

# BES 新测 $\tau$ 轻子质量的物理含意\*

吴济民<sup>1)</sup>

何祚麻<sup>1)</sup>

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039) (中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

## 摘 要

我们讨论了 BES 新近测得  $\tau$  轻子质量的物理含意. 预言了  $\tau$  的寿命值.

最近, BES 组在过程  $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$  的阈附近完成了  $\tau$  轻子对产生截面的测量<sup>[1]</sup>. 贴合了经过辐射修正的阈截面后<sup>[2]</sup>, 得到  $\tau$  质量值为:

$$m_\tau = 1776.9_{\pm 0.4}^{+0.4} \pm 0.3 \text{ MeV}. \quad (1)$$

它比老的  $\tau$  质量值低约 7 MeV, 而且误差减小 5-6 倍.

本文将讨论这个测量的物理含意, 检验弱作用带电流的普适性, 检验标准模型给出的有关预言. 为此, 我们将把理论预言与四个实验分支比值作比较:  $\tau \rightarrow l\nu\bar{\nu}$  ( $l=e, \mu$ ),  $\tau \rightarrow \nu_l\pi$  和  $\tau \rightarrow \nu_l K$ , 因为这几个实验的不确定性小, 理论上的了解也很好. (见方程(2)和(3))

标准模型预言  $\tau \rightarrow l\nu\bar{\nu}$  过程的分支比是(包括了弱电辐射修正)<sup>[3]</sup>

$$\text{BR}(\tau \rightarrow l\nu\bar{\nu}) = \tau_{\text{tau}} \frac{G^2 m_\tau^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_l^2}{m_\tau^2}\right) \left(1 + \frac{3}{5} \frac{m_\tau^2}{m_W^2}\right) \left[1 + \frac{\alpha(m_\tau)}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2\right)\right]. \quad (2)$$

其中

$$f(x) = 1 - 8x + 8x^2 - x^4 - 12x^2 \ln x,$$

$$\alpha^{-1}(m_\tau) = 133.3.$$

对  $\tau \rightarrow \nu_l\pi$  和  $\tau \rightarrow \nu_l K$  的衰变几率的预言是<sup>[3]</sup>:

$$\Gamma(\tau \rightarrow \nu_l\pi) = \frac{G^2 f_\pi^2 |V_{ud}|^2}{16\pi} m_\tau^3 \left(1 - \frac{m_\pi^2}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{m_\tau}{m_\pi}\right) + \dots\right), \quad (3)$$

$$\Gamma(\tau \rightarrow \nu_l K) = \frac{G^2 f_K^2 |V_{us}|^2}{16\pi} m_\tau^3 \left(1 - \frac{m_K^2}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{m_\tau}{m_K}\right) + \dots\right).$$

这里已经包括了带头的辐射修正效应.  $f_\pi |V_{ud}|$  和  $f_K |V_{us}|$  值可以从  $\pi_{\mu 2}$  和  $K_{\mu 2}$  衰变中精确地得到. 正如文献[4]中所分析的那样:

$$f_\pi |V_{ud}| = 127.4 \pm 0.1 \text{ MeV}, \quad (4)$$

$$f_K |V_{us}| = 35.18 \pm 0.05 \text{ MeV}.$$

本文1992年9月5日收到.

\* 国家自然科学基金会资助.

1) CCAST 成员

我们要求维持  $e-\mu-\tau$  普适性, 即:

$$G = G_\mu = (1.16637 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}.$$

我们已经知道了多年, 在  $\tau$  轻子的衰变中, 有一个谜. 如果我们采用粒子数据表<sup>[5]</sup>中的实验数据:

$$\begin{aligned} m_\tau &= 1784.1 \pm_{3.6}^{2.7} \text{MeV}, \\ \tau_{\text{tau}} &= (3.03 \pm 0.08) \times 10^{-13} \text{秒}, \\ \text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}) &= (17.7 \pm 0.04)\%, \end{aligned} \quad (5)$$

在  $\tau_{\text{tau}} - \text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  图上, 它与从方程(2)给出的标准模型的预言有明显的偏离. (这个预言由 A 带所表示, 这是由于所包括的数据误差造成的, 见图1)

用(5)式中给出的  $\tau$  质量和  $\tau$  寿命值, 对四个衰变过程的分支比也在表1的第二列中给出. 这里的误差也是由于  $m_\tau$  和  $\tau_{\text{tau}}$  的实验值的不确定性来的. 我们可以看到, 例如  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  的预期值比实验数据高出两个标准偏差, 这个偏差不可能是由于非零的  $m_\nu$  造成的 ( $m_\nu < 35 \text{MeV}$ ). 四个分支比的实验值全都低于理论预期值. 同时, 我们还计算了比值  $R_\tau^T, R_\tau^B$  (见后面)

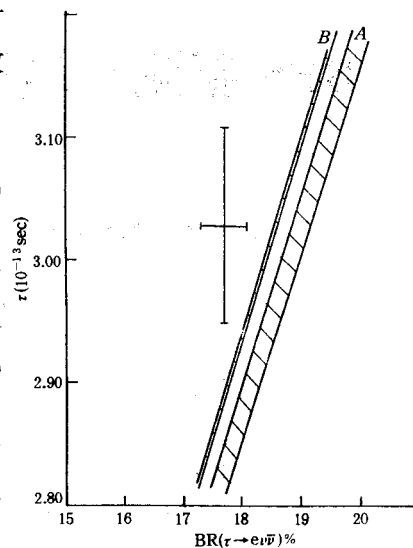


图1  $\tau$  轻子的寿命与分支比  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  的关系

A 带与交叉点的数据来自文献<sup>[5]</sup>, B 带的实验数据来自文献<sup>[1]</sup>

表1 在四种情况下  $\tau$  的衰变分支比(%)、 $R_\tau^T$  和  $R_\tau^B$

(所有输入  $m_\tau$  和  $\tau_{\text{tau}}$  都带有各自的误差)

	$m_\tau = 1784.1$ $\tau_\tau = 3.03 \times 10^{-13}$	$m_\tau = 1776.9$ $\tau_\tau = 3.03 \times 10^{-13}$	$m_\tau = 1784.1$ $\tau_\tau = 2.92 \times 10^{-13}$	$m_\tau = 1776.9$ $\tau_\tau = 2.92 \times 10^{-13}$	experimental values
$\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$	$18.93 \pm 0.65$	$18.55 \pm 0.51$	$18.28 \pm 0.33$	$17.88 \pm 0.20$	$17.7 \pm 0.4$ <sup>[5]</sup> $17.80 \pm 0.23$ <sup>[7]</sup>
$\text{BR}(\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu})$	$18.42 \pm 0.64$	$18.05 \pm 0.50$	$17.78 \pm 0.33$	$17.39 \pm 0.20$	$17.8 \pm 0.4$ <sup>[5]</sup> $17.43 \pm 0.24$ <sup>[7]</sup>
$\text{BR}(\tau \rightarrow \nu\pi)$	$11.55 \pm 0.38$	$11.41 \pm 0.32$	$11.15 \pm 0.18$	$11.00 \pm 0.13$	$11.0 \pm 0.5$ <sup>[5]</sup>
$\text{BR}(\tau \rightarrow \nu K)$	$0.76 \pm 0.02$	$0.75 \pm 0.02$	$0.73 \pm 0.01$	$0.72 \pm 0.01$	$0.68 \pm 0.19$ <sup>[5]</sup>
$R_\tau^T$	$3.30 \pm 0.18$	$3.41 \pm 0.13$	$3.50 \pm 0.10$	$3.61 \pm 0.05$	
$R_\tau^B$	$3.30 \pm 0.18$	$3.41 \pm 0.13$	$3.50 \pm 0.10$	$3.61 \pm 0.05$	$3.64 \pm 0.12$ <sup>[5]</sup> $3.63 \pm 0.06$ <sup>[7]</sup>

现在, 采用新测量的  $m_\tau$  值, 标准模型的预言用图1上的 B 带表示. 还是利用新测量的  $m_\tau$  值和现有的世界平均  $\tau$  寿命值,  $\tau_{\text{tau}} = (3.03 \pm 0.08) \times 10^{-13}$  秒, 我们在表1的第三列中

给出了四个分支比的期望值. 它们接近了实验值, 但还存在一个多的标准偏差.

从  $\text{BR}(\tau \rightarrow l\nu\bar{\nu})$  的表达式看, 我们可以发现, 方程(2)的右端, 除去  $\tau$  寿命外, 其余实验值是比较可信和精确的, 如果我们取  $\text{BR}(\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu})$  与  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  之比, 用以消去  $\tau_{\text{tau}}$  因子, 我们得到:

$$\begin{aligned} \frac{\text{BR}(\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu})}{\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})} &= \frac{f\left(\frac{m_\mu^2}{m_\tau^2}\right)}{f\left(\frac{m_e^2}{m_\tau^2}\right)} \\ &= \begin{cases} 0.97287 \pm 0.00010 & (m_\tau = 1784.1^{+2.7}_{-3.6} \text{MeV}). \\ 0.97266 \pm 0.00002 & (m_\tau = 1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.3 \text{MeV}). \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

最近 LEP 关于  $\tau$  衰变的测量, 再加上以前的世界平均值<sup>[5]</sup>, 现在获得了非常精确的和自洽的轻子衰变分支比<sup>[7]</sup>. 将上面的预言与实验值作比较,

$$\begin{array}{lll} \text{BR}(\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}) & (17.8 \pm 0.4)\%^{[5]} & (17.43 \pm 0.24)\%^{[7]} \\ \text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}) & (17.7 \pm 0.4)\%^{[5]} & (17.80 \pm 0.23)\%^{[7]} \\ \text{比值 } \frac{\text{BR}(\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu})}{\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})} & 1.005 \pm 0.045 & 0.9792 \pm 0.0261. \end{array} \quad (7)$$

我们看到, (6)式预言与实验数据很好自洽, 特别是与新的平均值  $0.9792 \pm 0.0261$ <sup>[7]</sup>. 预言与数据<sup>[7]</sup>之间的相对偏差仅仅约为  $-0.67\%$ . 因此, 我们对  $\tau$  的寿命值有较大的怀疑.

让我们观察  $\tau$  的单举强子衰变, 有关的比值  $R$  定义为:

$$R_\tau = \frac{\tau \text{ 的单举强子衰变的几率}}{\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu} \text{ 衰变几率}}. \quad (8)$$

实验上有两个独立的方法测量  $R_\tau$ . 一个是用衰变宽度给出:

$$R_\tau^{\text{exp}, \Gamma} = \frac{\Gamma_\tau - \Gamma_{\tau \rightarrow e} - \Gamma_{\tau \rightarrow \mu}}{\Gamma_{\tau \rightarrow e}} = 3.32 \pm 0.12^{[6]}. \quad (9)$$

另一个由分支比给出:

$$R_\tau^{\text{exp}, B} = \frac{1 - \text{BR}(\tau \rightarrow e) - \text{BR}(\tau \rightarrow \mu)}{\text{BR}(\tau \rightarrow e)} = 3.66 \pm 0.05^{[6]}. \quad (10)$$

其中  $\Gamma_\tau = \frac{1}{\tau_{\text{tau}}} \cdot \Gamma_{\tau \rightarrow e}$ ,  $\Gamma_{\tau \rightarrow \mu}$  可由理论计算给出.  $R_\tau^{\text{exp}, \Gamma}$  大大地低于  $R_\tau^{\text{exp}, B}$ .

理论上,  $\tau$  轻子的半轻子衰变可用谱函数方法给出. 好几位作者<sup>[3, 8, 9]</sup>给出了  $R_\tau$  的预言(包括几项修正)以及数值计算:

$$R_\tau = 3(V_{ud}^2 + V_{us}^2)S_{\text{EW}}[1 + \delta_{\text{EW}} + \delta_{\text{PT}} + \delta_{\text{NP}}]. \quad (11)$$

其中,  $S_{\text{EW}}$  是在带头对数近似下重整化群改进了的电弱修正,  $\delta_{\text{EW}}$  是较小的次带头级对数级电弱修正<sup>[3, 8]</sup>

$$S_{\text{EW}} = \left(\frac{\alpha(m_b)}{\alpha(m_\tau)}\right)^{\frac{9}{19}} \left(\frac{\alpha(M_W)}{\alpha(m_b)}\right)^{\frac{9}{20}} \left(\frac{\alpha(M_E)}{\alpha(M_W)}\right)^{\frac{36}{17}} = 1.0194, \quad (12)$$

$$\delta_{\text{EW}} = \frac{5}{12} = \frac{\alpha(m_\tau)}{\pi} = 0.0010.$$

微扰 QCD 贡献由下式给出<sup>[9]</sup>:

$$\delta_{\text{PT}} = \frac{\alpha_s(m_\tau)}{\pi} + 5.2023 \left(\frac{\alpha_s(m_\tau)}{\pi}\right)^2 + 26.366 \left(\frac{\alpha_s(m_\tau)}{\pi}\right)^3$$

$$+ O\left(\left(\frac{\alpha_s(m_\tau)}{\pi}\right)^4\right). \quad (13)$$

估计非微扰贡献与较小的夸克质量修正大约是  $\delta_{NP} = -(0.8 \pm 0.4)\%$ <sup>[9]</sup>. 所以,  $R_\tau$  的期望值与输入  $\alpha_s(m_\tau)$  有关.

正如文献[9]所计算的那样,  $R_\tau^{\text{exp}, \Gamma}$ 、 $R_\tau^{\text{exp}, B}$  分别相应于  $\alpha_s(m_\tau) = 0.21 \pm 0.07$  和  $0.36 \pm 0.04$ .  $R_\tau^{\text{exp}, \Gamma}$  与  $R_\tau^{\text{exp}, B}$  形式上的平均值  $R_\tau^{\text{exp}} = 3.61 \pm 0.05$ , 它相应于  $\alpha_s(m_\tau) = 0.34 \pm 0.04$ . 用重整化群方法把此平均值演化到质量尺度  $M_Z = 91.2 \text{ GeV}$  处, 人们就得到  $\alpha_s(M_Z) = 0.120^{+0.004}_{-0.005}$ . 这与现在 LEP 给出的平均值十分自洽  $\alpha_s(M_E) = 0.120 \pm 0.007$ <sup>[10]</sup>.

相反地, 把 LEP 值  $\alpha_s(M_Z) = 0.120 \pm 0.007$  用重整化群方法演化下来, 人们可得到  $\alpha_s(m_\tau) = 0.34^{+0.08}_{-0.06}$ <sup>[9]</sup>, 这意味着  $R_\tau = 3.6^{+0.4}_{-0.2}$ <sup>[9]</sup>.

现在, 让我们要求  $R_\tau^{\text{exp}, \Gamma} = 3.61 \pm 0.05$ . 从方程(9), 我们得到预言:

$$\tau_{\text{tau}} = (2.92 \pm 0.03) \times 10^{-13} \text{ 秒}. \quad (14)$$

这样, 利用这里预言的  $\tau_{\text{tau}}$  值, 我们再次用(I)老  $m_\tau$  值  $m_\tau = 1784.1^{+2.7}_{-3.6} \text{ MeV}$  和(II)新  $m_\tau$  值,  $m_\tau = 1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.3 \text{ MeV}$  由方程(2)、(3)计算了  $\tau$  衰变的分支比. 结果分别列于表1的第4、第5列中. 所预言的  $\tau_{\text{tau}}$  和  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  值示于图2上. 当然, 所预言的点应当落在图1的 B 带上. 作为一个例子, 把上述四种情况下的  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  预言值与实验值的比较画在图3上. 预言值很好地趋向于实验数据. 对其它三种衰变也有相似的行为.

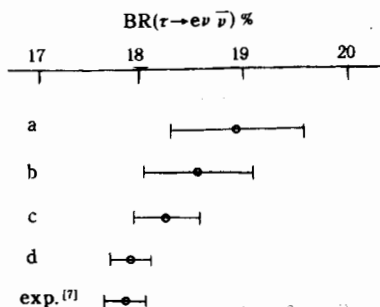


图3 在四个情况下比较  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  的预期值与实验数据:(a)采用粒子数据表给出的  $m_\tau$  和  $\tau_{\text{tau}}$  值. (b)新  $m_\tau$  值, (c)老的  $m_\tau$  值和预期的  $\tau_{\text{tau}}$ , (d)新  $m_\tau$  值与预期的  $\tau_{\text{tau}}$  值.

实验数据来自文献[7]

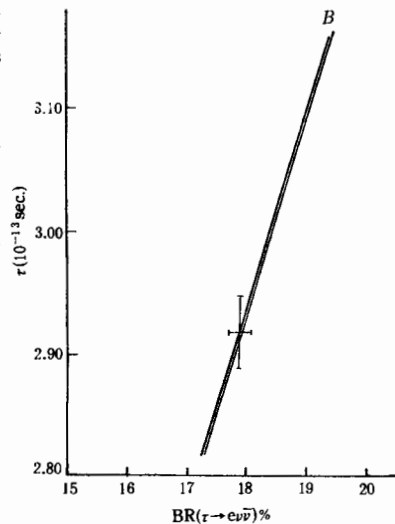


图2 用新测  $\tau$  质量值与预期的  $\tau$  寿命值得到的  $\tau$  寿命与分支比  $\text{BR}(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu})$  的关系

由  $\tau_{\text{tau}}$  的预期值来的预言与  $\tau$  衰变的四个精密的分支比都符合得很好, 理论预言值  $R_\tau^B = 3.61 \pm 0.05$  也与实验数据自洽, 从上述讨论我们看到, 弱作用流的普适性仍然得到保持. 耦合常数  $\alpha_s(m_\tau) = 0.34 \pm 0.04$ .  $\tau$  轻子的衰变之谜可以得到解决. 这里预言了  $\tau$  的寿命值. 我们希望在即将来临的实验中能将精确地确定  $\tau_{\text{tau}}$  值.

这里还要强调, 本文并不是专门为了精确地确定跑动耦合常数  $\alpha_s(m_\tau)$ . 但是, 我们论述了(9)式中要求  $R = 3.61 \pm 0.05$  是合理的.

新近测得的  $\tau$  轻子的质量值还会改变  $\nu_\tau$  质量的上限. 这在别处另作讨论<sup>[11]</sup>.

## 参 考 文 献

- [1] Nading Qi, "Preliminary results of the  $\tau$ -mass measurement from BES", presented at APS meeting (Washington D. C., April, 1992).
- [2] 吴济民、赵佩英, 高能物理和核物理, **17**(1993)365.
- [3] W. Marciano and A. Sirlin, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988),1815.
- [4] W. Marciano, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **41**(1991),469;  
也见 B. Holstein, *Phys. Lett.*, **B244**(1990),83.
- [5] Particle Data Group, *Phys. Lett.*, **B239**(1990),1.
- [6] A. Pich CERN-TH. 6237/91(1991).  
To appear in "Heavy Flavours"(eds. A. J. Buras and M. Linder)  
Advanced Series on Directions in High Energy Physics.  
(World Scientific, 1991)
- [7] W. Marciano, *Phys. Rev.*, **D45**(1992),721.
- [8] E. Braaten, *Phys. Rev.*, **D39**(1989),1458,  
E. Braaten and C. S. Li. *Phys. Rev.*, **D42**(1990),3888.
- [9] E. Braaten, S. Narison and A. Pich, CERN-TH. 6070/91.
- [10] T. Hebbeker, Plenary talk at the LP-HEP91 Conference, Geneva, July 1991.
- [11] 李金, 在粒子物理讨论会上的报告(1992.3, 理论物理所).

## The Implications of the New Measurement of $\tau$ Lepton Mass

WU JIMIN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

HE ZUOXIU

(*Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

### ABSTRACT

We discuss the physical implications for the new measurement of  $\tau$  lepton mass. The Value of  $\tau$  lifetime is predicted.