

关于 W 和 Z 是复合粒子的可能性问题

黄涛 谢治成

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

这篇文章唯象地分析了 W、Z 的质量和复合模型的关系, 其结果表明如果实验值有任何对 W-S 模型偏离都是对复合模型的支持. 按照近来的实验数据计算结果表明如果 W 的径向激发态 W' 存在, 它的质量至少将是 W 质量的 2—5 倍.

近来西欧中心 UA1 和 UA2 组发现了荷电 W 粒子以及中性 Z 粒子^[1], 直接地证实了 Weinberg-Salam 统一模型理论^[2]的正确性.

1979 年 Bjorken 提出一种可能性^[3], 即存在一个较一般的体系, 不要求保持可重整的规范理论甚至于不要求中间玻色子分立谱存在, 从而得到弱电统一理论预言的中性流结果. 同时 Sakurai 也以一个简单的 γ - W^3 混合图象表明可以重现统一模型的低能结果^[4]. 近几年来, 人们从层子和轻子是复合粒子的观点, 很自然地推测传递层子、轻子间弱相互作用的中间玻色子也是复合粒子. 从中间玻色子的复合性很容易理解 γ - W^3 的混合机制, 正像在强子的层子模型中 γ - ρ^0 混合一样.

在大多数复合粒子模型里, 设中间玻色子是由一对正、反费米子组成的^[5], 即 $W^+ = (\psi_u \bar{\psi}_d)$, $W^- = (\bar{\psi}_u \psi_d)$, $W^3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_u \psi_u - \bar{\psi}_d \psi_d)$, $W^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_u \psi_u + \bar{\psi}_d \psi_d)$. 其中 ψ_u 和 ψ_d 是同位旋空间的二重态. 这样 W^\pm 、 W^3 构成同位旋三重态, W^0 是同位旋单态. ρ 的实验测量值表明中性流纯粹是一个矢量流, 同位旋标量贡献极小, 因此 W^0 的质量应比 W^\pm 、 W^3 的质量重很多, 在下面的讨论中我们将忽略同位旋标量的贡献.

中性流的存在在标准的 $SU(2) \times U(1)$ 模型中是由自发对称性破缺引起的, 在复合模型中是由于正反亚层子可以湮灭为光子引起的(见图 1). 其湮灭顶点可以用束缚态的

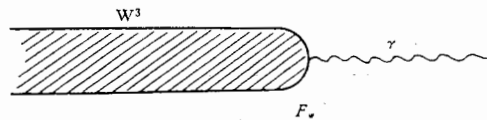


图 1 γ - W^3 混合

零点波函数 $\phi_w(0)$ 来表示, 则有

$$\langle 0 | J_\mu^3 | W \rangle = \varepsilon_\mu F_w \quad (1)$$

$$F_w = \beta_w \sqrt{m_w} \phi_w(0) \quad \beta_w = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

这种混合机制必然引起在原有唯象拉氏函数

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \frac{1}{4} W_{\mu\nu} W_{\mu\nu} - \frac{1}{2} m_w^2 W_\mu W_\mu \\ & - \frac{1}{2} m_\gamma^2 A_\mu A_\mu + g_w J_\mu W_\mu + e J_\mu^{e,m} A_\mu \end{aligned} \quad (3)$$

上附一有效拉氏函数 \mathcal{L}^{mix} ,

$$\mathcal{L}^{\text{mix}} = -\frac{1}{4} \lambda_{rw} (F_{\mu\nu} W_{\mu\nu}^3 + W_{\mu\nu}^3 F_{\mu\nu}) \quad (4)$$

其中

$$\lambda_{rw} = \frac{-2eF_w}{m_w^2} \quad (5)$$

式(3)中 g_w 由束缚态波函数重迭积分确定, m_w 由亚层子动力学方程确定. 按照 Hung-Sakurai 所用的传播子矩阵公式^[4]可以给出低能下弱中性流的形式

$$\mathcal{L}^{\text{NC}} = 4 \frac{G_F}{\sqrt{2}} \left(J_\mu^3 - \frac{e}{g_w} \lambda_{rw} J_\mu^{e,m} \right) \left(J_\mu^3 - \frac{e}{g_w} \lambda_{rw} J_\mu^{e,m} \right) \quad (6)$$

其中

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g_w^2}{8m_w^2} \quad (7)$$

以及

$$m_z^2 = m_w^2 / (1 - \lambda_{rw}^2) \quad (8)$$

因而

$$\sin^2 \theta_w = \frac{e}{g_w} \lambda_{rw} = \frac{\sqrt{2} e \lambda_{rw} g_w}{8G_F m_w^2} \quad (9)$$

此式给出了 r - W^3 混合机制下的混合角 θ_w .

既然 W 作为复合粒子, 必然存在径向激发态 W' 、 W'' 、 \dots , 它们与 W 具有完全相同的量子数, 也与 γ 有混合. 按照 Hung-Sakurai 方法, 方程(7)、(8)和(9)可以被推广为下列方程:

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g_w^2}{8m_w^2} + \frac{g_{w'}^2}{8m_{w'}^2} + \dots \quad (10)$$

$$1 + \lambda_{rw}^2 \frac{m_z^2}{m_w^2 - m_z^2} + \lambda_{rw'}^2 \frac{m_z^2}{m_{w'}^2 - m_z^2} + \dots = 0 \quad (11)$$

$$\sin^2 \theta_w = \frac{\sqrt{2}}{8G_F} e \left[\frac{\lambda_{rw} g_w}{m_w^2} + \frac{\lambda_{rw'} g_{w'}}{m_{w'}^2} + \dots \right] \quad (12)$$

其中

$$\lambda_{\gamma W'} = -2eF_{W'}/m_{W'}^2, \quad F_{W'} = \beta_{W'} \sqrt{m_{W'}} \phi_{W'}(0) \quad (13)$$

目前实验上测到的 m_W 和 m_Z 值在误差范围内与标准模型一致^[1], 一方面说明了弱、电统一模型所预言的结果是正确的, 另一方面意味着 W 粒子的径向激发态 W' 、 W'' 、 \dots 对基态的影响极小, 或者说它们的质量比 m_W 大得多. 正因为后一点, 我们可以简单地以一个 W' 代表所有激发态的效应, 这时

$$\frac{\lambda_{\gamma W'}}{\lambda_{\gamma W}} = \left(\frac{m_W}{m_{W'}}\right)^{3/2} \cdot a \quad (14)$$

$$a = \frac{\phi_{W'}(0)}{\phi_W(0)} \quad (15)$$

a 是两零点波函数之比值, 依赖于亚层子间的动力学. 对于通常禁闭机制的动力学, $a \sim \mathcal{O}(1)$ (对于谐振子势 $a = 1.22$, 对于线性势 $a = 1$, 对于对数势 $a = 0.72$). 因此可期望 $m_W^2/m_{W'}^2$ 和 $\lambda_{\gamma W'}/\lambda_{\gamma W}$ 是小量. 在方程 (11) 和 (12) 中略去二级小量, 并代入到方程 (10) 给出

$$\frac{g_{W'}^2}{m_{W'}^2} = \frac{8G_F}{\sqrt{2}} \left[1 - \frac{8G_F}{\sqrt{2}} \frac{1}{e^2 \lambda_{\gamma W}^2} m_W^2 \sin^4 \theta_W \right]. \quad (16)$$

这样, 在略去二级小量的近似下就可以从实验上所测量的 G_F , $\sin^2 \theta_W$, m_W , m_Z 来确定 $\lambda_{\gamma W}$, g_W^2/m_W^2 和 $g_{W'}^2/m_{W'}^2$.

至于 $\lambda_{\gamma W'}$ 和 $m_{W'}$, 按照文献[3, 4]的方法要求满足渐近 $SU(2) \times U(1)$ 对称性, 在 W' 存在的情况下应具有下列推广的等式^[7]

$$e = \lambda_{\gamma W} g_W + \lambda_{\gamma W'} g_{W'} \quad (17)$$

将 (12) 式略去二级小量后代入到 (17) 式给出

$$g_{W'} = \frac{e}{\lambda_{\gamma W'}} [1 - B m_W^2 \sin^2 \theta_W] \quad (18)$$

其中

$$B = 8G_F/\sqrt{2} e^2 = \frac{1}{(37.4 \text{ GeV})^2} \quad (19)$$

由此可得

$$\lambda_{\gamma W'} m_{W'} = \frac{1 - B m_W^2 \sin^2 \theta_W}{\sqrt{B \left(1 - B \frac{m_W^2}{\lambda_{\gamma W}^2} \sin^4 \theta_W \right)}} \quad (20)$$

方程 (20) 成立的条件是

$$1 - B \frac{m_W^2}{\lambda_{\gamma W}^2} \sin^4 \theta_W \geq 0 \quad (21)$$

等号条件正好给出 Weinberg-Salam 模型的结果. $1 - B \frac{m_W^2}{\lambda_{\gamma W}^2} \sin^2 \theta_W > 0$ 给出 W' 存在的条件, 因此如果实验上测量值使得式 (21) 的左边大于零, 则意味着 W' 的存在, 也意味着 W 粒子是复合粒子. 在复合模型里, 式 (21) 给出 $\lambda_{\gamma W}$ 可取值为

$$\lambda_{\gamma w}^2 > (B m_w^2 \sin^2 \theta_w) \sin^2 \theta_w \quad (22)$$

亦即混合参量 $\lambda_{\gamma w}$ 并不要求等于 $\sin \theta_w$, 目前的实验值表明 $B m_w^2 \sin^2 \theta_w$ 略大于 1, 因此有 $\lambda_{\gamma w}^2 > \sin^2 \theta_w$. 将此代入到 (8) 式可以看到在复合粒子模型里中性 Z^0 粒子质量可以略大于标准模型所预言的数值. 在下面的表中列出当取 $\sin^2 \theta_w = 0.23$ 时标准模型给出的 m_z 值和复合模型可取的 m_z 值:

$m_w \backslash m_z$	81 GeV	79 GeV	83 GeV
W-S 模型预言的 m_z	92.3 GeV	89 GeV	94.6 GeV
复合模型预言的 m_z	>93.4 GeV	>90.4 GeV	>96.5 GeV

目前的实验值 m_z 存在略大于 W-S 模型所预言的数值的可能性, 这一微小的偏差可在复合模型的框架中得到解释. 这是由于 W' 存在产生的影响, 又由于 $m_{w'}$ 比 m_w 重得多, 致使对标准模型的偏离较小.

$m_{w'}$ 值的大小也可以从目前的实验值给出一些信息. 因为由式 (14) 和 (20) 可以给出

$$a = \sqrt{\frac{m_{w'}}{m_w} \frac{1}{\lambda_{\gamma w} m_w}} \cdot \frac{1 - B m_w^2 \sin^2 \theta_w}{\sqrt{B \left(1 - \frac{B m_w^2}{\lambda_{\gamma w}^2} \sin^4 \theta_w \right)}} \quad (23)$$

当 $m_{w'} \rightarrow \infty$ 时只有 $1 - B m_w^2 \sin^2 \theta_w = 0$, 这意味着 W 粒子不是复合粒子. 然而考虑到实验值的偏离, 近似地方程 (23) 给出

$$m_{w'} \simeq \frac{10}{3} a^2 m_w \quad (24)$$

如果 a 值取通常的禁闭势, 那么 $m_{w'}$ 差不多是 m_w 的 2—5 倍, 可能更大一点. 这样一个能级间隔远不同于强子系统, 这是可理解的, 因为下一层次的标度 Λ_H 至少是几百 GeV, 而径向激发的能级应是 Λ_H 的数量级.

总之, 本文的讨论给出 W' 存在的条件 (21) 式, 无论 m_w 和 m_z 值对标准模型的任何偏离都可能预示着有限质量 W' 的存在, 也预示了 W 和 Z 可能是复合粒子. 而目前的实验数据可以推测 $m_{w'}$ 至少是 m_w 的 2—5 倍.

[附记] 在此工作完成以后见到了 UA1 组和 UA2 组的预印本给出新的实验数据^[8],

	m_w (GeV)	m_z (GeV)	$\sin^2 \theta_w$ (GeV)
UA1 组	80.9 ± 1.5	95.6 ± 1.4	$0.226 \pm 0.008 (\pm 0.014)$
UA2 组	$81.0 \pm 2.5 \pm 1.3$	$91.9 \pm 1.3 \pm 1.4$	0.226 ± 0.014

这些实验结果在误差范围内与标准模型一致, 但也可见到 UA1 组的 m_z 值偏大一点, 由此给出的 $\lambda_{\gamma w}^2 =$

$\frac{m_z^2 - m_w^2}{m_z^2} = 0.284 > \sin^2 \theta_w$, 因此并不排除 W 是复合粒子的可能性。有待实验上更精确的测量。

参 考 文 献

- [1] G. Arnison et al., *Phys. Lett.*, **122B** (1983), 103,
给出 $m_w = (81 \pm 5) \text{GeV}/c^2$
G. Arnison et al., *Phys. Lett.*, **126B** (1983) 398,
给出 $m_z = (95.2 \pm 2.5) \text{GeV}/c^2$
- [2] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **19** (1967), 1264;
A. Salam, *Elementary Particle Theory*, Proc. 8th Nobel Symp. Aspenäs garden (1968), p. 367.
- [3] J. D. Bjorken, *Phys. Rev.*, **D19** (1979), 335.
- [4] P. Q. Hung and J. J. Sakurai, *Nucl. Phys.*, **B143** (1978), 81.
- [5] O. W. Greenberg and Sucher, *Phys. Lett.*, **99B** (1981), 339,
H. Fritzsch and G. Mandelbaum, *Phys. Lett.*, **102B** (1981), 319,
Huang Tao and Xie Yicheng, *Commun in Theor. Phys.*, **1** (1982), 649, *ibid*, 753.
- [6] F. Dydak, Proc. Intern. conf. on High Energy Physics (Geneva, 1979) p. 25.
- [7] 这一等式也由 M. Kuroda and D. Schildknecht (*Phys. Lett.*, **121B**(1983), 173) 得到。他们在作了一些与本文不同的假定下讨论了 m_w' 值, 在他们的文章中有些假定是不自然的。
- [8] G. Arnison et al., *Physics Letters*, **129B** (1983), 273,
P. Bagnaia et al., *Physics Letters*, **129B** (1983), 130.

ON THE POSSIBILITY OF W, Z AS COMPOSITE PARTICLES

HUANG TAO XIE YI-CHENG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The relation between the masses of W^\pm and Z^0 in a composite model is discussed phenomenologically. It is shown that any deviation of experimental data from the predicted value of W-S model will be in favour of the composite model.

By using present experimental data, the calculation results show that if W' (the radial excited state of W) exists, then its mass will be greater than $(2-5)m_w$.