

τ 轻子质量的精密测量*

BES 合作组

丁慧良	于传松	马东红	马恩成	马基茂	马爱民	方建	王平
王运永	王佩良	王临州	王泰杰	王曼	王少敏	王灵淑	毛泽普
毛慧顺	兰慧彬	倪惠苓	叶铭汉	叶诗章	叶树伟 ¹	白景芝	史焕章
朱永生	朱启明	吕锋	庄保安	过雅南	李卫国	李芳	李如柏
李金	李佩琴	李蔚	李小南	李玉山	李卫东	李群 ²	刘怀民
刘荣光	刘琦	刘延	刘经华	刘振安	孙汉生	孙舫	吕军光
许榕生	许明康 ³	许亚娣 ³	严武光	张长春	张少强	张达华	张羽
张良生	张会领	张炳云	张家文	张建	张月元	杨长友	杨春敏
杨蔚	沈定力	沈肖雁	沈红	何炬	何增 ²	何可人	陈雅青
陈少敏	陈申见	陈宇	陈宏芳 ¹	陈光培	陈元柏	杜志珍	吴义根
宋晓非	孟祥承	邵毓莺	郁忠强	周月华	周化十	周光谱	周莉
周小帆	郑志鹏	郑林生	郑建平	林树子	罗勇	郎鹏飞	范晓聆
金艳	苑长征	赵宏伟	赵平德	赵萌	赵维仁	赵隼新	胡贵云
胡涛	胡洪波	胡晓庆	荣刚	姜春华	姜志进 ²	祝玉灿	祝红国
康书辉	席德明	谈益平	顾以藩	顾树棟	顾维新	顾建辉	高文绣
高树琦	高美丽	高翠山	徐芷青	徐德之	夏小米	唐素秋	虞炎华 ³
黄智胜	黄德强	崔化传	崔象宗	盛华义	韩璽	韩世温	谢小希
谢佩佩	程宝森	赖元芬	童国良	曾吉阳	网友昆	喻纯旭	漆纳丁
颜洁	薛生田	熊伟军	魏诚林	聂晶 ¹			

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1 (中国科技大学近代物理系 合肥 230026)

2 (山东大学物理系 济南 250100)

3 (杭州大学物理系 杭州 310028)

* 国家自然科学基金资助。

T. J. Shank S. Whittaker,
(*Boston University, Boston, Massachusetts 02215*)

M. Hatanaka D. Hitlin L. Jones M. Kelsey J. Oyang
X. R. Shi J. Panetta F. Porter E. Prabhakar
(*California Institute of Technology, Pasadena, California 91125*)

A. Lankford M. Mandelkern J. Shultz B. Schmid M. Schernau
A. Smith D. Stoker G. Zioulas
(*University of California, Irvine, California 92717*)

J. Chen Q. P. Jia R. Malchow R. Wilson
W. Toki
(*Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523*)

O. Bardon R. Cowan M. Fero J. Quigley E. Torrence
R. Yamamoto
(*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139*)

W. Dunwoodie H. Marsiske E. Soderstrom
J. Synodinos
(*Stanford Linear Accelerator Center Stanford University, Stanford, California 94309*)

W. Wisniewski
(*Superconducting Supercollider Laboratory, Dallas, Texas 75237-3946*)

J. Standifird I. Blum P. Gratton B. Kim X. C. Lou
H. Shipman J. Campbell J. M. Izen B. Lowery
(*University of Texas at Dallas, Richardson, Texas 75083-0688*)

T. Burnett
(*University of Washington, Seattle, Washington 98195*)

A. Breakstone F. Harris S. Olsen D. Paluselli
A. Breakstone F. Harris S. Olsen D. Paluselli L. J. Pan
(*University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822*)

1994-09-07 收稿

摘 要

由北京正负电子对撞机 (BEPC) 上取得的 τ 轻子质量附近 12 个能量点的数据, 筛选出 τ 轻子到其 6 个主要衰变道的事例数, 用最大似然法双参数拟合得到 τ 轻子的质量为 $1776.88^{+0.22+0.20}_{-0.23-0.17} \text{ MeV}$, 与 1992 年的 τ 轻子到 $e\mu$ 一个衰变道的测量结果相比, 增加了统计量, 减小了统计误差, 从而提高了精确度。

关键词 τ 轻子质量, 事例筛选, 径迹判定。

1 引 言

北京谱仪(BES)合作组于 1991 年底至 1992 年初在北京正负电子对撞机 (BEPC) 上根据近阈扫描的实验方案, 在 τ 质量附近的 12 个能量点上积累了 5000nb^{-1} 的积分亮度共约 180 万的对撞事例。由 τ 轻子的 $e\mu$ 衰变模式的事例, 运用最大似然法拟合得到 τ 轻子的质量 m_τ 为^[1,2]:

$$M_\tau = 1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.2 \text{ MeV}$$

τ 轻子主要衰变道最新实验结果给出的分支比^[3]为:

衰变道	分支比
$\tau \rightarrow e\nu_e\bar{\nu}_\tau$	$(17.88 \pm 0.15)\%$
$\tau \rightarrow \mu\nu_\mu\bar{\nu}_\tau$	$(17.90 \pm 0.16)\%$
$\tau \rightarrow \pi\nu_\tau$	$(11.60 \pm 0.40)\%$

北京谱仪对电子、 μ 子和 π 介子有较好的分辨能力, 因此通过收集 τ 轻子的 $e\mu$ 、 $e\pi$ 、 $e\pi$ 、 $\mu\mu$ 、 $\mu\pi$ 和 $\pi\pi$ 6 种衰变模式的事例进行分析拟合得到 τ 轻子质量都是可行的。这样做既扩大了统计量, 减小了测量的统计误差, 还可以避免收集数据的随机性和统计涨落带来的错漏。

本文报道的工作, 按照事例筛选、粒子鉴别、最大似然法拟合和误差处理等几个步骤, 以统一的逻辑分析了 τ 轻子的 6 个主要衰变模式的事例。由 12 个能量点取得的 τ 轻子事例, 筛选出衰变到以上 6 道的事例数 $N_{e\mu}$ 、 $N_{e\pi}$ 、 $N_{e\pi}$ 、 $N_{\mu\mu}$ 、 $N_{\mu\pi}$ 、 $N_{\pi\pi}$, 最后确定了 τ 轻子的质量。

2 τ 轻子 6 个主要衰变道的特征

(1) 事例判选的目的是将 $\tau^+\tau^-$ 事例与本底区别开。以上 6 个模式均为终态仅有两

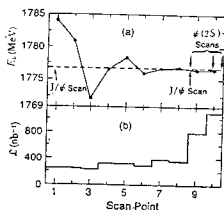


图 1 各实验点的束流能量 (E_b) 和积分亮度 ($\mathcal{L}$)

个电荷粒子并伴有携带能量逃逸而去的中微子。这种事例称为：“有能量或动量丢失的交叉事例”。北京谱仪可以“看”到这些事例的能量、动量的不守恒。这些事例与过程

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}, \quad e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma),$$

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma), \quad e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-,$$

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-, \quad e^+e^- \rightarrow e^+e^-q\bar{q},$$

(后三个过程即“双光子”过程)产生的本底在非共线角 ($ACOL$)，非共面角 ($ACOP$) 和横动量与丢失动量之比 ($PTES$) 的分布图中表现出强烈的不同，为事例和本底的区别提供了条件。

(2) 这 6 个衰变模式终态各伴有不同数目的中微子产生，例如 $e\mu$ 、 $e\bar{e}$ 、 $\mu\mu$ 模式各伴有四个中微子， $e\pi$ 、 $\mu\pi$ 模式各伴有三个中微子，而 $\pi\pi$ 模式只伴有两个中微子产生。因此在 $ACOL$ 、 $ACOP$ 和 $PTES$ 的分析中对不同的模式采用不同的截断条件。其中

$$PTES = \frac{|\langle p_1 + p_2 \rangle_z|}{W - |p_1| - |p_2|},$$

p_1, p_2 分别为衰变产生两个粒子的动量， W 为质心系能量。

(3) 以上各衰变模式中没有任何光子或 π^0 等中性粒子产生，因此在判选中做了拒绝中性径迹的定量要求。

(4) 为排除宇宙线本底，使用了“两个从中心点向外飞行的粒子到达飞行时间探测器所用的时间 T_1 和 T_2 应基本相同”的限定，并要求这两个时间之差 ΔT 小于 3 ns。

(5) 文献 [1] 将电子动量的下限定为 350 MeV/c，是较保守的措施，基于更多的 Monte Carlo 研究，现将电子的动量下限降为 200 MeV/c。

(6) $\tau \rightarrow \pi\nu_\tau$ 过程产生的 π 介子具有单色性，在阈值处产生的 π 介子的动量呈 δ 分布。离开阈值处， τ 的动量造成了 π 的加速或减速，其动量范围因此而有所展宽。根据能量、动量守恒的原理，由 τ 轻子、 π 介子和 τ 中微子 ν_τ 的能量 E_τ 、 E_π 、 E_{ν_τ} 和动量 p_τ 、 p_π 、 p_{ν_τ} 推出 π 介子的动量上限 $p_{\pi\text{上}}$ 和下限 $p_{\pi\text{下}}$ 分别为：

$$p_{\pi\text{上}} = \frac{(E_\tau + p_\tau)^2 - M_\pi^2}{2(E_\tau + p_\tau)};$$

$$p_{\pi\text{下}} = \frac{(E_\tau - p_\tau)^2 - M_\pi^2}{2(E_\tau - p_\tau)}.$$

由 $p_{\pi\text{上}}$ 、 $p_{\pi\text{下}}$ 再考虑到 BES 的动量分辨率 σ_p ，得到判别 π 介子的动量截断最大值 p_{max} 和最小值 p_{min} 分别为：

$$p_{\text{max}} = p_{\pi\text{上}} + 3\sigma_p;$$

$$p_{\text{min}} = p_{\pi\text{下}} - 3\sigma_p,$$

其中

$$\sigma_p/p = 2.1\% \sqrt{1 + p^2}.$$

3 τ 轻子事例的筛选条件

- (1) 两条电荷相反的径迹: $N_{\text{chg}} = 2$, $\Sigma Q_i = 0$, 好的径迹重建质量 $M_{\text{tr}} = 2$.
- (2) 两条径迹的顶点 (x_0, y_0, z_0) 在对撞区域: $|x_0| \leq 1.5\text{cm}$, $|y_0| \leq 1.5\text{cm}$, $|z_0| \leq 15\text{cm}$.
- (3) 不含有任何孤立光子, 孤立光子定义为能量大于 60MeV 并与带电径迹夹角大于 12° 的中性粒子.
- (4) 两条径迹的非共线角满足: $10^\circ < \text{ACOL} < 170^\circ$.
- (5) 不同衰变模式的 $PTES$ 和 $ACOP$ 的截断值满足:

衰变模式	$ACOP$	$PTES$
$\tau\tau \rightarrow e\mu$	$> 10^\circ$	> 0.1
$\tau\tau \rightarrow e\pi$	$> 20^\circ$	> 0.25
$\tau\tau \rightarrow \mu\pi$	$> 20^\circ$	> 0.25
$\tau\tau \rightarrow \mu\mu$	$> 20^\circ$	> 0.15
$\tau\tau \rightarrow \pi\pi$	$> 20^\circ$	> 0.30
$\tau\tau \rightarrow ee$	$> 50^\circ$	> 0.10
- (6) 在飞行时间计数器内有好的重建径迹.

4 电子径迹的判定条件

- (1) 动量 p_e 满足 $0.2\text{GeV}/c < p_e < p_{\text{max}}$.
- (2) 粒子速度 β 满足 $0.8 \leq \beta \leq 1.5$, 这里电子速度应为光速 $\beta = 1$, 由于时间分辨等因素造成了 β 的展宽.
- (3) 在簇射计数器中沉积的能量 E 与动量 p 之比满足 $E/p \geq 0.4$.
- (4) 若动量值在 $0.2\text{GeV}/c$ 与 $0.35\text{GeV}/c$ 之间时, 要求 $\beta \geq 1.0$, 而且根据主漂移室 (MDC) 中的 dE/dx 信息也判为电子.
- (5) 若动量在 $0.35\text{GeV}/c$ 与 $0.70\text{GeV}/c$ 之间时, 要求在 MDC 中的 dE/dx 信息判为电子, 在簇射计数器中沉积能量 $E \geq 0.4\text{GeV}$ 或击中数大于 9.
- (6) 若动量在 $0.7\text{GeV}/c$ 与 p_{max} 之间, 要求 $\beta \geq 0.8$, 在 MDC 中的 dE/dx 信息判为电子, 在簇射计数器中能量沉积 $E \geq 0.5\text{GeV}$, 击中数大于 13, 或 $E \geq 0.6\text{GeV}$, 击中数大于 9.

5 μ 子径迹的判定条件

- (1) 粒子在某层 μ 探测器的击中点满足 $|A_x| \leq 4$; $|A_z| \leq 6$, A_x 和 A_z 分别为此点在 $x-y$ 平面和 z 方向由 MDC 中径迹外推的截距与对应的分辨率 σ_x, σ_z 的比值.

(2) 至少有两层 μ 计数器被击中,若击中的为第二、第三层,则要求为双管击中。

(3) 或至少有一层 μ 计数器被击中且为双管击中。

(4) 动量 p_μ 在 $p_{\mu\text{上限}}$ 和 $p_{\mu\text{下限}}$ 之间时,应满足在簇射计数器中沉积能量 $E \leq 0.45 \text{ GeV}$ 。

部分 π 介子穿过量能器仍能击中 μ 探测器,称之为 Punchthrough π 。对这些 π 的研究发现,大约 10% 为 Punchthrough π ,其中约有 1% 的 π 还能击中二层或二层以上的 μ 计数器。确定的上述判断条件能够区别 Punchthrough π 和 τ 轻子衰变的 μ 。

6 π 介子径迹的判定条件

(1) 动量在 $p_{\min}$ 与 $p_{\max}$ 之间。

(2) 极角 θ 满足 $|\cos \theta| \leq 0.75$ 。

(3) 速度 β 满足 $0.85 \leq \beta \leq 1.5$ 。

(4) 簇射计数器中的击中数小于 11。

(5) 由主漂移室的 dE/dx 信息判为 π 。

(6) 在簇射计数器中的能量沉积 $E \leq 0.4 \text{ GeV}$ 。

(7) 不满足 μ 子径迹的判定条件。

7 测量结果

采用以上判选条件筛选了 τ 质量测量的 12 个能量点的数据,得到了 τ 轻子 6 种主要

表 1 各测量点的能量值、积分亮度值和各衰变道的事例数

测量点	能 (MeV)	积分亮度 (nb ⁻¹)	N_{ee}	$N_{e\mu}$	$N_{e\pi}$	$N_{\mu\mu}$	$N_{\mu\pi}$	$N_{\pi\pi}$
1	1784.19	245.8	0	2	3	0	1	1
2	1780.99	248.9	1	1	0	1	1	0
3	1772.09	232.8	0	0	0	0	0	0
4	1776.57	323.0	0	0	0	0	0	0
5	1778.49	322.5	0	2	2	0	1	0
6	1775.95	296.9	0	0	0	0	0	0
7	1776.75	384.0	0	0	0	0	0	0
8	1776.98	360.8	0	1	1	1	0	0
9	1776.45	794.1	0	0	0	0	0	0
10	1776.62	1109.1	1	1	1	0	1	1
11	1799.51	499.7	2	6	4	2	1	3
12	1789.55	250.0	2	1	1	0	2	1

注: N_{ee} , $N_{e\mu}$, $N_{e\pi}$, $N_{\mu\mu}$, $N_{\mu\pi}$, $N_{\pi\pi}$ 分别为 $\tau\tau \rightarrow e\mu$, $\tau\tau \rightarrow e\pi$, $\tau\tau \rightarrow \mu\mu$, $\tau\tau \rightarrow \mu\pi$, $\tau\tau \rightarrow \pi\pi$, $\tau\tau \rightarrow \pi\pi$ 各衰变道筛选到的事例数。

衰变模式共 49 个事例,表 1 中列出这 6 种衰变模式的事例数和各能量点的束流能量与积分亮度值。

表 2 给出各衰变模式筛选到的事例总数及本底事例数, 双参数拟合得到的探测效率及 τ 轻子质量。

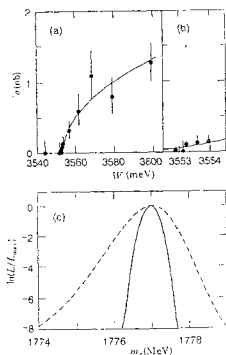


图 2

(a) 阈附近的 τ 产生截面; (b) 图(a)曲线的局部放大; (c) τ 质量最大似然法双参数拟合曲线。
虚线: 只用 $e\mu$ 衰变的事例拟合; 实线: 用 6 个衰变的事例拟合。

表 2 由 6 种衰变模式筛选的 τ 轻子事例数及双参数拟合结果

衰 变 道	$e e$	$e \mu$	$e \pi$	$\mu \mu$	$\mu \pi$	$\pi \pi$
筛选事例数	6	14	12	4	7	6
本底事例数	0.02	0.10	0.16	0.16	0.20	0.18
双参数拟合效率 (%)	$15.6^{+7.2}_{-5.5}$	$14.2^{+4.7}_{-3.9}$	$18.9^{+6.9}_{-5.5}$	$7.5^{+5.2}_{-3.5}$	$10.9^{+5.4}_{-4.0}$	$30.8^{+16.5}_{-12.6}$
双参数拟合 τ 质量 (MeV)	$1776.88^{+0.22}_{-0.23}$					

由表 1、表 2 的值进行双参数的最大似然法拟合, 得到 τ 轻子质量及其统计误差为

$$m_\tau = 1776.88^{+0.22}_{-0.23} \text{ MeV}$$

系统误差的分析方法与文献[1]相同,本文在此仅列出结果。表 3 给出系统误差来源及数值。

表 3 系统误差来源和相应的数值

误差产生源	误差值 (MeV)
1. 探测器接收效率及亮度计算的不确定性	+0.10 -0.11
2. BEPC 能量的不确定性	±0.09
3. 束流能散度的不确定性 (0.8 MeV) 引起的误差	±0.02
4. 各衰变道本底计数之和(约为 1)引起的误差	±0.10
5. Monte Carlo 模拟测量方案本身带来的系统偏差	0.10—0.22
误差总和	+0.20 -0.17

8 τ 轻子质量精密测量结果及讨论

由 τ 轻子的 6 个主要衰变模式的测量得出:

$$m_{\tau} = 1776.88^{+0.22+0.20}_{-0.23-0.17} \text{ MeV}$$

采用 6 个衰变模式的事例进行拟合,使参与分析的事例总数增加到文献[1]的 3.5 倍,统计误差降低到系统误差同一水平,总误差仅为 $^{+0.30}_{-0.31} \text{ MeV}$ 。这个结果比粒子物理手册

1992 年版本的数据 $\left(^{+2.7}_{-3.6} \text{ MeV}\right)$ 改进了一个数量级。

用本文得到的 τ 轻子质量值及最新的 τ 轻子衰变分支比 $B_{\tau} = (17.89 \pm 0.11)\%$, 和 τ 轻子寿命实验值^[4] $\tau_{\tau} = (293 \pm 9 \pm 12) \times 10^{-15} \text{ s}$, 得出弱耦合常数比为:

$$\left[\frac{G_F}{G_{\mu}}\right]^2 = 0.991 \pm 0.012;$$

$$\left[\frac{G_F}{G_{\mu}}\right] = 0.995 \pm 0.006.$$

μ - τ 轻子普适性在一个标准偏差内是成立的。

北京谱仪合作组感谢对撞机岗位上和支持实验的各研究室、工厂车间的同志们,特别是计算机中心的全体工作人员。理论室的黄海、吴济民等教授参与了许多物理理论问题的讨论计算和参数的确定,在此向他们表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] BES 合作组,高能物理与核物理,16(1992)865.
- [2] Measurement of the Mass of τ lepton, BES collab., *Phys. Rev. Lett.*, 69 (1992) 3021.
- [3] Review of particle properties, *PDG. Phys. Rev.*, D45(1993).
- [4] Experimental Results on τ physics, J.J. Gomez Cadenas, CERN-PPE/94-B.1994.

Precise Measurement of τ Mass

BES Collaboration

Received 7 September 1994

Abstract

Pairs of τ lepton produced near the threshold have been studied in $e\mu$, ee , $e\pi$, $\mu\mu$, $\mu\pi$, $\pi\pi$ final states with the data taken by BES detector at BEPC collider in 1992. The obtained τ mass is $1776.88^{+0.22+0.20}_{-0.23-0.17}$ MeV by fitting data with likelihood method.

Key words τ mass measurement, event selection, tracking identify.