

微观世界的对称性(下)

徐 德 之

7. CP 联合反演不变性 这是对体系同时作 C 变换和 P 变换下的不变性。在前面我们已谈到在弱作用过程中, C 宇称和 P 宇称都是不守恒的,这是因为假定中微子质量为零,使中微子一定是左旋的,反中微子一定为右旋的,所以 C、P 单独变换使中微子变成实际世界中不存在的粒子。但我们很易看出,同时作 CP 变换时,中微子将变为实际世界存在的反中微子:

左旋中微子 $\xrightarrow{C}$ 左旋反中微子 $\xrightarrow{P}$ 右旋反中微子
左旋中微子 $\xrightarrow{P}$ 右旋中微子 $\xrightarrow{C}$ 右旋反中微子
由此看来弱作用过程应该是 CP 不变的。事实上 CP 宇称在绝大多数情况下是守恒的,直到 1964 年科学家才第一次在中性 K 介子的衰变中发现 CP 有极小的破坏。

自从 K^0 介子被发现后,人们对它进行了大量的研究,观察到它主要有两种衰变,一种衰变为 2π 体系,一种衰变为 3π 体系,但这两种衰变有截然不同的寿命,前者是 10^{-10} 秒,后者是 10^{-8} 秒,两者差 100 倍。人们认为这是 K^0 的两种状态,并称短寿命的 K^0 态为 K_S^0 态;长寿命的 K^0 态为 K_L^0 态。由于早先在实验上还没有观察到 CP 破坏现象,所以自然地就用 CP 守恒来解释这种现象。因为 2π 体系的 CP 宇称为正, 3π 体系的 CP 宇称为负,所以如果 CP 守恒,则 K_S^0 应为 CP 正宇称态, K_L^0 为 CP 负宇称态。显然,用 K^0 来构成这种 CP 宇称态为:

$$K_S = \sqrt{2} (K^0 + CPK^0)/2$$

$$K_L = \sqrt{2} (K^0 - CPK^0)/2$$

由于 CP 守恒, K_S 是不能衰变到 3π 的,而 K_L^0 是不能衰变到 2π 的。但费契和克劳宁在 1964 年测到了 K_L^0 到 2π 的衰变,不过这种衰变的分枝比很小只有千分之三。这充分地证明了在弱作用中 CP 宇称不是绝对守恒的,而有极小的破坏。目前还在对 CP 破坏的原因进行深入的研究。

8. 时间反演不变性 这是把 t 变为 $-t$ 变换的不变性。形象地说就是把时间倒退回去。这时吸收(放出)一个粒子变成放出(吸收)一个粒子,动量 $\mathbf{p}$ 变成动量 $-\mathbf{p}$,自旋的转向也倒过来,但由于 $\mathbf{p}$ 也倒了,故自旋在动量上的投影不变,即粒子的旋性不变(见图 4)。正反粒子性也不变。一个体系的运动规律在 T 反演下不变时,则把一个过程严格地一步步倒退回去的过程也是存在的。

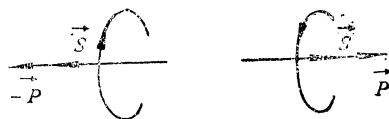


图 4

我们从理论上可以证明,只要一个体系的运动规

律是相对论不变的,则它一定在 CPT 联合变换下也是不变的,这条定理称 CPT 定理,或强反演定理。现在如前所述,在弱作用中 CP 不变性是受破坏的,于是只有当 T 变换不变性也受到破坏的情况下, CPT 才是不变的。所以弱作用中不具有 T 变换不变性。

T 反演没有相应的宇称量子数,这是因为在 T 变换下吸收粒子(放出粒子)态变为放出粒子(吸收粒子)态,变换前后的体系不处于同一个态中,故不会只差一个相因子。

9. 同位旋空间旋转不变性 同位旋空间是一个比较抽象的概念,它是在研究强作用时,通过和自旋的类比而引入的。

中子和质子是原子核的组成部份,虽然它们的电性不同,但有很多相同的地方,如它们的自旋都为 $1/2$,宇称都为正,它们的质量几乎相等,只差千分之一。再仔细地研究一下,发现它们的强作用也是完全一样的(称强作用的电荷无关性)。因此人们试图把它们统一起来描写,把它们看作同一个粒子的两个不同的态,就象一个电子有两个自旋投影状态一样。一个粒子的自旋描写了该粒子在空间旋转时的性质,有两个自旋投影状态的粒子的自旋为 $1/2$ 。和此类比,可以引进一种抽象的同位旋空间,它和普通空间一样,也有三个坐标架 I_x, I_y, I_z 。在此空间转动下,就得到不同同位旋的状态。质子和中子的同位旋为 $1/2$,所以有两个同位旋投影态。这样的类比是否正确,应由实验来检验。在普通空间旋转的自旋态中,除了有 $1/2$ 态以外,还有自旋为零的标量、自旋为 1 的矢量以及自旋为 $3/2, 2, \dots$ 等的各阶张量。那么根据类比,也应该有同位旋为零的标量态(只有一个分量),同位旋为 1 的矢量态(有三个分量)等等。实验上的确发现了这些状态,如 $\eta, \omega, \phi, J/\psi$ 等都是同位旋为零的态, $(p, n), (K^+, K^0), (\Xi^0, \Xi^-)$ 等都是同位旋为 $1/2$ 的旋量态, $(\pi^+, \pi^0, \pi^-), (\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-)$ 等是同位旋为 1 的矢量态, $(\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-)$ 为同位旋为 $3/2$ 的旋量态。不仅如此,将普通空间的角动量理论应用到同位旋空间中去,定量计算结果也和实验符合很好。所以这种类

12. 规范变换不变性 这是场的内部对称性. 场是一种波动, 它在每一时空点都有一定的相位, 规范变换就是与此相位有关的一种变换 (规范场的规范变换比较复杂). 前面所说的同位旋空间的旋转和 $SU(N)$ 变换都是一种规范变换. 如果各时空点的变换一样, 则称为第一类规范变换, 也称整体规范变换. 如果各时空点变换不一样, 则称为第二类规范变换, 或称定域规范变换. 显然, 第一类是第二类的特殊情况.

最简单的规范变换是 $U(1)$ 规范变换, 这是对每一个场 φ_i 的相角改变 $q_i\alpha$ 的变换: $\varphi_i \rightarrow e^{-iq_i\alpha}\varphi_i$. 其中 α 标志着改变的大小, q_i 表示 φ_i 的某种力学量的本征值, 它标志着规范变换的种类, 如电荷规范、重子数规范、轻子数规范等等, 这时 q_i 分别为 φ_i 的电荷、重子数、轻子数等等. 运动规律在这种整体规范变换下的不变性将导致电荷、重子数、轻子数等各种量子数的守恒. 如果这种变换是定域的 (第二类), 则自由场的运动规律不可能是不变的. 如自由电子场的拉氏量为 $i\bar{\psi}(x)(\gamma_\mu\partial_\mu + m)\psi(x)$, 因为第二类变换中的 α 与 x_μ 有关, 故变换后为 $i\bar{\psi}\left(\gamma_\mu\partial_\mu - iq\gamma_\mu\frac{\partial\alpha}{\partial x_\mu} + m\right)\psi$ 和原来的不一样了. 但电子场和电磁场相互作用的运动规律在此定域变换下是不变的. 这时拉氏量为

$$i\bar{\psi}(\gamma_\mu\partial_\mu - iq\gamma_\mu A_\mu + m)\psi - \frac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)^2,$$

只要电磁场作相应的变换: $A_\mu \rightarrow A_\mu - \frac{1}{q}\frac{\partial\alpha}{\partial x_\mu}$ (这就是规范场的规范变换), 则很易证明拉氏量是不变的. 因而电磁场也称规范场.

稍为复杂一点的是 $SU(2)$ 规范变换, 这是对两个对称的场作相互关联的变换, 所以变换后的两个场分别是原来两个场的线性叠加. 它的变换形式可写为 $\varphi \rightarrow e^{-i\alpha \cdot \tau}\varphi$, 其中 $\varphi = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}$, τ 为二行二列的泡利矩阵, α 为三个独立的变量, 所以实际上它包含了三种独立的变换. $SU(2)$ 变换和三维同位旋空间的旋转变换是等价的 (通俗地说是它们的变换结果是一样的), 所以整体 $SU(2)$ 规范变换不变性也导致同位旋守恒. 杨振宁和 Mills 最早引入定域 $SU(2)$ 规范变换不变性, 如果要求体系的运动规律在此变换下不变, 就要引入三个矢量规范场 (因为有三个独立变换). 只有和此规范场发生作用的体系的运动规律才在此变换下不变. $SU(2)$ 同位旋有两类. 一类是强作用运动规律所具有的整体 $SU(2)$ 规范不变性, 相应的旋称强同位旋. 一类是弱作用运动规律所具有的定域 $SU(2)$ 规范不变性, 相应的旋称弱同位旋. (u, d) , (C, S) , (ν_e, e) , (ν_μ, μ) (或许还有 (ν_τ, τ)) 都是弱同位旋空间的旋量. 和此不变性相联系的规范场有三个 W^+ 、 W^- 、 W^0 , 称为中间玻色子. 它们的质量很大, 所以由

它们传递的相互作用表现得很弱, 力程很短.

强作用的运动规律还满足定域 $SU(3)$ 规范变换不变性. 我们认为每一种夸克有三种不同的“色”态, 用红、绿、蓝表示. 这里的 $SU(3)$ 变换就是对这三种“色”态进行的变换. 其中包含了八个独立的变换, 所以应引进八个矢量规范场, 它们称为胶子, 强作用就是由这些胶子来传递的. 这种“色”的强作用有一种特性, 就是距离越远“色”力越强, 有色的粒子一定会结合起来, 自然界只能存在无色的粒子, 即我们通常见到的所谓基本粒子. 它们都是色 $SU(3)$ 空间的单态, 其它的多重态都是有色的, 故不能单独存在.

我们还可从理论上引入其它的规范变换, 如 $SU(5)$ 、 $SO(10)$ 等等, 这里不一一介绍了.

对称性在粒子物理中起着重要作用. 我们可以根据对称性来判断一个过程能否发生. 我们也可以在了解某种相互作用的具体形式时, 根据一般的对称性原理来唯象地写出它的拉氏量. 对称性使粒子之间发生了一定的联系, 从而使我们比较方便地对它们进行系统的研究. 对称性还决定了粒子的寿命. 我们知道粒子的衰变是由相互作用引起的, 相互作用越强, 粒子衰变得越快, 寿命就越短. 基本粒子间的强作用最强, 所以由它支配的衰变过程的时间最短, 但强作用满足的对称性最多, 所以使许多过程不能发生, 因而不是所有的粒子都能进行强衰变的. 电磁作用有较少的对称性, 所以当粒子不能发生强衰变时, 它可能发生电磁衰变, 这时它的寿命就比较长一些 (10^{-15} 秒— 10^{-20} 秒). 当对称性使电磁衰变也不能发生时, 粒子就只能通过弱作用发生衰变, 这时粒子的寿命应长于 10^{-14} 秒. 如果弱衰变也不能发生, 则此粒子就是绝对稳定的, 如以前认为质子、电子、光子、中微子都是绝对稳定的, 但现在认为可能存在一种超弱作用, 它不是重子数规范不变的, 于是质子也是可以衰变的了, 不过它的寿命很长, 长于 10^{30} 年. 到目前为止还没有发现.