

微观现象中的左右不对称性

——纪念宇称不守恒发现三十周年

谢 诒 成

(北方工业大学)

1956年美国《物理评论》(Physical Review)上登载了一篇题为《对弱相互作用中宇称守恒的质疑》的论文,引起物理学界极大的轰动.因为文章的作者——三十岁的李政道和三十四岁的杨振宁提出在弱相互作用中可能不存在左右对称,而这一观点是与多年来人们对于物理规律对称性质的传统看法相冲突的.不久吴健雄女士领导的一个小组以高超的技巧完成了检验弱相互作用中宇称不守恒的实验,结果证明了,从宏观物理现象归纳出的左右对称性不能推广到微观粒子的弱作用现象.吴健雄的实验同时还表明正反粒子对称性在弱作用现象中也不存在.这一具有划时代意义的重大发现开辟了微观物理研究的新领域,对此后三十年来粒子物理的发展有着深刻的影响.

一、对称性和守恒律

物理学中的对称概念是与我们的日常经验密切相关的.很早以前就有了空间各向同性和均匀性的概念,后来又发现了力学定律在伽利略变换(即匀速的坐标系变换)下不变,这种更高级的对称性是牛顿力学的立足点之一.几个世纪以来,物理学家研究对称原理,得出了许多重要的结果.

我们知道,各种各样的对称总可表示为在相应的数学变换下的不变性,譬如球对称就是转动变换下的不变性.物理学中的对称是物理定律在某种变换下的不变性.由于空间各向同性,在以坐标原点为中心作任意角度的旋转后,

物理定律不发生任何改变,有转动不变性.又如,空间的均匀性就是物理定律在平移变换下的不变性.在以上两个例子中,变换都可连续进行,这叫连续变换.另有一些对称性表现为分立变换下的不变性,左右对称属于这一类.与左右对称相应的变换是空间相对坐标原点的反射,即 $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}(x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z)$.

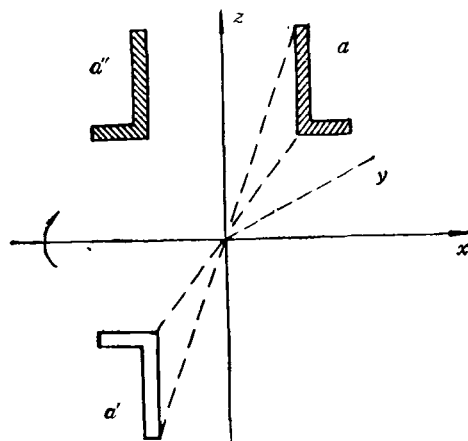


图1 空间反射与左右对称

如图1中的a,通过这样的反射,变到了a',a'绕x轴转180°就到了a''的位置.很容易看出,a''与a的关系是互为镜像的,如果a是一个向右的图形,a''正是一个向左的图形.因此,空间反射变换把一个系统变为其镜像,也就是左右之间的变换.

在经典力学中,一般来说,从每一种连续变换下的对称原理都可得到一种守恒量.由空间平移和转动不变性,我们分别导出动量守恒和角动量守恒定律,而能量守恒定律是从时间移

动的不变性而来,即如果把整个过程的时间参量 t 都平移一个 Δt , 物理定律不变。

经典力学还具有左右对称性。如果左右是对称的,从镜子中看到的一个过程可以用一个真实的过程来代替,两者间不可区分。经验告诉我们,宏观的物理过程确有这种对称性。但在经典力学中分立变换下的对称性并不产生守恒定律,因而左右对称对经典力学没有十分重要的实用意义。

量子力学发展后,对称性的作用变得更为广泛,意义也更为深刻。由于波粒二象性,微观粒子的状态是用一个波函数来描述的,不象经典力学那样仅用它的位置坐标。我们讨论量子力学的对称性就要研究各种变换下波函数的改变。这样,一方面是发现了比经典力学多得多的对称原理,另一方面使数学上较为复杂的量子力学问题得以简化。特别是在量子力学中分立变换下的对称性和连续变换下的对称性一样,可形成守恒定律,导出不变量。左右对称相应的不变量叫宇称。

二、宇称及宇称守恒

宇称的概念最早是在1927年由维格纳(Wigner)引入的。1924年,拉珀特(Laporte)发现,在复杂原子中能级分为两种,后来把其中一种叫做“奇”能级,另一种叫做“偶”能级。在通过单光子的吸收或发射而发生的能级跃迁中,一个“奇”能级总是改变到一个“偶”能级,或者反过来。后来维格纳用严格的推导证明了,由拉珀特揭示的实验规律是原子内部的电磁力具有左右对称的结果,维格纳的分析借助于“宇称”和“宇称守恒”的观点。

如前所述,左右对称就是在空间坐标反射变换下的不变性。量子力学的波函数是随时间和空间坐标而变化的,如果 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 描述了一个状态,那末定义 $\psi(-\mathbf{r}, t)$ 所描述的状态为原来状态的空间反射态。一般来说, $\psi(-\mathbf{r}, t)$ 是不同于 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 的另一个函数,但对于某些状态波函数, $\psi(\mathbf{r}, t)$ 与 $\psi(-\mathbf{r}, t)$ 之间只相

差一个常数因子 a ,即

$$\psi(\mathbf{r}, t) = a\psi(-\mathbf{r}, t).$$

这种状态称为具有固定宇称的态。而我们知道,一个空间反射态的空间反射态就是原来的状态,因此 a 的自乘必须是1,它本身就只有两种可能的取值,即任一宇称固定的态都要满足

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \pm\psi(-\mathbf{r}, t).$$

当等式右边前面的符号为正时,称 ψ 的宇称为“偶”,符号为负时,宇称为“奇”

维格纳进一步证明,如果相互作用的位势在空间反射变换下不变,那么一个态由这种作用导致的跃迁几率与空间反射态的跃迁几率相等。由空间各向同性可知,空间反射态等于原来状态的镜象态,一个过程与它的镜象过程有相同的几率就是左右对称。同时,根据宇称的定义和上面所说几率的等量关系可得出,如果过程的初态有固定的宇称,则末态的宇称必须与初态相同才能保证跃迁几率不为零,所以在具有左右对称性的相互作用导致的过程中,宇称不变,此即宇称守恒。反过来,从一个过程的宇称守恒也可推出相互作用的左右对称性。

用宇称守恒来分析原子光谱,拉珀特总结的规律就很容易得到解释。因为原子内部的电磁相互作用力是左右对称的,原子的各个能级都有确定的宇称,同时,吸收或发射的光子的宇称可定为奇的。如果初态原子处于宇称为奇的能级状态,则末态的能级与光子的总宇称也必须为奇,由光子宇称为奇可知,原子的末态能级宇称为偶,这正是实验观察到的情况。

宇称和宇称守恒的概念被进一步应用到原子核物理和粒子物理中。在大量现象中宇称守恒的讨论都取得了很大成效,人们似乎可以完全相信宇称守恒是微观物理的一条普遍定律,看来从宏观现象得出的左右对称经验也适用于微观世界。然而,这仅是一种信念,还未经实验全面证明。1956年,这种信念动摇了。

三、 τ - θ 之谜

1947年,在 π 介子的存在被证实后不久,罗

切斯特 (Rochester) 和巴特勒 (Butler) 从宇宙线的云雾室照片中发现了一个中性粒子衰变为两个 π 介子的过程, 并估计此中性粒子的质量约为电子质量 1000 倍。后来有人把这个过程的初态粒子称为 θ 粒子, 其衰变记作

$$\theta \rightarrow \pi + \pi$$

1949 年, 曾首先探测到 π 介子的鲍威尔 (Powell) 又利用新的乳胶技术, 得到了一个粒子衰变为三个 π 介子过程的照片, 他与合作者为这个新粒子起名为 τ , 照片中的过程为

$$\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi$$

θ , τ 及其它一些新粒子的发现在当时有相当重要的意义, 因为它们具有原先没有料想到的特点, 因而被称作“奇异粒子”。弄清奇异粒子的性质在理论上和实验上都引起了极大的兴趣。1953 年达列兹 (Dalitz) 和法勃利 (Fabri) 提出, 利用上面 θ 与 τ 的衰变公式, 可确定 θ 的字称为偶, τ 的字称为奇。他们的讨论大致是如下进行的。早先已确定 π 介子的自旋是零, 字称为奇, 如果忽略由 π 介子间相对运动引起的效应, 则两个 π 介子的总字称为偶, 三个 π 介子的总字称为奇。从字称守恒定律的要求立即可反推出 θ 是偶字称粒子, τ 是奇字称粒子。但要考虑到 π 介子间的相对运动, 为使结论可靠, 必须研究 π 介子出射的动量和角度分布。至 1956 年初, 已有不少实验室进行了必要的测量, 实验资料都明确指出, 按照上面的推理方式, θ 与 τ 的字称恰好相反, 分别为偶和奇。

另一方面, 当时的实验精度也足以确定 θ 与 τ 的质量仅相差不到电子质量的 10 倍, 也就是在百分之几的误差范围内可认为两者质量相等, 同时, 还测出两者有相同的寿命, 而且与核子有相同的作用。从以上事实可推断 τ 与 θ 是同一个粒子(后来称为 K 介子)。

显然, 分别从字称分析和质量、寿命得到的结论截然相反。因为如果两个粒子具有相反字称, 它们就不可能具有相同的质量、寿命和相互作用; 而如果这是同一种粒子, 又怎么会有两种字称呢? 物理学家陷入了迷惘和思索之中。这就是 1954 至 1956 年间出现的“ τ - θ 之谜”的由

来。

当时, 物理学家们好象在一间暗房里摸索, 寻找着出口, 他们已意识到在某个方向一定有一扇门, 但是这扇门在哪个方向呢? 杨振宁和李政道首先发现了解决难题的正确途径——弱相互作用中字称守恒定律不成立。

这里说到弱相互作用, 让我们先就微观粒子之间的相互作用类型作一些简述。

通过对原子和原子核结构的研究, 四十年代末物理学家已掌握粒子之间四种不同的相互作用, 这四种作用的类型和强度比较见表 1。

表 1

类 型	强度(数量级关系)
强相互作用	1
电磁相互作用	10^{-2}
弱相互作用	10^{-13}
引力相互作用	10^{-38}

当时知道, 原子核内部的核力属于强相互作用, 奇异粒子的产生也是由强相互作用引起的。对电磁相互作用, 人们认识得最早最清楚, 它存在于带电粒子之间, 也是原子内部结合电子与原子核的力的来源。弱相互作用的典型例子是原子核的 β 衰变, 后来发现 π 介子衰变为 μ 子(或电子)和中微子等过程与 β 衰变过程有相同的强度, 都属于弱相互作用。引力相互作用的效应在大部分粒子现象中几乎观测不到, 因而除非有特殊要求, 一般可忽略不计。

各种相互作用的差异不仅在于强度的数量级关系, 其物理规律也有不同特征。例如强相互作用中同位旋守恒, 在电磁相互作用中粒子的总同位旋却不守恒, 只是与电荷数有关的同位旋某一分量守恒, 而在弱相互作用中不存在对粒子同位旋的限制。又如强相互作用中奇异数守恒, 弱相互作用却不要求奇异数保持不变, 等等。然而, 就对称性来说, 四种相互作用也有共同点, 即能量守恒、动量守恒、角动量守恒和电荷守恒是每一种相互作用都必须遵守的。在 τ - θ 之谜出现以前, 左右对称被认为是理所当然的, 字称也就被当作一种必须守恒的量, 要求在相互

作用中不变。事实上不少强相互作用和电磁相互作用过程也确实支持了宇称守恒定律,但李、杨二人却敏锐地注意到,对弱相互作用运用这一定律缺乏可靠的依据。

前面提到的由 $\theta \rightarrow 2\pi$ 和 $\tau \rightarrow 3\pi$ 来分析 θ 与 τ 的宇称,是以宇称守恒为前提的。而我们知道上述两种过程属于弱相互作用,实际上先已肯定了弱相互作用中初态的宇称应等于末态的宇称,然后将末态 π 介子的总宇称当作是 θ 或 τ 的宇称,才得出关于两种粒子宇称相反的推断。反之,如果设想在弱相互作用中宇称不守恒,那么一种粒子既允许衰变为奇宇称的末态,也允许衰变为偶宇称的末态,对两种过程末态宇称的测量并不能给出有关初态粒子宇称的信息,这样,衰变模式的不同就与认为 θ 与 τ 是同一粒子的观点没有抵触, τ - θ 之谜自然就解开了。

但是,为了推翻一个从未有人怀疑过的早已被普遍接受的概念,首先必须说明先前偏爱这个概念的所有证据都是不充分的。杨振宁和李政道调查了可以得到的各种实验资料,经过严密的理论分析,于1956年5月作出了以下两点重要结论:(1)过去所作的弱相互作用方面的实验实际上都不曾涉及有关宇称是否守恒的问题。(2)在强相互作用和电磁相互作用中,确实有大量实验以相当高的精度确立了宇称守恒,但是这些实验还没有达到足够高的精度,不可能测出其中的弱相互作用宇称不守恒的效应。于是,通过他们的工作,提出了一个十分令人吃惊的事实:为人们长期深信不疑的一条原理,即对弱相互作用宇称守恒定律成立,并没有实验上的支持。他们还分析了为什么先前为透彻研究弱相互作用而作的许多有关 β 衰变的实验不曾给出宇称问题的信息,提出两个主要理由。首先,在 β 衰变中同时产生的中微子质量为零(或十分接近于零),这一事实导致实验的不确定性,因而仅从探测 β 谱这样简单的实验来间接检验宇称守恒是不可能的。其次,为了直接检验 β 衰变中宇称守恒问题,只研究过程中核子的变化是不够的,而在此以前的实验恰恰

都仅仅讨论核。在这样全面地剖析了弱相互作用的宇称问题之后,李、杨文章建议安排检验整个衰变过程中左右对称的实验。

四、弱相互作用中宇称不守恒的检验和结论

根据以上的讨论,李、杨文章还建议了检验宇称守恒的实验方案。首先,被观测的过程应是包含弱作用的,当时已知原子核 β 衰变和 π - μ , μ - e 衰变都可作为研究对象。而为了能确定这类过程是否有左右对称,必须设计特别的装置,使实验能在彼此互成镜象的两套系统上进行。我们已讨论过镜象过程与左右对称的关系,如果透过镜子所观测到的弱作用过程也能在真实世界中发生,就将证实弱相互作用的左右对称性,反之,如果真实世界中不存在与镜子中过程一样的现象,弱相互作用就必定是破坏左右对称的,即弱相互作用宇称不守恒。后来,吴健雄依据这一思想设计了极化 ^{60}Co 的 β 衰变实验。

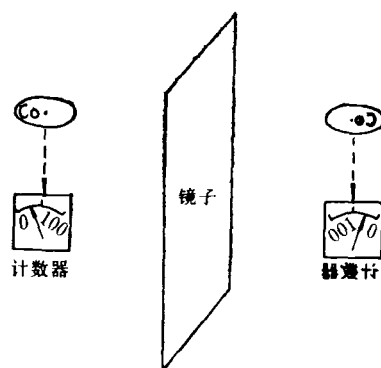
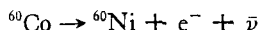


图2 检验宇称守恒的 β 衰变装置示意图

图2是吴健雄实验的简单示意图,图中有两套互成镜象的装置。 ^{60}Co 原子核处于环形电流产生的磁场中,磁场使原子核磁矩定向排列(极化)。镜子两边的环流方向恰好相反,这是很重要的,否则图中左右两边的装置将实际上没有区别,即使在弱作用中左右不对称,其效应也不会两个相同的装置上进行的实验中显示出来。由于相反方向环流的存在,左右两边的 ^{60}Co 被相反的磁场极化,造成了不同的实验条件。

当 ^{60}Co 衰变时发生如下过程:



其中 e^- 表示电子, $\bar{\nu}$ 表示反中微子, ^{60}Ni 是衰变后的原子核. 计数器可测得电子沿一定方向飞出的几率. 当左右两边的计数器按图 2 所示的位置安放时, 其计数率的异同由左右对称是否存在决定. 吴健雄等人通过测量明确无疑地得出左右两个计数器读数有极大的差异, 而装置的各个部分都是对称的, 不对称性只可能由 ^{60}Co 衰变引起. 这样, 就直接证实了弱相互作用的左右不对称性.

上述实验完成于 1957 年初, 仅几天后, 由加文 (R. L. Garwin) 等完成了 $\pi-\mu-e$ 过程的观测. 随后, 很快出现了一批实验结果, 从不同的衰变过程中都得到了同样的结论.

从 β 衰变实验还能得到另一个结论——弱相互作用在电荷共轭变换下也是不对称的. 所谓“电荷共轭变换”就是正反粒子之间的变换, 为了研究弱相互作用这方面的性质, 似乎应该用反粒子(例如反 ^{60}Co) 来做实验, 但这几乎是无法实现的. 实际上, 根据量子场论的知识, 从吴健雄等的实验结果, 作一些必要而不复杂的推演就可得出答案, 而无需真正去觅求不可得的反原子核来观测它的衰变.

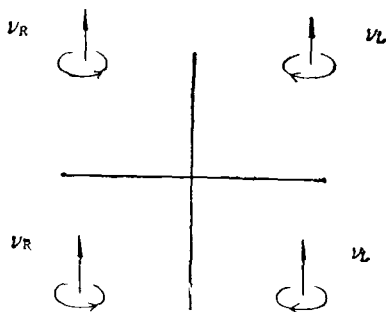


图 3 中微子、反中微子的左、右螺旋性
(向上的箭头表示粒子运动方向)

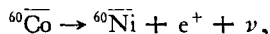
这个理论分析的要点是关于中微子的自旋状态. 我们知道中微子象一个陀螺, 有一个固定的角动量, 其大小是 $\frac{1}{2}$ 个角动量量子化单位. 在量子理论中, 自旋为 $\frac{1}{2}$ 的粒子只有两种量子

化状态, 代表了粒子的两种螺旋性. 当陀螺的旋向与动量方向平行时, 粒子是右旋的, 反平行时是左旋的, 见图 3.

图中 ν_R 表示中微子的右旋状态, ν_L 表示中微子的左旋状态, $\bar{\nu}_R$ 和 $\bar{\nu}_L$ 分别表示反中微子的两种自旋状态. 显然, 同种粒子的左旋和右旋状态恰好互成镜像. 假如弱相互作用左右对称, 在原子核的 β 衰变过程中产生的反中微子的自旋状态也将表现出左右对称性, 即在每个反应道中产生左旋中微子的几率振幅(可记作 C_L)应等于产生右旋中微子的几率振幅(可记作 C_R). 而由于宇称不守恒, 极化 ^{60}Co 实验中 β 粒子角分布数据肯定地给出

$$|C_L| \neq |C_R|.$$

根据 ^{60}Co 的 β 衰变反应式, 反原子核 $^{60}\bar{\text{Co}}$ 的衰变过程如下:



其中 e^+ 是正电子, ν 是中微子. 量子场论的理论计算可证明, 在这过程中产生中微子右旋状态的几率振幅等于 ^{60}Co 衰变产生反中微子左旋状态几率振幅的复数共轭 (C_R^*), 产生中微子左旋状态的几率振幅等于 ^{60}Co 衰变产生反中微子右旋状态几率振幅的复数共轭 (C_R^*). 由于电荷共轭变换只是把粒子状态与反粒子状态互换, 不改变粒子的自旋状态, 因此, 假如弱相互作用中存在电荷共轭对称性, 则 ^{60}Co 产生左旋反中微子的几率振幅应与 $^{60}\bar{\text{Co}}$ 中产生左旋中微子的几率振幅相等, 于是弱相互作用在电荷共轭变换下不变的条件为

$$C_L = C_R^*.$$

但由检验宇称实验得到的不等式表明这个条件不可能成立, 因而同时证明了弱相互作用没有电荷共轭对称性.

五、中微子的自旋状态与质量问题

宇称不守恒的发现引起了人们对一些问题进行更深入的讨论和研究, 特别是关于中微子性质的研究.

中微子是唯一的一种仅仅参与弱相互作用

的粒子，因而它的性质必定反映弱相互作用的规律。以上的有关自旋状态几率振幅不等式已说明这一点，在此基础上二分量相对论理论又引起人们注意。这是韦尔 (Weyl) 早在 1929 年提出过的一种理论，它认为中微子只有一种自旋状态，反中微子也只有一种自旋状态，即在图 3 表示的四种状态中要么只存在 ν_L 和 $\bar{\nu}_R$ ，要么只有另外两种。这样的中微子就象一种十分奇怪的陀螺，它仅朝一个方向旋转，例如旋转方向只能与中微子前进运动方向成左手螺旋关系。当我们透过镜子观察时，镜中的陀螺便将是右旋的，然而永远找不到真实的右旋中微子陀螺来代替镜子里的象，左右对称显然就完全不存在了。正因如此，过去人们一直以不符合宇称守恒定律为由而摒弃韦尔理论，而一旦宇称不守恒被证实，反对它的理由自然不再成立。相反，它被人们再次提起，并逐渐被接受为是适合于描述中微子自旋特征的恰当理论。因为自 1957 年至今的实验中，我们确实只观测到左旋状态的中微子和右旋状态的反中微子，而没有找到存在另两种自旋状态的正反中微子的证据。二分量理论的直接结果是中微子质量必须为零。倘若中微子具有一定的非零质量，就一定存在某个运动参考系，其速度与中微子方向相同而快于中微子，在该参考系中，中微子的速度方向将与原来方向相反。这时中微子动量反向了，旋转方向却没有变，左旋中微子在运动参考系中将会变为“右旋”的。二分量理论是相对论不变的，通过洛伦兹变换绝对不可能改变只有一种中微子自旋状态的事实，因此中微子的物理质量一定是零。无质量的中微子在任何惯性参考系中都不会反向，上述荒谬结果便不可能发生。目前为止的测量数据至少表明，在现有实验精度下中微子质量确实等于零。

六、电荷共轭×镜象反射

另一个有兴趣的问题是，弱相互作用在同时进行电荷共轭和镜象反射(称作 CP 变换)下是否有对称性。让我们假想用吴健雄的装置作另一种实验，左边仍然用 ^{60}Co 作放射源，而在镜

象对称的右边装置上用 $^{60}\bar{\text{Co}}$ 进行实验，这时左右两边的关系好象是由一面特殊的镜子照射形成，这面镜子不仅作反射，还将粒子与反粒子互换。此时如果比较图 2 中两个计数器(左边记录电子数，右边的将记录正电子数)的读数，将会有什么结果呢？

因为需要反原子核，这仅是个假想的实验，事实上，也无须真正去这样做。借助量子场论推导不难证明，在上面讨论中引入的四种几率振幅之间如果满足 $C_L = C_L^*$, $C_R = C_R^*$ ，则假想实验中两个计数器的读数将完全相同，这时我们便认为弱相互作用具有(电荷共轭×镜象反射)对称性。1957 年以后，一些实验测量得到的结果基本上支持以上等式。所以，人们认为尽管弱相互作用宇称不守恒和电荷共轭不守恒，但在两者的联合变换下，弱相互作用还保持了对称性，也就是弱作用在上面描述的特殊镜子中的像是真实世界中可能发生的过程。

然而，当实验精度提高后，1964 年测到了在 CP 变换下弱相互作用约有千分之几的不对称效应，这便是著名的“CP 破坏”问题。从量子场论的一些基本原理出发，曾证明，在任何过程中，不论宇称是否守恒，也不论电荷共轭变换是否对称，在空间反射(记为 P)、电荷共轭变换(记为 C)和时间反演(记为 T)的联合变换下物理定律保持不变。这个结论称作“CPT 定理”。依据该定理，从弱相互作用中存在 CP 破坏便可断定在时间反演下弱相互作用不对称，而当同时作左 \leftrightarrow 右、正粒子 \leftrightarrow 反粒子、过去 \leftrightarrow 将来的变换时，两种不对称效应将互相抵消。弱作用过程是否确有上述性质呢？目前实验上、理论上都在继续深入研究。

最后，值得一提的是，杨振宁和李政道在完成关于宇称不守恒的研究后，立即就注意到了中微子二分量理论和 CP 对称性问题，以上所介绍的有关这两个问题的分析也是他们最早作出的。可以毫不夸张地说，1956 年至 1957 年有关弱相互作用宇称不守恒的理论和实验工作开创了微观研究的一个新时期，这些工作提供的宝贵经验将永远给科学工作者以启示。