肯定了菲涅耳部分曳引假说
偏振面旋转实验	法拉第(1845年发现)、马斯卡特(1872)、瑞利(1902)、布雷斯(1905)、洛伦兹理论预计有 10^{-4} 的效应,实验未得到
干涉仪实验	迈克耳逊(1881)、迈克耳逊-莫雷(1887),有利于斯托克斯完全曳引假说
转盘实验	洛奇(1892)
磁流实验	洛奇(1897),对拉摩理论有很大影响
双折射实验	瑞利(1902)、布雷斯(1904),精度达 10^{-13}
电容器扭转实验	特劳顿与诺伯尔(1903)
单极感应实验	法拉第(1831年发现)、勒赫特(1895),找不到统一的解释

最后,让我们简单说一下物理科学中的不对称性。在弱相互作用中发现的宇称不守恒现象是物理规律的不对称的表现,粒子-反粒子数量的不对称也是物理规律中非对称性的一个例子,从宏观上看外观是左右对称的动物和植物,从微观的分子水平上观察,构成他们的蛋白质的分子却几乎都是由左型氨基酸组成的,而不是与其左右对称的右型氨基酸。这个问题仍是生物物理学界的一个研究课题。还有,人们日常见到的许多宏观现象都不具有时间反演对称性,时间流动方向的破缺至今我们也不能给出任何合理的解释,所有的动物、植物都遵守从小到大的成长规律,而不能有相反过程。泄露在空气中的有害气体,不会自动再

聚合成原来的体积。也就是说,宏观现象都是不可逆的,都不具有时间反演对称性。但我们必须指出,物质的微观运动几乎都是可逆的,宏观现象是微观运动的统计结果,大量微观粒子的运动要遵从热力学第二定律,该定律指出了由大量微观粒子组成的系统总是沿着熵增的方向(即混乱度增加的方向)发展。热力学第二定律对人们理解时间概念产生了很大的影响,不可逆赋予时间以确定的方向,使人们认识到了时间的单向性,因而才有了真正的时间概念。我们的宇宙就是沿确定的方向演化和发展的,我们的大自然就是处于基本上对称而又不完全对称的和谐统一状态。

(河北省廊坊市华北航天工业学院物理系 065000)