

对称性与守恒律

陆 埏 罗 辽 复

(一)

对称性原是一个几何学名词。比如,图1a 的五角星,图1b 的圆以及图1c 的花样,均属对称图形,这是显而易见的。也是众所周知的。对称性实质上是某种不变性。比如,将图1a 的五角星转过 72° ,整个

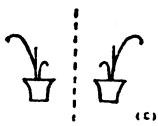
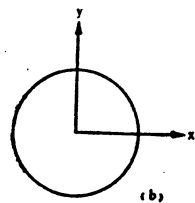
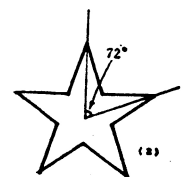


图 1

图形完全不变;将图1b 的圆转过任意角度,图形也不变;将图1c 的花样按虚线作左 \leftrightarrow 右变换,图形也不变,实际上,图1c 右方正是左方在镜子中的像。在物理学中,对称性具有更为深刻的含义,指的是物理规律在某种变换下的不变性。比如,昨天的物理规律必同于今天,今天的物理规律必同于明天。就是说,物理规律不依赖于时间起点的选择,将整个时间移动一下,物理规律不会变化。这里所说的物理规律指的是客观规律。人们对物理规律的认识在不断进步,但客观规律则是不变的。如果今天在一定内在因素和一定环境条件下发生了某

种规律的物理现象,那么可以预言明天在完全相同的内在因素和完全相同的环境条件下,必然也会发生同一规律的物理现象。这种对称性叫做物理规律的时间平移不变性。

又比如,物理规律也不依赖于空间坐标原点的选择,将整个空间移过一个位置,物理规律不会变化。北京的物理规律必同于南京,南京的物理规律必同于呼和浩特。如果在南京的实验室里做了某个实验,得到了某种物理结果,那么在呼和浩特的实验室里在完全相同的条件下做同一个实验,必然得到同样的物理结果。也许有人会说,即使实验室条件相同,南京和呼和浩特还有“地区差别”,比如地磁就不同。这是对的。应当强调指出,上面说的是“完全相同”,也不允许有地区差别。就是说,如果地磁对实验有影响,地磁差别也应设法消除或补偿。这种对称性叫做物理规律的空间平移不变性。

再者,如果将实验设备(包括测量设备、环境条件以及一切对实验有影响的因素)整个地改变一个方向(转过一个角度),实验结果也不会改变。这种对称性叫做物理规律的空间转动不变性。

现代物理学可以证明,物理规律每有一种对称性,就相应地存在一个守恒律,这是一个普遍原理。上面所讨论的三种对称性是如此之明显,如此之自然,是不容置疑的。与它们相对应的三个守恒律:

时间平移不变性——能量守恒律
空间平移不变性——动量守恒律
空间转动不变性——角动量守恒律

也经过了无数次反复的实验检验,从来没有发现过有任何不成立的迹象。因此,可以认为这三种对称性是严格成立的。

(二)

时间平移、空间平移和空间转动这三种变换都是可以连续进行的。此外,物理学上还存在着几种分立(不连续)变换的对称性,或称反演不变性。熟知的有如下三种,也有三种相应的守恒律:

空间反演不变性—— P 守恒律
时间反演不变性—— T 守恒律
电荷共轭不变性—— C 守恒律

空间反演,亦称镜像变换或 P 变换。空间反演不变性,实即左右对称性或镜像对称性,指的是物理规律在镜像变换下的不变性。换句

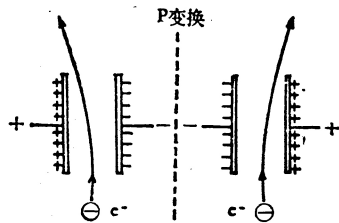


图 2

话说,当所有环境条件和内在因素均换成镜像时,客体运动和物理结果也将变为原来的镜像。举个电动力学例子:考虑图2左边那个实验,有一对平板电极,加有电压,一个电子自下而上穿越板间电场,由于被左侧正电极吸引,将略偏左而飞出。如果按照此实验在镜子中的像那样再安排一套实验(如图2右边,中间虚线相当于镜子),这两套实验安排就是左右对称的。在图2右边的实验中一切均反了一个方向,正电极变到了右侧,因此电子将略偏右而飞出。图2右方实验中电子的运动轨迹正好为左方轨迹的镜像,表明电动力学规律确实具有空间反演不变性或空间反演对称性。

电荷共轭,亦称粒子-反粒子变换或C变换。不过,这种变换并不

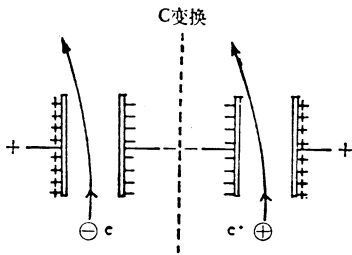


图3

一定要涉及电荷。中微子不带电,将中微子转换成反中微子,亦称电荷共轭变换。C不变性是指在一切粒子变为反粒子而反粒子变为粒子下物理规律不变。亦举类似于图2的实验作例子(如图3所示)。这时C变换相当于把所有的电荷变号,不仅正电极变负电极,负电极变正电极,而且电子 e^- 也要变为正电子(也叫阳电子即反电子) e^+ 。由于电子受正电极吸引与正电子受负电极吸引的力完全相同,粒子运动的轨迹将不会改变。这表明电动力学规律确实具有C不变性或C变换对称性。

时间反演即T变换。所谓T不变性是指物理规律在时间倒向下不变。说得更确切些,是指一切因素中与时间有关的量(如电流、速度等)里面均将时间倒向,此时客体运

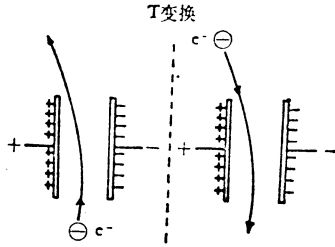


图4

动也将反向进行。仍以图2左边实验为例(如图4所示)。由于电极、电荷均与时间无关,所以它们在T变换下不改变;但电子运动在T变换下将倒转方向,所以T变换后,电子仍沿同一轨迹运动,只是倒转了运动方向,如图4右边所示。这种倒向运动也是符合电动力学规律的,也是现实世界能够实现的。这就叫做T变换下的不变性,也就是T变换下的对称性。

(三)

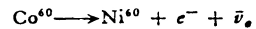
空间反演(P)、时间反演(T)和电荷共轭(C)这三种分立变换对称性不像那三种连续变换对称性那样明显。电荷共轭对称性原先对荷电粒子提出,后来推广到任何粒子-反粒子变换,是否普遍成立,本不十分显见。时间反演对称性在宏观物理现象中更有不少反例,比如热量总是从温度高的地方流向温度低的地方,倒流(时间反演)的情况是不存在的。不过,上面讨论的电子在电场中的运动,说明了电动力学规律确实具有这三种分立对称性。现代物理可以证明,那种热力学起源的时间反演不对称性实际上是一种统计效果,可根据时间反演对称的基本过程通过统计规律表现出来。因此,对于基本过程而言,这三种分立对称性在1956年以前一向被认为是严格成立的。尤其是空间反演不变性,实际上是一条十分古老的对称原理,几乎与那三种连续对称性同样地自然和明显,似乎也是不容置疑的。对于任何一个物理现象,如果将其一切环境条件和内在因素均换成其镜像,很难设想客

体运动和物理结果会不按镜像方式进行!

但是,五十年代中期,高能物理中出现了一些复杂的现象。当时发现了一种可衰变为3个 π 介子的粒子(τ)和一种可衰变为2个 π 介子的粒子(ϑ)。2 π 状态的宇称为正,3 π 状态的宇称为负。如果空间反演对称性成立,衰变过程应遵循宇称守恒定律, τ 和 ϑ 的宇称应当不同。然而实验测出 τ 和 ϑ 的质量相等,寿命也相同。如果它们不是同一种粒子,那么很难解释它们的质量和寿命为什么相同。如果它们是同一种粒子,那么衰变过程就不遵循宇称守恒律,因而不具有空间反演不变性。

李政道和杨振宁在1956年对于这种矛盾情况作了详尽的研究,他们发现,在强作用和电磁作用过程中宇称的守恒性已经有了确凿的实验证据,但是支配 τ 和 ϑ 衰变的是一种弱作用,而在弱作用过程中宇称是否守恒却还没有任何实验证据。因此,他们认为 ϑ 和 τ 实际上是同一种粒子,叫K介子,而宇称将不守恒,并且设计了可以检验空间反演是否对称的一系列实验方案。设计的原则在于安排两套实验装置,他们严格地互为镜像,然后在这两套装置中观测弱作用过程。

这类实验中最著名的一个例子是观测极化 Co^{60} 原子核的 β 衰变,这是吴健雄等人所做的确证宇称不守恒的第一个实验。原子核 Co^{60} 会放出电子 e^- 和反中微子 $\bar{\nu}$,而变为另一种原子核 Ni^{60} :



这是一种弱作用过程。 Co^{60} 本身像陀螺那样自转着(称自旋),如图5所示。为了检验这个过程是否具有镜像对称性,可按图5左方和右方安排两套完全对称的实验,并在相应的两个镜像方向探测 Co^{60} 原子核射出的电子 e^- ,比较两个探测器中记录到的电子数。如果两个电子数有显著差异,就明确地表明了镜像不对称性。实际上,将图右转

过 180° ，正好就是图左的虚线位置，只要比较图左实线和虚线方向的电子数就可以了。因此，两套实验装置是没有必要的。

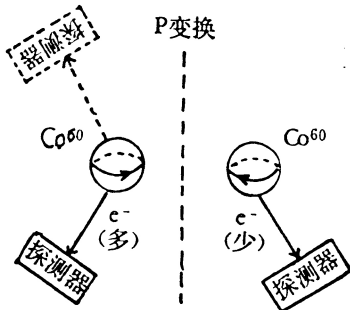


图 5

这个实验的主要困难在于如何使样品内 Co^{60} 原子核的自旋方向整齐地排列起来。实际上， Co^{60} 原子核不仅有自旋，而且也有磁矩。就是说，它不仅像个小陀螺，而且也像一块小磁铁。因此，可以用电流线圈产生磁场来使小磁铁排列起来，从而自旋方向也就排列起来了，如图 6。

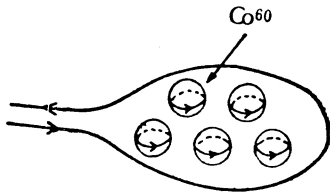


图 6

会破坏这种排列。必须将样品置于 0.01°K (离绝对零度只差百分之一度!) 的极低温度下，才能获得有效的自旋排列。显然，如果使线圈中的电流改变方向，相应磁场也就改变方向，使 Co^{60} 自旋向相反方向排列。因此，只要用一个探测器，在线圈中的电流改变方向前后各测量一次，就可以得到相应于图 5 左和右的结果。实验表明，两次测量所得的电子数相差很大，相当于图 5 左方情况的电子数多，右方情况的电子数少，确证了 β 衰变过程不具有镜像对称性。

(四)

那么，空间真的不对称了吗？

如果你将一根指南针放在一个螺线管线圈内，那么，当螺线管通以电流时，就会发现指南针的 N 极(北极)总指向螺线管(按右手定则)的正方向，如图 7 左方所示。作为其“镜像”的图 7 右方情形是不会发生的。这是一种一百多年以前就熟知的“镜像不对称”事例。这个事例真的表示空间具有左右不对称性吗？按照镜像不变性，将一切环境条件和内在因素均变为镜像，现象和结果也应变为镜像。作为环境条件的螺线管线圈电流，对于图 7 所示的镜面(虚线)，自身已经镜像对称，但当时人们并不知道指南针的内部结

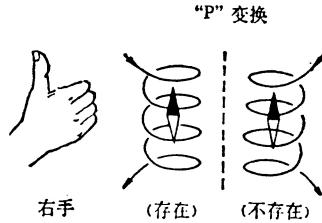
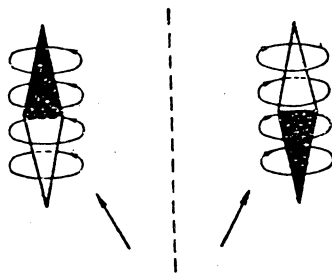


图 7

构。指南针的镜像究竟是什么，这是尚不清楚的。随着物理学的进一步发展，人们了解到，指南针的磁性实际上是由一种相当于“分子电流”的东西产生的。从“分子电流”来看，其镜像应当改变“分子电流”的方向，磁针方向应该倒转，如图 8 所示。因此，图 7 左方对于镜面(虚线)的真正镜像应当是图 7 右方的磁针倒转过来。右方磁针倒转后，就和右手定则一致了。可见，图 7 的“镜像不对称性”只是表面现象，是对指南针(磁性)的内部结构缺乏认识的结果。



分子电流示意

图 8

会不会图 5 实验中出现的不对称情况也只是表面现象？比如，也许在镜子中粒子会变为反粒子，反粒子会变为粒子。换句话说，真正的镜像变换也许是 CP (即除通常的镜像变换以外，还要同时作电荷共轭变换) 而不只是 P 。按照这种认识，真正的镜像对称应当是图 9。但是，没有现成的反原子核 Co^{60} ，目前还不能做这种直接的实验。

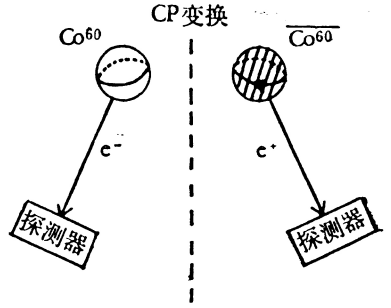


图 9

为了检验这种认识，我们来分析另一个实验，如图 10 所示。这里测量的是 π^- 介子衰变中放出的 μ^- 粒子相对于其运动方向的自旋情况。显然，图 10 左方的 μ^- 是右旋的，即以大拇指为运动方向，粒子按右手四指方向旋转；而其镜像(即图 10 右方的 μ^- 则是左旋的，即以大

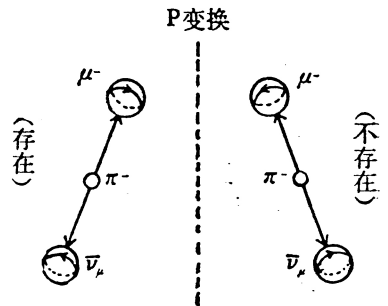


图 10

姆指为运动方向，粒子按左手四指方向旋转。实验上测得的 π^- 衰变放出的 μ^- 全部为右旋的，从未发现过左旋情况。因此，这个实验也确证了镜像不对称性。但是，实验不仅可以用 π^- 来做，而且也可以用其反粒子 π^+ 来做。重要的是，实验上测得 π^+ 衰变放出的 μ^+ 全部为左旋的，这正好表明了 CP 变换的不变

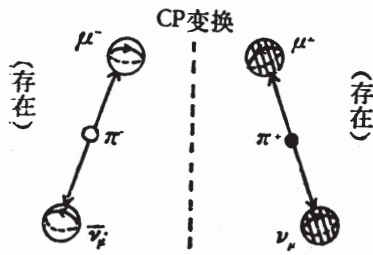


图 11

看来，空间仍然保持反演对称性，而对粒子性质的认识产生了一次飞跃：反粒子是粒子在镜子中的像！

(五)

然而，这个故事并没有结束。

1964年以后，又发现了 K_L^0 介子的弱作用衰变过程会表现出不具有 CP 对称性的现象。最直接的例子是所谓电荷不对称现象，如图 12 所示。具体地说， K_L^0 介子衰变为 (π^-, e^+, ν_e) 的可能性比衰变为 $(\pi^+, e^-, \bar{\nu}_e)$ 的可能性略大 0.33% 左右。可见， K_L^0 介子的衰变过程明确地表现出 CP 不对称性，但这种不对称性却十分微小。按照高能物理中的 CPT 定理（这个定理说，物理规律在

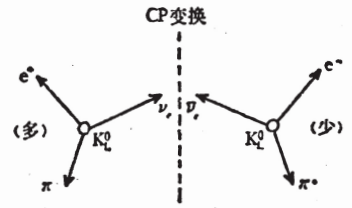


图 12

C, P, T 同时变换下不变）， CP 不守恒也就意味着 T 不守恒。为什么在 K_L^0 介子的衰变过程中会有这样微小的但又肯定的 CP 或 T 不守恒的现象呢？这是一个至今还没有得到满意答案的发人深思的问题。