

弱相互作用 和宇称不守恒

1957年12月11日诺贝尔讲演

李政道

在前面的杨教授讲话中已向诸位概述了在去年年底前我们对有关物理学中的各种对称原理的认识状况。在那以后,在短短的一年时间内这些原理在各种物理过程中的真正作用极大地被澄清了。如此显著的迅速发展只有通过世界各国各个实验室的许多物理学家们的努力和技巧才得以实现。为了对这些新实验结果有一个适当的洞察和了解,或许可先就我们对基本粒子和它们的相互作用作一个非常简单的评述。

(一)

迄今我们所知道的基本粒子的家族有相当多的成员。除了其它性质以外,每一个成员都以它的质量、电荷和自旋来表征。这些成员分成两大类:“重粒子”类和“轻粒子”类。重粒子中为人熟知的成员有质子和中子;轻粒子中有光子和电子。除了重粒子比轻粒子重这一明显含义外,这种分类还源于下列所观察到的事实,即单个的重粒子不能蜕变为几个轻粒子,即使这样的蜕变是与电荷、能量动量和角动量守恒定律相容的。这个事实的一个更精确的表达是“重粒子数守恒”,这就是说如果我们给每一个重粒子以一个重粒子数 +1,给每个反重粒子以重粒子数 -1,而每个轻粒子相应的数是 0,则在我们知道的所有过程中重粒子数的代数和是绝对守恒的。这个定律成立的最好证据是我们人类或我们星系没有蜕变为光辐射和其它轻粒子这一事实。

图 1 (见下页)表明了所有已知的重粒子(和反重粒子)。除核子以外的所有重粒子称为超子,并用大写的希腊字母标记。实线表示从一般理论讨论预期存在的粒子。所有已知的重粒子具有半整数自旋。图 2 (见下页)表明了所有已知的轻粒子。其中 e^\pm 、 μ^\pm 和 ν 、 $\bar{\nu}$ 具有半整数自旋,它们称为轻子。其余的,光子、 π 介子和 K 介子,具有整数自旋。

这些粒子间的相互作用(不包括引力)可分为三类:

1. 强相互作用。这类作用引起核子、 π 介子、超子(即 Λ^0 、 Σ^- 等)和 K 介子的产生和散射。它以一个耦合常数 $f^2/\hbar c \cong 1$ 来表征。

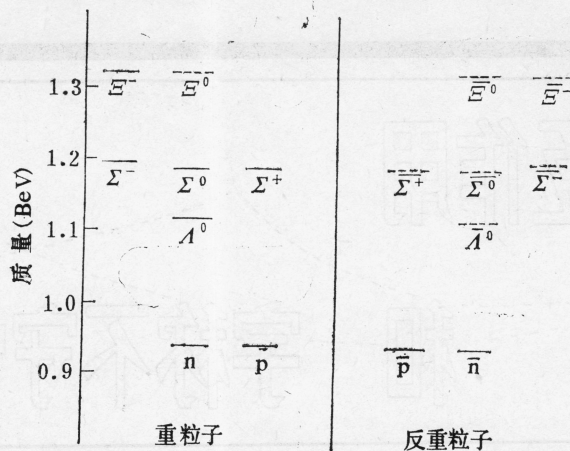


图 1

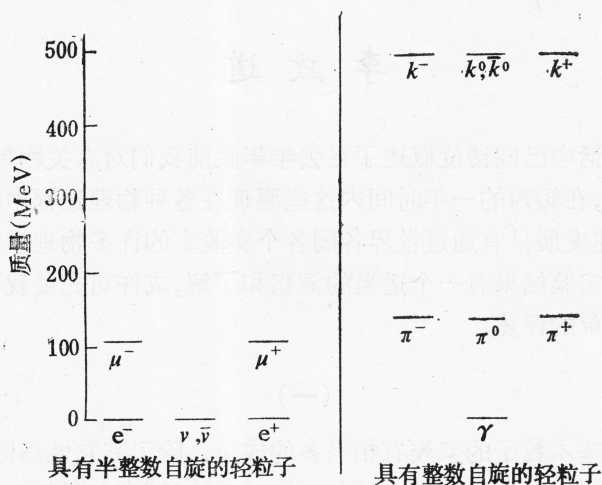


图 2

2. 电磁相互作用。电磁耦合常数是 $(e^2/\hbar c) = \frac{1}{137}$ 。

3. 弱相互作用。这类作用包括所有这些基本粒子的非电磁衰变作用和最近观测到的核子吸收中微子的过程。这个相互作用以耦合常数 $g^2/\hbar c \cong 10^{-14}$ 表征。

宇称守恒定律对强和电磁相互作用都是成立的,但对弱相互作用不成立。今天主要讨论最近在各种弱过程中观测到的宇称不守恒效应。

(二)

弱相互作用包含了许多不同的反应。现在至少已知道 20 种现象上独立的反应,从各种超子衰变到轻粒子的衰变。去年一年内,进行了许多严格的实验来检验宇称守恒在这些反应中是否成立。我们首先将总结一下实验结果及其直接的理论含义。然后,我们将讨论某些进一步可能的推论和理论的考虑。

1. β 衰变

第一个决定性地确定了宇称不守恒的实验是极化 Co^{60} 核的 β 角分布测量(图3)。 Co^{60} 核在极低温下被一个磁场极化。 在这实验中产生极化磁场的螺线管中电流的环形方向与 β 射线发射的优先方向确实以非常直接的方式表现出右手系统与左手系统的差异。 于是,无需借助于任何理论就可确认宇称的不守恒,或者说在一个镜像反映下的非不变性。

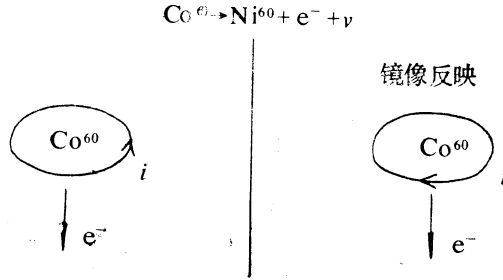


图 3

进一步从观测到的明显的角度不对称也可以确定 β 衰变相互作用在电荷共轭运算下不是不变的。 这个结果不需要去进行十分困难的(事实上几乎不可能的)采用反 Co^{60} 的实验就可作出,是以在一般定域场论框架内的一定的理论推导为根据的。 下面我们来简述这种推理。

让我们考虑一个 β 衰变过程

$$n \rightarrow p + e^- + \nu \quad (1)$$

其中每一个粒子用一个量子波动方程描述。 特别是中微子以如下狄拉克方程描写

$$\sum_{\mu=1}^4 \gamma_{\mu} \frac{\partial}{\partial x_{\mu}} \psi_{\nu} = 0 \quad (2)$$

其中 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 是四个 4×4 反对易狄拉克矩阵,而 $x_1, x_2, x_3, x_4 = ict$ 是四个时空坐标。 对每一个给定的动量,对中微子有二个自旋状态,对反中微子有二个自旋状态,它们可以记为 $\nu_R, \nu_L, \bar{\nu}_R, \bar{\nu}_L$,如果我们定义螺旋度 H 为

$$H \equiv \boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{p} \quad (3)$$

$\boldsymbol{\sigma}$ 是自旋算符而 \hat{p} 是沿动量方向的单位矢量,则这四个矢量螺旋度分别等于 $+1, -1, -1$ 和 $+1$ (图4,见下页)。在数学上,这种状态的分解相应于用下式把 ψ_{ν} 分为一个右手部分和一个左手部分

$$\psi_{\nu} = \psi_R + \psi_L \quad (4)$$

其中

$$\psi_R = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\psi_{\nu} \quad (5)$$

$$\psi_L = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi_{\nu} \quad (6)$$

与

$$\gamma_5 = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4$$

易见 ψ_R 和 ψ_L 都分别独立地满足狄拉克方程(方程2)。按这种分解,原子核A的 β 衰变过程可以用图式表示为

$$A \rightarrow B + e^- + \begin{cases} C_1^R \nu_R & (H = +1) \\ C_1^L \nu_L & (H = -1) \end{cases} \quad (7)$$

$$(8)$$

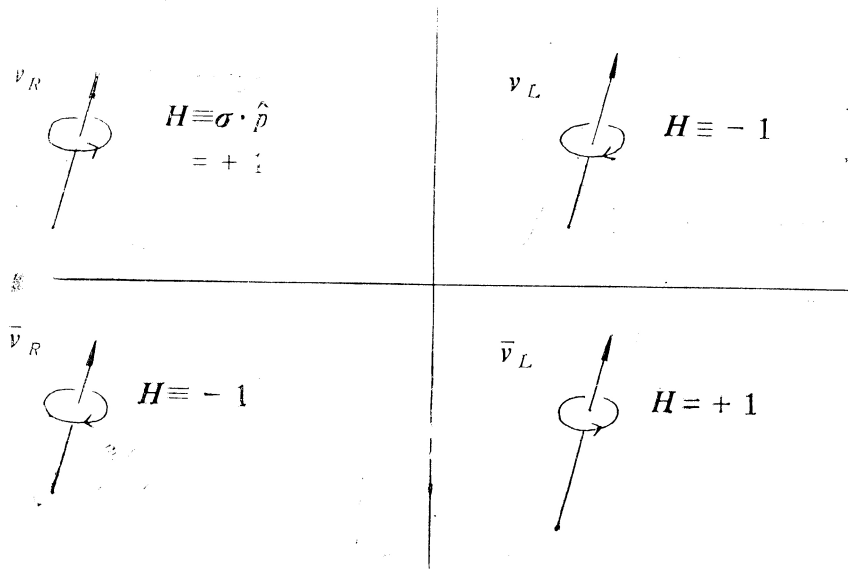


图 4

C_i^R 和 C_i^L 分别是发射 ν_R 和 ν_L 的不同几率振幅。下标 i 表示这类辐射的各种可能的道。如果理论在固有洛伦兹变换下不变,则存在着五种这样的道:称为标量项 S ,张量项 T ,矢量项 V ,赝标项 P 和轴矢项 A 。根据量子场论的一般规则,对应于一个粒子衰变的任一相互作用项就存在一个相应的表示一个反粒子衰变的厄米共轭项。于是,反原子核 \bar{A} 的衰变可以用图式表示为

$$\bar{A} \rightarrow \bar{B} + e^+ + \begin{cases} C_i^{R*} \bar{\nu}_R & (H = -1) \\ C_i^{L*} \bar{\nu}_L & (H = +1) \end{cases} \quad (7')$$

C_i^{R*} 和 C_i^{L*} 是发射 $\bar{\nu}_R$ 和 $\bar{\nu}_L$ 的相应振幅。在电荷共轭算符作用下我们把一个粒子变为它的反粒子,但不改变它的空间或自旋波函数。因此变换后必须有同样的螺旋度。这就是说,如果 β 衰变过程在电荷共轭算符下是不变的,我们就应该预期过程(7)与过程(8')以同样的振幅进行。电荷共轭下不变的条件就是

$$C_i^R = C_i^{L*} \quad (9)$$

对所有的 $i = S, T, V, P, A$ 都满足。

在 Co^{60} 衰变中因为在 Co^{60} 和 Ni^{60} 之间自旋值有一个不同,只有 $i = T$ 和 $i = A$ 的项有贡献。从观测到的很大的角度不对称可以有把握地作出结论,对 $i = T, A$ 都有

$$|C_i^R| \neq |C_i^L|$$

这与方程(9)相抵触,因而证明了 β 相互作用在电荷共轭下不守恒。在上面讨论中为了说明问题,我们假设中微子用一个四分量理论描述,进一步还假定了在 β 衰变过程中只发射中微子。事实上即使在设想中微子必须用一个八分量理论来描述,或假如除中微子外也能发射反中微子的情况下,上述有关电荷共轭下非不变性的结论也同样可得到。

近来,在纵向极化电子和正电子、 β - γ 关联与 γ 辐射的圆极化以及除 Co^{60} 核以外其它各种极化核的 β 角分布等各方面都做了许多实验。所有这些实验的结果都证实了第一个 Co^{60} 实验的主要结论,即在 β 过程中宇称算符和电荷共轭算符两者都是不守恒的。

另一个有兴趣的问题是 β 衰变相互作用是否在 (电荷共轭 \times 镜像反映) 的乘积算符下是不变的。在这个算符下我们应把 A 的衰变与带有相反螺旋态的 \bar{A} 相比。这样, 如果 β 衰变在这个 (电荷共轭 \times 镜像反映) 的联合运算下不变, 我们就应预期过程 (7) 与过程 (7') 以同样的振幅进行, 对 (8) 与 (8') 也类似。相应的条件就是

$$\begin{aligned} C_i^R &= C_i^{R*} \\ C_i^L &= C_i^{L*} \end{aligned} \quad (10)$$

与

虽然现在已进行一些实验检验这条件是否成立, 这些实验还未达到可以作结论的地步, 因此我们还不知道对这个重要问题的答案。

2. $\pi-\mu-e$ 衰变

π 介子衰变到一个 μ 介子和一个中微子。 μ^\pm 介子又衰变到一个 e^\pm 和两个中微子 (或反中微子)。如果在 π 衰变中宇称不守恒, μ 介子的发射可能是纵极化的。如果随后发生的 μ 衰变宇称也是不守恒的, 由这样的—个静止的 μ 介子发射出来的电子 (或正电子) 在相对 μ 介子极化的朝前和朝后的方向上会显示出角度的不对称 (图 5), 因此在 $\pi-\mu-e$ 衰变系列中我们可观测到在 π 介子静止系中测量的 μ^\pm 介子动量和在 μ^\pm 静止系中测量的 e^\pm 的动量之间的—个角度关联。如果这个角关联表现出前后不对称, 则宇称必定在 π 衰变和 μ 衰变中都不守恒。在 β 衰变结果的几天之后出现的关于这种角关联的实验结果已为大家所知, 这些结果肯定地表明了 在 π 衰变中与 μ 衰变中—样, 不仅宇称不守恒, 电荷共轭算符也是不守恒的。

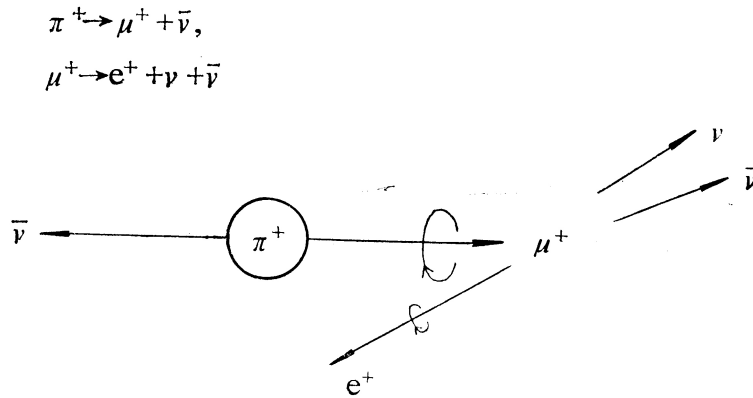


图 5

随后, 对 μ^+ 衰变中的正电子的纵极化的直接测量也对 μ 衰变给出了同样的结论。

3. $K-\mu-e$ 衰变

在这个情况下, 代替 π 介子的是更重—点的 K 介子, 它衰变到 μ 介子和—个中微子 (图 6, 见下页)。关于从 K^+ 介子衰变出来的 μ^+ 动量和从 μ^+ 衰变出来的正电子动量之间的角关联实验确认了在 K 衰变中宇称和电荷共轭算符也都是不守恒的。

4. Λ^0 衰变

Λ^0 粒子可以通过—个高能 π^- 打击质子产生。接着 Λ^0 衰变为—个质子加—个 π^- (图 7, 见下页)。观测关于入射 π 动量 \mathbf{p}_{in} , Λ 粒子动量 \mathbf{p}_Λ 和衰变出的 π 介子动量 \mathbf{p}_{out} 形成的—个乘积 $\mathbf{p}_{out} \cdot (\mathbf{p}_{in} \times \mathbf{p}_\Lambda)$ 的符号的—个不对称分布将对这个衰变中宇称不守恒给出明确的证明。目前关于这种反应的实验表明了在这类反应中确实存在—个 \mathbf{p}_{out} 和 $(\mathbf{p}_{in} \times \mathbf{p}_\Lambda)$ 之间的角关联, 而且, 由很大的上-

$$k^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu},$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

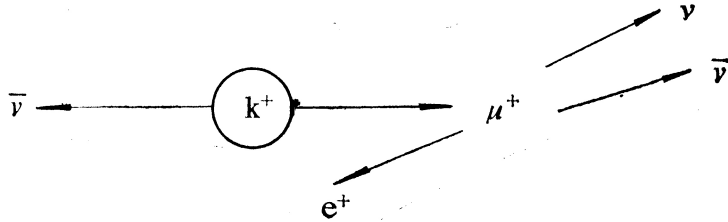


图 6

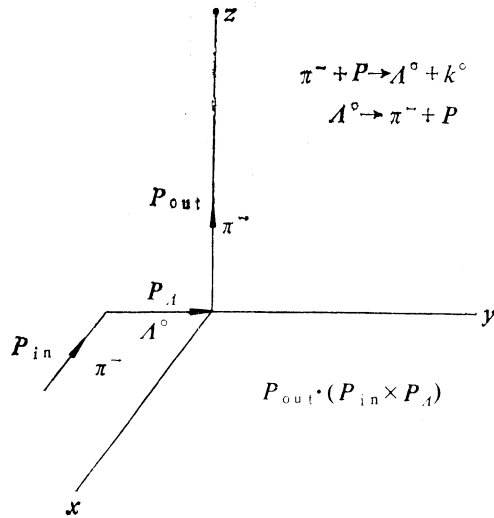


图 7

下不对称可以作出结论, Λ^0 衰变相互作用在电荷共轭运算下也不是不变的。

从所有这些结果看来在各种弱相互作用中宇称不守恒性和这些过程在电荷共轭下的非不变性都已确定无疑。与这种性质相关, 我们发现了一个非常新而丰富的自然现象领域, 它反过来给我们以进一步探测我们物理世界结构的一个新工具。这些反应给我们提供极化和分析各种基本粒子自旋的一个自然的方法。例如, 现在 μ 介子的磁矩可以得到极高精确度的测量, 否则是达不到这么高精度的; 某些超子的自旋现在可能可以通过观测它们衰变中的角度不对称性来明确测定; 各种气态、液态和固态物质电磁场的新样式现在可以用这些不稳定的极化粒子来研究。然而, 最显著的结果或许是开辟了新的可能性和重新检验我们关于基本粒子结构的旧概念。我们下面将讨论这类考虑的两个方面——中微子的二分量理论和可能存在的一个轻子守恒定律。

(三)

在这宇称不守恒的最新发展以前, 通常用一个四分量理论来描述中微子, 如前所述, 在这个理

论中对每一确定的动量有二个中微子自旋状态 ν_R 和 ν_L , 加上二个反中微子的自旋状态 $\bar{\nu}_R$ 和 $\bar{\nu}_L$. 然而, 在二分量子理论中我们假设这些状态中的二个, 也就是 ν_L 和 $\bar{\nu}_L$ 在自然界不能单独存在. 于是中微子的自旋永远平行于它的动量, 而反中微子的自旋永远反平行于它的动量. 因此在二分量子理论中我们只有四分量子理论中自由度的一半. 图解上我们可以把自旋和中微子的速度用一个右手螺杆的螺旋运动来表示, 而用一个左手螺旋运动表示反中微子(图 8).

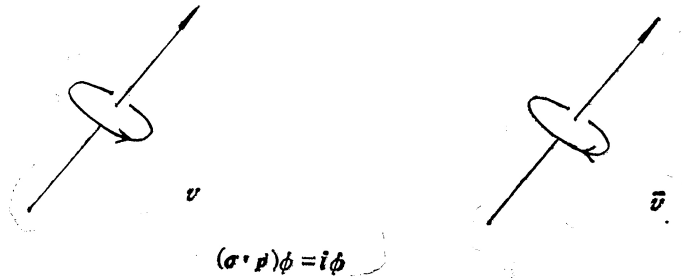


图 8

一个自旋为 $1/2$ 的粒子的二分量子相对论理论的可能性早在 1929 年 H. Weyl 就讨论过. 但过去因为 Weyl 形式中的宇称是显然不守恒的, 所以它总是被排斥. 由于目前的发现, 这样一个反对理由就完全不成立了.

为了体会在目前情况下这个二分量子理论的简单性, 最好是假设对轻子存在着一个新的守恒定律. 这个定律与相应的重粒子守恒非常类似. 我们赋以每一个轻子等于 $+1$ 或 -1 的轻子数, 而其它粒子轻子数为零. 一个轻子的轻子数必须与它的反粒子的轻子数相反. 则轻子数守恒表达为“在所有物理过程中轻子数的代数和必须守恒”.

如果我们假设这个定律成立, 并且中微子以二分量子理论描述, 就能直接导出一些简单的结果.

1. 中微子和反中微子的质量必须为零. 这对于物理质量, 甚至包含所有相互作用的贡献都是对的. 为明白这一点, 让我们考虑一个以有限动量运动的中微子. 从二分量子理论可知这个中微子的自旋必须平行于它的动量. 现在假设它有一个非零物理质量, 则我们总可以让一个观察者沿着与中微子相同的方向运动, 但速度比中微子快. 以这个观察者的观点, 这个“中微子”现在变为一个自旋沿着它的原先方向但动量相反的一个粒子, 即变为一个“反中微子”. 但由于轻子数不可能因洛仑兹变换而互相转换, 因此中微子的物理质量必须为零.

2. 理论在宇称算符 P 下不是不变的, P 的定义是把所有空间坐标反向但不把一个粒子改变为它的反粒子. 在这样一个运算下我们把一个粒子的动量反向而不改变自旋方向. 因为在这个理论中对一个中微子动量和自旋方向总是平行, 宇称算符 P 作用于中微子上导致一个不存在的态, 因此这个理论在宇称运算下不是不变的.

3. 类似地我们可以证明这个理论在把一粒子变为它的反粒子而既不改变自旋也不改变动量方向的电荷共轭变换下不是不变的.

为了检验轻子数的守恒定律和二分量子理论完全成立, 我们必须仔细考察所有的中微子过程. 例如在 β 衰变中我们一定有

$$n \longrightarrow p + e^- + \nu \quad (H_\nu = +1)$$

或
$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (H_{\bar{\nu}} = -1)$$

这可以用测定中性轻子的动量和自旋来确定,也就是测量它是否是一个中微子(右手螺旋)或一个反中微子(左手螺旋)。通过角动量守恒定律,对核和电子的极化和角分布的测量可导致确定中微子的自旋状态。类似地通过反冲动量的测定我们可以找到关于中微子线动量的信息。用同样方法我们不仅可用 β 衰变也可用 π 衰变、 μ 衰变和K衰变来检验二分量理论或轻子数守恒定律的成立。现在这种测量还未达到一个最后确定的程度。我们未来发展中的大部分可能依赖于这类实验的结果。

(四)

科学的进步总是我们的宇宙观和我们对自然界的观测之间相互密切影响的结果。前者只能从后者中推演出来,而后者也被前者极大地制约着。这样,在我们对自然的探索中,我们的概念和我们的观测之间相互影响,有时会在早已熟悉的现象中引导出完全没有预料到的情况,就如现在的情况那样。这些隐蔽的性质往往只是通过根本改变我们有关支配自然现象的原理的基本概念后才发现的。虽然这是尽人皆知的,不过能够在很短时间内在一个单独的例子中看到这两种因素——概念和观测的相互影响和促进是一个非常丰富和值得记取的经验。我能在此向诸位报告在目前的宇称不守恒和弱相互作用有关的发展中的部分经验确实是一个特殊的荣幸。

(谢诒成译、黄涛校,未经作者校阅)

(题图:密建林)