

第五章 弱相互作用和电弱统一模型

第一节 弱相互作用的研究历史

一、弱作用的编年史

1. 从 β 衰变到费米弱作用理论

1914年: 查德威克 (J. Chadwick) 第一次发现 β 射线的能谱是连续的。有两种可能:

- a) β 射线是原子核的两体衰变, 则可能在 β 衰变中能量不守恒;
- b) 衰变可能是一个三体衰变过程, 没有被观测到的粒子带走一部分动量, 所以电子的能谱才是连续的。

1930年: W. Pauli 首次提出后面一种可能: 存在一种粒子——中微子——与物质作用很弱, 质量 (几乎) 为零, 自旋为 $1/2$ 。

1934年: Fermi 四费米子(流流)弱相互作用理论: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 过程可以用如下 (矢量流—矢量流相互作用) 等效拉氏量来描写

$$\mathcal{L}_{eff} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_n)(\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_{\nu_e}) \quad G_F \approx \frac{1.03 \times 10^{-5}}{M_p^2}$$

对于原子核 β 衰变中出现的电子连续能谱问题，Pauli 提出可能存在中微子来解释这种现象（因为根据能动量守恒，两体衰变中末态粒子的动量是确定的。所以如果能动量守恒，原子核 β 衰变中除了放出 β 射线之外，还应该存在没有被观测到的新粒子）：

$$X \rightarrow X' + e^+(e^-) + \nu_e(\bar{\nu}_e)$$

Pauli 正式发表他的中微子假说之后一年，费米为了解释 β 衰变现象，提出假设：原子核的 β 衰变实际上是核子的衰变过程，

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \\ p^* &\rightarrow n + e^+ + \nu_e. \end{aligned}$$

上面第二式中的质子是束缚在原子核中的非自由质子；而且受量子电动力学流场相互作用的启示

$$H_{em'} = e \int dx^3 \bar{p}(x) \gamma_\mu p(x) A^\mu(x),$$

费米提出描述 β 衰变的有效哈密顿量

$$H_{\beta'} = G_F \int dx^3 \bar{p}(x) \gamma_\mu n(x) (\bar{\psi}_e(x) \gamma^\mu \psi_{\nu_e}(x)),$$

其中，他用轻子矢量流代替电磁相互作用中的矢量场。

这个理论模型在解释一系列 β 衰变如

$$\begin{aligned} O^{14} &\rightarrow N^{14} + e^+ + \nu_e, \\ C^{10} &\rightarrow B^{10} + e^+ + \nu_e, \end{aligned}$$

都相当成功。这类 β 衰变的一个共同特征是初末态原子核的自旋角动量为0，称为费米型 β 衰变。由这类衰变定出的费米常数为

$$G_F \approx \frac{1.03 \times 10^{-5}}{M_p^2}$$

但还有一类 β 衰变，如 $He^6 \rightarrow Li^6 + e^- + \bar{\nu}_e$ ，初态原子核的自旋为0，但末态原子核的自旋为1，这类衰变称为Gamov-Teller型衰变。要描述这类衰变，仅引入矢量流相互作用是不够的，还必须引入其它形式的流，如轴矢流等。

1936年: Gamov和Teller提出扩充费米理论, 用以描写更多的弱相互作用过程

$$\mathcal{L}_{eff} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_i c_i (\bar{\psi}_p \Gamma_i \psi_n) (\bar{\psi}_e \Gamma^i \psi_{\nu_e}), \quad \Gamma_i = 1, \gamma_5, \gamma_\mu, \gamma_\mu \gamma_5, \sigma_{\mu\nu}$$

Γ_i 分别对应标量(S)、赝标量(P)、矢量(V)、轴矢量(A) 和张量流(T)。

1937年: Majorana 提出 (现在称为) Majorana 中微子理论: 中微子和反中微子是同一种粒子。

1943年: Pentecorro 提出费米理论的普适性想法: 衰变和俘获来自同一起源。

1949年: Weeler和Tiomno, Lee, Rosenbluth 和 Yang提出弱相互作用的普适性, 不同的弱作用过程 (β 衰变, μ 衰变, μ 俘获) 有相同的性质, 有共同的耦合常数——费米耦合常数。

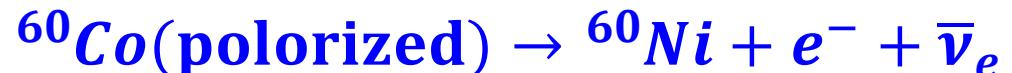
2. 弱相互作用中的宇称不守恒和和普适的 V-A 理论

1956年以前，人们认识到的弱衰变有原子核 β 衰变、 μ 衰变和 π 的弱衰变。在历史上， β 衰变的试验数据（错误的）似乎支持 ST 组合的四费米相互作用，而 μ 的衰变则支持 VA 组合， π 的弱衰变则似乎排除 V, S, T。也就是说，似乎不可能找到一种普适的弱作用流结构来统一描述所有的弱相互作用现象。1956年，李政道和杨振宁提出弱作用宇称不守恒猜想以及后来的实验证实则对弱作用流结构的最后确定起了关键的推动作用。

1956年：李政道和杨振宁提出弱相互作用过程中宇称不守恒假设。50年代初期起，Alvarez 和 Goldhaber, Birge 等人发现 $\theta - \tau$ 疑难： θ 粒子和 τ 粒子质量、寿命相同但衰变模式不同：

$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-, \quad \tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

李—杨认为它们可能属于同一种粒子，由于弱作用宇称不守恒才有不同宇称的衰变末态出现。他们还给出了具体的试验检验途径。



1957年：吴健雄等通过测量 ^{60}Co 的 β 衰变中电子的角分布，发现衰变几率依赖于赝标量 $\langle \sigma_{\text{nucleus}} \cdot p_e \rangle \neq 0$ 。随后的实验都证实了弱作用宇称不守恒。这表明，在弱作用的有效拉氏量中要引入赝标量：

$$\mathcal{L}_{eff} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_i C_i (\bar{\psi}_p \Gamma_i \psi_n) (\bar{\psi}_e \Gamma^i (1 \pm \gamma_5) \psi_{\nu_e}), \quad (\{\gamma_0, \gamma_5\} = 0)$$

1957年：Salam、李政道和杨振宁、Landau 提出二分量中微子理论——中微子是右手的或者左手的，即中微子具有确定的 helicity。因为实验上已经证明了弱作用中电子是左手的，轻子的弱流就应该写成

$$J_{lepton}^i = \bar{\psi}_e \frac{1}{2} (1 + \gamma_5) \Gamma^i (1 \pm \gamma_5) \psi_{\nu_e}$$

因此测量中微子的螺旋度 (helicity) 对确定轻子弱流的结构非常关键。综合弱作用实验结果，发现弱流只能有矢量 (V) 和轴矢量 (A) 结构，所以就确定了弱相互作用的 V—A 理论——弱相互作用是 (V-A) 流的乘积。

1957年：Schwinger、李政道和杨振宁提出弱作用中的中间玻色子观点。若中间玻色子带电，并且弱作用是短程相互作用，中间玻色子质量应当比较大，弱流相互作用可以写成流场耦合作用，

$$\mathcal{L}_{eff} = g_w (J^{-\mu} W_\mu^+ + J^{+\mu} W_\mu^-), \quad g_w^2 = M_W^2 G_F / \sqrt{2}$$

1958年：Feynman 和 Gell-Mann、Marshak 和 Sudarshan、Sakurai 提出普适的V-A弱相互作用理论，

$$J_{lepton}^{+\mu} = \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e},$$

$$\mathcal{L}_\beta = -\frac{G_\beta}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_p \gamma^\mu \left(1 - \frac{g_A}{g_V} \gamma_5 \right) \psi_n \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e}$$

其中，

$$G_\beta = (1.14730 \pm 0.00064) \times 10^{-5} GeV^{-2},$$

$$g_A/g_V = 1.255 \pm 0.006$$

1958年: Goldhaber, Grodzins 和 Sunyar 测得中微子的螺旋度为-1, 更证实了弱相互作用的V-A型结构。

1959年: Reines 和 Cowan 利用反应堆产生的大量反电子中微子, 通过反应



证实了反电子中微子的存在。

1961年: Glashow 提出 $SU(2) \otimes U(1)$ 群的可能性, 并引入中性中间玻色子 Z。

1962年: L.M. Lederman、J. Steinberger 和 M. Schwartz 等人从实验上证实了存在两类中微子 ν_e 和 ν_μ , 它是弱衰变中产生的中微子, μ 衰变 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 用如下四费米子相互作用描述,

$$\mathcal{L}_\mu = -\frac{G_\mu}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{\nu_\mu} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_\mu \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e},$$

$$G_\mu = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

通过和大量实验比较可得到, $G_\beta/G_\mu \approx 0.98$, 尽管两个耦合常数接近, 但差别仍然是明显的。

3. Cabibbo 理论和奇异数改变弱流

二十世纪五六十年代，随粒子加速器技术的发展，大量的强子态从试验室中产生，许多粒子都有弱衰变：

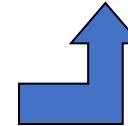
a) 强子半轻子、轻子衰变（末态粒子有轻子出现），除 β 衰变外，



b) 强子的非轻子若衰变过程（奇异粒子强子弱衰变 $\Delta S = 1$ ）

这些过程都伴随着味道改变，其中奇异粒子的弱衰变还主要表现在奇异数改变为1。这些衰变（包括 β 衰变和 μ 衰变）的共同特点是：

1) 粒子寿命长；2) 作用力程短；3) 衰变中都伴有粒子类型的改变。这说明弱作用是一种新型的相互作用。如果再考虑 β 衰变和 μ 衰变的相似性，那么一个自然的问题是，弱作用能否用一个统一的理论来描述呢？Cabibbo 理论回答了这个问题。



1963年：N. Cabibbo 将强子 $SU(3)$ 对称性的观念引入弱相互作用中的强子流：**强子流应该遵从强子的 $SU(3)$ 变换**，与强子八重态和十重态对应的也应该有奇异数改变的强子弱流，

$$J_\mu^- = \cos \theta_c J_\mu^{-, \Delta S=0} + \sin \theta_c J_\mu^{-, \Delta S=1}$$

Cabibbo 还进一步假设，各类弱相互作用具有统一的弱耦合常数，这一弱耦合常数应该和纯轻子弱相互作用的耦合常数 G_μ 一致，则强子半轻子衰变的等效流流相互作用拉氏量为，

$$L_\mu = -\frac{G_\mu}{\sqrt{2}} (\cos \theta_c J_\mu^{-, \Delta S=0} + \sin \theta_c J_\mu^{-, \Delta S=1}) \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e}$$

所以，

$$\cos \theta_c = G_\beta / G_\mu = 0.977, \quad \sin \theta_c = 0.214$$

Cabibbo 理论很好地解释了弱相互作用的普适性问题。根据这一理论，弱相互作用的耦合常数在各种弱相互作用过程中都是相同的。因此可以把弱耦合常数统一写作 $G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ ，并称作 **费米常数**。

4. 描述弱相互作用的规范理论的建立

1964年：Higgs 提出实现真空对称性自发破缺的一种机制——**Higgs 机制**。

1967, 68年：Weinberg 和 Salam 利用 Higgs 机制建立了弱电统一理论。

1970年：Glashow, Iliopoulos 和 Maiani 引入轻子—夸克对称性——与奇异夸克对应，还应该存在粲夸克，从而避免了味道改变中性流所造成的困难，是谓**GIM 机制**。

1971年：‘t Hooft 严格证明了具有自发对称性破缺的无质量和有质量的 Yang-Mills 理论的可重整性。

1973年：Kubayashi 和 Maskawa 提出了三代夸克之间的混合矩阵——CKM矩阵。这在标准模型三代结构下有可能描写CP破坏现象。

1973 年： CERN 第一次实验上证实了弱中性流的存在：

$$\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-,$$

$$\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + X,$$

这证实了标准模型的预言，并测得了 $\sin^2 \theta_W$ 的范围。

1974年：丁肇中 和 Richter 发现了 J/ψ 粒子，随后证明它就是粲夸克偶素，从而从实验上证实了 GIM 机制 预言的粲夸克的物理存在。

1975年：M. Perl 发现了 τ 轻子。

1977年：费米实验室发现了 Υ 粒子——b 夸克的发现

1983年：CERN 在质子—反质子对撞实验中发现了中间玻色子 W^\pm, Z^0 。

1987年：ARGUS 组第一次发现了 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合现象。

1992年：北京正负电子对撞机(BEPC/BES) 试验精确测量了 τ 轻子的质量。

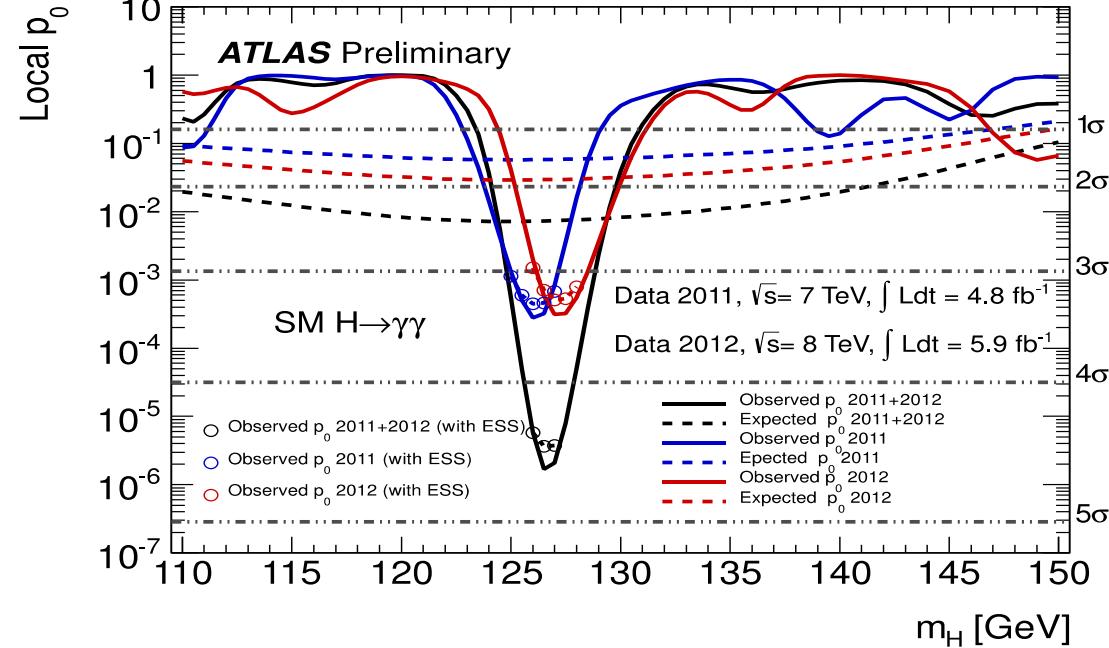
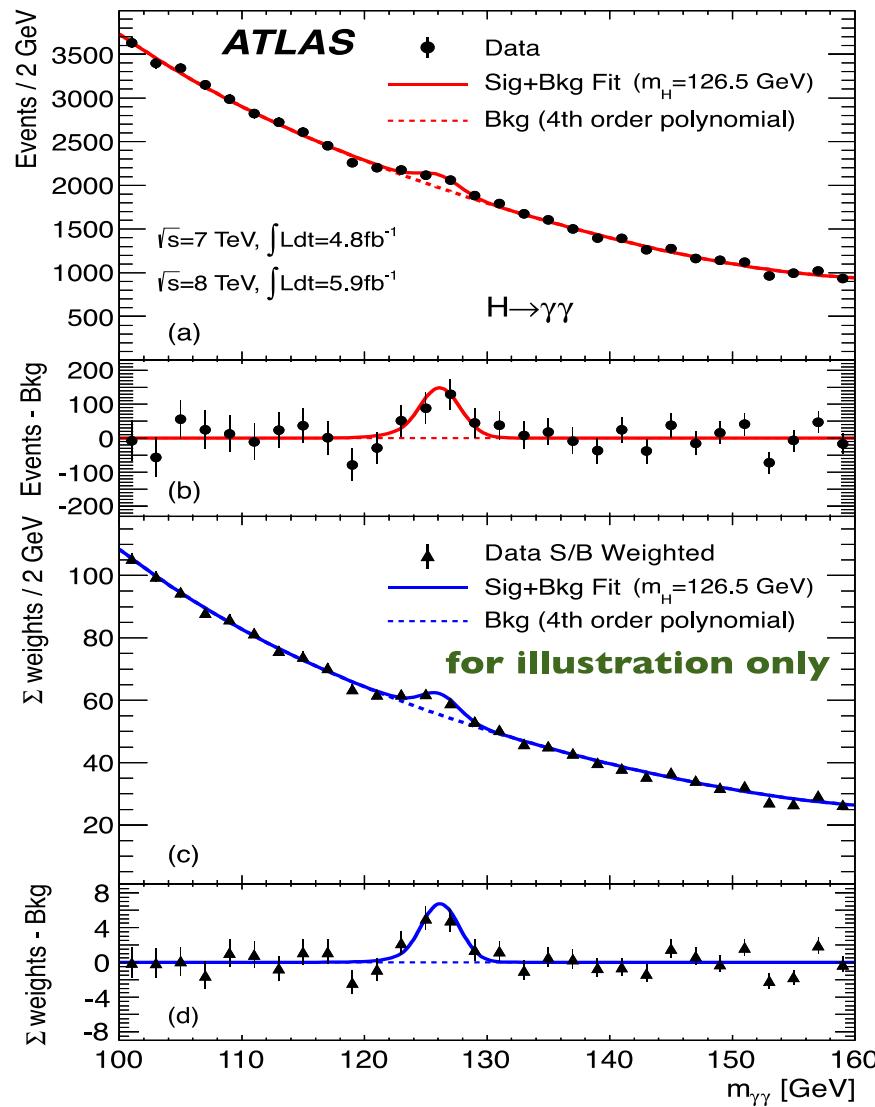
1995年：费米实验室的 CDF 组和 D0 组发现了顶夸克。

2012年：欧洲核子中心(CERN)的 LHC 上发现 $M_H = 125 \text{ GeV}$ 的标量粒子，
它的性质和标准模型预言的 Higgs 粒子相符。



2012年7月4日CERN大会议室

H → γγ : Results



$m_H (\text{min local } p_0) = 126.5 \text{ GeV}$

Min. local $p_0 = 2 \times 10^{-6}$

Local significance: 4.5 σ (observed)
2.4 σ (expected)

Properties of the New Particle

It's a boson!

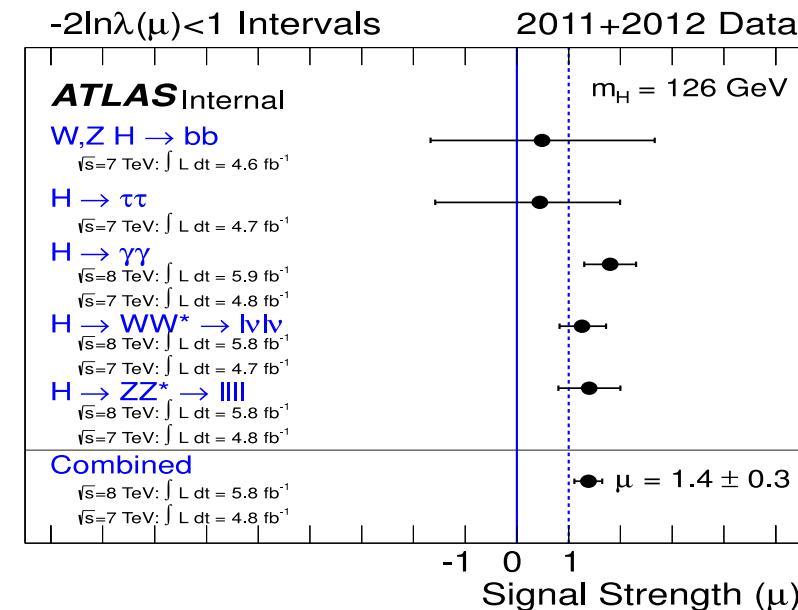
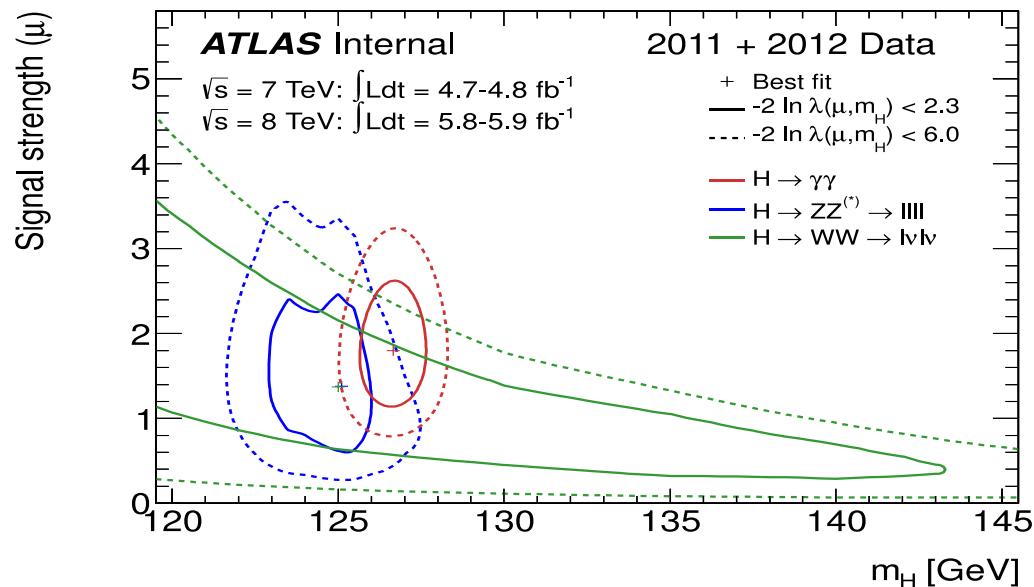
Because we observed the decay into two bosons

Spin = 1 excluded

Because $S=1$ cannot decay into 2 photons (Yang's theorem)

Mass: $m = 126 \pm 0.4 \text{ (sys)} \pm 0.4 \text{ (stat)} \text{ GeV}$

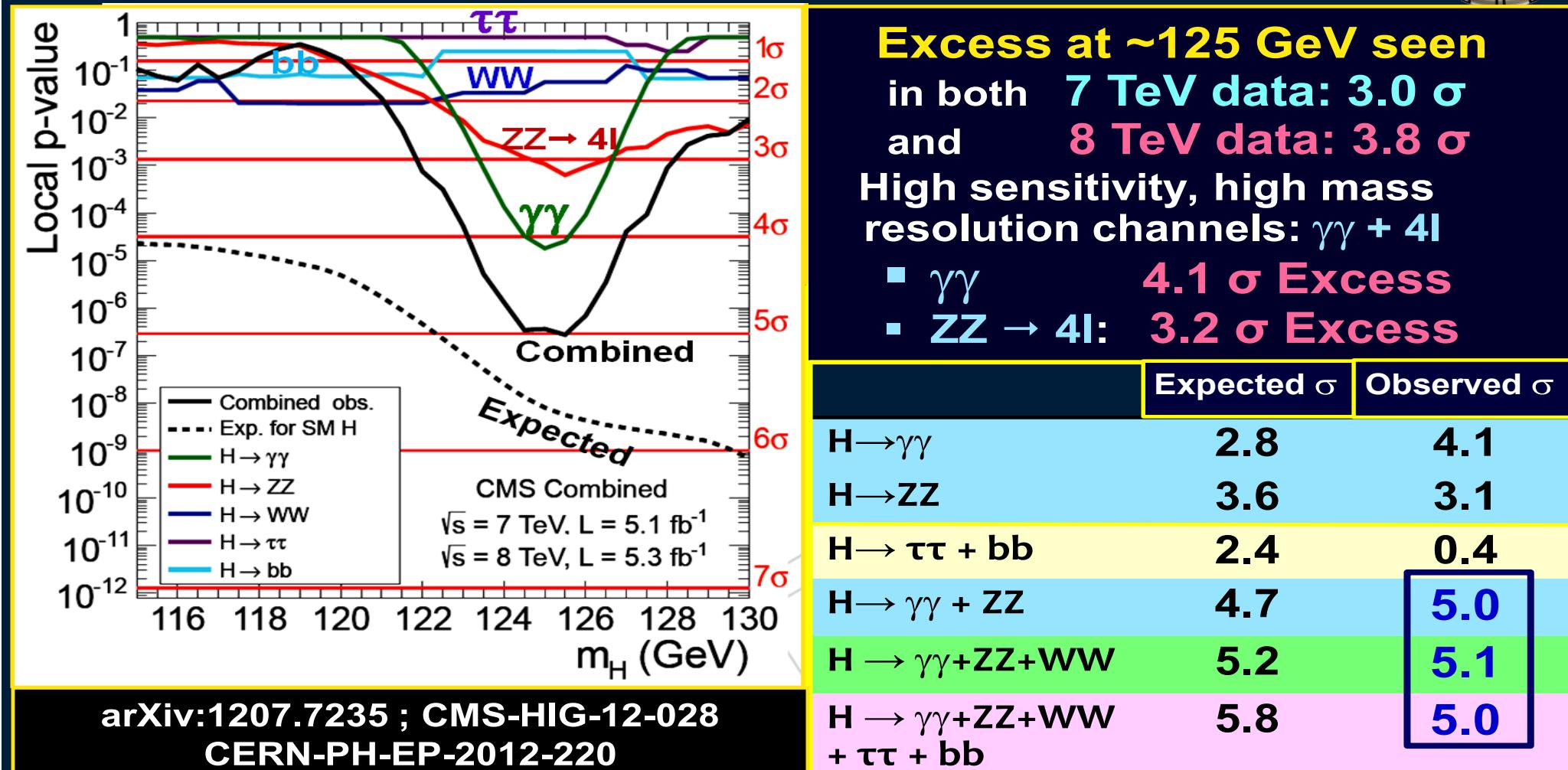
Signal strength: $\mu = 1.4 \pm 0.3$ (SM: $\mu=1$)



Compatible with the SM Higgs Boson!



Observation of a New Boson Near 125 GeV p-values and Significance by Channel



第二节 电弱统一模型出现前的弱作用理论 ——普适的V-A理论

从费米提出描述 β 衰变的四费米子有效理论以后，经过几十年的试验和理论努力，关于低能的弱相互作用理论逐步完善：低能弱相互作用过程可以用费米子流流相互作用描述，这种相互作用的流结构也确定为只有矢量流和轴矢流油贡献，具体地说就是弱相互作用流的结构为矢量流减去轴矢流，即V-A形式。

一、纯轻子弱相互作用

1. 轻子弱流：目前实验上已经发现三代轻子

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

每一代轻子可由构成两种流——带电流和中性流

$$J_{i,\mu}^+ = \bar{l}_i \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \nu_i,$$

$$J_{i,\mu}^0 = \bar{l}_i (a \gamma_\mu + b \gamma_\mu \gamma_5) l_i + c \bar{\nu}_i \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \nu_i$$

对于中性流， a, b, c 的特定取值对应电磁流和中性弱流(见后)。

2. 带电弱流相互作用

描述轻子弱衰变的低能有效理论可以用（左手）带电流相互作用来描述，

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{eff}(x) &= \sum_{ij} -\frac{G_{ij}}{\sqrt{2}} J_{i,\mu}^-(x) J_j^{+,\mu}(x) + \text{h. c.} \\ &= \sum_{ij} -\frac{G_{ij}}{\sqrt{2}} \bar{\nu}_j(x) \gamma_\mu (\mathbf{1} - \gamma_5) l_i(x) \bar{l}_i(x) \gamma^\mu (\mathbf{1} - \gamma_5) \nu_i(x) + \text{h. c.}\end{aligned}$$

我们现在姑且用带下标的耦合常数来表示轻子不同代之间的耦合。

a) μ 的弱衰变： μ 几乎 100% 通过如下过程衰变：

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$$

如果忽略电子的质量，可以得到 μ 的衰变宽度

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \Gamma_\mu = \frac{G_\mu^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

根据实验测得的muon的寿命 $\tau_\mu = 2.197 \times 10^{-6} \text{ s}$

可以推出这个过程的耦合常数: $G_\mu = 1.164 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

b) τ 轻子的纯轻子弱衰变

1975年发现的 τ 轻子 的质量和寿命为

$$m_\tau = 1.777 \text{ GeV}, \quad \tau_\tau = 2.906 \times 10^{-15} \text{ s}$$

其纯轻子衰变模式和分支比分别为

$$\text{Br}(\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau) = 17.36\%,$$

$$\text{Br}(\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau) = 17.84\%$$

如果忽略电子和 μ 的质量 (相对于 τ 的质量很小), 有效理论计算出,

$$\Gamma_{\tau \rightarrow e} = \frac{G_{\tau \rightarrow e}^2 m_\tau^5}{192\pi^3} = \Gamma_\tau \text{Br}(\tau \rightarrow e) = \frac{\text{Br}(\tau \rightarrow e)}{\tau_\tau},$$

$$\Gamma_{\tau \rightarrow \mu} = \frac{G_{\tau \rightarrow \mu}^2 m_\tau^5}{192\pi^3} = \Gamma_\tau \text{Br}(\tau \rightarrow \mu) = \frac{\text{Br}(\tau \rightarrow \mu)}{\tau_\tau}$$

由此可以反推出

$$G_{\tau \rightarrow \mu} = 1.150 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2},$$

$$G_{\tau \rightarrow e} = 1.165 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}.$$

比较 $G_\mu = 1.164 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ ，可以看出三者符合得相当好。

如果考虑轻子质量和辐射修正，轻子纯轻子衰变的夸克可以更精确地表为，

$$\Gamma_{L \rightarrow l} = \frac{G_{L \rightarrow l}^2 m_L^5}{192\pi^3} \left(1 - 8 \frac{m_l^2}{m_L^2} \right) \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2 \right) \right)$$

北京正负电子对撞机对 τ 轻子质量的精确测量（1992）对轻子弱作用的普适性验证有很大贡献。考虑各种修正后，费米常数可以定为

$$G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

二、半轻子弱作用过程和强子弱流

1. 普适 V-A 理论和夸克层次上的 Cabibbo 理论

在有强子参加的过程中，因为强子之间存在强相互作用，而弱作用是在远小于强子尺度的范围内发生的，所以这时的弱作用实测结果会受到强作用的影响。原子核的beta衰变就是一个例子。费米将原子核的 β 衰变归结为下面的过程

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \\ p^* &\rightarrow n + e^+ + \nu_e. \end{aligned}$$

并用费米子流流相互作用来描述这些过程。随后几十年的理论和实验发展确定了弱作用的普适V-A 理论，轻子带电流可以写成（根据中微子二分量理论）

$$J_e^{+, \mu} = \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e},$$

1958年，Feynman 和 Gell-Mann、Marshak 和 Sudarshan、Sakurai 提出 β 衰变的普适的V-A弱相互作用理论

$$\mathcal{L}_\beta = -\frac{G_\beta}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_p \gamma^\mu \left(1 - \frac{g_A}{g_V} \gamma_5 \right) \psi_n \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e}$$

根据大量的实验结果，可以得出

$$G_\beta = (1.14730 \pm 0.00064) \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2},$$
$$g_A/g_V = 1.255 \pm 0.006$$

可以看出， β 衰变的耦合常数和纯轻子弱过程的耦合常数很接近，但由于实验的精度很高，它们之间仍有显著的差别：

$$G_\beta/G_\mu \approx 0.98$$

另外，在半轻子过程中，除了上述的奇异数不改变的过程，还有奇异数改变的过程，如



如果和前述 β 衰变类似，我们也引入相应的四费米相互作用来描述这个过程。假设V-A流结构仍然成立，并忽略强相互作用影响，有效拉氏量可以写成，

$$\mathcal{L}_\beta = -\frac{G'}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_p \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_\Lambda \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e} + h.c. = -\frac{G'}{\sqrt{2}} (J_h^{\bar{\psi},\mu} J_{e,\mu}^+ + h.c.)$$

- 通过对该过程以及其他奇异数改变的过程理论计算和实验比较，发现 $\Delta S = 1$ 的弱过程有相同的耦合常数 G' ，但和 G_β 有较大的差别， $G'/G_\beta \sim 1/5$
- 奇异数改变和奇异数不变的半轻过程不能直接用相同的有效理论来描述。

我们已经介绍过，Cabibbo 根据强子的 $SU(3)$ 对称性（严格地说是八重态理论），认为强子弱流之间也应该按照 $SU(3)$ 变换。由于重子八重态和十重态中有奇异粒子， $SU(3)$ 变换可以把奇异数不改变的强子流变为奇异数改变的强子流，那么从更统一的观点来看，强子流应该同时包括奇异数改变和不改变的部分，

$$J_{h,\mu}^- = \cos \theta_c J_{h,\mu}^{AS=0,-} + \sin \theta_c J_{h,\mu}^{AS=1,-}$$

Cabibbo 进一步假设各类弱作用过程有相同的弱耦合常数，这个耦合常数和 μ 衰变的耦合常数相同，那么半轻子衰变的有效拉氏量可以写成，

$$\mathcal{L}_{\text{semi}} = -\frac{G_\mu}{\sqrt{2}} \left(\cos \theta_c J_{h,\mu}^{AS=0,-} + \sin \theta_c J_{h,\mu}^{AS=1,-} \right) \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e} + h.c.$$

夸克模型提出以后，人们知道强子可以看作夸克构成的，强子之间的相互作用可以看作是在夸克之间进行的。例如中子的 β 衰变

$$n(\textcolor{red}{udd}) \rightarrow p(\textcolor{red}{udu}) + e^- + \bar{\nu}_e$$

实际上可以看作是价夸克 d 和 u 之间的反应过程， $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

类似地，

$$\Lambda(\textcolor{red}{uds}) \rightarrow p(\textcolor{red}{udu}) + e^- + \bar{\nu}_e$$

可以看作是 $s \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

相应地，夸克层次上的强子流可以写成，

$$\begin{aligned} J_{q,\mu}^- &= \cos \theta_C J_{q,\mu}^{\Delta S=0,-} + \sin \theta_C J_{q,\mu}^{\Delta S=1,-} \\ &= \bar{u} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) (\bar{d} \cos \theta_C + \bar{s} \sin \theta_C) \end{aligned}$$

所以，在夸克层次上的半轻子弱作用等效理论可以写为，

$$\mathcal{L}_{semi} = -\frac{G_\mu}{\sqrt{2}} \bar{u} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) (\textcolor{red}{d \cos \theta_c + s \sin \theta_c}) \bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_{\nu_e} + h.c.$$

Cabibbo 角可以由 $\cos \theta_C = G_\beta / G_\mu = 0.977$ 定义，所以，

$$\sin \theta_C = 0.214$$

$$G'/G_\beta = \sin \theta_C / \cos \theta_C \approx 0.2$$

这和前面的实验结构是相符合的。

2. GIM 机制

Cabibbo 理论对弱作用的普适性给出了很好的解释，但从理论上讲还是有一些不十分令人满意的地方。

首先， u 、 d 、 s 夸克是强相互作用的本征态，因为强相互作用奇异数和同位旋守恒。但是在弱作用中奇异数和同位旋都是不守恒的，所以 u 、 d 、 s 都不是弱作用的本征态。比如在 Cabibbo 理论中，进入强子弱带电流的实际上是 d 和 s 的混合，

$$d' = d \cos \theta_C + s \sin \theta_C$$

我们再引入另外一种混合方式，

$$s' = -d \sin \theta_C + s \cos \theta_C$$

那么这两种混合方式可以用正交（幺正）矩阵描述

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

显然，在 Cabibbo 理论中只有 d' 和 u 有 V-A 耦合，也就是说 Cabibbo 理论有一个隐含的假设，不存在 u 和 s' 之间的弱流。这就是一个不令人满意的地方。

另外，1962年，试验上发现了一种新型的中微子—— μ 中微子，这种中微子只和 μ 轻子构成轻子带电弱流，类似地，电子中微子只和电子构成轻子带电流。如果把它们分成两组（代）

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$

显然这两组轻子除了带电轻子质量不同外，其它性质十分相似。

那么，我们来看夸克，弱作用本征态 d' 和 u 夸克构成强子带电流，这二者之间的性质与前面任何一组的中微子-带电轻子相似：电荷数相差为一。也可以把 u 和 d' 写成一个二重态 (s' 也仿照着写出)

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ?? \\ s' \end{pmatrix}$$

如果猜想夸克和轻子有某种相似性，一个有趣的问题是：是否存在新的一味质量较重的夸克（后来发现的粲夸克 c ），它的电荷和 u 夸克电荷相同， $Q = 2/3$ ，并且和 s' 构成与第二组轻子相似的二重态，它们也可以构成强子带电流呢？

这就是1964年 Bjorken 和 Glashow 的想法：

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$$

对 c 夸克存在的设想在当时看起来只是理论家的“思维体操”，Bjorken 和 Glashow 等都不很在意，但其重要物理后果好几年以后才被人们意识到：要使得弱作用的最低阶水平上不存在味道改变的中性流，必须有 c 夸克的存在。

和轻子类似，强子弱中性流是指由弱作用本征态构成的，不引起电荷变化的流。在 Cabibbo 理论中，只有三味夸克： u, d, s 。如果没有 s' 参与弱相互作用，可能存在的弱中性流（忽略正反夸克场之间的 γ 矩阵）为，

$$\bar{u}u + \bar{d}'d' = \bar{u}u + (\cos^2 \theta_C \bar{d}d + \sin^2 \theta_C \bar{s}s) + \sin \theta_C \cos \theta_C (\bar{s}d + \bar{d}s)$$

第三项就是味道改变的中性流。

味道改变中性流的存在是和实验严重矛盾的：

- a) 它预言半轻子过程 $K^+(u\bar{s}) \rightarrow \pi^+(u\bar{d} + l + \bar{l})$ 的存在；
- b) 它预言纯轻子衰变 $K_L(s\bar{d} + \bar{s}d) \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ 的存在。

以上两个过程根据弱相互作用有效理论，应该是 G_F 的最低阶过程，但实验发现是被严重压低的。

如果 c 夸克存在， s' 参与弱作用，并且和 c 能够构成带电强子弱流，

$$J_\mu^{-,cs'} = \bar{c}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)s' = \bar{c}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)(-d \sin \theta_c + s \cos \theta_c)$$

那么，弱中性流应该包括 u, d', c, s' 的贡献，可以证明，

$$J^0 = \bar{u}u + \bar{c}c + \bar{d}'d' + \bar{s}'s' = \bar{u}u + \bar{c}c + \bar{d}d + \bar{s}s$$

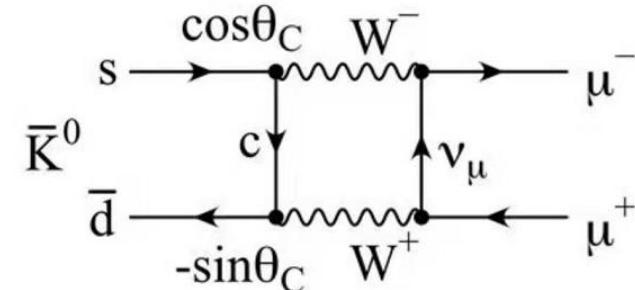
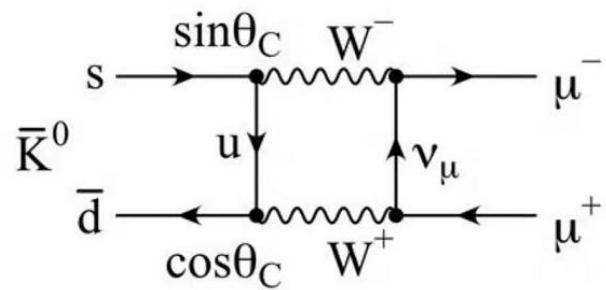
这样味道改变弱中性流就完全消除了。

需要说明的是，这里所谓的味道改变中性流的不出现，是在弱作用的低能有效理论框架下说的，也就是说，在弱耦合常数的最低阶不出现味道改变中性流的贡献，但在标准模型框架下，味道改变中性流可以在弱作用的圈图贡献中出现，但被严重压低。因此GIM机制又称为GIM压低。

在 c 夸克存在时，强子弱带电流可以写成更紧凑的形式：

$$J_\mu^- = (\bar{u} \quad \bar{c}) \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

$$J_\mu^+ = (\bar{d} \quad \bar{s}) \begin{pmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \begin{pmatrix} u \\ c \end{pmatrix}$$



$m_c = m_u$ 时两个图的贡献可以相消（第二个图来自中间的粲夸克的贡献）。