

## ——弱相互作用和电磁相互作用可能的统一

柯 之

### 左旋的轻子与右旋的轻子

玲：叔叔，上次你说弱相互作用和电磁相互作用可能统一起来，我很想听听是怎么统一的呢！是不是很难懂？

吕：与其说不好懂，不如说不好讲，因为要用到一些数学工具。而且，这还不是一个很成熟的理论，经过充分的实验检验后，它还可能会有很大的变动。

玲：叔叔，这不要紧，反正科学是要不断发展的，不过，可请你不要写复杂的数学式子，写了复杂的数学式子我就真的不懂了。

吕：好，我来试试看。小玲，咱们以前讲过中微子是左旋的，反中微子是右旋的，你还记得吧？

玲：记得，但是电子不受这个限制，它既可左旋，又可右旋。

吕：对了。我们还说过，中微子的静止质量为零。如果电子的静止质量也是零，那么，电子也就和中微子一样，可以分成左旋的电子和右旋的电子两种。

玲：哎，电子也分家啦。

吕：不仅电子分家， $\mu$  子的静止质量如果等于零， $\mu$  子也要分家，分成左旋的  $\mu$  子和右旋的  $\mu$  子两家。

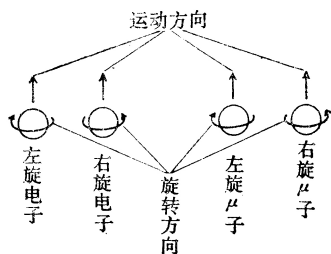


图1 如果电子和 $\mu$ 子没有静止质量，  
就也可以分成左旋的和右旋的两家

玲：这有什么意思呢？电子和 $\mu$ 子的质量并不是零啊！

吕：如果一个描述弱相互作用的理论体系，既要满足第二种规范不变性，又要正确地反映弱相互作用的宇称不守恒——就是左和右的不对称，那么，电子、 $\mu$  子的静止质量就要假定是零。

玲：是吗？这个代价可不轻！上次讲为了求得实现弱相互作用的重正化，就要求满足第二种规范不变性；现在为了要满足这

个不变性，并且反映宇称不守恒，又要假定电子和 $\mu$ 子的静止质量等于零啦。可是这与事实不符啊！

吕：为了满足第二种规范不变性， $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  的静止质量也必须是零。

玲：记得上次讲过的，它们的静止质量也不是零啊！

吕：是啊，问题是咱们别眉毛胡子一把抓，先抓当前的主要问题——第二种规范不变性问题，然后再来解决质量不等于零的问题。

玲：那也行。

吕：好，现在我们就可以把左旋的电子和左旋的电子型中微子归做一类，更确切地说，就是把它们看作是同一种粒子（静止质量为零的粒子）的两种不同的带电状态。

玲：哦，以前不是说过，质子和中子是同一种粒子——核子——的两种不同带电状态吗？

吕：对啦，你记得那次我们是用什么来代表这两种状态的？

玲：是用陀螺！把正转的陀螺（旋转指向一个给定方向）代表质子状态，把反转的陀螺（旋转指向相反方向）代表中子状态。这种陀螺的旋转就叫做同位旋，这陀螺所在的空间叫做同位空间。

### 轻子的“同位旋”和“超荷”

吕：不错，这次是想用正转的陀螺代表中微子状态，用反转的陀螺代表电子状态。事实上还有其他的可能性（因为理论模型

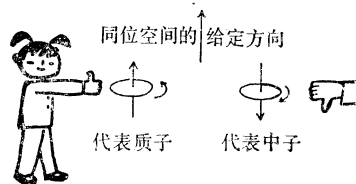


图2 用同位旋陀螺的正向旋转代表质子，反向旋转代表中子。正转代表的电荷（质子电荷为 $+e$ ）大于反转代表的电荷（中子电荷为0）

的种类是很多的),但为了避免啰嗦,我就不讲了。好在现在讲的这种可能性是有代表性的。(注)

玲:记得上次还讲过,如果一个同位旋陀螺只有两种基本旋转状态(正转和反转),它的同位旋的大小就是  $1/2$ 。

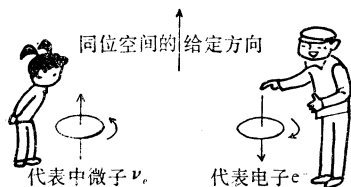


图3 同位旋陀螺正转代表中微子  $\nu_e$ , 反转代表电子  $e^-$ 。正转代表的电荷(中微子电荷为 0)大于反转代表的电荷(电子电荷为  $-e$ )

吕:对,现在我们要讲的代表左旋电子和左旋电子型中微子的同位旋陀螺的同位旋的大小就是  $1/2$ , 因为只有两种带电(同位旋旋转)状态。

玲:叔叔,是不是也可以用一个同位旋陀螺的两种旋转状态来代表左旋  $\mu$  子和左旋  $\mu$  型中微子呢? 比方说,用正转状态代表  $\mu$  型中微子,用反转状态代表  $\mu$  子呢(见图 4)?

吕:可以,而且这个同位旋陀螺的同位旋大小也是  $1/2$ ——只有两个基本带电状态。

玲:那还有右旋的电子和右旋的  $\mu$  子呢?

吕:因为没有右旋的电子型中微子(和右旋的  $\mu$  中微子),所以右旋的电子(和右旋的  $\mu$  子)配不上对,它是单个的,又叫同位旋单态,就是说,只有一种带电状

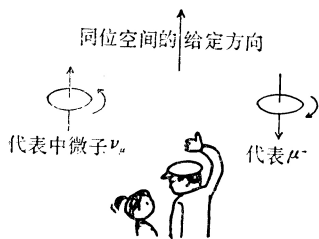


图4 正转代表  $\nu_\mu$ , 反转代表  $\mu^-$

态。小玲,你看,这里就出现了左和右的不对称!

玲:这用什么陀螺来代表呢?

吕:只能用一个同位旋  $=0$  的陀螺,也就是不转的陀螺来代表。因为只有不转的陀螺,它才只有一种转动状态,就是不转(没有转动方向)。否则,任何转动着的陀螺都至少有正转、反转两种状态,以至有更多种转动状态(例如垂直于给定方向的转动状态,见对话⑦)。小玲,你想想看,明明右旋的电子和右旋的  $\mu$  子都是旋转着的粒子,怎么又用不转的陀螺来代表它们呢?

玲:叔叔,你考不住我,虽说右旋的电子和右旋的  $\mu$  子都是旋转的粒子,但这是自旋,不是同位旋。同位旋是代表带电状态的,同位旋等于零,代表只有一种带电状态。自旋和同位旋是两码事,对不?

吕:很对,好,现在我们就有了两组左旋的同位旋双重态:

$$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_{eL} \end{pmatrix} \text{ 左旋电子型中微子} \\ \begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_{\mu L} \end{pmatrix} \text{ 左旋 } \mu \text{ 型中微子}$$

和两个右旋的同位旋单态:

$e_R$  右旋电子  $\mu_R$  右旋  $\mu$  子  
单是同位旋还不能完全确定粒子的电荷,另外还必须有一个量子数,叫“超荷”,左旋轻子双重态的超荷都是  $-1$ ,右旋轻子单态的超荷都是  $-2$ 。

玲:为什么叫“超荷”?

吕:叫“荷”是因为它是一种类似于电荷的“荷”,也有它的守恒律。但它又不是电荷,所以就叫它“超荷”,以表示与电荷有区别。它与电荷之间有下列关系:

$$\text{电荷} = \left( \text{在给定方向的同位旋投影} + \frac{\text{超荷}}{2} \right) e$$

对于同位旋为  $1/2$  的正转陀螺来说,在给定方向的同位旋投

影为  $1/2$ , 反转陀螺的投影为  $-1/2$ 。

玲:我试试看,先看左旋电子型中微子,它在给定方向的同位旋投影是  $1/2$ , 超荷  $-1$ ,

$$\text{电荷} = \left( \frac{1}{2} + \frac{-1}{2} \right) e = 0,$$

不错。再看左旋  $\mu$  子,反转陀螺的同位旋投影是  $-1/2$ , 超荷  $-1$ ,

$$\text{电荷} = \left( -\frac{1}{2} + \frac{-1}{2} \right) e = -e,$$

不错。再看右旋电子,同位旋为  $0$ , 投影也是  $0$ , 超荷  $-2$ ,

$$\text{电荷} = \left( 0 + \frac{-2}{2} \right) e = -e,$$

也不错。叔叔,这个式子和以前讲过的表达核子、 $\pi$  介子、 $\Sigma$  超子的电荷的式子非常相象呢(对话⑧)!

吕:是的,如果在那个表达式里用超荷来代表重子数加奇异数,超荷 = 重子数 + 奇异数

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

就可写成

$$\text{电荷} = \left( \text{同位旋在给定方向的投影} + \frac{\text{超荷}}{2} \right) e$$

就和这里写的电荷式子完全一样了。可以看到,所以叫“超荷”是因为它与奇异数有关,奇异数又是和超子有关的(对话④)。

## 两种旋转——与“超荷”相联系的两角旋转以及“同位”空间的旋转

玲:为什么弄得这么复杂呢?

吕:不是人们喜欢复杂,而是客观事物本身就比较复杂。有了弱相互作用的左右不对称性,就要求把左旋和右旋分开,为了统一描述电子型(或  $\mu$  型)中微子和左旋电子(或  $\mu$  子),就

注 这里介绍的是 1967—1968 年 韦因伯和萨拉姆提出的弱电统一理论。



要引入同位旋, 为了表达粒子的电荷, 又必须引入超荷量子数。这还只是第一步, 然后就要探讨与它们有关的同位空间旋转和相角变动。

玲: 以前讲过一种与电荷有关的相角变动, 变动的大小应和粒子带的电荷成正比(见对话⑥)。现在, 与超荷有关的相角变动的大小, 是不是也要和粒子的“超荷”成正比呢?

吕: 是这样。例如左旋二重态的场的相角变动如果是一 $\alpha$ , 那末, 右旋单态的场的相角变动就是 $-2\alpha$ , 因为刚才讲过, 左旋轻子的超荷都是 $-1$ , 右旋轻子的超荷都是 $-2$ , 后者是前者的两倍。

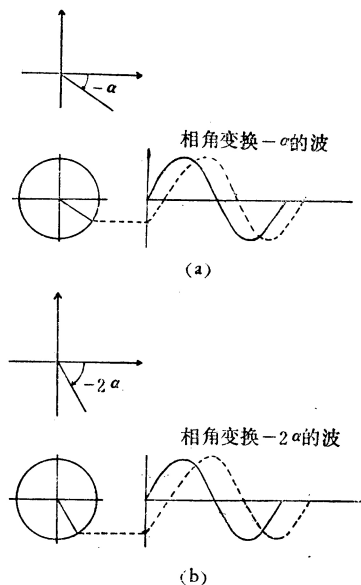


图5 与超荷相联系的相角变换  
(a) 超荷为 $-1$ 时, 相角变换为 $-\alpha$   
相角变换为 $-\alpha$ 的波  
(b) 超荷为 $-2$ 时, 相角变换为 $-2\alpha$   
相角变换为 $-2\alpha$ 的波

玲: 以前讲过, 在与电荷有关的相角变动下, 运动规律(运动方程)的不变性可以导致电荷守恒, 这种相角变动又叫做规范变换。

吕: 对, 与超荷有关的相角变动也是一种规范变换, 在这种变换下, 如果运动规律不变, 就可导

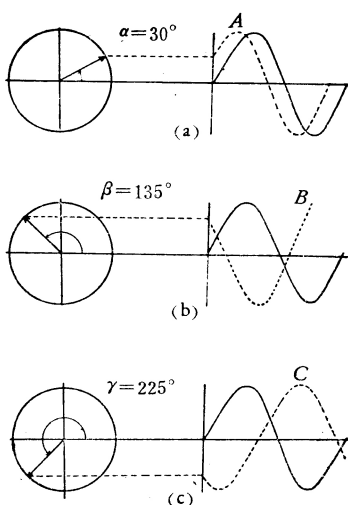


图6 每一个相角变换都和平面上的一个角度相关致“超荷”守恒。小玲, 你看起来没有, 相角变动其实是反映了一种平面上的旋转角度!

玲: 我不明白。

吕: 你看这图6, 图上每一个相角变动都和平面上的一个角度相关: A曲线和 $\alpha = 30^\circ$ 相关, B曲线和 $\beta = 135^\circ$ 相关, C曲线和 $\gamma = 225^\circ$ 相关。A、B、C是三条经过了相角变动的正弦波动曲线。

玲: 噢, 原来平面的旋转是这个意思。

吕: 然后我们再来看同位空间的旋转, 我们必须把平面上的旋转扩充为立体的旋转。

玲: 还能用平面上的一个角度来表示吗?

吕: 不能了, 因为立体的旋转既可以绕X轴转一个角度, 又可以绕Y轴转一个角度, 又可以绕Z轴转一个角度。所以一般来说, 同位空间的旋转要用三个

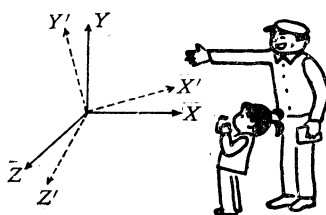


图7 同位空间的旋转不是平面的旋转, 而是立体的旋转

角度来表示。

玲: 从图上看, 就好像一个方木箱在那儿转来转去呢!

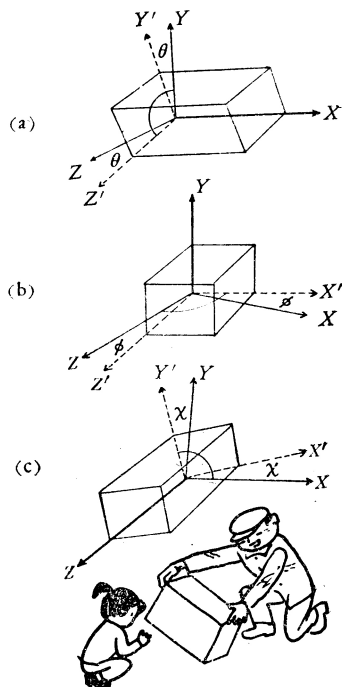


图8 立体的旋转既可绕X轴转(a), 又可绕Y轴转(b), 又可绕Z轴转(c). 三种方式互不相同

吕: 还有, 在同位空间旋转时, 粒子的电荷也要随着变: 比如说, 代表 $\mu$ 型中微子的同位旋陀螺的旋转方向如果倒向, 它就变成左旋的 $\mu$ 子; 在这同时, 左旋 $\mu$ 子的同位旋陀螺也要倒向, 变成左旋的 $\mu$ 型中微子。

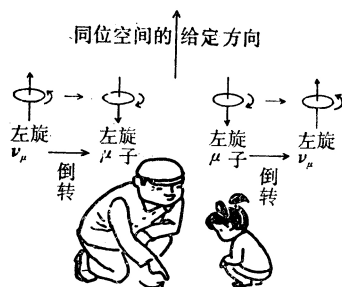


图9 同位旋陀螺的旋转方向倒转, 粒子带电状态相应地改变(粒子也改变)

玲: 噢, 同位空间旋转, 又同粒子带电状态的改变联系起来了, 这真复杂。

吕: 是啊, 无论从旋转的方式, 或从

电荷的改变来说,都比较复杂.但从量子场的运动规律(运动方程)来看,同位空间的旋转同样也是一种规范变换(只是复杂一些).如果运动规律(运动方程)在这种旋转下不变,我们就说运动规律在与同位旋有关的规范变换下具有不变性,这种不变性导致同位旋守恒.

### 与弱相互作用有关的定域规范变换的不变性——弱作用与电磁作用可能的统一

玲: 以前讲过规范变换有两种,第一种规范变换的旋转角度是常数,第二种规范变换的旋转角度随地点时间而不同.所以又叫“定域规范变换”.

吕: 同位空间旋转的角度也可以随地点时间而不同,这样的同位空间旋转,对于量子场来说,也叫做第二种(或叫做定域的)规范变换.

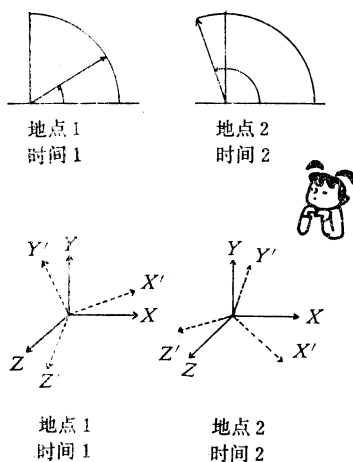


图 10 第二种规范变换或定域规范变换举例  
(上图)在不同的空间时间有不同的相角变换  
(下图)在不同的空间时间有不同的同位空间的旋转

玲: 是不是也需要规范场呢?

吕: 如果要保证场的运动规律在定域规范变换下不变,那就必须要有规范场.

玲: 在电磁作用里,一个规范场就够了,现在呢?

吕: 与电荷有关的定域规范变换只有一个角度(相角),所以一个规范场就足够了.现在,与超荷有关的定域规范变换也只有一个角度(相角),所以也只需要一个规范场.但是与同位旋有关的定域规范变换要用三个角度来表示它,所以需要三个规范场.

玲: 原来是对应于每一个旋转角度就需要一个规范场!这些规范场的粒子带不带电呢?

吕: 与超荷有关的规范场粒子是不带电的,暂时我们把它叫做B粒子;与同位旋相联系的三个规范场粒子所带的电荷则各不相同,一个带正电,一个带负电,一个不带电.

玲: 这么说来一共有四种规范场粒子了,叔叔,这带电的规范场粒子是什么粒子呀?

吕: 就是上次讲过的传递弱相互作用的带电的中间玻色子  $W^+$  和  $W^-$ .

玲: 还有两种不带电的呢?

吕: 一种就是与超荷有关的B粒子;另一种是与同位旋有关的规范场粒子,暂时叫做A粒子.B粒子和A粒子并不是单独出现的,而是以叠加的形式出现的.小玲,你记得以前讲过的  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  叠加成为  $K^0_{\text{长}}$  和  $K^0_{\text{短}}$  吗(对话⑦)?

玲: 记得.  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  有两种叠加方式,一种叠加方式是短寿命的  $K^0_{\text{短}}$ ,另一种叠加方式是长寿命的  $K^0_{\text{长}}$ .

吕: 现在这两种不带电的规范场粒子B和A也是以两种不同的叠加方式在运动方程式中出现,一种叠加方式就是中性的中间玻色子  $Z^0$ ,另一种叠加方式就是不带电的光子  $\gamma$ .

玲: 哟,光子?光子不是传递电磁相互作用的吗?怎么和传递弱相互作用的中间玻色子  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  结成兄弟姐妹了呢?

吕: 就是啊,所以说探讨弱相互作用

用的定域规范不变性的重要收获,就是理论上发现有可能传递电磁相互作用的光子  $\gamma$  和传递弱相互作用的中间玻色子  $Z^0$  并不是互不相干的,它们无非是刚才讲的不带电规范粒子B和A的两种不同方式的叠加.也就是说,传递电磁相互作用的光子  $\gamma$  和传递弱相互作用的中间玻色子  $Z^0$  以及  $W^+$ 、 $W^-$  之间存在着根本性的联系,弱相互作用和电磁相互作用是建筑在同一个基础上面的.

玲: 多有意思啊!本来是想解决弱相互作用的问题,结果却把弱相互作用和电磁相互作用统一起来了.

吕: 不,问题还没说完,到现在为止,所有的粒子都还是没有静止质量的,  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  和电子、 $\mu$  子都还没有静止质量.

玲: 这还是一个待解决的问题!

### 铁磁性物体所体现的对称与不对称

吕: 对.现在我们来讲一讲对称性的破坏吧,还是从真空讲起.一般都认为真空反正是什么都没有,它给不出任何不对称的东西来,是绝对对称的.

玲: 这倒是.

吕: 可是,你还记得“真空不空”吗?还记得真空在外电场的作用下,也象一些介质那样可以出现极化现象吗?……我们也讲过,真空无非是各种场的最低能量状态.于是,问题就来了,介质处在最低能量状态时,却不一定是任何对称性都能满足的.

玲: 噢,你给举个例子吧.

吕: 我们就举铁磁体作为例子.金属铁、镍、钴都是铁磁体,铁磁体也是一种介质.在绝大多数情况,如果没有外来磁场,一个铁磁性物体是并不带有磁性的.但是,如果把铁磁性物体放在偏振光(光波按一定方式

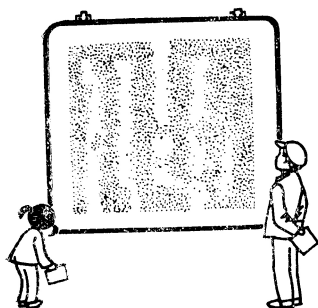


图 11 偏振光照在铁磁体表面呈现的磁畴花纹

振荡,这种光叫偏振光)下,用显微镜来观察,就可以看到,这个铁磁性物体的磨光的表面上有很细小的明暗花纹。原来,这铁磁性物体并不是真的不带有磁性,它实际上是由很多单独的、完全磁化的小区域所构成,只是因为这些小区域的磁化方向各不相同,磁性互相抵消,才使得磁性不显露出来。这种完全磁化的小区域叫做磁畴。

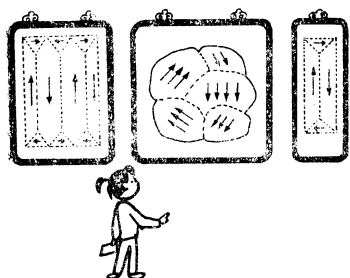


图 12 晶体中各个磁畴及其磁化方向示意图

玲: 为什么会产生磁畴?

吕: 这是因为在铁磁性物体的很小区域里,一部分电子都喜欢按相同的方向进行自旋。

玲: 这是为什么?

吕: 因为在这种小区域里,这一部分电子如果自旋方向相同,那末,它们就是处在最低能量状态。小玲,你记得吗? 以前我们讲过氢原子内部的电子(对话⑤),它有很多能级。其中有一个是最低能量的能级,电子处在这个最低能级的时候,原子最稳定。否则,原子就处于

激发状态,一定要电子跃迁回到最低能级以后,才能恢复稳定。

玲: 我还记得。现在是不是说这一部分电子都按相同方向自旋时,磁畴才处于(能量最低的)稳定状态呢?

吕: 是的,就这一点来说,和氢原子的情况是类似的。

玲: 那么这一部分电子都按相同方向自旋和磁性又有什么关系呢?

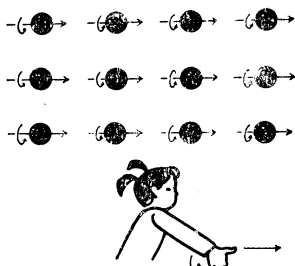


图 13 在磁畴的小区域里,一部分电子都按相同的方向自旋(另外还有一部分电子的自旋方向互不一致,对磁畴的磁化没贡献,这里省略)

吕: 以前我们说过,电子也是一个小小磁针,如果一部分电子都按相同的方向作自旋(图 13),那末,它们的小磁针就都会南北极相衔接,规则地排列起来(图 14),使整个磁畴呈现出很强的磁性来,是不是?

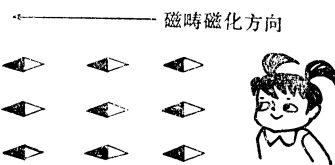


图 14 在磁畴的小区域里,一部分自旋方向相同的电子的小磁针按相同方向排列(黑色代表北极)(另外一部分电子的小磁针不按相同方向排列,磁性相互抵消,这里省略)

玲: 可是,另外的那些电子呢?

吕: 另外的那些电子的自旋方向是互不一致的,它们的小磁针的方向也是互不一致的。

玲: 我明白了,一部分电子自旋方向相同,小磁针方向也相同,

使磁畴表现出来有磁性;另外一部分电子的小磁针方向不一致,它们的磁性就必定互相抵消,对磁畴的磁性就没有什么贡献,是吗?

吕: 就是这样。小玲,你看一看这两个图(图 13、14),这里有没有什么不对称性?

玲: 排列得那么整齐,我看不出有什么不对称性。

吕: 你看,在这个图里(图 13),电子的自旋都在同一方向,是朝右的,这就是方向上的不对称性,具体说,就是左右的不对称性。再看电子的小磁针,它的方向(图 14,从小磁针的南极到北极的方向)与自旋的方向相反,所以,磁畴的磁化方向也和电子自旋的方向相反(对照图 13 和图 14)。小磁针的方向和磁畴的磁化方向都是朝左的,这又是左右方向上的不对称性。

玲: 原来是左右方向的不对称!

吕: 如果外加一个 H 方向的磁场,就可以使磁畴中的所有这些电子的自旋方向倒转,小磁针的北极都指向 H 的方向(向右),南极都指向相反的方向(向左)。然后,即使把外加磁场 H 去掉,磁畴的这个状态也不会自动改变的。小玲,你知道为什么吗?

玲: 刚才说过,磁畴中的这一部分电子的自旋方向相同时,就是最低能量的(也就是稳定的)状态。现在这一部分电子的自旋方向虽全都倒转,但仍然自旋方向完全相同(都向左),所以同样是一个最低能量状态或稳

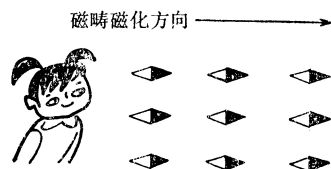


图 15 自旋和磁针都倒向,仍然是最低能量的稳定的状态

定状态,对不对?

吕: 对,小玲,你再说说看,这个最低能量状态是不是也是不对称的?

玲: 也是不对称的。因为所有的小磁针的方向都是朝右,不是朝左,磁畴的磁化方向也都是朝右,不是朝左,所以也是左右方向上不对称。

吕: 不错。不过,小玲,你看得出来没有,这里既有不对称,又有对称。

玲: 我只看出左右的不对称,怎么又有对称呢?

吕: 你看,磁畴在最低能量状态时,既可以是小磁针的北极都指向左方,南极都指向右方;又可以小磁针的北极都指向右方,南极都指向左方,这不又两头对称了吗?

玲: 嗯,是两头对称的。

吕: 这里说的对称性是运动规律的对称性。例如,在运动规律(运动方程)的支配下,当磁畴中有一部分电子的自旋都指向右方时,固然是一个最低能量状态;磁畴中这部分电子的自旋都指向左方的状态,同样也是一个最低能量状态。所以在运动规律中,并没有哪一头更特殊些,这不就是左右两头对称吗?但是,磁畴的实际的最低能量状态只可能或者是这一部分电子的自旋都指向右方,或者是这一部分电子的自旋都指向左方。在前一种情况,右是特殊方向,在后一种情况,左是特殊方向。所以每一个实际出现的最低能量状态,又必须是左右不对称的。

玲: 原来是又有对称性,又有对称性的破坏。

吕: 对称性的这种破坏,不是来自运动规律(运动方程),而是由于介质的最低能量状态本身就是不对称的,这叫做对称性的“自发破缺”。真空也可以有“自发破缺”。

### 什么是真空的自发破缺?

玲: 真空怎么自发破缺呢?

吕: 以前我们讲过真空象一种处于最低能量状态的介质(对话⑥),所以它也可能具有某种不对称性(或破坏对称性)。假定有一种自旋为零的场,它有两种带电状态,一种状态叫 $\varphi_1$ 场(粒子带正电),一种状态叫 $\varphi_2$ 场(粒子不带电)。我们用同位旋陀螺的两种旋转方向(状态)来代表它们: 旋转方向朝上就代表 $\varphi_1$ 场,朝下就代表 $\varphi_2$ 场。而且, $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 场的运动方程是非线性的,也就是说,它们是自己和自己直接发生相互作用的,完全不需要传递者。于是,在一定条件下,处于最低能量状态(真空状态)的 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 场的平均值(即真空平均值)就可能不是零。就好象刚才说的,磁畴处于最低能量状态时它的磁性不为零一样(顺便说一下,一般粒子的场的真空平均值都是零)。不仅如此,在运动规律(方程)的支配下,真空状态( $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 场的最低能量状态)既可以是同位旋朝上的 $\varphi_1$ 的真空平均值不为零,同位旋朝下的 $\varphi_2$ 真空平均值为零;也可以是同位旋朝下的 $\varphi_2$ 的真空平均值不为零,同位旋朝上的 $\varphi_1$ 的真空平均值为零。你看,这又和刚才的磁畴相仿,磁畴的最低能量状态既可以是按朝右的方向磁化,又可以按朝左的方向磁化。小玲,你可以说一说 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 的对称性和不对称性吗?

玲: 好,我试试看。先说对称性,在运动规律(运动方程)的支配下,真空(也就是能量最低)的时候,可以是同位旋朝上的 $\varphi_1$ 真空平均值不为零,也可以是同位旋朝下的 $\varphi_2$ 真空平均值不为零。所以运动规律在同位空间里是上下两个方向对称的。但实际的真空状态则或者是同

位旋朝上的 $\varphi_1$ 真空平均值不为零,或者是同位旋朝下的 $\varphi_2$ 真空平均值不为零。所以,每一个实际的真空状态又是同位空间上下两个方向不对称的。这里又有运动规律的对称性,又有实际真空状态的不对称性,这又是一对矛盾,对吗?

吕: 对,这就是真空的“自发破缺”的一个例子。其实,在同位空间各向同性的情况下,运动规律(运动方程)不仅上下两个方向对称,而且在同位空间的各个方向都是对称的。代表真空平均值不为零的那个 $\varphi$ 场的同位旋陀螺的旋转方向可以是同位空间的任何一个方向。

玲: 不就只有 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 吗?其他方向的 $\varphi$ 是什么?

吕: 其他方向的 $\varphi$ 可以用 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 的叠加来表示,我就不讲了。总之,仍旧无非是运动规律(方程)在同位空间旋转下具有对称性(不变性);而实际的真空状态必定只能有一个真空平均值不为零的 $\varphi$ 场,代表这个 $\varphi$ 场的同位旋陀螺的旋转方向,就是同位空间的一个特殊方向。真空状态下有了这个特殊方向,就破坏了同位空间的旋转对称性,因为不再各向同性了(见图16)。

玲: 这也是真空的“自发破缺”吧?

吕: 是的,这是对于同位空间旋转不变性(各向同性)的“真空自

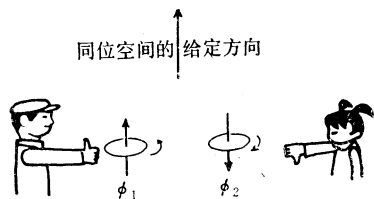


图16 如果 $\varphi_1$ 的真空平均值 $\neq 0$ , $\varphi_2$ 的真空平均值 $=0$ ,那末向上的方向就是同位空间的一个特殊方向,破坏了各向同性

如果 $\varphi_1$ 的真空平均值 $=0$ , $\varphi_2$ 的真空平均值 $\neq 0$ ,那末向下的方向就是同位空间的一个特殊方向,破坏了各向同性。

发破缺”，当然还有其他方式的“真空自发破缺”。

### 中间玻色子由于真空自发破缺而获得静止质量

玲：叔叔，为什么要讨论“真空自发破缺”？

吕：因为在“真空自发破缺”下，运动规律仍可以保留（定域规范变换的不变性）对称性，从而仍可以保证实现重整化（无穷大积分项都可系统地消去）；同时， $\varphi$  场真空平均值不为零，又可导致玻色子  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  和电子、 $\mu$  子等获得静止质量，这样就可以解决静止质量等于零的问题。

玲：这又是怎么一回事？

吕：我们说过，粒子的“静止质量”也是和粒子的运动密切联系的（对话⑥）。这里所说的运动，包括粒子的内部运动，也包括粒子与周围的物质的相互作用。比方说吧，有一个在介质里行走的带电粒子，由于和周围的介质不断发生相互作用，它的“静止质量”就和不在介质中时不一样。我们把这个粒子在介质中时的“静止质量”叫做“有效质量”。现在真空“自发破缺”了，某个同位旋方向的  $\varphi$  场的真空平均值不等于零了，粒子在真空中走，也就仿佛在介质中走一样。粒子与处于最低能量状态（真空状态）的  $\varphi$  场不断发生相互作用，就也可以通过相互作用而获得静止质量或“有效质量”（图 17）。

玲：都有哪些粒子通过这种相互作用而获得“静止质量”呢？

吕：三种规范粒子  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  都通过这种相互作用而获得了很大的“静止质量”。但是还保留一种规范场粒子没有得到“静止质量”，它就是光子。另外，电子、 $\mu$  子也通过这种相互作用获得了“静止质量”。真空平均值不为零的  $\varphi$  场的粒子也通

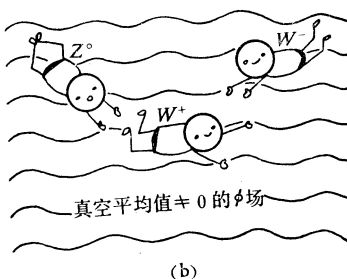
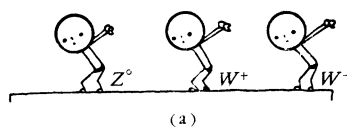


图 17 中间玻色子与真空平均值不为 0 的  $\varphi$  场相互作用就可获得静止质量

过  $\varphi$  场与  $\varphi$  场的自相作用而获得很大的“静止质量”。

玲：原来光子仍旧没有“静止质量”，这真巧。

吕：是啊，光子有了“静止质量”就和客观事实不符了。不仅如此，即使真空有了自发破缺，即使别的对称性都破坏了，但与电荷相联系的第二种（定域）规范不变性仍旧不会破坏（光子是规范场），所以仍能保证电荷守恒！

玲：还有别的什么收获吗？

吕：还有，比如说，如果  $\varphi$  场的“真空自发破缺”破坏了 CP 不变性，那就可以解释为什么弱相互作用可以破坏 CP 守恒了（对话⑦）。

玲：是吗？那就很有意思了。不过，我觉得最有趣的收获还是一方面发现了弱相互作用和电磁相互作用的可能的统一，另一方面规范场粒子获得了静止质量，重整化又得到了保证，避免了无意义的无穷大。叔叔你说呢？

吕：我也这样想。

### 弱相互作用和电磁相互作用的统一意味着什么？

玲：叔叔，你跟我说说，这种统一恐怕还有一些更深远的意义吧？

吕：根据上次讲的和这次讲的可以

看到，这两种相互作用的可能统一，是在科学实验的实践基础上提出来的。科学实验对理论工作提出了要求，要求人们去解释各种弱相互作用现象，要求人们去解释各种电磁相互作用现象，又要求能够计算弱相互作用和电磁相互作用的高次作用的效应，所有这些要求，在弱作用和电磁作用统一的物理图象（理论）里，事实上都初步满足了。反过来，物理理论又新的基础上提出了新的预言，包括弱相互作用和电磁相互作用之间有统一的作用机制，存在传递弱相互作用的  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  等中间玻色子，……等等。对于这些预言，仍必须回到科学实验中去检验。若是它们经得起科学实验的检验，那末，两种相互作用的统一就不只是“可能”了，它就是一个经得起实践检验的客观真理。否则就只能是一个不符合实际的有趣的猜测。不过，这是一个值得花力量去检验的理论。

玲：如果实践的检验证实了，会有什么后果呢？

吕：那就是说，两种相互作用客观上是统一起来的，弱作用并不真的比电磁作用“弱”。它之所以“弱”，是因为传递相互作用的粒子  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  太重了，在低能的条件下，很不容易推动  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  的场去传递弱相互作用。反之，只要能量足够高，这个障碍就不存在了，弱相互作用就和电磁相互作用差不多强了。

玲：这又会引出什么后果呢？

吕：现在还说不清楚，不过，弱相互作用与电磁相互作用的统一如果真的成为事实，它的意义将是不同一般的。我们不妨回顾一下历史：十九世纪以前，人们不知道电和磁之间有什么联系，那时候，电的应用与磁的应

用受到了很大的限制。但是，到了十九世纪，发现了电和磁是统一的电磁现象的两种不同表现以后，电和磁就不再被看做是互不相干的东西了，它们的应用范围也越来越广了。今天的世界已经是一个处处都离不开电和磁的应用的世界。

玲：是呀，说不定这两种相互作用的统一也会在科学技术上引起一场革新哩！可是叔叔，这个理论的实践检验到底进行得怎样？

### 中性流的发现

吕：如果要检验，当然必须找到  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  这些粒子。但是目前确实还没有在实验上找到它们。主要是因为它们太重了，已有的加速器的能量还不足以产生它们……。不过，现在还是找到了一些迹象，例如中性流的发现，就间接地支持了  $Z^0$  的存在。

玲：中性流是什么意思？

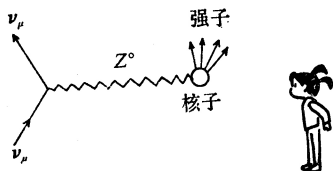


图 18 中微子打核子，如果交换  $Z^0$ ，就仍是中微子

吕：小玲，你来看这两个图，都是  $\mu$  型中微子打质子（或中子）。图 18 是传递一个中性的中间玻色子  $Z^0$ ， $\mu$  型中微子的电荷不变，仍保持为  $\mu$  型中微子。质子（或中子）被碰撞后产生一大群的介子，它自己也可能变成中子（或质子），但是整个过程不出现单个的  $\mu$  子。图 19 是传递带电的中间玻色子  $W^+$ ，质子（或中子）被撞后也产生一大群介子，但重要的是在这个过程里， $\mu$  型中微子转变成为  $\mu$  子，而且是单个的  $\mu$  子。

玲：哦，传递  $Z^0$  就没有单个  $\mu$  子，

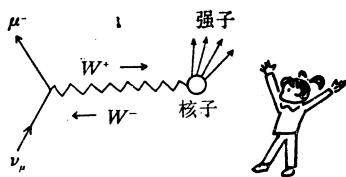


图 19 中微子打核子，如果交换  $W^\pm$ ，就变成  $\mu^\pm$

传递  $W^\pm$  就有单个  $\mu$  子。

吕：对了，所以只须检查  $\mu$  型中微子碰撞后有没有单个  $\mu$  子出来。至于出来多少个带电介子，那是无关紧要的。

玲：实验的结果怎样呢？

吕：结果发现有时出现单个  $\mu$  子，有时不出现单个  $\mu$  子。出现和不出现的次数的比例大致是三比一。

玲：那就说明， $Z^0$  肯定存在啦？

吕：还不能这么说，要肯定  $Z^0$  的存在，必须确实确实找到  $Z^0$  才行。现在只能说如果这个过程有传递者，那末这个传递者必定是电中性的，一般叫做“中性流”。这就叫做“中性流的发现”吧。中性流的发现间接地支持了存在中间玻色子  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  的图象。

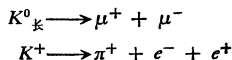
### 强子的弱相互作用与粲粒子的发现

玲：刚才讲的弱相互作用与电磁相互作用可能统一的图象，是不是只适用于轻子（ $\mu$  子、电子、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_e$ ）呢？

吕：不是，对于强子的弱相互作用，也可以有类似的图象，但是出了一些问题。

玲：什么问题？

吕：是这么一个问题：强子是由层子和反层子组成的。一开始的时候，曾经以为层子只有三种（两种是不带奇异数的，一种是带奇异数的）。在这个图象里， $Z^0$  可以作为下述两个衰变过程的弱作用传递者：



就是说，由于有  $Z^0$  作为传递者，这两个过程在实验上是不难看到的。但是实验上却很难看到这两种衰变过程。

玲：这是什么原因呢？

吕：一个可能的原因就是  $Z^0$  不能作为改变奇异数的传递者。你看，这两个衰变过程里，衰变前都是奇异粒子，衰变后都不是奇异粒子，总奇异数在衰变中发生了改变。 $Z^0$  就称为改变奇异数的传递者。

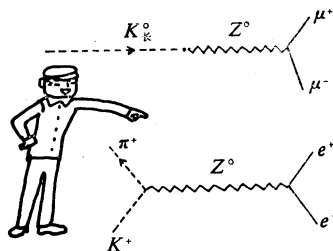


图 20 在这个图里， $Z^0$  是改变奇异数的弱作用传递者

玲：这个问题又怎么解决呢？

吕：如果层子不是三种，而是四种，这个问题就可以解决。因为在弱相互作用和电磁相互作用统一的理论里，如果有四种层子， $Z^0$  就可以不是改变奇异数的弱作用传递者了，从而上述衰变过程就不可能由  $Z^0$  来传递，而必须通过其他的更弱的过程（更多次的弱相互作用和电磁相互作用）才能实现。这样，上面的两个衰变过程就很不容易发生，也很不容易在实验上看到了。

玲：这就是说，从弱相互作用的分析还可以预言有第四种层子！那末，第四种层子有没有呢？

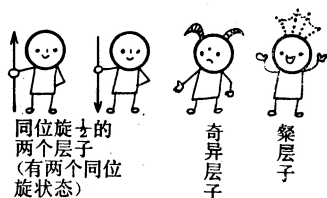


图 21 如果  $Z^0$  不是改变奇异数的传递者，那就要有第四种层子——粲层子

吕：这第四种层子叫做“粲”层子，它们带有一种新的量子数，叫做“粲数”（类似于奇异数）。粲层子与其他层子又可以组成带粲数的强子。理论上这种带粲数的强子主要是衰变成带奇异数的强子。实验上确已发现了一类不稳定的强子，它们的主要衰变产物就是带奇异数的强子（例如  $K$  介子等等）。这些不稳定的强子很可能就是带粲数的强子。另外我们曾讲过新粒子  $J/\psi$  的发现（对话④），它的寿命比一般强作用衰变粒子的寿命要大一千多倍，看来它是由粲层子和反的粲层子所组成的介子。

玲：这么看来，关于粲层子的预言

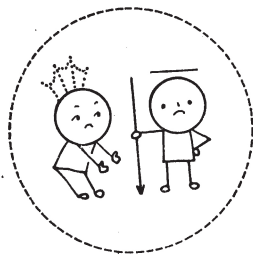


图 22 粲层子和其它反层子组成粲介子

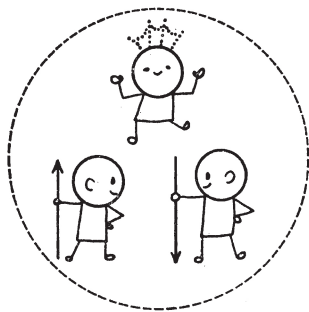


图 23 粲层子和其它两个层子组成粲重子

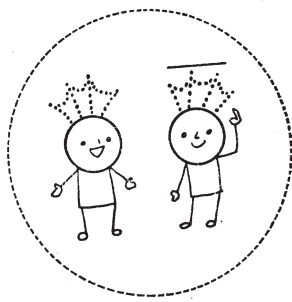


图 24 粲层子和反粲层子组成  $J/\psi$  粒子——一种新粒子

又得到证实啦。

吕：可以这样看，它对于弱相互作用与电磁相互作用的统一，也可算是一个间接的支持。

玲：叔叔，从上次到这次，讲的都是有关弱相互作用的故事，这真是一个迂迴曲折的故事哩！

吕：毛主席曾经说过：“一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。这就是马克思主义的认识论，就是辩证唯物论的认识论。”几十年来，人们对弱相互作用的认识过程，的确就是一个从

实践到认识，从认识到实践的多次反复的过程。

玲：这个认识过程还没有完成吧？

吕：还差得很远呢！且不说别的，就是关于弱相互作用的传递者，目前在弱作用与电磁作用统一的前提下所提出来的理论图象就有几十种之多。其中有的还预言有重的轻子。不过到底哪一种图象对，目前还没有定论。看来有一些关键性的客观事实我们还没有掌握。小玲，弱相互作用我们已经讲的很多了，下次换一个题目，好吗？

玲：下次讲强子可分的问题吧！