



## ——反映粒子内在性质的一些守恒与不守恒, 对称与不对称

柯 之

玲: 今天继续讲守恒和不守恒、对称和不对称吗?

吕: 今天要讲的守恒和不守恒、对称和不对称同上次讲的有些不一样, 它们不是反映“物质不灭”和“运动不灭”, 而是反映粒子的某些内在的性质。咱们先讲同位旋吧。

### 借用一下自旋的图象—— 同位旋, 同位旋守恒

玲: 什么是同位旋?

吕: 小玲, 你记得吧, 我们讲过核子有两种带电状态, 一种是质子状态, 一种是中子状态。质子是带正电的, 中子是电中性的, 但是质子-质子之间的强相互作用同中子-中子之间的以及质子和中子之间的强相互作用没有什么差别, 不受质子带正电、中子电中性的影响。

玲: 我记得, 叔叔, 这好像叫做强相互作用的电荷无关性。

吕: 对了, 这也是一种对称性。

玲: 噢, 有电荷和没有电荷也有对称性? 这怎么对称呀?

吕: 要讲这个对称性, 就要借用一下电子自旋的图象。

玲: 这又是新鲜事, 能借用吗?

普通空间的  
取定的方向

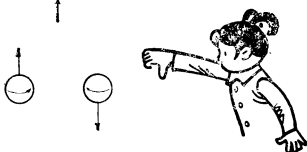


图1 在普通空间里, 核子有两个基本自旋状态, 一个是顺着取定的方向, 一个是逆着取定的方向

吕: 能。你还记得吧, 我们讲过电子的自旋是  $\hbar/2$ , 在取定一个方向之后 (例如某个磁场的方向), 它就只有两个“基本自旋状态”, 一个是顺着这个方向, 一个是逆着这个方向 (其他状态都是由这两个“基本状态”叠加而组成的)。

玲: 我记得。叔叔, 可是核子带电和不带电的两种“基本状态”同自旋的两种“基本状态”能够有什么联系呢?

吕: 可以这样来看, 用两个陀螺来代表两个质子, 它们的旋转都

顺着取定的方向; 再用两个陀螺来代表两个中子, 它们的旋转都逆着这个取定的方向 (图3)。小玲你看, 质子和中子的区别在什么地方?

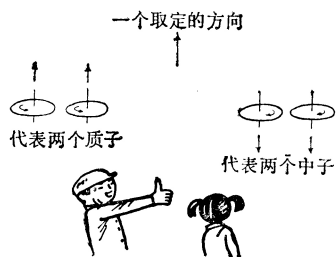


图 3

玲: 质子和中子的不同是一个带正电, 一个电中性。但从代表它们的陀螺来看, 就不是带电不带电的不同了, 而是代表质子的陀螺同代表中子的陀螺的旋转方向相反。

吕: 好, 现在有这样一个客观事实, 就是质子-质子之间的强相互作用同中子-中子之间的强相互作用一样, 能不能用陀螺表示出来呢?

玲: 能, 这就是说: 代表两个核子的两个陀螺的旋转都顺着某个方向 (两个质子), 或两个陀螺的旋转都逆着某个方向 (两个中子), 它们之间的强相互作用都是一样。也就是说, 两个陀螺的旋转方向倒转来, 它们之间 (即两个核子之间) 的强相互作用并不改变。

吕: 小玲, 你看, 这不是出现对称性了吗? 两个陀螺 (有相同旋转方向) 的旋转方向不论改变到别的什么方向, 强相互作用都

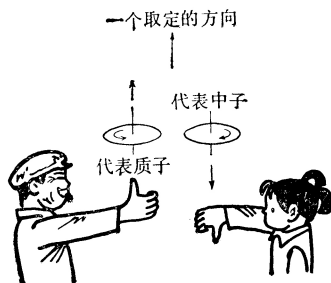


图 2

不改变。这恰好就是上面讲过的方向的均匀性。

玲：可是陀螺只是代表啊，总不能强相互作用的电荷无关性就是方向的均匀性呀！

吕：对的。但是既然用陀螺作为代表，我们总可以说，从陀螺的角度来看，强相互作用是“方向均匀”(各向同性)的。

玲：那可以。

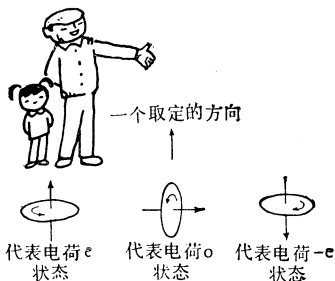


图 4

吕：好，现在我们就来作一些对比：陀螺的旋转可以和电子的自旋相对比，陀螺代表的是核子的带电状态（不是核子的自旋），我们就把陀螺的旋转叫做“同位旋”。因为核子只有两种“基本带电状态”，可用两个相反方向旋转的陀螺来代表它们，所以说核子只有两种“基本同位旋状态”。再和只有两种“基本自旋状态”的电子对比：因为电子的自旋是 $\hbar/2$ ，所以电子只有两种“基本自旋状态”。现在我们同样可以认为核子的同位旋是 $1/2$ ，同位旋为 $1/2$ 的粒子只有两种“基本同位旋状态”（即两种基本取向）。

玲：不是说还有自旋为一个 $\hbar$ 的粒子吗？

吕：对，以前说过，自旋为 $\hbar$ 的粒子有三种“基本自旋状态”。与此相对比，同位旋为 $1$ 的粒子也应该有三种“基本同位旋状态”：一种是陀螺的旋转顺着取定的方向；一种是陀螺的旋转逆着取定的方向，一种是陀螺的旋转垂直于取定的方向（参考对话②）。一般这三种“基

本同位旋状态”分别代表带电电荷为 $+e$ ， $-e$ ， $0$ 的三种状态。（图4）

玲：什么粒子有三种带电状态呢？

吕： $\pi$ 介子有 $\pi^+$ ， $\pi^0$ ， $\pi^-$ 三种，它们带的电荷分别是 $+e$ ， $0$ ， $-e$ ， $\Sigma$ 超子有 $\Sigma^+$ ， $\Sigma^0$ ， $\Sigma^-$ 三种，它们带的电荷分别也是 $+e$ ， $0$ ， $-e$ 。所以说， $\pi$ 介子和 $\Sigma$ 超子的同位旋都是 $1$ ，可与自旋为 $\hbar$ 的情况类比。

玲：哦！原来同位旋的图象都是从自旋的图象借来的呀！

吕：还有，刚才讲过，强相互作用与粒子带电状态无关。这个事实，从陀螺的观点来看，就意味着强相互作用在陀螺所在的空间是各向同性的。

玲：陀螺所在的空间不就是普通空间吗？

吕：是的。但是在这里它又有不同的意思。因为陀螺旋转的方向（也就是“同位旋”的方向）既然代表不同的电荷状态，那末陀螺所在的空间的各个不同方向就也应该代表不同的电荷状态。包含有这种意义的空间（不同的方向代表不同电荷状态的一种空间），我们把它叫作“同位空间”。于是，强相互作用在陀螺所在的空间（同位空间）的各向同性，可以形象地说是强相互作用在“同位空间”各向同性（方向均匀性）。这就是反映粒子内在性质（带电或不带电）的一种对称性。

玲：噢，原来是把空间方向和电荷状态连系起来了。可是叔叔，“同位旋”为什么用“同位”两个字，和同位素有什么关系吗？

吕：没有关系。同位素一般是指电荷相同，质量不相同的原子核，例如氕核、氘核都是氢核的同位素都带一个正电荷，但是质量不相同。同位旋的同位的意思和这不一样，例如 $\pi^+$ ， $\pi^0$ ， $\pi^-$ （或 $\Sigma^+$ ， $\Sigma^0$ ， $\Sigma^-$ ）属于同一个“同位旋三重态”，它们的电荷不

同，而质量基本上相同。所以“同位旋”的“同位”和“同位素”的“同位”的意思正好相反。

玲：唉，要不是这么讲一下，我真又搞糊涂了。叔叔，上次讲每一种对称性（或均匀性）都导致一种守恒，那么强相互作用过程中，同位空间各向同性是不是也导致某种守恒呢？

吕：是的，和空间的各向同性导致角动量守恒相仿佛，强相互作用过程中同位空间的各向同性，可导致强相互作用过程中的同位旋守恒。

玲：什么叫强相互作用的同位旋守恒？

吕：参与一个强相互作用的各个粒子，各自处于不同的带电状态。每个粒子的带电状态由一个“同位旋陀螺”的角动量（例如核子“同位旋陀螺”的角动量为 $1/2$ ， $\pi$ 介子“同位旋陀螺”角动量为 $1$ ，等等）来代表，所有这些陀螺的角动量所组成的总角动量，在强相互作用过程中不会改变，这就是强相互作用过程中的同位旋守恒。

玲：原来“同位旋守恒”也是借用了自旋陀螺的图象。叔叔，同位旋守恒和电荷守恒不是一回事吧。

吕：不是一回事，但强子的电荷和其他的量子数如同位旋、重子数、奇异数之间有如下的关系：

$$\text{电荷} = \left( \text{同位旋在给定方向的分量} + \frac{\text{重子数} + \text{奇异数}}{2} \right) e$$

例如质子的重子数是 $1$ ，奇异数是 $0$ ，同位旋在给定方向的分量是 $1/2$ （因为陀螺旋转是顺着给定方向），代入得电荷为 $+e$ 。又例如中子的重子数、奇异数和质子一样，只是同位旋在给定方向的分量是 $-1/2$ （因为陀螺旋转是逆着给定方向），代入得电荷为 $0$ 。另外 $\pi$ 介子、 $\Sigma$ 超子的同位旋在给定方向的分量有三种，即 $+1$ （顺着给定方向，



如  $\pi^+$ ,  $\Sigma^+$ ), 0 (垂直于给定方向, 如  $\pi^0$ ,  $\Sigma^0$ ) 和 -1 (逆着给定方向, 如  $\pi^-$ ,  $\Sigma^-$ ),  $\pi$  介子的奇异数、重子数都是 0,  $\Sigma$  超子的奇异数是 -1, 重子数是 +1, 代进公式……(图 5)。

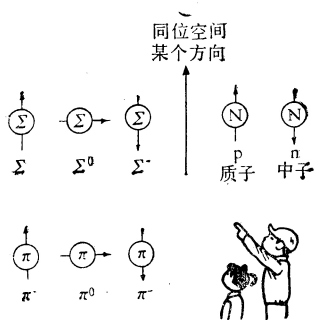


图 5 核子(N)的同位旋是 1/2, 它在同位空间有两种基本取向: 一是顺着同位空间的取向 (质子状态, 分量是 +1/2); 一是逆着这个方向 (中子状态, 分量是 -1/2).  $\pi$  和  $\Sigma$  超子的同位旋是 +1, 在同位空间有三种取向

玲: 行, 不用讲了, 让我回家自己去检验一下。

吕: 那很好。

### 同位旋的不守恒

玲: 叔叔, 在弱相互作用和电磁相互作用里, “同位旋”还守恒吗?

吕: 在弱相互作用和电磁相互作用里, 同位空间不是各向同性的, 所以同位旋就不守恒了。

玲: 是吗? 怎么样的不各向同性呢?

吕: 比如说, 核子的同位旋顺着某取向时, 它就是质子, 带阳电; 核子的同位旋反着这个方向时, 它就是中子, 电中性。带阳电的粒子和电中性的粒子的电磁性质当然是不一样的, 它们的电磁作用也是不一样的。由此可见, 同位旋的不同方向代表着不同的电磁作用。也就是说, 电磁作用在同位旋空间不是各向同性的。

玲: 这种不各向同性还有什么表现呢?

吕: 表现之一是如果粒子的“同位旋陀螺”所指的方向不同, 那末, 粒子的“静止质量”也会有不同。例如质子和中子虽然同属核子, 但它们的“同位旋陀螺”所指的方向相反, 它们的“静止质量”就有大致千分之一的差别。与此相仿,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  和  $\pi^0$  之间也有约百分之三的质量差,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$  之间也有近百分之十的质量差。

玲: 弱作用和电磁作用在同位空间的不各向同性还有什么后果?

吕: 还有一个重要后果, 就是在这些作用过程中, 同位旋是不守恒的。

玲: 同位空间各向同性, 导致同位旋守恒; 同位空间不各向同性, 就导致同位旋不守恒, 是吗?

吕: 是这样。

玲: 举一个例子好吗?

吕: 我们选弱作用衰变  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$  的例子吧。刚才说,  $\pi$  是同位旋三重态, 有  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$  三种, 同位旋是 1。但是  $K^+$ ,  $K^0$  的强作用也与它们带的电荷无关, 和质子、中子相仿, 构成同位旋二重态, 它们的同位旋是 1/2。如果同位旋守恒, 一个  $K^+$  衰变出来的  $\pi^+$  和  $\pi^0$  的总同位旋就应该是 1/2, 可是 (同位旋是 1 的) 两个  $\pi$  介子无论如何组不成总同位旋为 1 的状态。你看, 在这个弱作用的衰变过程里, 同位旋就是不守恒的。

### 小玲觉得好像进了动物园

玲: “基本”粒子世界的各式各样的作用和现象真是复杂啊!

吕: 是复杂, 但是经过分析之后, 就可以看到“基本”粒子世界的一切运动和转化都根源于各种对立的统一。正如毛主席所指出的: “对立统一规律是宇宙的根本规律”。“事物发展的根本原因, 不是在事物的外部而是在事物的内部, 在于事物内部的矛盾性”。

玲: 这话真是千真万确, “基本”粒子世界就是充满着矛盾。不过, 叔叔, 我又想到一个问题。上次讲了一些守恒定律, 你说它们都可以从空间均匀性, 时间均匀性, 方向均匀性 (各向同性) 以及相变换不变性, 规范变换不变性, ……等等导出, 怎么导出呀?

吕: 小玲, 我本想给你讲的, 可是因为你没有学过微积分, 所以我就没有讲。

玲: 为什么一定要用微积分呢? 不用微积分不行吗?

吕: 恩格斯在《自然辩证法》里曾经说过: “只有微分学才能使自然科学有可能用数学来不仅仅表明状态, 并且也表明过程: 运动”。恩格斯还说过: “数学中的转折点是笛卡儿的变数。有了变数, 运动进入了数学, 有了变数, 辩证法进入了数学, 有了变数, 微分和积分也就立刻成为必要的了, ……”客观世界的运动就是这样。一般的定性地讲运动, 可以做到不用微积分, 但如果要定量地讲运动, 包括讲量化的场的各种守恒定律, 那就离不开微积分和微分方程了。这是由客观事物的性质所决定的, 是主观愿望改变不了的。例如上次讲过的第二种规范变换就包括了微分运算。小玲, 我们还是继续定性地来讲守恒和不守恒吧, 以后有时间再来讨论有关微积分的问题。

玲: 叔叔, 每次你给我讲“基本”粒

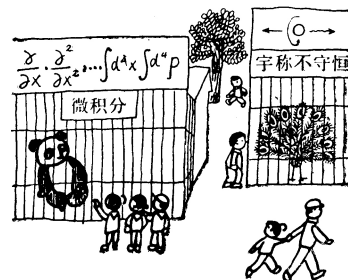


图 6 小玲觉得好像进了动物园

子的故事，都使我想起小时候爸爸妈妈带我去逛动物园，看着这个动物也新鲜，看着那个动物也有趣，总不想离开。

吕：小玲，看到微积分又觉得新鲜了吧，不过我们来不及看它了，今天我们还有不少“动物”等着去看呢！现在我就带你去看“宇称的守恒和不守恒”。

### 左和右的对称——宇称守恒

玲：宇称守恒是什么？

吕：让我们先来看看坐标系。以前我们曾经用左手和右手来表示左旋和右旋，这次我们要用左手和右手来说明两个不同的然而左右对称的坐标系。小玲，

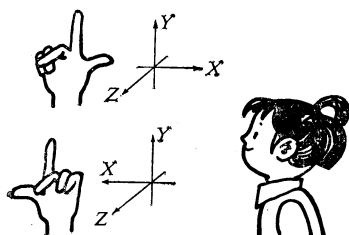


图7 右手坐标系和左手坐标系都是立体坐标系

你先看我的右手，我让右手的姆指代表X方向，食指代表Y方向，中指代表Z方向。这样就画出了一个立体的坐标系，叫做右手坐标系。再看我的左手，我也让姆指代表X方向，食指代表Y方向，中指代表Z方向，这样就画出另一个立体坐标系，叫做左手坐标系。

玲：这有什么意思呢？

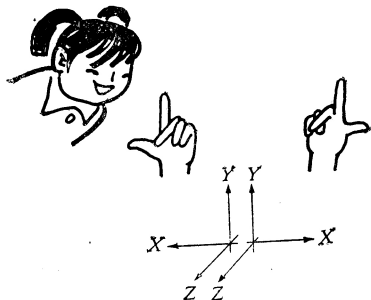


图8 左手坐标系和右手坐标系重合不起来

吕：小玲，你试试看，这两个坐标系的X、Y、Z轴能够重合起来吗？

玲：好，我试试看……。唉呀，总凑不到一块去！如果我把左右的食指、中指分别指向相同的方向，姆指就指不到相同的方向去，而是一个朝左，一个朝右。

吕：这就是说，如果把两个坐标系的Y轴和Z轴重合起来，X轴就根本重合不起来，而是一个X轴的箭头朝左，另一个X轴的箭头朝右。由此可见，左手坐标系和右手坐标系的的确是两个完全不同的坐标系。好，现在你再在镜子里看看你的右手（和右手坐标系），同你的左手（和左手坐标系）比较一下。

玲：嗨，镜子里的右手（和右手坐标系）的模样同我的左手（和左手坐标系）一样！

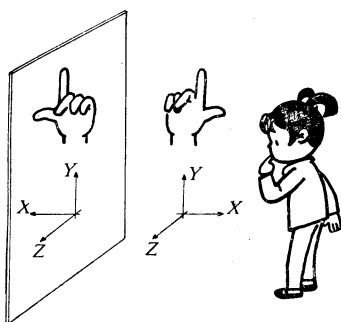


图9 右手坐标系在镜子里看就变成了左手坐标系

吕：对了，左手坐标系和右手坐标系虽然完全不同，但左手坐标系在镜子里看就是右手坐标系，右手坐标系在镜子里看就是左手坐标系，因此我们就把左手坐标系和右手坐标系称为“互相镜像对称”的。运动也可以有镜像对称。比方说，图10有一架喷气式飞机，它在向右喷气，产生的反推力，使它向左飞。旁边有一面镜子，镜子里也看到有一架喷气式飞机，但它是向右飞，向左喷气。小玲，你说，能不能让喷气式飞机像

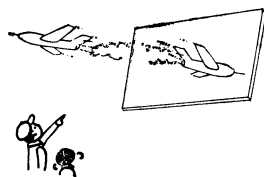


图10 在镜子里看，飞机倒过来飞，向左喷气

镜子里的喷气飞机那样向左喷气，产生向右的反推力呢？

玲：完全可以，把飞机的头掉过来，让它向左喷气，产生的反推力就必定使它向右飞，和镜子里看到的完全一样。

吕：不错，你看喷气飞机的镜像运动（在镜子里看到的喷气飞机的运动）完全可以在现实的世界里实现。

玲：这里大概有什么讲究了吧？

吕：是的，凡是现实世界中的一种运动（或过程），只要它的镜像运动（或过程）也可以在现实世界中实现，那末，这种运动（或过程）就称为“宇称守恒”的（或“镜像对称”的）。这种运动所遵循的规律就称为“宇称守恒”的运动规律。刚才讲的喷气飞机随喷气而产生反推力的运动规律就是“宇称守恒”的。因为镜子里看到的运动完全可以在现实世界中实现。

玲：叔叔，请你再举个例子。

吕：好，再举一个例子。这里有一个通直流电的线圈，它应该产生一个向下的磁场。磁场里有一根通直流电的电线，按左手定测，这根电线受到一个把它推向镜面的力，使它向镜面挪动。再向镜子里看，看到通直流电的线圈是按反方向绕的，上面那根直的电线的电流方向不变，但这根电线是从里往外挪动。小玲，你说这个镜像运动能够在现实世界中实现吗？

玲：能够，因为在现实世界里，线圈按反方向绕，磁场也就倒过来了（向上），所以那根电线所受的力和挪动方向也必定倒过来

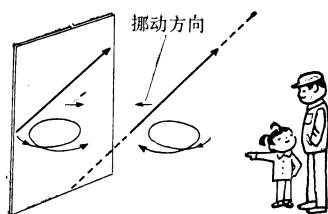


图 11 镜子里的线圈电流是倒过来流的, 直的电线的挪动方向也是反过来的。镜子里的现象在现实世界中可以实现

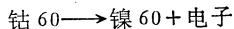
了(根据左手定则)。

吕: 说的对, 由此可见, 电磁相互作用的运动(或过程)也是“宇称守恒”的。此外, 强相互作用也是“宇称守恒”的。

### 左和右的不对称——宇称不守恒

玲: 有没有宇称不守恒的情况呢?

吕: 有, 弱相互作用的运动(或过程)就是宇称不守恒的。人们曾经用钴60的 $\beta$ 衰变实验来证实这一点。钴60的 $\beta$ 衰变(弱作用衰变)是



+ 电子型反中微子

在这个实验里, 用外加磁场和低温的办法使钴60原子核的自旋都指向相同的方向。

玲: 为什么要外加磁场和低温?

吕: 因为钴60原子核也带有磁性(像一个小磁针), 在外加磁场的作用下, 它们可以规则地排列起来(小磁针都指向相同方向, 自旋也都指向相同方向)。温度不低也不行, 否则原子热运动也会破坏原子核的规则排列。

玲: 为什么要使钴60原子核的自旋都按相同方向排列?

吕: 因为要看一看衰变出来的电子的飞行方向和钴60原子核自旋的方向之间有什么联系。

玲: 结果怎样呢?

吕: 结果发现, 衰变出来的电子大部分都飞向与钴60原子核的自旋相反的方向。小玲, 你还记得我们讲过的自旋方向吗?

玲: 记得, 右手握拳伸出姆指, 让食指中指的弯转方向和旋转方向一致, 那末姆指就代表自旋方向。

吕: 对了, 如果像图上那样也摆上一面镜子, 那末大部分电子是飞向镜子的。可是往镜子里看呢? 我们看到钴60原子核的自旋方向没有变, 可是大部分电子的飞行方向改成由里往外飞了。换句话说, 大部分电子的飞行方向是与钴60原子核的自旋方向相同的。小玲, 你说这个镜像运动在现实世界里能够实现吗?

玲: 不能, 因为刚才说过, 实验上发现, 在现实世界里, 钴60衰变出来的大部分电子的飞行方向是与钴60原子核的自旋方向相反, 不是相同

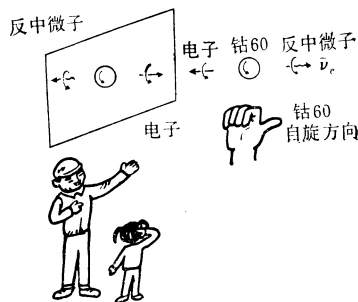


图 12 钴60的 $\beta$ 衰变。电子前进方向与钴60原子核自旋方向相反。镜子里看到电子前进方向与钴60原子核自旋方向相同。镜子里的现象在现实世界中不能实现。所以是宇称不守恒的

吕: 小玲, 你看, 这个实验证实了弱相互作用和前面的两个例子不一样。它的镜像运动(或过程)在现实世界里是不能实现的, 所以弱相互作用宇称不守恒。

玲: 如果镜像运动也能够现实世界中实现, 电子应该怎么飞呢?

吕: 应该在顺着钴60原子核自旋的方向和相反的方向, 有一样多的电子。

玲: 哦, 对了, 这样一来, 镜子里看到的电子也是两个方向一样多, 就和现实世界一样了。这

就宇称守恒了。

吕: 但事实不是这样, 钴60 $\beta$ 衰变出来的电子主要是飞向与钴60原子核自旋相反的方向, 这个过程镜像(过程)在现实世界中不能实现, 它是一个宇称不守恒的过程。

玲: 这个过程里还放出反中微子。

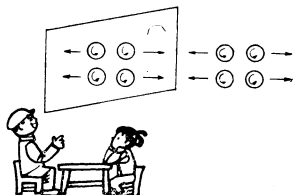


图 13 如果在钴60的自旋方向和相反方向放出的电子一样多, 镜子里和现实世界就是一样的, 就是宇称守恒的。但事实上不是这样

叔叔, 我记得你以前讲过, 中微子只参与弱相互作用, 不参与强相互作用和电磁相互作用。

吕: 对了, 不但中微子只参与弱相互作用, 而且它本身的运动性质就是宇称不守恒的。

玲: 是吗? 为什么呢?

吕: 我们设想有一个中微子, 中微子都是左旋的(见对话③), 所以它的前进方向和它的自旋方向相反(如前一样, 自旋方向用右手姆指表示, 见图14)。再看镜子里, 中微子的前进方向倒转, 自旋方向不变, 所以在镜子里, 中微子前进方向和自旋方向相同, 成了右旋的。可是右旋的中微子在现实世界是不存在的(见对话③), 所以……

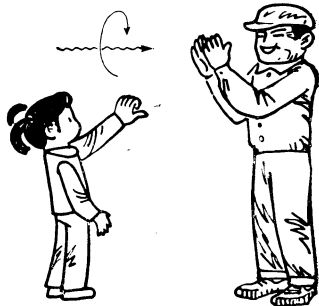


图 14 中微子左旋, 前进方向与自旋方向相反

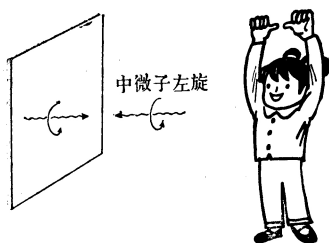


图 15 镜子里是右旋中微子，是现实世界没有的

玲：所以，中微子的运动性质就是宇称不守恒的，对吧？叔叔，如果中微子朝上走呢？它在镜子里的前进方向就不会倒转了吧。

吕：中微子朝上走并不能改变我们的结论，因为镜子里中微子的前进方向虽然不变，它的自旋方向却倒过来了，所以仍然成了右旋的。这样的镜像运动仍旧是现实世界不存在的，宇称仍然不守恒。

玲：哦，原来不管中微子朝什么方向走，它的运动都是宇称不守恒的。

吕：对了，中微子运动的“宇称不守恒”反映了中微子的一种内在性质，这种内在性质和弱相互作用的“宇称不守恒”又有着密切的关系。如果中微子也参与强相互作用和电磁相互作用，那末它就可以把“宇称不守恒”带到强相互作用和电磁相互作用中去。但事实上中微子不参与强作用和电磁作用，所以强作用和电磁作用的“宇称守恒”并没有受到中微子的破坏。

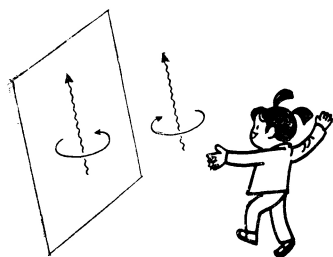


图 16 中微子朝上，它的镜像运动仍是右旋中微子

### 正反变换的守恒和不守恒——联合反演 (CP 变换) 的守恒

玲：叔叔，既然镜子里看到的中微子是右旋的，那不是和反中微子一样了吗，反中微子是右旋的呀！

吕：对了，你说的这句话事实上表明了另外一种守恒，叫做联合反演 (CP 变换) 守恒。为了说明这种守恒，我们先说一种变换，叫做“正反变换”——正粒子变成反粒子，反粒子变成正粒子，其他不变。通过“正反变换”，中微子就换成反中微子，反中微子就换成中微子。“正反变换”又叫“电荷共轭变换”，因为通过这种变换，电子就变成阳电子，质子就变成反质子，所有的正电荷都变成负电荷，负电荷都变成正电荷。不过，中微子是不带电的，所以把它称为“正反变换”更恰当一些。小玲，你说一说，左旋中微子经过“正反变换”后变成什么呢？

玲：变成左旋反中微子，因为刚才说“正反变换”只是使正粒子变成反粒子，反粒子变成正粒子，其他不变，左旋也不变，对吗？

吕：对了，可是左旋反中微子在现实世界中并不存在，(见对话⑧)，所以，中微子的运动性质在“正反变换”中也是不守恒的！

玲：中微子的不守恒真多！可是叔叔，你刚才不是说有另外一种守恒吗？

吕：好，有了“正反变换”，我们就可以来讨论这另外一种守恒了。用 P 代表“镜像变换”(就是往镜子里看)，用 C 代表“正反变换”，用 CP 代表“镜像变换”和“正反变换”的联合。我们立刻可以看到，左旋中微子经 CP 变换后就变成右旋反中微子，右旋反中微子经 CP 变换后就变成左旋中微子(请读者按照前面说过的 P 和 C 的变换自己检

验一下)：

(存在) C (不存在)  
左旋中微子  $\rightarrow$  左旋反中微子

P (存在)  
 $\rightarrow$  右旋反中微子

(存在) C (不存在)  
右旋反中微子  $\rightarrow$  右旋中微子

P (存在)  
 $\rightarrow$  左旋中微子

左旋中微子和右旋反中微子都是现实世界中客观存在的。所以，中微子的运动性质，在单独的“镜像变换”和单独的“正反变换”中虽然都是不守恒的，但是在“镜像变换”和“正反变换”联合起来的“CP 变换”中则是守恒的。这种守恒简称“CP 守恒”。

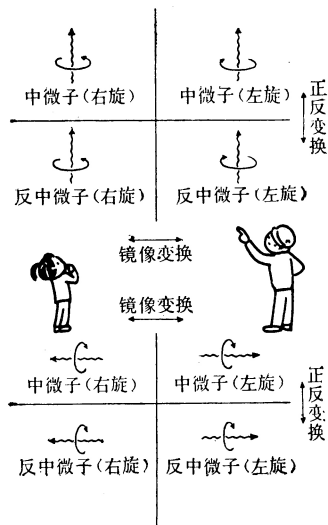


图 17 中微子的镜像是右旋中微子，再经正反变换就变成右旋反中微子。中微子经正反变换变成左旋反中微子，左旋反中微子经镜像变换也变成右旋反中微子(右上、左下是现实世界存在的)

玲：强相互作用和电磁相互作用在“正反变换”下也守恒吗？

吕：都守恒。值得注意的是，因为中微子不参与强相互作用和电磁相互作用，所以它也不会把“正反变换”的不守恒带到强相互作用和电磁相互作用中去。

玲：中微子是参与弱相互作用的，弱相互作用在“正反变换”下大概也不守恒吧？

吕：你猜对了，弱相互作用不但“镜像变换”不守恒，而且“正反变换”下也不守恒。但是，弱相互作用在“正反变换”和“镜像变换”联合起来的“CP 变换”下，一般是守恒的。

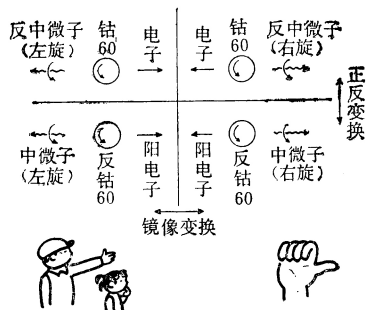


图 18 钴 60  $\beta$  衰变和反钴 60 的衰变 (右上、左下是现实世界存在的)

玲：叔叔，你再举个例子吧。

吕：行，再举一个。以前我们说过，所有的粒子都有它的反粒子，所有的原子核也都有它的反原子核。现在，假定我们有反的钴 60 原子核，就是说，钴 60 核中的质子和中子都换成反质子和反中子，我们会发现，反的钴 60 原子核衰变出来的东西，不是电子和中微子，而是阳电子和中微子，而且大部分阳电子的飞行方向，是和反钴 60 原子核的自旋方向相同的（见图 18 左下）。由此可见，如果对钴 60 的衰变过程只作“正反变换”，并不能得到现实世界可以产生的过程，因为“正反变换”后，阳电子的运动方向是和反钴 60 的自旋方向相反的（见图 18 右下）。小玲，你看，对弱作用过程作“正反变换”后，得不到现实世界可以产生的过程，这不就是弱作用在“正反变换”下不守恒吗？

玲：叔叔，钴 60 弱作用衰变的“正反变换”不守恒也主要是中微子造成的吧？

吕：是的，你看，钴 60 衰变出来的反中微子是右旋的，如果只做“正反变换”，钴 60 原子核变成反

钴 60 原子核，电子变成阳电子，都是允许的，但是右旋反中微子变成右旋中微子，却是现实世界中不允许的，只凭这一点，就足以说明钴 60 的  $\beta$  衰变在单独“正反变换”下是不守恒的。

玲：那末，“镜像变换”和“正反变换”联合起来（即“CP 变换”）怎么又守恒了呢？

吕：你再看一下图 18 右上：钴 60 衰变出来的电子大部分飞行方向与钴 60 核自旋方向相反，反中微子右旋；图 18 左下，反钴 60 衰变出来的阳电子大部分飞行方向与反钴 60 核自旋方向相同，中微子左旋。这两个弱相互作用衰变过程都是现实世界中允许的，而且可以经“CP 变换”把前者变成后者，或把后者变成前者。所以我们说这两个弱相互作用衰变是“CP 守恒”的。但是，对前者或后者只做“正反变换”，或只做“镜像变换”，就会出现图 18 左上和右下的过程。左上：钴 60 衰变出来的电子大部分飞行方向与钴 60 核自旋方向相同，反中微子左旋；右下：反钴 60 衰变出来的阳电子大部分飞行方向与反钴 60 核的自旋方向相反，中微子右旋。这两个过程都是现实世界中不允许的。所以说弱相互作用衰变过程在单独的“正反变换”或单独的“镜像变换”下是不守恒的。

玲：看了这个图，我对弱相互作用过程在“CP 变换”下守恒，在单独的“正反变换”或“镜像变换”下不守恒，已经有了一些印象。可是我还有个疑问。反的钴 60 找到了没有呢？

吕：还没有，但理论上可以预言反钴 60 的衰变过程。

玲：反的钴 60 还没有找到，就在理论上预言反钴 60 的衰变，这靠得住吗？

吕：对于科学理论要一分为二来看：一方面科学理论来自人们

在三大革命运动的一定发展阶段上对于客观世界的认识，它具有相对真理的性质，它不能预言超出它可以应用的范围的事物，它还需要发展；另一方面，“无数相对真理之总和，就是绝对的真理”，科学理论只要是真正地反映了客观存在的规律性，它就可以在一定的范围内作出正确的预言，指导我们的行动，不然我们还要理论干什么呢？

玲：那怎么去判断哪个范围可用，哪个范围不可用呢？

吕：检验真理的标准是实践：在预言反粒子的存在及其行为这个范围里，有关正反粒子的理论，已经经过了多次的反复的实践检验。例如反质子，反中子，很多种反超子，都是先在理论上预言，后在实验中找到。反氦核也是理论预言在先，实验证实而后。现在，反钴 60 无非是反质子、反中子多些，和反氦核没有原则上的区别，所以理论上对于它的预言是可信的。

玲：刚才我觉得不大放心。现在这样一解释，就比较放心了。看来，弱相互作用的过程，在单独的“镜像变换”或“正反变换”下虽然不守恒，但在 CP 联合变换下就一定守恒啦！

吕：也不能这么说。刚才我只说“一般”是守恒的，在弱相互作用中，也有 CP 不守恒的现象存在。

### CP 联合变换的不守恒 ——CPT 的守恒

玲：CP 又有不守恒？一下不守恒，一下守恒，一下又不守恒，真是一个曲折离奇的故事。

吕：事情是这样的。在弱作用中奇异数不守恒， $K^0$  介子和  $\bar{K}^0$  介子可以通过弱相互作用互相变来变去。

$$K^0 \rightleftharpoons \pi + \pi \rightleftharpoons \bar{K}^0$$

（这是奇异数不守恒的过程）

由于这个缘故，事实上在弱作用中，中性 $K$ 介子并不表现为 $K^0$ 和 $\bar{K}^0$ ，而是表现为另外两种状态，一种叫短寿命状态 $K_S^0$ （寿命 $\sim$ 百亿分之一秒），一种叫长寿命状态 $K_L^0$ （寿命 $\sim$ 一亿分之五秒）。为了方便起见，一般用 $|K_S^0\rangle$ 、 $|K_L^0\rangle$ 、 $|K^0\rangle$ 、 $|\bar{K}^0\rangle$ 分别代表 $K_S^0$ 、 $K_L^0$ 、 $K^0$ 、 $\bar{K}^0$ 的量子状态。而且， $K_S^0$ 和 $K_L^0$ 是由 $K^0$ 和 $\bar{K}^0$ 叠加而成的，可写成：

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

根据 $K^0$ 的内在性质， $|K^0\rangle$ 在单独“镜像变换”下变成 $-|K^0\rangle$ ，在单独“正反变换”下变成 $|\bar{K}^0\rangle$ ，所以，在“CP联合”变换下就变成 $-|\bar{K}^0\rangle$ ，可以写成 $CP|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$ 。相仿，根据 $\bar{K}^0$ 的内在性质有 $CP|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle$ 。于是， $|K_S^0\rangle$ 和 $|K_L^0\rangle$ 在CP变换下是：

$$CP|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (-|\bar{K}^0\rangle + |K^0\rangle) = |K_S^0\rangle$$

$$CP|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (-|\bar{K}^0\rangle - |K^0\rangle) = -|K_L^0\rangle$$

这就是说， $K_S^0$ 的CP值是+1， $K_L^0$ 的CP值是-1。

玲：叔叔，你再说下去吧。

吕：现在要问， $K_L^0$ 和 $K_S^0$ 是不是能够通过弱作用衰变成两个 $\pi$ （ $\pi^+\pi^-$ 或 $2\pi^0$ ）？根据 $\pi$ 介子服从玻色统计的性质可以知道， $\pi^+\pi^-$ 体系（或 $\pi^0\pi^0$ 体系）的CP值总是+1。因此可以写出：

$$K_S^0 \longrightarrow \pi^+\pi^- \text{ (或 } \pi^0\pi^0)$$

CP值+1=+1

$$K_L^0 \longrightarrow \pi^+\pi^- \text{ (或 } \pi^0\pi^0)$$

CP值-1 $\neq$ +1

你看，短寿命的 $K_S^0$ 衰变成两个 $\pi$ 的过程是CP值守恒的，长寿命的 $K_L^0$ 衰变成两个 $\pi$ 的过程是CP值不守恒的。换句话说，如果弱作用CP严格守恒， $K_L^0$

就不可能衰变成两个 $\pi$ 。但事实上发现不是这样，大概一千个 $K_L^0$ 衰变中，有两三个这种衰变（ $K_L^0$ 绝大多数都衰变成三个 $\pi$ ，或一个 $\pi$ 和一对正反轻子）。

玲：嗨！ $K_L^0$ 衰变成两 $\pi$ ，CP就不守恒？

吕：是的， $K_L^0$ 衰变成两 $\pi$ 的发现，

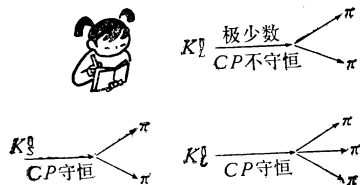


图 19

证实CP不严格守恒。

玲：为什么说不严格守恒？

吕：因为基本上还是CP守恒的，一千个衰变里只有两三个CP不守恒。

玲：对CP不守恒有什么解释吗？

吕：还没有十分令人信服的解释。不过有了更多的实验事实之后，它的规律性是会逐步弄清的。

玲：从刚才讲的来看，先是“镜像变换”守恒，“正反变换”守恒；后来又是“镜像变换”不守恒，“正反变换”不守恒，但是“CP联合变换”守恒；后来CP又不守恒了，会不会CP再加上一个什么又变成守恒呢？

吕：小玲，又给你猜着了。再加上一个“时间反演”(T)就行。“正反变换”(C)，“镜像变换”(P)和“时间反演”(T)三者合在一起，叫做“CPT变换”，弱作用过程在“CPT变换”下是守恒的。此外，强作用过程和电磁作用过程在“CPT变换”下也是守恒的。我就不细讲了。

玲：什么叫“时间反演”？

吕：“时间反演”相当于把一卷电影片子倒过来演：前进的车子变成倒退的车子，倒退的车子变成前进的车子；顺时针方向转的陀螺变成反时针方向转，反时针方向转的陀螺变成顺时针

方向转；……等等（图20）。总之，“时间反演”就是把“将来”和“过去”交换。就交换这一点来说，有点类似“镜像变换”中“左”和“右”的交换。

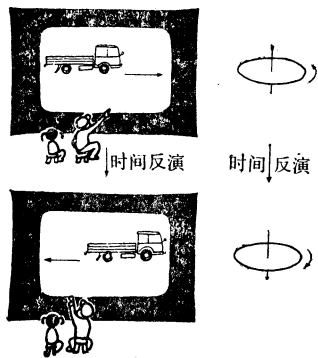


图 20

玲：这有点奇怪：“镜像变换”(P)和“时间反演”(T)，一个是空间，一个是时间。“正反变换”(C)呢，既不是空间，又不是时间，而是正和反。为什么在CPT守恒里，正和反会同空间时间搞到一块去呢？

吕：小玲，你提了一个很有兴趣的问题。可以说，有一点是清楚的，就是“正反变换”(C)是涉及到粒子内部性质的变换，“镜像变换”(P)也是涉及到粒子内部性质（例如中微子的左旋性质）的变换，所以CPT守恒至少是显示出来粒子的内在性质，同空间时间之间有着某种密切的联系。但是目前人们对这方面的认识还是不够深入的。

玲：弱相互作用的花样真不少，一下子守恒，一下子不守恒、反反复复，都是出在弱相互作用。

吕：对了，这也说明人类对于客观世界的认识必须经过实践—认识—实践的多次反复才行。到现在为止，我们对弱相互作用的认识还很肤浅，还有一些原则性的问题没有弄清。下次我们讲弱相互作用的故事吧。

玲：好极了！

（插图：尉迟横）