

# $\tau$ 粒子质量的最新数据

郑志鹏

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

北京谱仪合作组最近获得  $\tau$  粒子质量的最新结果为

$$m = 1776.9 \pm 0.5 \text{ MeV.}$$

该值比以前的粒子表给出值小 7.2 MeV, 精度提高了 5—7 倍, 为解决  $\tau$  寿命、衰变分支比和轻子普适性理论的矛盾向前迈进了一大步。

## Abstract

A new measurement by the Beijing Spectrometer Group has obtained a value of  $1776.9 \pm 0.5 \text{ MeV}$  for the mass of the  $\tau$  particle. This value is less than that given by the PDG (Particle Data Group) data by 7.2 MeV. The measurement precision is 5 times better than previously, and the result is a big stride forward in resolving the contradiction among the  $\tau$  lifetime, the  $\tau$  leptonic branching ratio and the lepton universality

## 一、 $\tau$ 粒子质量精确测量的意义

众所周知, 在物理学中, 质量是一个十分重要的量。高能物理是研究基本粒子性质及其相互作用规律的学科, 而区别现有的 400 多种粒子的基本量之一是质量, 它和自旋、宇称等量子数可以用来表征粒子的特性。

$\tau$  是 1975 年发现的粒子, 它和电子、 $\mu$  子以及相应的中微子构成轻子类, 属于第三代轻子。虽然它的质量并不轻, (是电子的 3500 倍, 是质子的 1.9 倍), 但由于其特性与电子、 $\mu$  子相似, 因而都列入“轻子”类, 称为重轻子。为了测定  $\tau$  粒子的质量, 10 年前曾有 DELCO, MARKII, DASP 和 SPEC 等四个探测器做过实验。其方法皆采用测量远离  $\tau$  产生阈的截面, 再拟合这些实验值, 而求得  $\tau$  质量, 这样得到的误差较大。对后三个实验, 误差为 10—20 MeV (百万电子伏)。DELCO 的精度最好, 误差也达 3—4 MeV。综合这四个实验, 粒子表给出的

$\tau$  粒子的质量值为

$$m_{\tau} = 1784.1 \pm 7.2 \text{ MeV.}$$

这样的精度远远满足不了高能物理研究的需要。

特别是近两年来,  $\tau$  粒子寿命和  $\tau$  粒子衰变分支比的实验值似乎与轻子普适性理论相矛盾, 而轻子普适性理论 [即轻子 (电子、 $\mu$  和  $\tau$  粒子) 的弱相互作用是相同的] 是目前高能物理的“标准模型”理论的基础之一, 迄今为止与实验符合较好。难道  $\tau$  粒子寿命、 $\tau$  粒子分支比的实验是对轻子普适性理论的挑战吗? 自然, 这是高能物理界十分关注的问题。

按轻子普适性理论,  $\tau, \mu$  的弱作用耦合常数 (费米弱耦合常数) 应该相等, 即

$$\frac{G_{\tau}}{G_{\mu}} = 1 \text{ 或 } \frac{G_{\tau}^2}{G_{\mu}^2} = 1, \quad (1)$$

$$\frac{G_{\tau}^2}{G_{\mu}^2} = \frac{\tau_{\mu}}{\tau_{\tau}} \left( \frac{m_{\mu}}{m_{\tau}} \right)^5 B (\tau \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_{\tau}), \quad (2)$$

其中  $\tau$  为衰变寿命,  $m$  为质量,  $B$  为  $\tau \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_{\tau}$  的分支比。

而按 1990 年粒子表所载入的  $\tau$  粒子寿命、 $\tau$  粒子分支比和  $\tau$  粒子质量的值计算得到的

$$\frac{G_1^2}{G_2^2} = 0.936 \neq 1, \quad (3)$$

如果真是这样的话, 将是对轻子普适性理论的一个冲击。但在下结论前, 需要检验过去给出的  $\tau$  粒子质量值是否对。

## 二、北京谱仪探测器

就是在这样一个动机下, 北京谱仪 (BES) 合作组从 1991 年 8 月至 1992 年 2 月对  $\tau$  质量进行了精确测量。该合作组由 100 多名我国物理学家、工程师和 30 名美国物理学家组成。他们利用 BES 探测器, 记录和分析产生的  $\tau$  事例。

BES 是一个长、宽、高各 6m 多, 重 500t 的大型设备, 由中心漂移室, 主漂移室, 飞行时间计数器, 簇射计数器,  $\mu$  鉴别器以及螺线管线圈组成。它像人们的眼睛可以分辨、识别那些小到  $10^{-16}\text{cm}$  的微观粒子。

BES 是工作在北京正负电子对撞机 (BEPC) 上的唯一的高能物理探测器, 从 1990 年开始运行, 在  $\tau$  质量测定以前已收集到 900 万  $J/\psi$  事例, 并获得一些初步结果。

## 三、 $\tau$ 质量的测量

### 1. 方法

BES 合作组首次采用在  $\tau$  产生阈扫描逐步逼近阈值的方法, 逐步增大对撞机正、负电子束的能量以接近阈值。根据爱因斯坦质、能公式  $E = mc^2$ , 只有当正、负电子 ( $e^+$ ,  $e^-$ ) 束总能量与  $\tau$  质量相当时, 才可能产生一对  $\tau$  粒子, 即  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 。我们称产生和不产生  $\tau$  的界限为“阈”。当我们精确地调节正、负电子束的能量, 不断缩小产生与不产生之间的能量间隔, 就可以找到“阈”, 即相应  $\tau$  质量值。我们用最大似然法来拟合真值。拟合中采用双参数 ( $\tau$  质量和探测效率) 法。这样可以得到较好的精度。

北京正负电子对撞机是目前运行的唯一可接近  $\tau$  产生阈值的正负电子对撞机, 我们充分利用了这一优势。

### 2. 截面的精确计算

在最大似然拟合过程, 需要精确知道  $\tau$  产生截面的公式。我们仔细考虑了库仑效应, 终态粒子的辐射和自旋效应, 初态的辐射修正以及真空极化和束流能散度的影响等, 提高了拟合精度。

### 3. 用双标记法选择 $\tau$ 粒子对

严格选择  $\tau$  事例, 排除其他本底是实验的关键问题。 $\tau$  是一个不稳定的粒子, 在它产生之后的  $3 \times 10^{-13}\text{s}$  就衰变为其他粒子。 $\tau$  衰变模式很多, 我们只选取  $\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau$  和  $\tau \rightarrow \mu\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$ , 所谓  $e\mu$  事例的双标记方法来确认  $\tau$  粒子对 ( $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$  分别为反电子中微子, 反  $\mu$  中微子,  $\nu_\tau$  为  $\tau$  中微子。这些中微子和反中微子是不带电的, 都不能直接观察到, 而  $e, \mu$  是带电的, 较容易记录下来)。这种方法可以有较好的信号-噪声比, 较高的对本底的排斥率 (实验中本底排斥率为百万分之一点四)。为了选取上述要求的  $\tau$  衰变事例, 区别其他衰变模式和本底, 我们设置了严格的筛选条件, 保留所需信号, 排除本底。在所测到的 7 个  $e\mu$  事例中, 混入本底的可能性只有 0.2 个事例的几率。

### 4. 对撞机和谱仪的稳定性

为了确定对撞机和谱仪的长期稳定性, 在  $\tau$  质量的测量过程中, 我们对  $\tau$  产生阈前后的  $J/\psi$  粒子和  $\psi'$  粒子进行反复扫描。最后确定对撞机和谱仪的长期稳定性非常好, 偏离小于 0.2MeV, 并且具有非常好的能量线性。

对撞机的高亮度 ( $5 \times 10^{30}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、较小的束流能散度 (1.4MeV) 以及谱仪较好的粒子分辨本领为  $\tau$  质量测量提供了极有利条件。

北京正负电子对撞机和北京谱仪从 1991 年 11 月到 1992 年 2 月连续运行, 共收集了  $5000\text{nb}^{-1}$  的积分亮度, 测量了 12 个实验点, 胜利完成了  $\tau$  质量的测量。经过紧张、严格的数据分析之后 (见图 1), 得到  $\tau$  质量值为

$$m_\tau = 1776.9^{+0.3}_{-0.3} \pm 0.2\text{MeV} \quad (4)$$

或

$$m_\tau = 1776.9 \pm 0.5 \text{ MeV},$$

其中

$+0.4$   
 $-0.5$  MeV 为统计误差,  $\pm 0.2$  MeV 为系统误差。

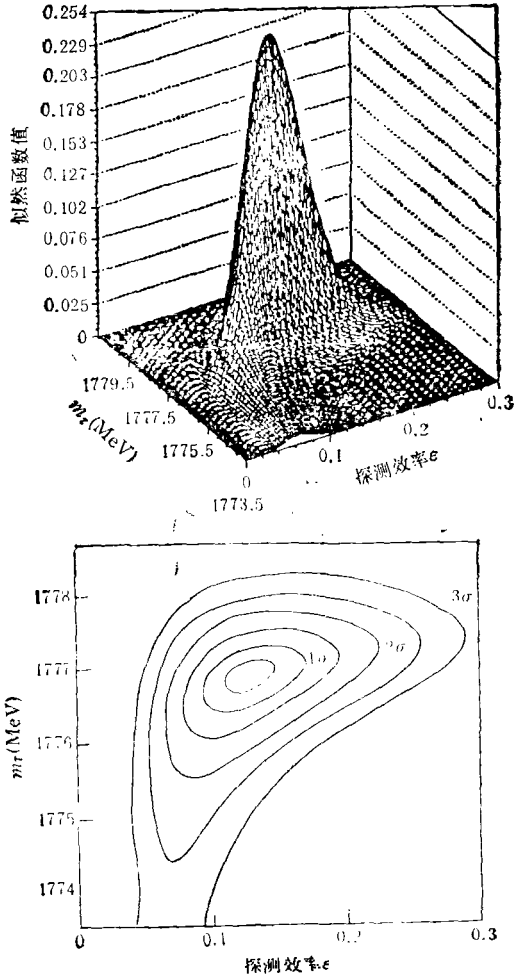


图1 双参数拟合法测量到的 $\tau$ 质量值

该结果先后在美国物理学会年会和海外华人物理学会上报告, 得到了国际高能物理界的关注和好评。

#### 四、新结果的含意

1. 我们所测到的新的 $\tau$ 质量值比以前使用

的粒子表数值小了 7.2 MeV, 这个值已超过了两倍偏差, 说明这是一个较大的修正。

2. 我们测的 $\tau$ 质量误差为 0.5 MeV, 比粒子表给出的精度提高了 5—7 倍。无疑今后粒子表将采用这一数值。

3. 按我们给出的新的 $\tau$ 质量值, 已有的 $\tau$ 寿命和衰变分支比的实验数据更接近轻子普适性理论。

$$\frac{G_\tau^2}{G_\mu^2} = 0.96, \text{ 即 } \frac{G_\tau}{G_\mu} = 0.98. \quad (5)$$

此值更接近于 1, 见图 2。

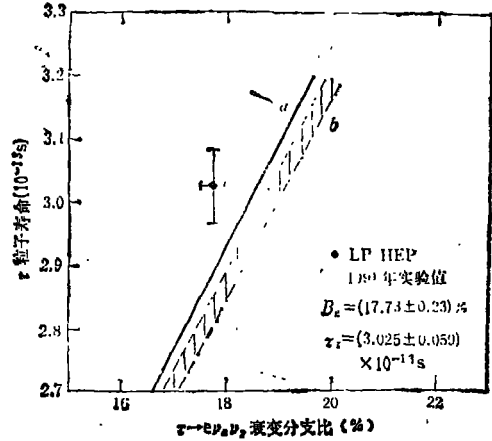


图2 我们测得的 $m_\tau$ 值(宽度为 $\pm 1\sigma$ , 左边黑色线 a) 与原来粒子表给出的 $m_\tau$ 值(宽度为 $\pm 1\sigma$ , 右边阴影线 b) 的比较(都假定轻子普适性理论成立)

4.  $\tau$ 质量值直接影响到 $\tau$ 中微子质量, 过去 ARGUS 组测量到 $\tau$ 中微子质量小于 35 MeV, 按新的 $\tau$ 质量值,  $\tau$ 中微子质量上限将降到 30 MeV 左右。

5. 需要 $\tau$ 寿命和分支比的进一步实验数据, 看来过去的实验-理论不相符的问题根源不在 $\tau$ 质量本身。

BES 合作组所测得的 $\tau$ 质量新数据为解决 $\tau$ 寿命, 分支比和理论偏离的问题往前迈进一步, 问题的最终解决还需高能物理界各方面的配合与努力。

高