

从左右对称谈起

复旦大学 倪 光 炯

如果我们说，自然现象是左右对称的，大家马上会反对说：不对，就看我们人体吧，心脏偏在左边，右手比左手灵便些，也可能粗壮些，等等。总之，人是左右不对称的，而且我们一眼看出去，很少有东西是左右对称的。

那末，力学、电磁学的规律是不是左右对称的呢？

牛顿力学的规律是左右对称的。一个用喷气推进器发动的宇宙飞船，它因向左喷气产生向右的推力而获得向右的加速度。加速度的方向与推力的方向相同（都是向右），加速度的大小正比于推力，反比于宇宙飞船的质量：

$$\text{加速度} = \frac{\text{喷气产生的推力}}{\text{宇宙飞船质量}}$$

这就是牛顿第二定律（在太空中，不考虑空气阻力）。

再从镜子里看这个宇宙飞船，它喷气的方向反了过来（向右），推力的方向也反了过来（向左）。按照牛顿力学第三定律，推力方向与喷气方向相反，镜子里虽然不能直接看到推力的方向，但可以看到喷气的方向）。但是推力的大小没变（推力的大小决定于喷出来的气的多少和气的速率，从镜子里看不到推力的大小，但镜子里看到喷出来多少气和气的速率当然和原来的一样）。另外，镜子里看到宇宙飞船加速度的大小也和原来的一样，只是方向反了过来（向左）。所以总起来看，镜子里仍然是加速度与推力的方向相同（都是向左），并仍然满足：

$$\text{加速度} = \frac{\text{喷气产生的推力}}{\text{宇宙飞船的质量}}$$

由此可见，镜内看到的牛顿力学规律和镜外看到的牛顿力学规律没有什么两样。读者也许要问，这是什么意思呢？这有以下两层意思：

第一，镜外看到的运动过程和物理规律是现实世界能够实现的运动过程和物理规律；镜内看到的运动过程和物理规律则不一定是现实世界里能够实现的运动过程和物理规律。如果镜内看到的运动过程和物理规律能够在现实世界中出现（也就是说：镜中看到的物理规律和现实世界中的物理规律相同），我们就说这种运动过程和物理规律是“镜像反射”不变的，或左右对称的。例如，在现实世界中，我们完全可以做到让一个宇宙飞船向相反的方向飞行，和镜中看到的宇宙飞船一模一样。

第二：为什么叫“镜像反射”呢？因为镜子里有映像，而且的确有了反射，向左变成向右，向右变成向左。

再看图 1，镜子外面有一只右手，镜子里是这只右手的映像。读者可以试一试，用右手去模拟镜中

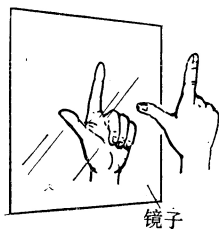


图 1

的映像是根本作不到的，但是用左手去模拟就全不费功夫。事实上镜中看到的手就是一只左手。由此可见，镜像反射不但把向左变成向右，把向右变成向左，而且把右手变成左手，把左手变成右手。所以“镜像反射不变性”也称为“左右对称性”。刚才说过，牛顿力学就是“镜像反射”不变的，或左右对称的。

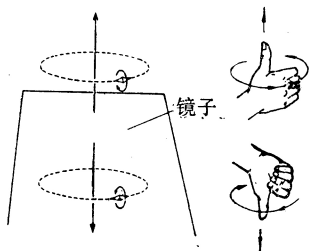


图 2

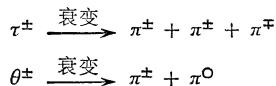
如果所有的磁性都是电流造成的，那末，电磁学的规律也是左右对称的。请看图 2，这里有一条电线，电流向上流。旁边有一个磁针，平衡的时候，磁针的方向沿着以电线为中心的圆周方向。如果用右手做成图中的样子，那么拇指的方向就是电流的方向，食指环绕的方向就是由磁针南极到磁针北极的方向。

再看镜子里，电流的方向反过来了，磁针的方向也反过来了。读者也许要问，电流的方向反过来了明显的，磁针的方向怎么也反过来了呢？这是因为磁性都是电流造成的。请看镜子外面的磁针，周围画了一个带箭头的小圆环，它代表磁针里面电子的转圈（电子的转圈形

成转圈的电流,转圈的电流造成磁针的磁性)。再看镜子里面,磁针里面电子转圈的方向倒过来了,所以磁针的磁性也倒过来了,南极变成北极,北极变成南极。再用右手做成图中的样子(下面的右手),拇指代表镜中电流方向,食指环绕方向就恰好也是平衡的时候镜中由磁针南极到磁针北极的方向。

由此可见,镜外的规律和镜内的规律都可以用右手来表示。正是由于镜内的规律和镜外的规律相同,所以电磁学的规律也是“镜像反射不变的”,或“左右对称的”。

一直到二十世纪五十年代初,人们所发现的物理规律都满足“镜像反射不变性”或“左右对称性”。但是,1956年后不久,“基本”粒子研究中却遇到了一个令人困惑不解的问题,原来带电的重介子(就是现在大家熟悉的 $K^\pm$ 介子)有两种衰变方式:一种衰变为三个 π 介子,记为 $\tau^\pm$ 介子;另一种衰变为两个 π 介子,记为 $\theta^\pm$ 介子:



根据当时的理论分析,只有两种可能性:

第一种可能性:如果“镜像反射不变性”或“左右对称性”严格成立,那末, τ 、 θ 就必定是两种不同的粒子。但 τ 和 θ 的质量是相同的,寿命也差不多,为什么是两种不同的粒子呢?

第二种可能性:如果 τ 、 θ 是相同的粒子,那末,“镜像反射不变性”或“左右对称性”就必定破坏(即不成立)。但是人们以前从来没有见过物理规律的左右对称性的破坏,这一次真的破坏了吗?这好象是一个谜,即所谓“ τ - θ 之谜”。

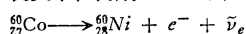
在微观世界里,“镜像反射不变性”或“左右对称性”表现为“宇称守恒”的形式。为了避免写出数学式子,读者可以直接把“宇称守恒”理解为“镜像反射不变性”或“左右对称性”,因为物理意义是一样的。上

面两种可能性可以表述为:

第一种可能性:如果“宇称”严格守恒, τ 、 θ 就必定是不同的粒子;

第二种可能性:如果 τ 、 θ 是相同粒子,“宇称”就不守恒。

1956 年李政道、杨振宁受“ τ - θ 之谜”的启发,认真分析了到那时为止的物理实验,得出一个结论,至少在“基本”粒子弱相互作用的领域里,宇称守恒定律从来没有得到过实验的检验,而仅不过是一个认识上的推论而已。接着他们提出了一些具体的物理实验的建议,目的是验证宇称守恒定律到底是否成立。其中一个“极化核 β 衰变”实验,很快地由吴健雄等利用低温技术实现,结果确凿无疑地判明,在弱相互作用中宇称守恒定律并不成立。这次实验研究的对象是钴 60 原子核的 β 衰变(半衰期 5.24 年)



钴 镍 电子 反中微子
他们把钴 60 放在低温($\sim 0.01^\circ\text{K}$)下,

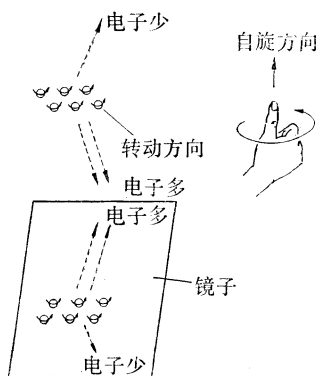


图 3

加上几百高斯的磁场,钴 60 原子核就象很多小磁针那样在磁场中整齐地排列起来了,它们很像是按相同方向旋转的许多小陀螺(图 3)。实验的目的是要判定,衰变出来的电子是向上发射的多呢,还是向下发射的多(向上是顺磁场方向,也是钴 60 核自旋的方向),还是上下一样多。

如果宇称是守恒的,就一定要

上下一样多,因为若是镜外上下一样多,必定镜里也上下一样多,镜里镜外的规律就相同了。但实验的结果却是向下发射的电子多于向上发射的电子。就是说,与自旋反方向发射的电子较多(见图 3,食指在核转动方向,拇指就是自旋方向)。再看镜子里,钴 60 的转动方向未变,即自旋方向未变,但是向上发射的电子多于向下发射的电子,就是说,与自旋同方向发射的电子较多。于是,镜外和镜里的物理规律是不相同的。现实世界(镜外):与自旋反方向发射的电子较多;镜中世界:与自旋同方向发射的电子较多,所以镜中看到的衰变过程不可能在现实世界中实现。这就确凿地证实了这种衰变过程(弱相互作用过程)是宇称不守恒(左右不对称)的。这样一来,刚才讲的第一种可能性就排除了,说明 τ 和 θ 是同一种粒子(即 $K^\pm$ 介子),它们的衰变都是弱相互作用衰变,“左右对称性”是应该破坏的。

1957 年人们又推测,弱相互作用的宇称不守恒和中微子的性质有关(在图 3 的衰变中还要放出反中微子,实验没有去测量它,所以图中没有画出来)。具体来说,现实世界里中微子(ν)是左旋的(见图 4 左

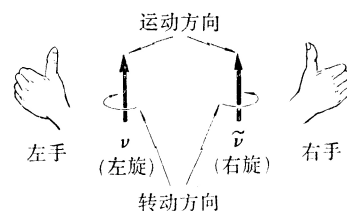


图 4

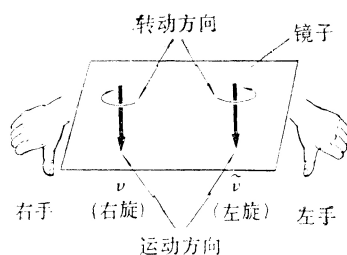


图 4'

运动方向,那末左手的食指就代表中微子转动方向;反中微子($\bar{\nu}$)是右旋的(图4右边,右手的拇指如果指向反中微子的运动方向,那末右手的食指就代表反中微子转动方向)。再看镜子里,镜子里看到的中微子(ν)是右旋的,反中微子($\bar{\nu}$)是左旋的(请读者自己用镜子验证一下这一点),和现实世界的中微子、反中微子的性质正好相反。换句话说,镜子里看到的中微子(右旋)和反中微子(左旋)在现实世界里是不存在的。这意味着什么呢?这意味着中微子(反中微子)本身的性质就是破坏宇称守恒的。所以凡是有中微子出现的过程(例如钴60 β 衰变过程),都是宇称不守恒的。

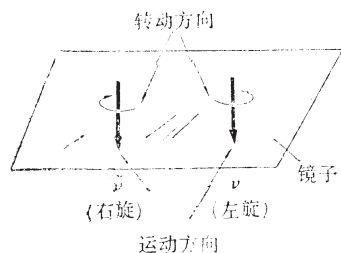


图 5

中微子(反中微子)的这种古怪的性质,起初只是一种推测,但后来在实验上也得到了证实。

请读者再对照一下图4'和图5。细心的读者一定会发现,如果把镜子里的中微子变成反中微子,反中微子变成中微子(见图5,手和图4'一样,这里不再画了),那就又是左旋的中微子和右旋的反中微子,和现实世界完全一样了。这是什么意思呢?这就是说,虽然中微子和反中微子的性质破坏了左右对称,但是中微子和反中微子的性质并不破坏“左右加上正反”的对称。

说到“正反”,这里要解释几句。中微子的反粒子是反中微子,反中微子的反粒子是中微子,所以说,中微子和反中微子互为反粒子。电子的反粒子是阳电子,质子的反粒子是反质子,中子的反粒子是反中子。所有的粒子都有它的反粒子。前面

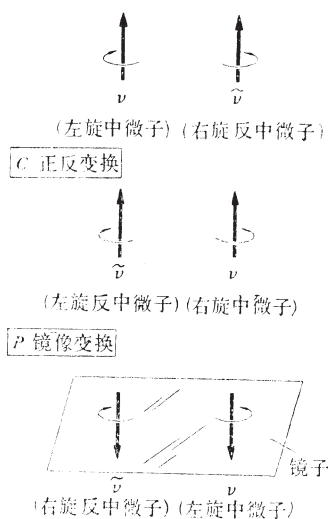


图 6

说过,左右交换对应于“镜像反射”(用P代表);现在正反粒子的交换则对应于“正反变换”(用C代表)。中微子经过正反变换,就成为反中微子;反中微子经过“正反变换”,就是中微子。电子经过“正反变换”,就是阳电子,等等。

读者立刻可以发现,左旋的中微子经过“正反变换”后就是左旋的反中微子,右旋的反中微子经过“正反变换”后就是右旋的中微子,而左旋的反中微子和右旋的中微子都是现实世界中不存在的(与现实世界的规律性相抵触),所以我们说,中微子和反中微子的性质(规律性)在正反变换下也是不对称的,或“正反变换”下也不是不变的(请读者与前面讲的“镜像反射”的不变性和左右对称性相对照),见图6。

那末,什么是“左右加上正反”变换呢?顾名思义就是“左右变换”和“正反变换”合起来的变换,简称为“CP变换”。在CP变换下,中微子和反中微子的性质是保持不变的,因为从图4和图5可以看到,左旋中微子经过CP变换后就是右旋反中微子,右旋反中微子经过CP变换后就是左旋中微子,变换后的右旋反中微子和左旋中微子本来就是有的,都是现实世界中存在的东西。(图4→图4'→图5是先

作P变换,后作C变换。图6是先作C变换,后作P变换,结果一样。)

而且中微子和反中微子性质的“左右加上正反”的不变性(简称“CP变换”不变性),可以导致弱相互作用(例如 β 衰变)的“CP变换”不变性。由于篇幅的限制,这里就不举例了。

那末,“CP变换”的不变性是不是就绝对正确了呢?也不是。问题仍然出在K介子,但这次不是带电的K介子($K^\pm$),而是中性的K介子(K^0)。原来 K^0 和它的反粒子 $\bar{K}^0$ (称为反K零)经常以叠加的形式出现,一种叠加叫做 K_S^0 ,它的寿命是

$$\sim 0.88 \times 10^{-10} \text{ 秒},$$

又叫短寿命 K^0 ;另一种叠加叫做 K_L^0 ,它的寿命是

$$\sim 5.18 \times 10^{-8} \text{ 秒},$$

叫长寿命 K^0 。 K_S^0 和 K_L^0 在CP变换下的性质是不同的。根据理论上的分析,如果长寿命的 K_S^0 的衰变过程严格遵守“CP变换”的不变性,那末, K_S^0 就只能衰变成三个 π 介子($\pi^+\pi^-\pi^0$,或 $\pi^0\pi^0\pi^0$),不能衰变成两个 π 介子($\pi^+\pi^-$,或 $\pi^0\pi^0$)。早年的实验确是显示出 K_S^0 并不衰变成两个 π 介子。可是到了1954年,人们把实验的精度大幅度提高以后,终于发现了长寿命的 K_L^0 也有两个 π 介子的衰变方式。不过为数很少,只占衰变总数的千分之二左右。但即使是千分之二,也说明“CP变换”的不变性是破坏了。

读者也许又要问,“宇称守恒”破坏之后,有“CP变换”守恒来代替它,现在“CP变换守恒”破坏了,是不是又有什么别的守恒来代替它呢?回答是有,就是CPT守恒,或CPT不变性。C和P刚才已经讲过,那末T是什么呢?T就是“时间反演”。形象地说,把一个基本的物理过程拍成电影,然后把胶卷按倒过来的次序放映,银幕上看到的就是这个物理过程的“时间反演”。例如,原子中的电子从较高的能级A跃迁到较低的能级B并放出一个光子,

这是一个物理过程，它的“时间反演”则是一个电子吸收一个光子，并从较低的能级 B 跃迁到较高能级 A。

“CPT 变换”就是“CP 变换”之外，再进行“T 变换”（即“时间反演”变换）。到 1970 年，实验上又证实了“T 变换”的不变性在弱相互作用中也肯定破坏了，但“CPT 变换”的不变性至今还是对的。

让我们回顾一下：从宇称守恒

（左右对称）到宇称不守恒（左右不对称），从宇称不守恒到 CP 守恒，从 CP 守恒又到 CP 不守恒，从 CP 不守恒又到 CPT 守恒。这确是一个曲曲折折的认识过程，但是每个曲折都使我们对客观世界的认识深入了一步。故事是不是就到此为止了呢？不会的。正如毛主席教导的，“自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”