

希格斯 (Higgs) 粒子

吴 济 民

(中国科学院高能物理研究所)

在现有的弱电统一理论中,认为应当存在自旋为零的粒子(Higgs 粒子),并且通过“Higgs 机制”实现真空对称性自发破缺。这个理论的许多重要预言都得到了实验上广泛的证实,但始终没有找到在理论上起核心作用的 Higgs 粒子本身。粒子物理学面临一个十分重要的课题。本文从理论和实验两个方面就这个问题进行了评述,其中包括介绍 Higgs 机制和寻找 Higgs 粒子的现状及意义。

弱电统一理论的建立是本世纪内粒子物理学的重要进展之一。这个理论提出后,经历了广泛的实验检验,成为现代通用的研究弱作用、电磁作用的理论。这个理论基于杨振宁-米尔斯理论(Yang-Mills 理论)和动力学对称性自发破缺理论。在 Yang-Mills 理论中,规范场粒子的质量为零。1964年, Higgs 在理论中引入自旋为零的粒子(即 Higgs 粒子),通过所谓 Higgs 机制,使得规范场粒子成为有质量的粒子。Glashow, Weinberg, Salam 在 $SU(2)_L \times U(1)$ 规范理论中引入这一机制,构成了现在的弱电统一理论。

Higgs 机制在弱电统一理论中居于核心地位。人们努力在各种实验过程中寻找 Higgs 粒子。到目前为止,还没有发现这种粒子。目前计划中的高能加速器都把寻找 Higgs 粒子列为重要的研究项目。粒子物理学面临着—个基本性的问题。如果的确存在 Higgs 粒子,为什么现有的弱电统一理论不能预言它的质量大小?是否理论本身还存在某些重要的不足?如果客观上确实不存在 Higgs 粒子,为什么这样构成的弱电统一理论却能如此广泛地解释和预言了弱作用和电磁作用过程?理论中出现的 Higgs 粒子代表了一种什么效应?真正的对称性自发破缺机制应当是怎样的?这些都是十分重要的问题。

物理

一、Higgs 机制

在 Yang-Mills 理论中,只存在无质量的规范粒子。规范粒子传递相互作用。实验告诉我们,传递弱作用的规范粒子(弱中间玻色子)应当有较大质量,传递电磁作用的规范粒子(光子)应当是无质量的。这就要求存在能实现对称性自发破缺的理论,满足上述物理要求。

弱电统一理论的拉氏量具有定域 $SU(2)_L \times U(1)$ 规范不变性(一种 Yang-Mills 理论),它是

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\ & + \bar{L}\gamma^\mu \left(i\partial_\mu - gT \cdot A_\mu - g' \frac{1}{2} Y B_\mu \right) L \\ & + \bar{R}\gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g' \frac{1}{2} Y B_\mu \right) R \\ & + D_\mu \phi^\dagger D_\mu \phi - V(\phi) \\ & - (G_1 \bar{L}\phi R + G_2 \bar{L}\phi R + h.c.), \quad (1) \end{aligned}$$

其中

$$W_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ig[A_\mu, A_\nu],$$

$$A_\mu = \sum_a A_\mu^a T^a,$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu. \quad (2)$$

A_μ^a, B_μ 是分属于 $SU(2)$ 和 $U(1)$ 群的规范

场, 它们的场粒子(规范粒子)的质量都为零. 从上式可以得到电磁流与光子场、弱中性流与 Z^0 场、带电流与 W_{μ}^{\pm} 场的相互作用. 这些已被实验很好地检验了, 本文不再讨论. 我们集中讨论 Higgs 粒子及其有关的相互作用部分.

为了产生动力学对称性自发破缺, 理论中引入了标量二重态, 它有四个分量.

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 - i\phi_2 \\ \phi_3 - i\phi_4 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

由它构成位能项 $V(\phi) = \mu^2 \phi^+ \phi + \lambda (\phi^+ \phi)^2$. 当 $\lambda > 0$, $\mu^2 < 0$ 时, 能量最低值发生在

$$\phi^+ \phi = -\mu^2 / 2\lambda$$

处, 人们可按下面的公式选其中一个态为真空态, 即

$$\begin{aligned} \langle \phi_1 \rangle &= \sqrt{-\frac{\mu^2}{2\lambda}} = v, \\ \langle \phi_i \rangle &= 0 \quad (i = 2, 3, 4). \end{aligned} \quad (4)$$

现实的物理世界就是在这个真空态附近作展开而得. 可把这个展开写成

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

这里的 $H(x)$ 就是 Higgs 场, 把这样的 $\phi(x)$ 代入(1)式, 就能使弱中间玻色子 W_{μ}^{\pm} , Z^0 获得质量. 这样的真空态不具有拉氏量(1)式所具有的对称性, 即真空态对称性被自发破缺, 满足了物理要求. 各有关的结果如下:

(1) 由

$$\begin{aligned} D_{\mu} \phi^+ D_{\mu} \phi &\rightarrow \frac{g^2}{4} (v + H)^2 \left[(W_{\mu}^+)^+ W_{\mu}^+ \right. \\ &\left. + (W_{\mu}^-)^+ W_{\mu}^- + \frac{1}{2 \cos^2 \theta_w} Z_{\mu} Z_{\mu} \right], \end{aligned}$$

可导致

$$\begin{aligned} m_W^2 &= \frac{1}{4} g^2 v^2, \\ m_Z^2 &= \frac{1}{\cos^2 \theta_w} \frac{1}{4} g^2 v^2, \\ m_{\gamma} &= \frac{m_W}{\cos \theta_w}. \end{aligned} \quad (6)$$

还可给出 HWW 作用顶点行为

$$\frac{1}{2} g^2 v H (W_{\mu}^+)^+ W_{\mu}^+, \quad (7)$$

HZZ 作用顶点行为

$$\frac{1}{2 \cos^2 \theta_w} \frac{1}{2} g^2 v H Z_{\mu} Z_{\mu}, \quad (8)$$

HHWW 作用顶点行为

$$\frac{1}{4} g^2 H H (W_{\mu}^+)^+ W_{\mu}^+, \quad (9)$$

和 HHZZ 作用顶点行为

$$\frac{1}{2 \cos^2 \theta_w} \frac{1}{4} g^2 H H Z_{\mu} Z_{\mu}. \quad (10)$$

(2) 由汤川耦合项可导致 Higgs 粒子与费米子的耦合和费米子质量项 $\frac{m_i}{v} \bar{\psi} \psi + m_i \bar{\psi} \psi$.

(3) 由位能项(加上附带常数之后)

$$V(H) = \lambda \left(\frac{1}{2} H^2 + v H \right)^2,$$

可导致

$$m_H^2 = 2\lambda v^2 = -2\mu^2. \quad (11)$$

利用这里推得的带电流与 W_{μ}^{\pm} 的相互作用和利用等效的 V-A 理论可以讨论同一物理过程. 再比较两个计算结果后可得

$$\begin{aligned} \frac{G_F}{\sqrt{2}} &= \frac{g^2}{8m_W^2} = \frac{1}{2v^2}, \\ v &= (\sqrt{2} G_F)^{-1/2} = 246 \text{ GeV}. \end{aligned} \quad (12)$$

可以看到, 引入的标量场共有四个自由度, 经上述处理后, 其中三个自由度被吸收为三个有质量的中间玻色子 W_{μ}^{\pm} , Z_{μ} 的纵向分量, 还余下一个标量场自由度(中性 Higgs 粒子). 这就是 Higgs 机制. 不幸的是, 理论本身不可能预言 λ 值大小, 也就不能预言 Higgs 粒子的质量值.

在文献中, 人们常常提到存在 Higgs 粒子质量的下限问题. 其想法是, 考虑到单圈图给位势带来的修正, 可以给出

$$m_H^2 \geq \frac{G_F}{8\pi^2 \sqrt{2}} \left(6m_W^2 + 3m_Z^2 - 4 \sum_i C_i m_i^2 \right), \quad (13)$$

其中 m_i 为费米子质量, 颜色因子 $C_i = 1$ (轻子) 或 3 (夸克). 显然只有 t 夸克才会给上式

以重要的影响,故有

$$m_H^2 \geq (7.2\text{GeV})^2 \left[1 - \left(\frac{m_t}{80\text{GeV}} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

当 $m_t \rightarrow 80\text{GeV}$ 时,这个限制消失.但是,如果 $m_t > 80\text{GeV}$,则这个讨论就失去了意义.如果考虑到更高级圈图后,上述结论还要改变.所以,这个讨论不能被认为是定论,仍有许多要讨论的问题.

近两年来,对格点规范理论中的格点 Higgs 模型作数字模拟计算,得到了比值 $\frac{m_H}{m_W}$ 的上限

约为 8—10. 似乎表明 $m_H \lesssim 650-820\text{GeV}$. 但是,这些计算还没有考虑费米子的影响,点阵体系也不够大,是否达到了连续极限还有待讨论,所得结果远非定论.

二、Higgs 粒子的衰变和产生

为了寻找 Higgs 粒子,我们需要了解它的各种衰变模式和产生过程.

由于 Hff 等相互作用, Higgs 粒子可以直接衰变成基本费米子对 ff , $W_\mu^+ W_\mu^-$ 和 $Z_\mu^0 Z_\mu^0$ 对. 在运动学条件允许的范围内,各种衰变的部分宽度为

$$\left. \begin{aligned} \Gamma(H \rightarrow ff) &= \frac{G_F m_H m_f^2}{4\pi\sqrt{2}} C_f \left(1 - \frac{4m_f^2}{m_H^2} \right)^{3/2}, \\ \Gamma(H \rightarrow W_\mu^+ W_\mu^-) &= \frac{G_F m_H^3}{8\pi\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{4m_W^2}{m_H^2}} \\ &\quad \times \left(1 - 4\frac{m_W^2}{m_H^2} + 12\frac{m_W^4}{m_H^4} \right), \\ \Gamma(H \rightarrow Z_\mu^0 Z_\mu^0) &= \frac{G_F m_H^3}{16\pi\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{4m_Z^2}{m_H^2}} \\ &\quad \times \left(1 - 4\frac{m_Z^2}{m_H^2} + 12\frac{m_Z^4}{m_H^4} \right). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

如果 $m_H \gg m_W, m_Z$, 则有

$$\begin{aligned} \Gamma(H \rightarrow W^+ W^-) &= 328\text{GeV}[m_H(\text{TeV})]^3, \\ \Gamma(H \rightarrow Z^0 Z^0) &= 164\text{GeV}[m_H(\text{TeV})]^3, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\Gamma(H \rightarrow W^+ W^-)}{\Gamma(H \rightarrow Z^0 Z^0)} \simeq 2.$$

计算还表明,如果再考虑到W粒子的极化物理

问题, Higgs 粒子优先衰变成纵向极化的W粒子. 本底过程 $q\bar{q} \rightarrow W^+ W^-$ 主要衰变成横向W粒子,这个特点有助于区分出 Higgs 粒子.

通过圈图过程, Higgs 粒子可以衰变成 $\gamma\gamma$ 对或 gg 对,现讨论如下:

对 $H \rightarrow gg$ 衰变,圈图可以由夸克构成(图 1). 当 $m_H \ll m_W, m_Z$ 时,它的部分宽度是

$$\Gamma(H \rightarrow gg) = \frac{G_F m_H^3}{36\sqrt{2}\pi} \left(\frac{\alpha_s(m_H^2)}{\pi} \right)^2 |I|^2, \quad (17)$$

其中 $|I|^2$ 是一个复杂的函数,它与 m_t/m_H 有

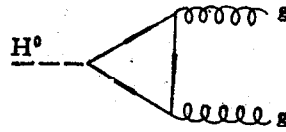


图 1

关,其峰值在 $m_t/m_H \simeq 0.4$ 处(图 2). 当

$$m_t/m_H > 0.7, \quad |\tau|^2 \simeq 1$$

时,如果只有 N 个重夸克,则可取 $|\tau|^2 \simeq N^2$.

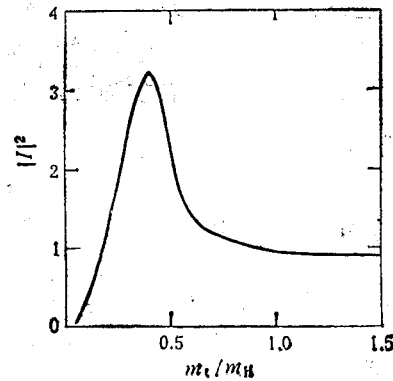


图 2

$H \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变与 $H \rightarrow gg$ 衰变十分相似,除去夸克外,还有带电轻子、无色带电标量粒子和 W^\pm 粒子都可以构成圈图,对过程作出贡献. 其部分宽度是

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{G_F m_H^3}{8\sqrt{2}\pi} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 |I|^2. \quad (18)$$

这里要把所有圈图贡献计算在内. 如果 m_H 远大于构成圈图各粒子的质量,则 $I \rightarrow -1/2$.

图 3 给出了 Higgs 粒子随 m_H 变化的分

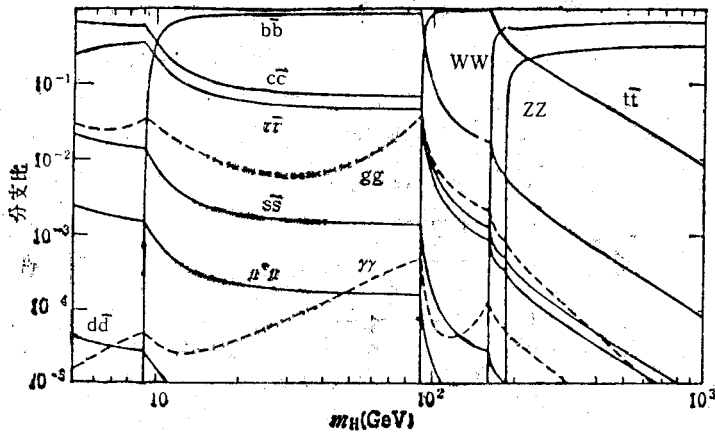


图 3

支比(假设 $m_t = 45\text{GeV}$)。可见,在不同的 m_H 值下,主要衰变道不同,这为寻找 Higgs 粒子提供指导。

当 $2m_c < m_H < 2m_b$ 时,主要衰变道为 $H^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$, $c\bar{c}$, 当 $2m_b < m_H < 2m_t$ 时,主要衰变道为 $H^0 \rightarrow b\bar{b}$, 当 $2m_w < m_H, 2m_z < m_H$ 时,主要衰变道为 $H^0 \rightarrow W^+W^-, Z^0Z^0$ 。在任何情况下, $H_0 \rightarrow \gamma\gamma, gg$ 都不是主要衰变道。

利用上述公式,还可以估算出 Higgs 粒子的衰变总宽度(取 $m_b = 5\text{GeV}, m_t = 45\text{GeV}$), 如表 1 所示。与费米子耦合的强度正比于费米子的质量 $g_{Hff} = \frac{m_f}{v}$ 。即使取 $m_t = 45\text{GeV}$,

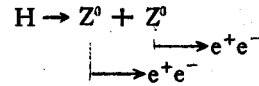
则有 $g_{Htt}^2/4\pi \approx \frac{1}{375}$, 也远小于 α 。中等质量的

Higgs 粒子主要衰变成 $b\bar{b}$ 或 $t\bar{t}$, 所以衰变宽度比较窄,再加上 QCD 过程产生的本底十分严重,故实验工作比较困难。在大质量 ($m_H >$

表 1

$m_H(\text{GeV})$	$\Gamma(H)$	主要衰变道
20	0.64MeV	$H \rightarrow b\bar{b}$
50	2.3MeV	同上
80	3.8MeV	同上
100	75.7MeV	$H \rightarrow t\bar{t}$
300	8.3GeV	$H \rightarrow W^+W^-, Z^0Z^0$
1000	470GeV	同上

$2m_z$) 情况下,可以利用下面列出的过程中 e^+e^- 的不变质量把 Z^0 玻色子辨认出来:



但是, $\Gamma(H)$ 随 m_H 而增大,若 $m_H = 1\text{TeV}$, 就不存在衰变产物分布上的结构了,测量无从谈起。

理论上预言有许多产生 Higgs 粒子的过程,其中有一些过程是有可能真正观察到 Higgs 粒子的过程。在对撞机中产生 Higgs 粒子的一个十

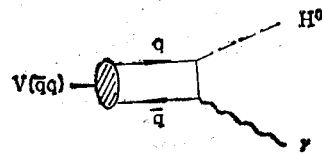


图 4

分吸引人的过程是重夸克偶素的辐射衰变(见图 4),即

$$v \rightarrow H^0\gamma.$$

在非相对论近似下有

$$\frac{\Gamma(v \rightarrow H\gamma)}{\Gamma(v \rightarrow e^+e^-)} \approx K \frac{G_F m_v^2}{4\sqrt{2}\pi\alpha} \left(1 - \frac{m_H^2}{m_v^2}\right), \quad (19)$$

其中 QCD 修正因子是

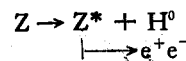
$$K = \frac{1 - \frac{4\alpha_s}{3\pi} a\left(\frac{m_H^2}{m_v^2}\right)}{1 - \frac{16\alpha_s}{3\pi}}$$

这里函数 $a\left(\frac{m_H^2}{m_v^2}\right)$ 是一个复杂的函数。

$$a \approx 10-20.$$

表 2 给出在 $J/\psi, \Upsilon$ 家族中的预言。可以看出,这是一个有可能观察到的过程。

由于 HZZ 耦合并不受其它因素的压制,有可能在 Z^0 衰变过程中找到 Higgs 粒子(见图 5),即



其中 Z^* 是虚态。利用这一过程,可以在 e^+e^- ,

表 2

共振	$B(\nu \rightarrow e^+e^-)$	$B(\nu \rightarrow \tau H^0) / (1 - \frac{m_H^2}{m_\nu^2})$
$\phi(3.096)$	7.4×10^{-2}	3.2×10^{-3}
$\phi(3.685)$	0.8×10^{-2}	4.9×10^{-3}
$\tau(9.460)$	2.9×10^{-2}	1.2×10^{-4}
$\tau(10.025)$	1.6×10^{-2}	0.7×10^{-4}
$\tau(10.355)$	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}

$p\bar{p}$ 对撞机 Z 共振区寻找 Higgs 粒子。这一过程的部分宽度是

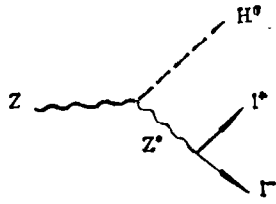


图 5

$$\frac{1}{\Gamma(Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu})} \frac{d\Gamma(Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu} H^0)}{dx} = \frac{\alpha \left(1 - x + \frac{x^2}{12} + \frac{2}{3} y^2\right) (x^2 - 4y^2)^{1/2}}{4\pi x_w (1 - x_w^2)^2 (x - y)^2} \quad (20)$$

式中 $x \equiv 2E_H/m_Z$, $x_w \equiv \sin^2\theta_w$, $y \equiv m_H/m_Z$. 在 e^+e^- 对撞机中, 在 Z 共振区产生 Z 粒子截面峰值约为 $4 \times 10^{-32} \text{cm}^2$. 在 LEP 加速器 ($\mathcal{L} = 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 上运行一个有效年 (10^7s) 可产生 4×10^6 个 Z 粒子. 若 $m_H \approx 30 \text{GeV}$, $B(Z \rightarrow \nu\bar{\nu} H^0) \sim 10^{-3}$, 就可能测得 Higgs 粒子.

另一个可能的过程是 $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$, 其截面为

$$\sigma = \frac{G_F^2 m_Z^4}{96\pi} [1 + (1 - 4\sin^2\theta_w)^2] \cdot \frac{8K}{\sqrt{s}} \left[\frac{K^2 + 3m_Z^2}{(\delta - m_Z^2)^2} \right], \quad (21)$$

其中 K 为 Z^0 的质心动量. 若 $m_H = 50 \text{GeV}$, $\sqrt{s} = 150 \text{GeV}$, 上一截面值即为 $2 \times 10^{-36} \text{cm}^2$, 若 $\mathcal{L} = 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 运行一个有效年约可得 200 个事例. 这在 LEP II 加速器上 ($100 \times 100 \text{GeV}$, e^+e^-) 可以实现.

物理

在极高能量的强子对撞机上也有可能产生和观察到 Higgs 粒子. 强子 A 中的 a 型部分子与强子 B 中的 b 型部分子通过硬过程发生反应, 其截面为

$$d\sigma = \int dx_1 dx_2 f_{a/A}(x_1) f_{b/B}(x_2) d\hat{\sigma}, \quad (22)$$

其中 a(b) 部分子携带 A(B) 强子中纵向动量份额为 $x_1(x_2)$, 子过程截面为 $d\hat{\sigma}$. 可以考虑有四种子过程产生 Higgs 粒子 (见图 6).

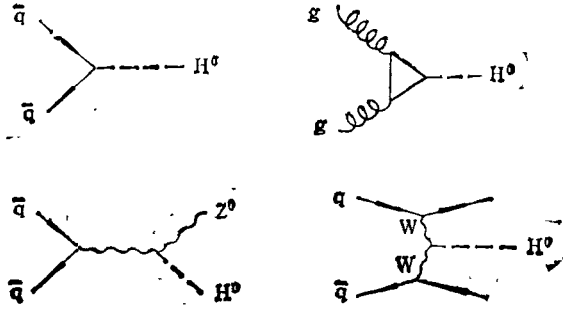


图 6

第一种过程的耦合强度正比于 m_t . 在质子中很少有重夸克 t, b 成分, 其贡献可不考虑. 其余过程都是高级过程. 第二个过程 (胶子融合) 的截面是

$$\sigma(p\bar{p} \rightarrow H^0 + \text{其它}) = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \left(\frac{\alpha_s}{3\pi} \right) \frac{\pi N^2}{32} \cdot \frac{\tau}{m_H} \int_0^1 \frac{dx}{x} g(x, m_H^2) g\left(\frac{\tau}{x}, m_H^2\right), \quad (23)$$

其中 $\tau = m_H^2/S$, N 为重味夸克种数. 图 7 给出数值积分结果 (取 $m_t = 50 \text{GeV}$). 随 \sqrt{s} 增大截面也增大, 但随 m_H 增大截面下降. 注意到 1pb 截面在 LHC 对撞机上 ($p\bar{p}$, $\sqrt{s} = 17 \text{TeV}$, $\mathcal{L} = 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 运行一有效年, 就有 8600 个事例. 由胶子融合产生的 Higgs 粒子有可能在这里被观察到.

由夸克辐射出来的 W^\pm, Z^0 粒子融合后也可以产生 Higgs 粒子. 有关讨论指出, 这一过程截面与胶子融合过程截面可相比拟, 并在 SSC 和 LHC 上都可以被观察到.

但是, 即使有几千个 Higgs 粒子, 区分出它来还不容易, 因为其衰变产物没有十分特有的信号.

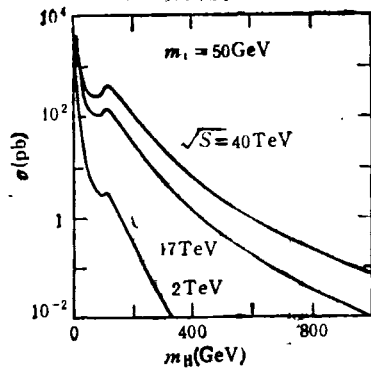


图 7

三、寻找 Higgs 粒子的现状

目前已在下列几个方面寻找，其寻找的质量范围从几个 MeV 到几个 GeV，结果都是否定的。

(1) 测量 μ 原子发射的 X 射线。如果存在 Higgs 粒子，那么 μ 子会受到新的位势的影响，使能级、能级差发生变化，并通过发出的 X 射线测得能级差。将理论预言与实验结果进行比较，发现如果存在 Higgs 粒子，其质量应大于 3—6 MeV。

(2) 寻找下一个核衰变过程

$^{16}\text{O}^*(6.05\text{MeV}, 0^+) \rightarrow ^{16}\text{O}(\text{基态}, 0^+) + \text{H}^0$
比较理论预言与实验结果，发现前后几个实验分别排除了 Higgs 粒子的质量在下列范围内的可能性： $2.8\text{MeV} < m_{\text{H}} < 11.5\text{MeV}$ ； $m_{\text{H}} > 5.5\text{MeV}$ 。

(3) 如果存在 Higgs 粒子作为相互作用的传递者存在，对于低能中子-核散射过程是很敏感的。散射振幅是 $f = f_{\text{N}} + f_{\text{Higgs}}$ 。假设 Higgs 粒子提供汤川位势 $V(r) \sim AG_{\text{F}} \frac{e^{-m_{\text{H}}r}}{r}$ ，

实验结果要求 $m_{\text{H}} > 6\text{MeV}$ 。

(4) 不少人从理论上讨论了从赝标粒子衰变道中寻找 Higgs 粒子的可能性。特别是利用 $b \rightarrow SH$ 。CLEO 组分析了 18 万个 B 介子衰变事例：

$$B \rightarrow K + H \rightarrow \pi^+ \pi^-, \mu^+ \mu^-, K\bar{K}, \dots$$

从不变质量分布中没有发现存在 Higgs 粒子

的迹象。排除了在下列范围内存在 Higgs 粒子的可能性： $0.3 < m_{\text{H}} < 3.0\text{GeV}$ 和 $3.2 < m_{\text{H}} < 3.6\text{GeV}$ 。

(5) 利用(19)式，CUSB 组分析 $\Upsilon(9.46)$ 和 $\Upsilon''(10.36)$ 的衰变数据，认为可以排除 $m_{\text{H}} < 3.9\text{GeV}$ 的可能性。但是，理论给出的 QCD 一级修正过大，使人怀疑在这里微扰论是否可用。所以，理论上还要解决 QCD 修正和相对论修正问题。

(6) 在 J/ψ 辐射衰变中产生的 $\xi(2.2)$ 曾被人们考虑过是否为 Higgs 粒子，

$$J/\psi \rightarrow \gamma \xi, \quad \xi \rightarrow K_s K_s + K^+ K^-$$

$$\Gamma(\xi) = 18 \pm 25\text{MeV}.$$

但是， $\Gamma(\xi)$ 实验值比理论预言(19)式大一个量级。在 KP 散射过程中也观察到 $\xi(2.2)$ 态衰变成 $K_s K_s, K^+ K^-$ 。其截面也比假设产生 Higgs 粒子大许多量级，所以 $\xi(2.2)$ 不象是一个 Higgs 粒子

(7) $t\bar{t}$ 夸克对组成的 3S_1 束缚态 Θ 可能衰变成 Higgs 粒子，即 $\Theta \rightarrow H\gamma$ (若 $m_{\Theta} > m_{\text{H}^0}$)。不幸，日本的 Tristan ($\sqrt{S} = 60\text{GeV}$) 没有找到 Θ 存在的迹象。那就希望在 SLC ($50 \times 50\text{GeV}$) 或 LEP 中寻找。这一过程的部分宽度和分支比约分别为

$$\Gamma_{\Theta} \approx 100\text{keV} \left(\frac{m_{\Theta}}{100\text{GeV}} \right)^{7.5},$$

$$B(\Theta \rightarrow H\gamma) \approx 0.05 - 0.10 \left(\frac{m_{\Theta}}{100\text{GeV}} \right)^{-7.5}.$$

估计在 LEP 上，若 $m_{\Theta} = 100\text{GeV}$ ，运行一有效年可得 2×10^4 个 Θ 事例，其中 $\Theta \rightarrow H\gamma$ 约为 10^3 个事例。

综上所述，寻找 Higgs 粒子并测量它的各种耦合性质是粒子物理学面临的一个重大课题。但是，实验上的困难很大。理论不能预言它的质量大小，所以就要在 $m_{\text{H}} < \infty$ 整个范围内寻找它。在中等以下的质量范围内，预计它的宽度较窄。但是，当 $m_{\text{H}} > 2m_{\text{Z}}$ ，随着 m_{H} 的增大，它又成为一个很宽的共振。QCD 过程的本底又很强，又增加了测量难度。到目前为止，在小于 6GeV 范围内没有发现存在这种粒子。

四、自然界果真存在 Higgs 粒子吗?

是否可能自然界根本就不存在 Higgs 粒子呢? 是否可能在弱电统一理论中出现的 Higgs 粒子只不过是某一种未知效应的等效结果。这种可能性是存在的, 不少人持这种观点。

在弱电统一理论中, 利用 Higgs 机制实现了真空对称性的自发破缺。关于弱带电流、中性流的理论预言也通过了各种实验检验。但是, 理论中与 Higgs 粒子有关的部分始终没有得到检验。这里同时还存在二十几个自由参数, 包括费米子的质量、混合角、夸克代的数目、 θ_w 值等。这不是基本性理论的特征, 而是唯象性理论的特征, 因而人们怀疑通过 Higgs 机制来实现真空对称性自发破缺是否正确、有效。

另一方面, 研究 ϕ^4 理论的重整化问题时发现, 在四维情况下, 接近于证明了这个理论中的重整化自耦合常数 λ_R 为零 (即平庸性问题)。一般认为, 这里包含非微扰效应。所以, 这些讨论都在格点规范理论中进行。如果 $\lambda_R = 0$, 这就是自由粒子理论, 不可能由此得到 $\langle \phi \rangle \approx 0$ 。整个 Higgs 机制就无法实现。 ϕ^4 理论作用量是弱电统一理论的作用量的一部分。如果上述讨论也能扩大到弱电统一理论中来, 并且证实了存在平庸性, 那么 Higgs 机制就要被否定, 更不用谈及 Higgs 粒子了。由于这个原因, 出现了一些新的理论模型, 其中主要有五彩夸克模型和超对称模型。

在五彩 (technicolor) 夸克模型中, 不存在基本的 Higgs 粒子, 但认为在现有的夸克之外, 还应当存在另一种自旋为 1/2 的“五彩夸克”和“五彩反夸克”, 在他们之间存在新的很强的相互作用, 并认为这也是一种规范相互作用, 其规范群为 G_{TC} 。 G_{TC} 是相似于 QCD 的渐近自由的不破缺的规范群, 通常选 G_{TC} 为 $SU(N)$ 。五彩夸克填充它的 N 维基础表示。假设“五彩颜色”也是禁闭的, 则在大于 QCD 能量尺度的能量下, 这种相互作用就增强。所有观察到的物理态都是“五彩颜色”的单态。Higgs 粒子是五彩夸克-五彩反夸克组成的标量束缚

态。这是一个有吸引力的新观念。

为了使夸克、轻子获得质量, 要把五彩夸克和普通夸克放在“推广的五彩”规范群的另一多重态中考虑。但是, 这将导致如下的理论预言, 即存在较大的“味道”改变的中性流, 从而超出了现有的实验结果的上限。虽然随后已提出不少模型理论企图改变这个理论预言, 但都没有达到令人满意的地步。在实验上要把五彩束缚态的衰变产物与 QCD 本底区分开来也有困难。总之, 这个模型理论没有达到自治的程度, 更没有得到实验的检验。

超对称理论是基于费米子与玻色子之间的对称建立起来的理论。它认为, 每种费米子 (玻色子) 都存在它的玻色子 (费米子) “伙伴”。由于费米统计, 费米子圈相对于玻色子圈的贡献要多一个因子 (-1), 因而就可以在圈图计算中相互抵消, 使得在计算 Higgs 粒子质量时, 得到稳定的结果, 克服 Higgs 机制中理论上的一个困难。在最小的超对称理论模型中含有两个独立的 Higgs 二重态。在真空对称性自发破缺后, 还存在两个带电的 (H^\pm) 和三个中性的 Higgs 粒子, 以及各自的“伙伴”——自旋为 1/2 的 Higgsino 粒子。超对称理论引入粒子的数量加倍地多, 因而理论结构复杂, 并且也始终没有得到实验的检验。

围绕 Higgs 粒子问题, 无论在实验上和理论上都有许多十分重要的工作要做。寻找 Higgs 粒子无疑是粒子物理实验方面非常重要的使命。为了建立有关的自治的理论体系, 十分可能导致发现新的带有基本性质的原则。

- [1] S. Coleman and E. Weinberg, *Phys. Rev. D*, **7**(1973), 1883.
- [2] S. L. Glashow, *Nucl. Phys.*, **22**(1961), 579.
- [3] J. Goldstone, *Nuovo Cimento*, **19**(1961), 154.
- [4] P. W. Higgs, *Phys. Rev. Lett.*, **12**(1964), 132.
- [5] A. D. Linde, *JETP Lett.*, **19**(1976), 296; *Phys. Lett.*, **63B**(1976), 435.
- [6] A. Salam, *Elementary Particle Theory*, ed. N. Svartholm, Almqvist and Wiksell, Stockholm, (1968).
- [7] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **19**(1967), 1264; *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 294.
- [8] C. N. Yang and R. L. Mills, *Phys. Rev.*, **96**(1954), 191.