

笔者感谢杨福家教授对本工作的关心和支持。

- [1] S. Shi et al., *Z. Phys. A*, **342**(1992), 369.
[2] H. V. Klapdor et al., *Atomic Nucl. Data Table*, **31**(1984), 81;
K. Takahashi et al., *Atomic Nucl. Data Table*, **12**(1973), 101.
[3] D. Z. Yin et al., *J. Radioanal. nucl. chem. Letters*, **175-3**(1993), 207.
[4] Table of Isotope 7th edition, Edited by C. M. Lederer and V. S. Shirley.
[5] Chart of the Nuclides—Srasbourg 1992, France. Edited by M. S. Antony et al., Chart of the Nuclides 1992, Japanese Nuclear Date Committee and Nuclear Data Center, Edited by T. Horiguchi et. al.
[6] Fu Deji et al., *Chinese Phys. Lett.*, **10-5**(1993), 267.

LEP 对撞机上 τ 粒子寿命的最新测量结果¹⁾

杨长根 陈和生 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

报道了 τ 粒子寿命的最新测量结果, 着重介绍了我们参加的 L3 实验组的测量方法和结果。最新测量结果的 τ 寿命平均值为 $293.9 \pm 3.5\text{fs}$, 该结果与标准模型轻子普适性理论的假定相一致。

关键词 寿命, 碰撞参数, 衰变长度

Abstract

New results for the τ lifetime are reported. The average τ lifetime is $293.9 \pm 3.5\text{fs}$, which is consistent with the lepton universality hypothesis.

Key words lifetime, impact parameter, decay length

一、精确测量 τ 粒子寿命的意义

τ 粒子是 1975 年在美国斯坦福加速器实验室 (SLAC) 的正负电子对撞机 SPEAR 上, 由 MARK-I 实验组在 $e^+e^- \rightarrow e^+\nu_e\mu^+\bar{\nu}_\mu$ 的反应中发现的, 它的质量约为 1.7GeV 。

随后进行的大量实验表明, τ 粒子是自旋为 $1/2$ 的费米子。它不参与强相互作用。按照 $SU_2 \times U_1$ 的标准模型, 它与 τ 中微子组成第三代轻子。实验上, 对 τ 中微子的存在及其性质仍然必须作进一步的研究。

轻子是点粒子。在目前实验达到的能量范围内, 没有发现轻子有任何内部结构。然而 τ 轻子的质量大约是有复杂内部结构的质子的二倍, 因此对 τ 粒子各方面的性质进行深入研究, 检验它是否严格遵循标准模型, 具有特殊重要

的意义。从某种意义上讲, 如果存在某种违背标准模型的轻子现象, τ 粒子就是最可能发生这种现象的轻子。 τ 粒子质量重, 可能的衰变道很多, 寿命短, 因而对它的衰变性质的测量比较困难和复杂, 至今仍有不少悬而未决的问题。我们对衰变性质的测量远不及对 μ 子衰变性质的测量那样深入和精确。因此, 十多年来, 对 τ 衰变的实验研究和理论计算, 一直是粒子物理中十分活跃的领域。

近年来, τ 衰变中的疑难问题之一是它的寿命、质量和到轻子道衰变分支比三者之间的关系。标准模型预言了这三者之间有明确的关系:

$$R_\tau = \left(\frac{G_\tau}{G_\mu}\right)^2 = \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5 \frac{\tau_\mu B_1}{\tau_\tau f},$$

1) 国家自然科学基金资助项目。

式中 l 表示 e 或 μ 轻子, f 是相空间质量修正因子, 对 $l=e, f=1$; 对 $l=\mu, f=0.9728$. R_g 表示费米耦合常数 G_e 和 G_μ 之比的平方. 标准模型理论中假定了轻子 e, μ 和 τ 的普适性, 所有轻子的费米耦合效应相同, 即 R_g 的值应为 1.0. 但长期以来, R_g 的实验测量结果小于 1.0, 与 1.0 有二个标准差的偏离. 这样, 通过精确实验进一步检验轻子普适性, 便成为很重要的研究课题. 从上式可以看到, 对于检验轻子普适性假定来说, τ 的质量、寿命和衰变分支比的精确测量三者是同样重要的.

不久前, 北京正负电子对撞机上的 BES 实验组精确地测量了 τ 的质量. 与此同时, 日内瓦欧洲核子中心的大型正负电子对撞机 LEP 上的四个实验对另两个重要的物理量, 即 τ 的寿命和 τ 的轻子衰变道分支比进行了精确的测量. 本文报道 τ 粒子寿命的最新测量结果, 并着重介绍我们参加的 L3 实验组的测量方法和结果.

二、L3 实验组测量 τ 寿命的方法

测量粒子寿命的方法之一是测量从产生顶点到衰变顶点的距离, 即衰变距离. 由衰变距离 L 和粒子的能量就可以按相对论公式算出它的寿命.

τ 末态的可能衰变道很多. 按衰变产物的带电粒子数目区分, τ 衰变主要模式是: 一根带电径迹 (86.1%), 三根带电径迹 (13.8%) 和五根带电径迹 (约为 0.1%). 五根带电径迹的衰变分支比很小, 不能用来作 τ 寿命的测量. 一、三根带电径迹的 τ 寿命测量方法主要有: (1) 碰撞参数法 (如图 1), 用于 τ 衰变末态只有一根带电径迹的情形, 这时测量 τ 衰变的末态径迹与 τ 产生顶点的垂直距离. 这个垂直距离叫碰撞参数 d , 它与衰变距离 L , τ 衰变的带电径迹与 τ 原初飞行方向间的夹角 ϕ 有关即 $d = L \times \sin \phi$; (2) 衰变距离法, 用于 τ 衰变末态有三根带电径迹的情形, 由末态的三根带电径迹可以拟合 τ 的衰变顶点, 测量从 τ 产生顶点到衰

变顶点之间的距离 L .

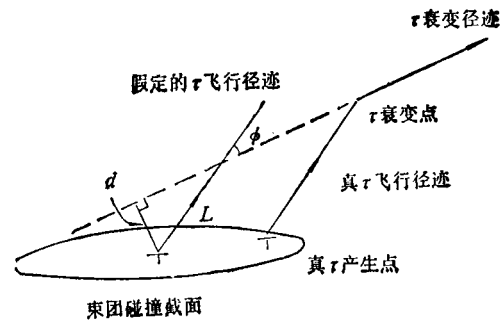


图 1 测量 τ 寿命的碰撞参数法

和早期 τ 寿命的测量相比较, LEP 实验的特点是产生的 τ 对能量高. LEP 目前运行的能区是 91 GeV 左右, 并在 Z^0 的共振峰处, 因此大量的 τ 对通过 $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$ 产生. 由于在质心系能量为 91 GeV 左右时, 末态强子事例的带电粒子多重数一般在 30 个以上, 而一个 τ 衰变至多有五个带电粒子, 因此在 LEP 能区进行 τ 物理研究, 可以很容易地排除来自强子事例的本底.

L3 探测器是为 LEP 正负电子对撞机而设计的四个大探测器之一, 它主要用于轻子、光子动量及其位置的精确测量, 同时也测量强子喷注及事例顶点. 我们利用 L3 探测器上 1991 年测量的全部 5983 对 $\tau^+\tau^-$ 事例, 对碰撞参数法作了改进后, 和衰变距离法共同给出 τ 寿命测量的精确结果.

τ 粒子的寿命非常短 ($\sim 3 \times 10^{-13}$ s), 尽管在 Z^0 能区产生的 τ 对的洛伦兹因子大, 它在束流管道内就已经衰变 (飞行距离约为 2.6 mm). 因此对 τ 衰变的末态径迹需要内推延伸至束流管道内, 接近束流束团碰撞顶点的位置. 我们把径迹在顶点位置的分辨叫做径迹的顶点位置分辨. 为改善径迹的顶点位置分辨, 现在的探测器都引入了高精度的顶点探测器. L3 的内径迹室兼顾了径迹的动量测量和顶点位置测量. 我们对内径迹室作更进一步的顶点位置分辨刻度, 并利用高精度的电子能量和 μ 子动量测量重新拟合带电径迹后, 得到 L3 探测器对 τ 末态衰变的轻子径迹顶点位置分辨为 $59 \mu\text{m}$.

τ 对的产生位置假定为正负电子束团碰撞的碰撞区中心位置。这个位置和加速器束团的稳定性有关。假定每一次加速器束团注入后,束团中心位置不再变化。我们对每一次注入,利用强子事例的多根末态径迹计算事例的产生点,再计算多个事例产生点的平均位置来给出碰撞束团的中心位置。共计算了约 150 个注入的碰撞束团中心位置。

束团碰撞区的束团密度成正态分布。这个正态分布的标准差表示了束团碰撞区的大小,可以对 Bhabha 和双 μ 子事例,通过拟合末态径迹与束团碰撞区中心位置的距离分布来得到。束团截面的 x, y 方向分布的标准偏差相差较大,因而在拟合束团碰撞区大小时,我们考虑不同 ϕ 角径迹的距离分布,得到碰撞束团密度分布的标准差。实际上的 τ 产生顶点按照几率大小可以发生在碰撞区的任意位置。我们假定 $\tau^+\tau^-$ 对产生在束团碰撞中心位置,而把上述正态分布的标准差作为产生顶点的误差放入碰撞参数的拟合中。

碰撞参数用最大似然法来拟合。最大似然函数由指数分布的衰变和高斯分布的测量误差部分卷积而得。测量误差中包括径迹室的顶点位置分辨误差、带电粒子与束流管道的多次散射引起的位置分辨误差和碰撞束团大小的误差。因为衰变距离大的事例的碰撞参数也大,因而衰变距离的指数分布中这些事例在最大似然函数里占的权重也大,为按照衰变事例的多少来进行拟合,我们采用了分道的最大似然函数拟合方法。

衰变距离的拟合也同于碰撞参数的拟合。在衰变距离计算的同时,考虑了碰撞束团和衰变顶点计算的误差。对于高能量的加速器,产生的 τ 粒子能量高时,由它衰变的末态三个带电粒子间的夹角也很小,因此衰变顶点的计算误差较大。粗略的关系是由三个末态径迹计算的衰变顶点的位置误差三倍于每根径迹的顶点位置的测量误差。

碰撞参数、衰变距离的大小与 τ 寿命大小的关系可用蒙特卡罗的方法模拟得到。模拟产

生不同寿命的 τ 粒子,用与实验数据相同的拟合方法拟合不同寿命 τ 粒子的碰撞参数和衰变距离,得到碰撞参数、衰变距离大小随 τ 寿命的变化关系,比较实验测量的碰撞参数、衰变距离的大小,即可得出 τ 寿命的测量结果。

对 τ 寿命测量的系统误差,我们也进行了全面的考虑,特别是利用 L3 内径迹室结构,对由漂移速度和零时间引起的系统误差作了系统的研究。得到的 τ 粒子寿命测量结果为 293 ± 9 (统计误差) ± 12 (系统误差) fs。

三、LEP 各实验组最新结果

至 1992 年初,LEP 上其他三个实验组都已发表了 1991 年数据的 τ 粒子寿命测量的分析结果。各实验组的 1991 年的测量结果均比 1990 年的测量结果有明显的改进。ALEPH, DELPHI, OPAL 三个实验组的主要改进是探测器的内层装入了硅微条探测器。L3 实验组的主要改进是中心径迹室的顶点位置分辨和拟合方法。L3 探测器也在 1992 年底装入了硅微条探测器,并已开始运行,可望不久测得比现在更好的结果。

测量方法上,OPAL 实验组采用了切割事例碰撞参数分布的方法,碰撞参数分布最小和最大的尾端各切掉总事例的 5%,总共 10% 的事例,然后求剩余事例碰撞参数分布的平均值。这个方法的好处是平均的碰撞参数值不依赖于蒙特卡罗很难模拟的处于碰撞参数分布尾巴上的事例,而且这些事例对碰撞参数平均值的影响较大。但这也是这个方法的缺点之一,因为尾巴部分的事例对 τ 寿命的测量要比碰撞参数小的事例更灵敏。

ALEPH 实验组采用了另一种变通的碰撞参数法测量 τ 寿命,对 $\tau^+\tau^-$ 分别衰变为末态只有一根带电径迹的事例,计算碰撞参数的差值或和值的平均值,利用它与 τ 寿命成正比的关系直接测量 τ 寿命。ALEPH 实验组采用的方法的优点是它不依赖于蒙特卡罗的模拟,可以直接得到 τ 寿命的结果,但由于两根末态径

迹的碰撞参数分别都包含了束团碰撞区中心位置的误差,因而碰撞参数的差值或和值的误差为束团中心位置误差的 $\sqrt{2}$ 倍。

到目前为止, LEP 四个实验组的 τ 粒子寿命测量结果如表 1, 综合的 τ 粒子寿命测量结果为 $293.9 \pm 3.5\text{fs}$ 。

表 1 LEP 实验组的 τ 寿命测量结果

实验组	数据	τ 粒子寿命 (fs)
ALEPH	90+91	295 ± 6
DELPHI	91	298 ± 7
L3	91	293 ± 15
OPAL	90+91	290 ± 6

四、 τ 粒子寿命新结果的意义

在给出 τ 粒子寿命测量结果的同时, LEP

表 2 LEP 实验组的 τ 分支比测量结果

实验组	数据	分支比 $B_e(\%)$	分支比 $B_\mu(\%)$
ALEPH	89+90+91	18.20 ± 0.35	17.61 ± 0.33
DELPHI	91	17.62 ± 0.69	17.73 ± 0.62
L3	91	17.90 ± 0.57	17.60 ± 0.57
OPAL	90+91	17.50 ± 0.42	16.80 ± 0.42

四个实验组也给出 τ 粒子 e, μ 衰变分支比的测量结果 (见表 2)。结合 $\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}, \tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}$ 道的分支比关系式 $B_\mu = 0.9728B_e$, 得到如下结果: $\bar{B}_1 = (17.89 \pm 0.16)\%$ 。

在 1990 年之前, 由粒子数据表给出的 τ 质量、寿命、分支比计算的 R_g 值为 0.95 ± 0.03 。1992 年, BES 精确的 τ 质量测量值为 $1776.9 \pm 0.5\text{MeV}$, 使得 R_g 的值接近了轻子普适性的理论值, $R_g = 0.965 \pm 0.026$ 。在得到精确的 LEP τ 粒子寿命测量结果后, 我们同时将 BES 的 τ 质量和 LEP 的 τ 寿命结果放入到理论公式中, 得到 $R_g = 0.994 \pm 0.016$, 即 τ 粒子寿命和衰变分支比的实验结果与轻子普适性理论相一致。图 2 为 τ 质量、寿命和衰变分支比测量结果与标准模型轻子普适性理论比较, 两者符合得很好。

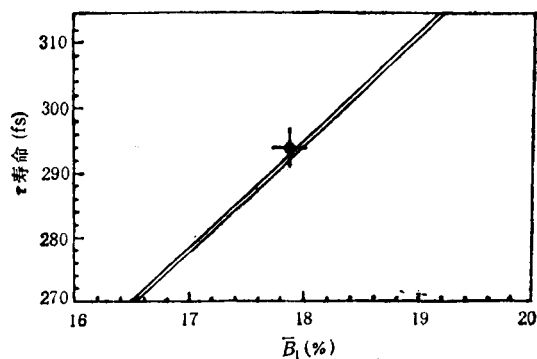


图 2 LEP 测量的 τ 寿命的新结果与 τ 质量、衰变分支比的关系

随着事例统计的增加, LEP 上 τ 粒子性质的测量将给出更好的结果。

(上接第 219 页)

- [2] A. P. DeFonzo, M. Jarwala and C. R. Lutz, *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987), 1155.
- [3] D. H. Auston, K. P. Cheung and P. R. Smith, *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984), 284.
- [4] Ch. Fattinger and D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.*, **53** (1988), 1480.
- [5] B. B. Hu, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990), 886.
- [6] X.-C. Zhang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990), 1011.
- [7] D. R. Dykka, et al., OSA Proceedings on Ultrafast Electronics and Optoelectronics, J. Shah and U. Mishra ed., **14** (1993), 108.
- [8] X.-C. Zhang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992), 2303.
- [9] D. Grischkowsky et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **77** (1990), 2006.
- [10] W. J. Walecki *Appl. Phys. Lett.*, **63** (1993) 250.
- [11] H. G. Roskos et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992), 2216.
- [12] P. C. M. Planken et al., *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992), 2009.
- [13] P. C. M. Planken et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992), 3800.
- [14] H. Hamster et al., OSA Proceedings on Ultrafast Electronics and Optoelectronics, J. Shan and U. Mishra ed., **14** (1993), 116.
- [15] D. W. Van Der Weide et al., *Electron. Lett.*, **27** (1991), 1412.