

怎样才能使 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 成为质子的主要衰变道?

吴丹迪 李铁忠

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文讨论了日本 KKNDE 质子衰变实验中的后选事例 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 的意义。在 Pati-Salam-Sarkar 工作的基础上,我们给出了一个可能使 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 成为质子主要衰变道的模型。

质子衰变的问题仍然是众所关注的大问题。尽管质子衰变的最简单的模型——Georgi-Glashow 的最小 $SU(5)$ 大统一模型^[1] 似乎已被实验否定^[2]。理论和实验的探讨仍在进行。理论方面有“拯救” $SU(5)$ 理论的尝试,包括改变最小 $SU(5)$ 模型^[3] 的 Higgs 结构^[3], 研究超对称的大统一模型^[4] 及考虑质子结构对衰变模式和宽度的影响。特别是应注意到在质子中的总自旋为零的任何 ud 夸克对,因为矢量或轴矢量耦合与费米子的螺旋性有很大关系,并表现为对零自旋复合粒子等效流的 Σm^2 压制,这里 m^2 是流中两费米子的质量^[5]。然而最近在日本 Komioka 发现的两个新的质子衰变的后选事例^[6], 又引起另外一方面的震动。日本仪器的特征是由于光电管大而有较高的灵敏度,但是分辨率差一些^[7]。由于这个原因,每一个事例如果是质子衰变都可以有两三种解释。

第一个可能的事例是 $N \rightarrow \mu^+ \eta$ 或 $e^+ \rho^-$ 或 $\mu^+ K^0$, 其中以 $\mu^+ \eta$ 的解释贴合的最好。

第二个可能的事例是 $N \rightarrow e^+ \omega^0$ 或 $e^+ \rho^-$, 其中以 $e^+ \omega^0$ 贴合最好。

这里 N 是指质子或中子。根据报告^[6], 第一个事例的可信度较第二个大。如 D. Cline^[8] 所指出,这两个事例的最可几解释是不一样地,它们分别为 $\mu^+ \eta$ 和 $e^+ \omega^0$, 这是对日本人发现的可信性不利的因素。尽管目前看来在所有实验组中日本的质子衰变事例呼声最高^[8]。

日本仪器对于 $e^+ \pi^0$ 末态也有很高的灵敏度,但是他们没有发现 $e^+ \pi^0$, 这一点与其它实验组是一致的。日本组发现的事例中最奇特的是 $\mu^+ \eta$ 末态。尽管第一个事例可以有其它解释,而且这些事例是否真是质子衰变还需要进一步发现更多事例来佐证。但是就目前情况而言,如果相信日本的第一个事例是质子衰变事例(因可信度较第二个大),那么,这说明 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 是质子的主要衰变道。这是最令人惊奇的,因为到目前为止还没有一个质子衰变的模型能够给出 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 是主要衰变道。而第一、二两个后选事例中,其它的

几种可能,均有模型给出它们成为主要衰变道.如文献[9]给出了 $e^+\omega^0$ 和 $e^+\rho^-$ 是核子的主要衰变道,文献[5]给出 μ^+K^0 是质子的主要衰变道.

事实上在所有的 $SU(5)$ 或 $SO(10)$ 模型中,质子的主要衰变方式是通过其中两个夸克湮灭为一个夸克和一个轻子,即湮灭方式.第三个夸克是旁观者保留在衰变末态中.因此末态成分里一定有一个 d 夸克或 u 夸克.这就决定了 $e^+\pi^0$, $e^+\rho^0$, $e^+\rho^-$, $e^+\omega^0$, $\mu^+\kappa^0$ 等衰变方式较 $\mu^+\eta^0$ 的几率为大.我们知道当末态有 d 或 u 夸克时, $\mu^+\eta^0$ 只能通过 $u\bar{u}$ 或 $d\bar{d}$ 来实现.因为对 $J^P = 0^-$ 态

$$\begin{aligned}(u\bar{u})_{0^-} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(\eta + \sqrt{2}\eta' + \sqrt{3}\pi^0), \\(d\bar{d})_{0^-} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(\eta - \sqrt{2}\eta' + \sqrt{3}\pi^0), \\(s\bar{s})_{0^-} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(-2\eta + \sqrt{2}\eta').\end{aligned}\quad (1)$$

所以湮灭道中出现 η 的可能性在考虑相体积修正以前是出 π^0 可能性的 $1/3$. 要使 $\mu^+\eta$ 成为主要衰变道,就必须使质子中的第三个夸克变成 s 夸克,而另外两个夸克变成轻子和 \bar{s} 夸克这种聚合反应是主要衰变道,即 $p \rightarrow \mu^+s\bar{s}$ 是主要道.在有湮灭反应质子衰变道的时候,聚合反应 $p \rightarrow \mu^+s\bar{s}$ 受到多一个重粒子传播子 $1/m_x^2$ 的压制,因此不可能是主要道.

一个有趣的质子衰变模型是 Pati-Salam-Sarkar (PSS) 的 $G = SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ 模型^[10]. 在这个模型中质子只能通过三体的聚合反应来衰变,两体湮灭反应是禁戒的. PSS 模型的特点是^[11] 规范粒子不传递质子衰变.在文献[10]中引入 $(15, 2, 2)$ 和 $(1, 2, 2)$ 这两个 Higgs 多重态,只有引入它们,才能在这个模型中贴合实验的费米子质量.除此以外,他们又引进 Higgs $(10, 3, 1)$ 和 $(10, 1, 3)$ 以达到自发破坏左右对称的目的.这个模型的好处是简洁,遗憾的是,在这个模型中, $p \rightarrow \mu^+s\bar{s}$ 成为主要衰变道的概率太小(见后文).作为另外一种有趣的可能性,我们考虑如下的 Higgs 构成

$$\begin{aligned}(15, 2, 2) &= \zeta_i^{aj}, \quad (a = 1, 2, SU(2)_L \text{ 指标 } \quad \epsilon = 1, 2, SU(2)_R \text{ 指标}) \\(1, 2, 2) &= \Theta^{ab}. \\(10, 1, 1) &= \eta_{(i, \bar{n})}, \\(1, 3, 1) &= \delta^{(ab)}, \\(1, 1, 3) &= \Delta^{(cd)}, \\(15, 1, 1) &= \phi_i^j.\end{aligned}\quad (2)$$

$i, j = r, g, y, l$ 是 $SU(4)$ 色指标,代替文献[10]中的 $(10, 3, 1)$ 和 $(10, 1, 3)$,我们用 $(15, 1, 1)$ 破坏 $SU(4)$ 到 $SU(3) \times U(1)$, 用 δ 和 Δ 来破坏左右对称^[10], Θ 与 ζ 联合能够正确地贴合费米子 Dirac 质量, ζ 和 η 能够传递聚合式质子衰变,与质子衰变有关的拉氏量为:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= g_{\xi\xi'} \epsilon^{\alpha\beta} \epsilon^{ab} \eta_{(i, \bar{n})} \phi_{L\alpha\xi}^i \phi_{L\beta\xi'}^j + h_{\xi\xi'}^a \bar{F}_{Li\xi}^a \zeta_{ij}^{ab} F_{Rj\xi'}^b \\&+ \tilde{h}_{\xi\xi'}^a \bar{F}_{Li\xi}^a \zeta_{ij}^{ab} F_{Rj\xi'}^b + (L \rightarrow R) + (\text{H.C.})\end{aligned}\quad (4)$$

这里 α, β 为外尔旋量指标, $\xi, \xi' = 1, 2, 3$ 为代的指标,费米子 $\phi_{L,R}$ 填充 G 群的 $(4, 2, 1)$ 表示或 $(4, 1, 2)$ 表示.例如第一代

$$\psi_{L,R} = \begin{pmatrix} u_r & u_g & u_y & \nu_e \\ d_r & d_g & d_y & e \end{pmatrix}_{L,R} \quad (5)$$

$\xi = \tau_2 \zeta^* \tau_2$ 也是 $(15, 2, 2)$ 表示. 费米统计要求

$$g_{\xi\xi'} = -g_{\xi'\xi}. \quad (6)$$

亦即 $(10, 1, 1)$ 只耦合不同代的费米子. 对质子衰变有贡献的最低级费曼图仅仅有 PSS 类型的图 (图 1). 这个图仅仅给出三个可能的质子衰变过程:

$$\begin{aligned} p &\rightarrow \mu^+ \eta \sim |h_{12}|^2, \\ &\rightarrow \mu^+ K^0 \sim |h_{11}|^2, \\ &\rightarrow \nu_\mu K^+ \sim |h_{11}|^2. \end{aligned} \quad (7)$$

仅有这三个衰变道是本模型的特点. 但是我们还没有理由证明这三个道哪一个大, 亦即无法证明 $|h_{12}|^2$ 和 $|h_{11}|^2$ 那一个大. 这两种可能性各有约一半的概率, 因此这个模型有 $1/2$ 的概率给出 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 是主要衰变道. 关于这个过程速率的估计请参阅 [10] 及我们的文章 [11]. 我们与工作 [10] 不同的地方在于, 在图 1 中我们用 $\eta(10, 1, 1)$ 代替了他们的 $\Delta(10, 3, 1)$. 在他们的模型中, $(10, 3, 1)$ 可以同 $uc, uv_e, u\mu, uv_\mu, ud, uu, us$, 等流耦合. 这样质子衰变道就可以是 (只考虑 O^- 介子) $p \rightarrow e^+ \pi^0, \nu_e \pi^+, \nu_\mu K^+, \mu^+ K^0, \mu^+ \bar{K}^0, \mu^+ \eta, \dots$. 其分支比在所有 Yukawa 耦合常数都相等的情况下为: $4/3:2:1:1:1:2/3$. 注意, 由于 Yukawa 耦合是 S-P 型的文献 [5] 的增长机制不起作用. 因此只有相体积的修正, 而相体积修正有利于 $e^+ \pi^0$ 和 $\nu_e \pi^+$ 道. 因此文献 [10] 中 $\mu^+ \eta$ 会成为主要道的概率小于 $1/10$.

我们的结论是: 如果 $p \rightarrow \mu^+ \eta$ 是质子的主要衰变道, 那么 Higgs 传递的聚合反应就是质子衰变的主要机制, 而且类似 $(10, 1, 1)$ 这样的 Higgs 多重态应当存在.

作者感谢况浩怀, 笠原克昌提供了关于日本实验的材料, 并感谢周咸建首先提供了这方面的消息.

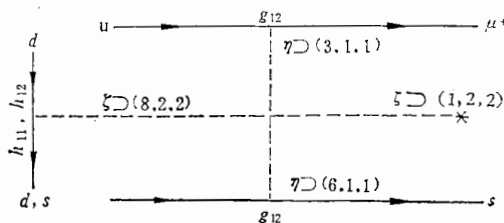


图 1

参 考 文 献

- [1] H. Georgi and S. L. Glashow, *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 438.
- [2] 例如, W. J. Marciano, in *Peoc. Fourth Workshop on Grand Unification* (Univ. of Pennsylvania) ed. A. Welton (Birkhouse, Basel, 1983) to be published.
- [3] P. H. Frampton and S. L. Glashow, *Phys. Lett.*, **131B** (1983), 340. Ernest Ma and K. Whisnant, *Phys. Lett.* **131B** (1983), 343.
- [4] S. Ferrara, report in Beijing, November 1983.

- [5] Chand Chao-Hsi and Wu Yong-shi, *Phys. Lett.*, **132B**(1983), 363.
- [6] Narkshurtan, 东京大学宇宙线研究所, Kamioka Nucleon Decay Experiment, Report at the Ecoban Conf. Jan. 1984.
- [7] H. Ikeda et al, KEK preprint 81—23, 1982.
- [8] W. Sullivan, Report in New York Times, 1984, Jan, 6th.
- [9] J. F. Donoghue, *Phys. Lett.*, **92B** (1980), 99; E. Golowish, *Phys. Rev.*, **D22** (1980), 1148.
- [10] J. C. Pati, A. Salam and Sarker, *Phys. Lett.*, **133B** (1983), 330.
- [11] 关于 $SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ 请参阅 J. C. Pati and A. Salam, *Phys. Rev. Lett.*, **31**(1973), 661; *Phys. Rev.*, **D10** (1974), 275; G. Senjanovic, *Nucl. Phys.*, **B153**(1979), 334;
吴丹迪,李铁忠,高能物理与核物理, **7**(1983), 702.

HOW TO MAKE $p \rightarrow \mu^+ \eta$ THE MAIN MODE OF PROTON DECAY

WU DAN-DI LI TIE-ZHONG

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A model based on Pati-Salam-Sarkar's work is presented in which $p \rightarrow \mu^+ \eta$ has a half chance to be the main mode of proton decay.