

李政道 著

对称 不对称 和粒子世界

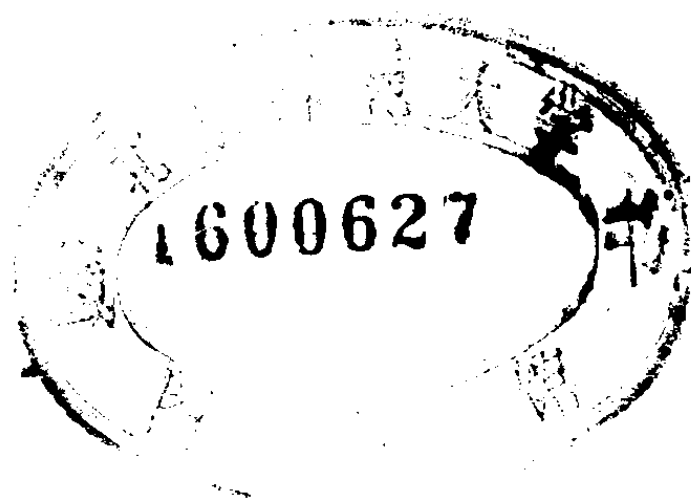
科学出版社

5011/35/24
对称、不对称和粒子世界

李政道 著

吴元芳 译

刘连寿 校



科学出版社

1991

内 容 简 介

本书生动地概述了现代物理学中的一些基本概念——对称性、自发破缺、物理真空等，勾画出粒子物理学近几十年来的发展概貌。本书深入浅出，适于中等文化水平以上读者阅读。

T. D. Lee

SYMMETRIES, ASYMMETRIES, AND THE WORLD OF PARTICLES

University of Washington Press, 1988

对称、不对称和粒子世界

李政道 著

吴元芳 译

刘连寿 校

责任编辑 张邦固

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991 年 12 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1991 年 12 月第一次印刷 印张：1 3/4

印数：0001—1 600 字数：36 000

ISBN 7-03-002489-3/O · 462

定价：2.05 元

序

毛泽东主席问：“告诉我，为什么对称性会这么重要。”

那是在 1974 年 5 月 30 日，中国仍处在“文化大革命”的混乱和“四人帮”横行猖獗的时候。我悲哀地发现，在这块古老、文明的土地上，教育几乎完全被耽搁了，我渴望有一个办法能够改变事情的发展趋势，那怕是一点点也好。

那天早上，大约 6 点钟左右，我在北京饭店房间的电话意外地响了，电话通知我说毛主席想在他中南海的住地，从前的皇宫内接见我。更令我惊奇的是毛主席见到我后第一件想知道的事竟是物理学中的对称性。

根据韦伯斯特辞典，对称意味着“平衡相称”或“从这种平衡相称中引起的美感”。在汉语中对称这个词有几乎完全相同的含义。因此，它基本上是一个静止的概念。按照毛主席的观点，整个人类社会的进化源于运动变化。运动，而不是静止，是唯一重要的因素。毛主席强烈地感到这种观点同样适用于自然，因此，他对对称性在物理学中被提高到如此重要的地位感到困惑不解。

在我们的会见中，我是唯一的客人，一个小茶几放在我们的扶手椅之间，上面有些小本子和铅笔，还有总是要有的绿茶。我把一支铅笔放在本子上，把本子推向毛主席的方向，然后再拉回来。铅笔开始向一个方向滚，然后滚回来。我指出，虽然运动很快就停止了，然而从整体看这个动态过程有一种对称性。对称概念本身并没有静止的意思，它的普遍性远远超

过了它通常的含义而广泛适用于从我们宇宙的产生到微观亚核反应的一切自然现象。毛主席欣赏这简单的演示,然后,他询问了有关对称性更深刻含义的一些问题以及其它的物理问题。他对没有时间研究科学表示遗憾,但是,他还记得年轻时曾经很愉快地读过由 J. A. 汤姆森(Thomson)写的一套科学著作。

我们的谈话逐渐从自然现象转到人类活动。最后,毛主席接受了我的一个建议,即:至少对有前途的青年学生的教育必须得到保证,并坚持下去和进一步加强。这个建议在周恩来的有力支持下,导致设立“少年班”——一个特殊的强化教育计划,让杰出的、有才华的少年上大学。这个计划最早在安徽的中国科技大学实施,后来,由于它的成功而被推广到中国的其它大学。

第二天,在机场,我收到毛主席的一份临别礼物。一套四册 1922 年原版的 J. A. 汤姆森著《科学概论》。

对“文化大革命”造成的普遍混乱而言,这次会见带来了一点秩序。也许,它在一定意义上反映了人类本能地迫切探索自然界的对称性和渴望一个既充满活力而又稳定的社会这二者之间的关联。

目 录

序.....	iii
对称性与不对称性.....	1
粒子世界.....	22
附录.....	43
参考文献.....	46

对称性与不对称性

JABBERWOCKY
'Twas brillig, and the slithy toves
Did gyre and gimble in the wabe:
All mimsy were the borogoves,
And the mome raths outgrabe.

她（艾丽斯）对此疑惑了很久，最后，终于明白了：“原来这是一本镜子书！如果我把它举到镜子前面，所有的单词都变成正常排列了。”

——刘易士·卡罗尔：《通过镜子看世界》

镜 像 对 称

像艾丽斯一样，物理学家也知道存在着左右差别。而且，他们也确信这种差别不是绝对的。如果我们通过一面镜子来看，那么右就变成左，左就变成右。尽管从镜子里看到的世界是不同的，然而，我们怎么能肯定我们的世界不在实际上是另外一个镜子世界的镜像呢？很长时间以来，自然规律在镜像反射下的对称性（左、右对称性）被认为是一个神圣的原理。这意味着，镜子里面的世界有可能是一个真实的世界。

在我们日常生活中，左和右明显地彼此相区别。例如，我们的心脏通常不在右边。英语中“右”（right）的另一个含义是“正确”，对吧？英语单词 *sinister** 的拉丁语字根是“左”；在意大利语中，“左”是 *sinistra*。在英语中人们习惯说“右左”，

* 意为不吉祥、不幸、左边。——译注

但是在汉语中说“左右”，传统上左先于右。然而，我们日常生活中的这种不对称要么是由于我们环境本身的偶然不对称性，要么是由于初始条件的不对称性所造成。在1956年底发现左右对称性破坏(宇称不守恒)以前，人们一直认为，自然规律在左右变换下具有对称性是理所当然的。

让我们来看一个例子。假设有两辆卡车，除了一辆是另一辆的镜像外，造得精确地相同，如图1所示。卡车a的司机座位在左前排，油门在他的右脚附近；卡车s的司机座位在右前排，油门在他的左脚附近。两辆卡车加满同样数量的不含杂质的具有左右对称性的汽油。现在，假设卡车a的司机按顺时针方向旋转启动钥匙，同时用右脚踩油门，使卡车以某一速度——例如30(米/小时)向前行进；另一个司机除了将左和右互换外，作完全相同的操作，即他沿反时针方向旋转启动钥匙，并用左脚踩油门，而且保持油门在同样的倾斜度。读者

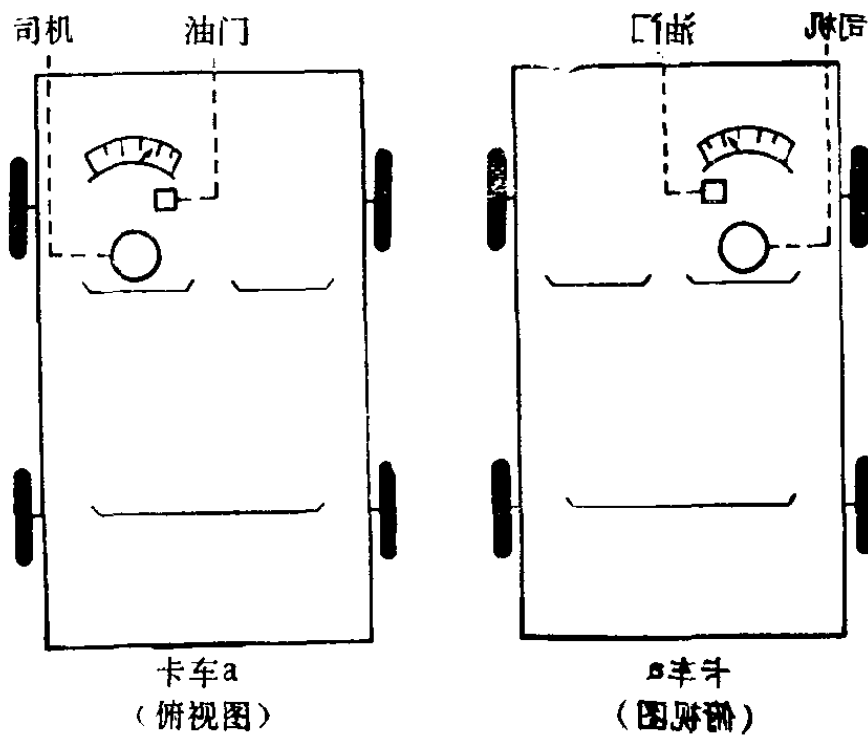


图1 除了一辆是另一辆的镜像外，两辆卡车的制造工艺精确地一样

可以猜一猜，卡车 s 作什么运动？

大概，按你通常的感觉会说，两辆卡车明显地会以同样的速度向前运动。如果是这样的话，那么你就像 1956 年以前的物理学家。看来很合理的是，除了一辆是另一辆的镜像以外彼此完全相同的两套设备应该在一切方面都以相同的方式运动。自然，除了原有的左右差别以外。换句话说，尽管左和右彼此不同，看起来不言自明的是，除此以外，它们没有别的差别。因此，称哪一个为“右”，哪一个为“左”是完全相对的。这正是物理学中的对称原理。

奇怪的是，这种看法被证明是不对的。在 1956 年，吴健雄、E. 安布勒 (Ambler)、R. W. 海沃德 (Hayward)、D. D. 霍珀斯 (Hoppes) 和 R. P. 赫德森 (Hudson) 研究了极化钴 ^{60}Co 核衰变的电子分布。因为这些核是极化的，它们的转动彼此相互平行。实验由两套完全相同的设备组成，它们唯一的差别是初始核的自旋方向相反。这样，每一套设备都是

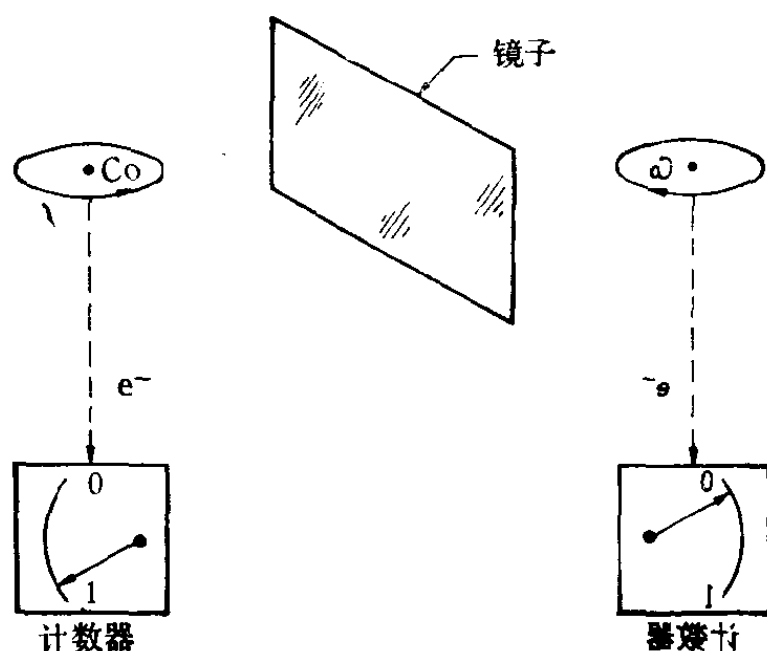


图2 这两个 ^{60}Co 衰变实验的初始装置是精确的镜像关系，但是，正像计数器所显示的，末态电子分布不镜像对称

另一套的镜像。然而,实验发现,这两套装置的末态电子分布并非一个是另一个的镜像。简言之,初态相互是镜像,而末态位形则不然(见图 2)。

现在让我们回到两辆卡车的例子。原则上我们可以将一个 β 衰变源装到卡车的发火装置中作为它的组成部分。这样来建造两辆相互是镜像的卡车虽然不经济,但还是可行的。然而,这两辆卡车将会以完全不同的方式运动: 卡车 a 以某一速度向前运动;而卡车 s 以完全不同的速度运动,甚至会向反方向运动。这就是左右不对称(或宇称不守恒)这一发现的实质。

对称性与不可观测量

至此,我们应该暂时停下来,进行一点抽象思考。当我们说左右对称时,我们暗示了不能观测到左右之间的绝对差别(当然,人们“知道”左不同于右)。换句话说,如果我们观测到左和右的绝对差别,那么,左右对称性就破坏了,即左右不对称。

的确,所有的对称性都是基于某些基本量不可观测的假设。我们把这些量叫做“不可观测量”。相反,一旦一个不可观测量变成可观测,对称性就破缺了。这一点将是贯穿本书的主题。

为了帮你理解这一论断的思路,让我再举一个例子。考虑两个物体(如地球和太阳)之间的相互作用能 V 。这两个物体用 1 和 2 标记。想象一个任意选定的参考点 O。相对于 O 点,地球和太阳的位置可以用矢量 r_1, r_2 代表。每个矢量既表示了距离又表示了方向,如图 3 的实线所示。

我们现在假设任一物体的绝对位置都是不可观测的量。

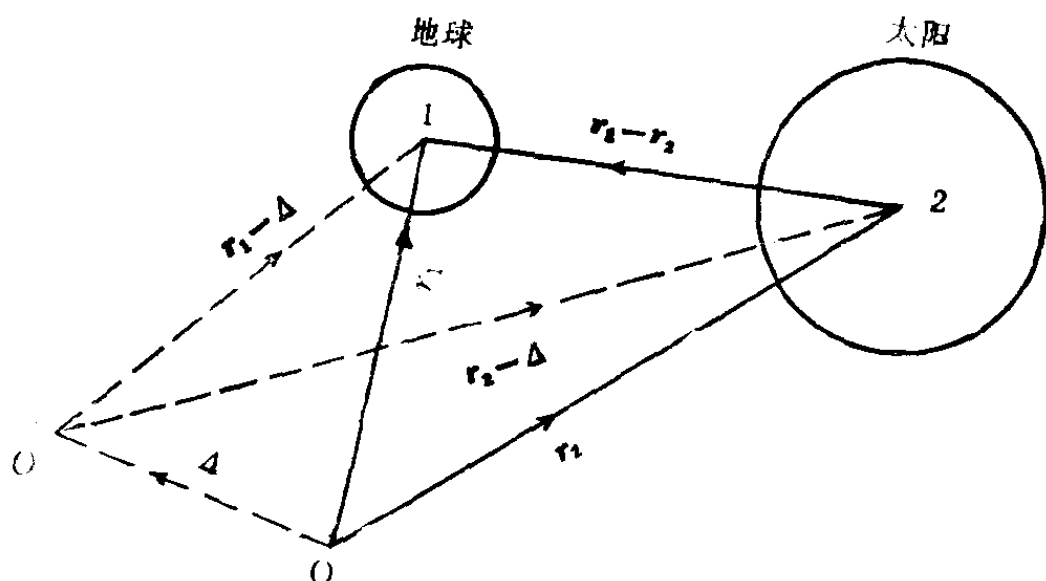


图3 把参考点O移到O'并不改变矢量1和2间的相对关系

当然,任何两个物体相互之间的相对位置能够测量;并且,它们的相互作用能唯一地依赖于它们的相对位置,也就是说, V 与参考点O无关。由于 V 与参考点O无关,如果我们把参考点从O移动一个距离 Δ 到O', V 应保持不变。但是,在这个过程中,点1和点2相对于参考点的位置从图3的实线变到虚线:

$$\mathbf{r}_1 \rightarrow \mathbf{r}_1 - \Delta, \quad \mathbf{r}_2 \rightarrow \mathbf{r}_2 - \Delta \quad (1)$$

而 V 既然不变,只能是仅仅依赖于点1相对于点2的相对位置 $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$:

$$V = V(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \quad (2)$$

当我们把O移到O'时,它保持不变。

下一步,想象地球的位置移动了一个小量。地球所受的力正比于对应的能量变化率。如果太阳代替地球移动,这个道理同样适用。现在,让我们来把地球和太阳一道移动一个相同的小距离。很明显,这样做不改变它们之间的相对位置 $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ 。从等式(2),我们可以看到,能量 V 也不变。由于整个系统没有能量变化,总的力一定是零;即,作用在地球上的

力抵消了作用在太阳上的力。因此，我们已经由简单的绝对位置不可观测假设导出了牛顿第三定律（每个作用力都有一个大小相等、方向相反的反作用力）。

进一步，由于系统的动量改变率等于作用于系统的总力，总的作用力为零意味着系统动量守恒（不随时间变）。这样，由绝对位置不可观测的基本假设也导出了动量守恒律。

总结上面所说，我们会发现，有三个逻辑步骤：

（1）绝对位置是不可观测量的物理假设；

（2）隐含了相互作用能 V 具有在（1）式所代表的联合数学变换下不变的性质；

（3）由此得到物理推论——动量守恒律。

反过来，我们也可以用动量守恒律去检验绝对位置是否是一个不可观测量。用数学语言来说，由等式（1）代表的变换叫做空间平移。相互作用能不变通常称为“不变性”（在上述情况下，称为 V 在空间平移变换下有不变性）。

以完全类似的方式，我们可以假设绝对时间是一个不可观测量。在下述时间平移变换下：

$$t \rightarrow t + \tau$$

物理规律必须对称（不变）。这导致能量守恒（这是因为，我们把时间 t 增加一个任意量 τ ，总能量不变，因而能量是一个不依赖于时间的常量）。如果假设空间的绝对方向是不可观测量，我们能导出旋转对称，并且得到角动量守恒律。这个推导过程和推导空间平移变换下的动量守恒步骤一样。所需要的只是用“角度位置”代换等式（1）中的“空间位置”。这样，空间平移变成了角度旋转，而所得到的动量守恒变成了角动量守恒。

这种逻辑步骤能够推广到物理学中从相对论到量子论的

所有对称原理。它成为我们对自然界作理论分析的一个极强有力的工具。仅从非常简单的不可观测量的假设出发，我们能够得到非常广泛而普遍的结论。这些结论独立于所考虑的特殊系统的细致结构。

在所有智慧的追求中，很少有哪一个能和对称原理的深刻概括性和优美简洁相比(详见附录)。

不对称性和可观测量

由于对称性对应着不可观测量，那么，发现任何不对称肯定意味着有某些可观测量。前面讨论镜像对称时，提到的吴健雄、安布勒、海沃德、霍珀斯和赫德森所做的实验也建立了正负电荷之间的不对称。与此有关，人们也许会问，“通过这些对称破缺现象所发现的可观测量确切地说是什么？”让我们注意，在通常的术语里谈到的电荷符号仅仅是一种习惯而已。由于碰巧我们规定质子带正电，所以电子被规定为带负电。反过来规定也对。但是现在，随着不对称性的发现，是不是我们可以定义一个绝对的电荷符号呢？是不是我们能发现正负电荷之间或者左和右之间的绝对差别呢？

作为一个示例，让我们来考虑两个假想的、高度文明的地区A和B，如图4。假设这两种文明在空间上完全彼此分离；然

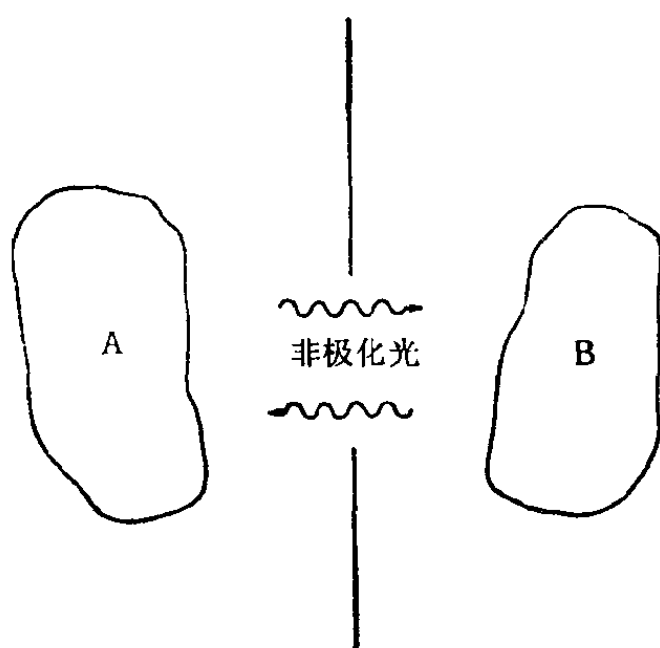


图4 两个想象的文明A和B

而，他们作出了一种安排，仅仅通过电中性和没有极化的信息，例如未极化的光，进行交流。这样交流了几年以后，这两个文明可能决定增加他们的接触。由于他们都很发达，他们认识到他们必须首先在两个方面达成协议：(1)电荷的符号，(2)右手螺旋的定义。

头一个问题的重要是为了确定文明 A 中的质子是对于文明 B 中的质子还是反质子。仅当 A 中的质子和 B 中的一样时，才能进行更密切的交往。如果这两个文明决定有更进一步的密切交流，如机械贸易，那么，定义右手螺旋法则也是重要的。在进行实际的商品贸易以前，他们应该达成关于螺旋法则的规定。(读者也许会奇怪，为什么文明 A 不能简单地直接送一只“手”到文明 B，但这是不允许的。因为，如果 A 是由物质组成而 B 是由反物质组成，那么，这样直接的交换就可能导致物质湮没。因此，这种行为即使不危险，至少也具有挑衅性。)无论如何，我们所关心的学术问题是，能否仅用中性的未极化的通讯方式发送这两则信息。如果没有在过去 30 年里所发现的对称性破缺，那么这将是是不可能的。现在，假设这两种文明和我们一样先进，原则上就能够达成这样的协议。

首先，两个文明应该建立高能物理实验室(为了和这两种文明相处，我恐怕得让读者忍受一些高能物理的术语)。这些实验室可以产生不带电荷、不具有任一阶电磁矩、没有自旋、比电子重 1000 倍的球对称长寿命中性 K_L^0 介子。 K_L^0 介子不稳定，它既可以衰变为一个电子 e^- 、一个中微子 ν^0 和一个 π^+

1) 中微子或它的反粒子——反中微子是电中性、没有质量但有自旋的粒子。因此，它总是以光速 c 运动，并且它的能量等于光速 c 乘上它的动量。带电 π 介子是球对称的。它没有自旋，但有一个 280 倍于电子的质量，并且带有一个单位的电荷(正 π 介子 π^+ ，负 π 介子 π^-)。

介子,也可以衰变为它们的反粒子,即:一个正电子 e^+ 、一个反中微子 $\bar{\nu}$ 和一个负 π^- 介子。这两种不同的衰变方式可以容易地通过用磁场将电子和正电子分开而相区别。这两种文明中的物理学家将发现,虽然开始的 K_L^0 介子是电中性的,然而这两种衰变方式的衰变率不同:

$$\frac{\text{衰变率}(K_L^0 \rightarrow e^+ + \pi^- + \nu)}{\text{衰变率}(K_L^0 \rightarrow e^- + \pi^+ + \bar{\nu})} = 1.00648 \pm 0.00035 \quad (3)$$

这个结果的确非常有意义。因为它意味着通过测量衰变率,人们可以把正电子 e^+ 与负电子 e^- 区别开来。这样,在两种相反的电荷之间存在着一个绝对的差别。如果我们停下来想一想,我们会感到这确实非常不平凡:原始的粒子 K_L^0 是完全电中性的呀! 因此,我们会以为 K_L^0 对于正或负号电荷没有任何偏爱。然而, K_L^0 衰变成正电子比衰变成负电子要快! 好,现在每个文明仅仅需要考察快衰变模式,同时把末态电子的电荷和它的“质子”的电荷加以比较。如果两种文明有相同的相对符号,那就意味着他们由相同的物质组成。

我们现在来完成第二个任务:定义右手螺旋法则。通过在刚才说的 K 介子衰变中测量其中微子和反中微子的自旋和动量方向便可做到这一点。中微子和反中微子都具有自旋(角动量)。对于一个中微子,如果让左手大拇指平行于它的动量方向,那么,弯曲的四指将总是给出它的自旋的方向。因此,中微子的自旋和动量方向定义了一个绝对的左手螺旋,而同时反中微子的自旋和动量方向定义了一个绝对的右手螺旋。这个性质对于在任何地方、以任何方式产生的中微子和反中微子都成立,见图 5。

现在,让我们回到两种文明交流的问题上来。我们看到,通过测量 K_L^0 的两种衰变率及用中微子定义螺旋法则,两种

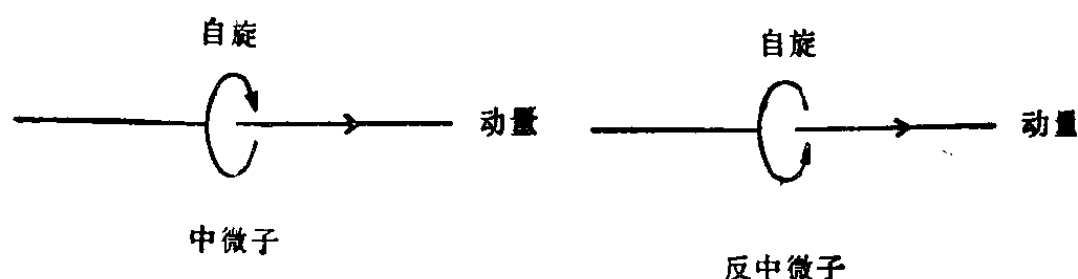


图 5 中微子的自旋和动量方向定义了左手螺旋法则；
反中微子定义了右手螺旋法则

文明完全可以由电中性的非极化的通讯方式给出正负号电荷以及左和右的绝对定义。

我们能够给出一个关于电荷符号的绝对意义的事实，意味着自然界对于电荷符号不对称。在物理学家的术语里，称之为“电荷共轭”破坏，即 C 破坏。同样，我们能够给出一个关于左右螺旋的绝对定义的事实表明存在左右不对称，或镜像反射下的不对称。这被称为“宇称破坏”，或 P 破坏。正负号电荷之间的变换用 C 表示，左右之间的变换用 P 表示。

人们已经知道，在三种看起来似乎彼此无关的对称变换

C: 电荷改号

P: 镜像反射

T: 时间反演

之间存在着紧密的联系。正如我们在上面讨论过的，自然界在 C 变换或者 P 变换下不对称。通过对 K 介子衰变的仔细考察发现，自然界在时间反演变换下也不对称(在下一节中，我们将讨论这种变换)。然而，据我们目前所知，自然界在这三种变换的联合变换下看来是严格对称的。换句话说，如果我们交换

粒子 $\longleftrightarrow$ 反粒子

右 $\longleftrightarrow$ 左

过去 $\longleftrightarrow$ 将来

那么,所有的物理规律都将是对称的。这称为 CPT 对称。从 CPT 对称,人们可以推出,所有粒子和它的反粒子应具有相同的质量;它们的电荷数值相同,符号相反。

时 间 反 演

时间反演对称 T 意味着任何运动在时间逆转下仍然是一种可能的运动。有些人也许会认为这很荒唐。因为我们都变得越来越年老,而不是越来越年青。所以,物理学家怎能期望

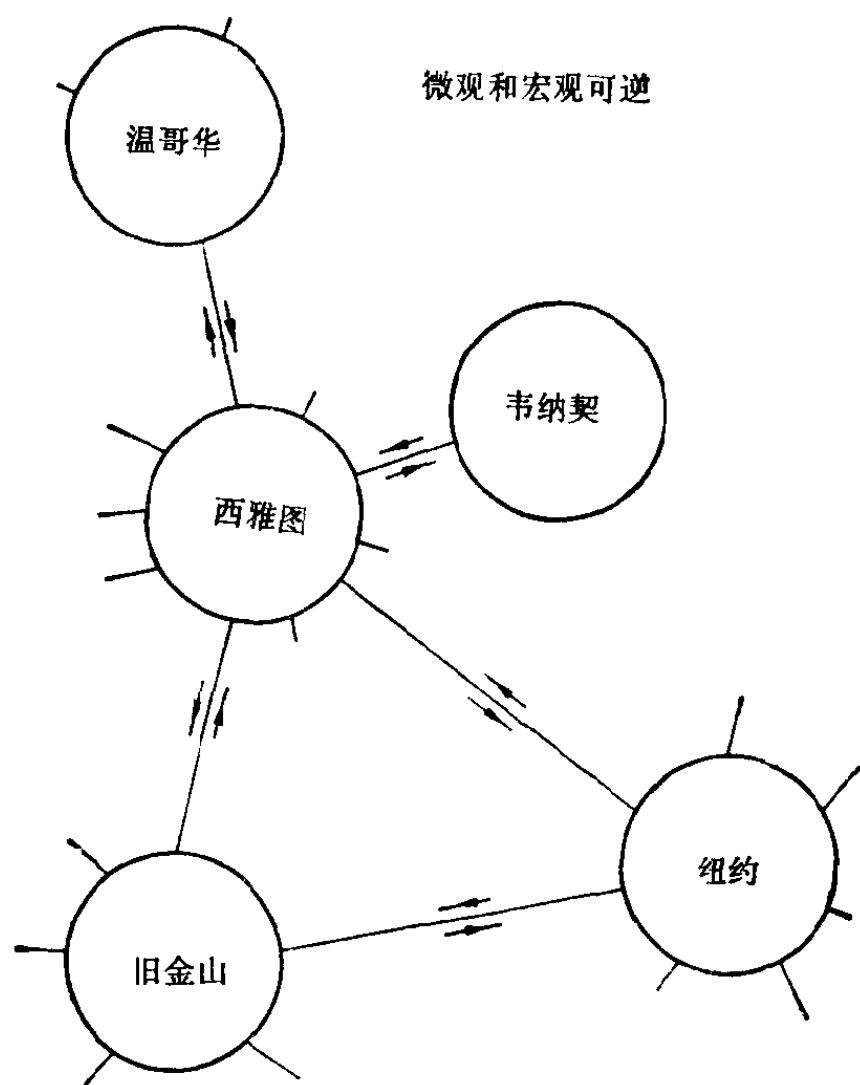


图 6a 在这个例子里,微观可逆性意味着在任意一条航线上有相等数量的航班,当机场的名字、大门的号码和所有航班信息已知时,也有宏观可逆性