

# τ 重轻子物理

张家铨

## 一、引言

τ 重轻子的发现经过了一段坎坷不平的历程。从本世纪六十年代以来，在实验方面和理论上就有很多人研究重轻子的问题。

自从 μ 子被发现并确认是属于轻子一类以后，为什么在自然界里要有 μ 子的存在一直是一个谜，因为 μ 子和电子 (e<sup>-</sup>) 的区别仅仅只是质量和轻子数不同。

从实验物理学家的观点看来，既然自然界中有 μ 子存在，

就可能存在比 μ 子更重的轻子——重轻子。重轻子的发现也许会对解释 μ 子存在的理由和 μ 子与电子 (e<sup>-</sup>) 的质量差提供一些线索。在六十年代就有人作实验来寻找重轻子，但均未获取到证据。

在理论方面，六十年代以来，Bjorken, Tsai 等著名理论学家，就关于重轻子的产生机制和衰变性质等进行了仔细的研究。

1975 年 SLAC-LBL 合作组宣布，在 SPEAR 上用磁探测器 (Mark I) 观测到重轻子产生的信号，但并未立即得到人们的承认。直到 1977 年汉堡光子、轻子会议时，对 τ 重轻子的发现还持怀疑或保留态度。出现这个情况的主要原因是，τ 重轻子的产生阈能和粲粒子 (D 介子) 的产生阈能很接近。

1977 年末，DASP 组宣布了在 DORIS 上获得的实验结果。该实验是在粲粒子的产生阈能之下在

ψ' (3685 MeV) 的能量附近作的，也观测到了 τ 重轻子的衰变信号，这时大家才消除了最后的怀疑。

τ 重轻子为什么能归入轻子类规范理论把所有的基本粒子分

为费米子和规范玻色子两大类。费米子是构成物质的基本成分，包括夸克和轻子。规范玻色子就是传递相互作用的传播子。按此分类，属于轻子的成员有：e<sup>-</sup>、ν<sub>e</sub>、μ 和 ν<sub>μ</sub> 以及它们的反粒子。轻子的基本特性是：只有弱相互作用，荷电轻子还有电磁相互作用，但都没有强相互作用；它们都具有类点性，是类点粒子；它们的自旋值为半整数。根据对 τ 的仔细研究表明，τ 是属于轻子类。

实验结果证明 τ 具有轻子的基本特性。

(1) τ 的产生截面 σ(e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> → τ<sup>+</sup>τ<sup>-</sup>) 对能量的依赖关系说明 τ 是类点粒子，并且自旋 S = 1/2。τ = 1/2 的产生截面与能量的关系如下图所示。由图中的实验数据和量子电动力学理论可以给出 τ 的质量值是 m<sub>τ</sub> = 1782 ± 3 MeV

(2) 事例中的 e 或者 μ 的动量分布与母粒子的三体弱衰变一致。

观测的事例是：

$$e^+e^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp + \text{丢失能量}$$

在这类事例中，丢失能量就是没有探测到的粒子所带走的能量。根据实验装置的设计和实验的安排，没有探测到的粒子不是带电粒子，也不是光子。根据测量的丢失能量谱和丢失动量谱，在每个事例中有 4 个粒子没有被探测到。由于测量的 e<sup>±</sup> 或者 μ<sup>∓</sup> 的动量谱分布与母粒子的三体弱衰变一致，所以，这类事例只能是由下列过程产生的。

$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-\rightarrow e^\pm\mu^\mp + \text{丢失能量(4个中微子)}$$

这样，轻子类的成员增加到 6 个，即 e<sup>-</sup>、ν<sub>e</sub>、μ<sup>-</sup>、ν<sub>μ</sub>、τ<sup>-</sup> 和 ν<sub>τ</sub> 以及它们的反粒子。标准模型理论预言，在轻子数目和夸克数目之间存在对称性，即

$$\text{轻子: } \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

$$\text{夸克: } \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$$

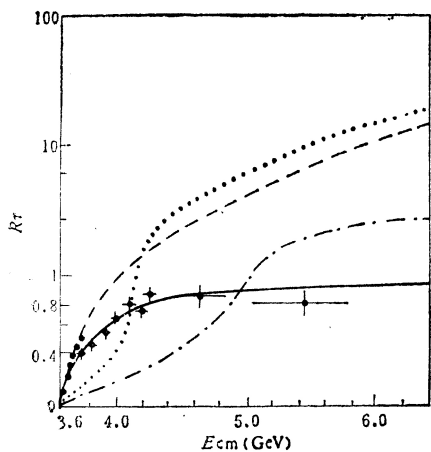
τ 重轻子和 τ 粒子的发现对标准模型理论是有力的支持。但是，目前 ν<sub>τ</sub> 实验上还没有最后确定，t 夸克也还没有发现。

## 二、τ 重轻子物理的现状

### 1. τ 重轻子和 ν<sub>τ</sub> 中微子的基本性质

根据目前实验上对 τ 重轻子和 ν<sub>τ</sub> 中微子的研究，它们的基本性质列于表 1。

这里 τ<sup>-</sup> 的质量，自旋值和类点性以及 ν<sub>τ</sub> 的自旋值都是由上面图中的数据得到的。ν<sub>τ</sub> 中微子的质量限是测量衰变 τ<sup>-</sup> → e<sup>-</sup>ν<sub>e</sub>ν<sub>τ</sub> 中电子的能谱得到的。而 τ<sup>-</sup> 的寿命是测量衰变顶点得出的结果。在标准模型的假设下，τ 与弱带电流的耦合强度跟 μ 相同。那末，理论给出 τ 的寿命表示式为



τ 产生截面与能量的关系；——S = 1/2, 类点；..... S = 1 (K = 1), 类点；- · - · - S = 1 (K = 0), 类点；- - - - S = 3/2, 类点

表 1  $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$  的基本性质

特征量 粒子	质量 $m(\text{MeV})$	寿命 $t$ (秒)	自旋 $s$	$\tau$ 轻子数	类点性
$\tau^-$	$1782^{+3}_{-4}$	$(4.6 \pm 1.9) \times 10^{-13}$	$\frac{1}{2}$	+1	$< 10^{-16}$ 厘米
$\nu_\tau$	$< 250$		$\frac{1}{2}$	+1	

$$t_\tau = B(\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau) \cdot \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^\delta \cdot t_\mu$$

式中  $t_\mu$  是  $\mu$  子的寿命,  $m_\mu$  是  $\mu$  子的质量,  $m_\tau$  是  $\tau$  重轻子的质量. 由测量得到的衰变分支比  $B(\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau) = 0.175 \pm 0.011$  得到  $t_\tau = (2.8 \pm 0.2) \times 10^{-13}$  秒. 可见由测量衰变顶点得到的结果与由标准模型理论得到的值是一致的.

关于  $\tau^-$  和  $\nu_\tau$  关联以及  $\tau$  轻子数的问题有下列两个实验证据.

(1) 在  $e\mu$  事例中,  $e$  和  $\mu$  的动量分布与三体衰变相符合, 而且在  $e\mu$  事例中没有其他带电粒子或者光子被探测到. 因此, 三体衰变只能是:

$$\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau, \quad \tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$$

(2) 如果  $\tau$  没有相关联的中微子  $\nu_\tau$ , 那末  $\tau$  只能通过  $e, \mu$  或者它们的混合衰变. 理论给出  $\tau$  衰变成三个带电轻子的分支比  $B \simeq 5\%$ ,  $\tau$  的寿命  $t_\tau > 10^{-11}$  秒. 但是实验上测量得到的结果是  $B < 0.6\%$ ,  $\tau$  的寿命  $t_\tau \simeq (4.6 \pm 1.9) \times 10^{-13}$  秒. 这实验结果表明  $\tau^-$  有相关联的中微子  $\nu_\tau$ .

2.  $\tau$  重轻子的其它性质和各种衰变方式

(1)  $\tau-\nu_\tau$  顶点耦合

关于  $\tau-\nu_\tau$  顶点耦合的情况可由衰变方式  $\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$  中测量电子的能谱或者动量谱得到. 对于不同的顶点耦合方式 ( $V-A$ ), ( $V, A$ ) 和 ( $V+A$ ), 理论上给出相对应的参量  $\rho$  的值分别为 0.75, 0.375 和 0. 实验上测量得到的  $\rho$  值为  $0.72 \pm 0.15$ , 这表明与 ( $V-A$ ) 顶点耦合方式符合较好.

(2)  $e-\mu-\tau$  普适性问题

在实验上通过测量  $\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ ,  $\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$  这两个衰变分支比来了解  $e-\mu-\tau$  的普适性问题. 实验测量值和理论值见表 2.

表 2 实验值和理论值的比较

	实验值	理论值
$B_e(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$	$0.175 \pm 0.011$	0.180
$B_\mu(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)$	$0.185 \pm 0.012$	0.175
$\frac{B_\mu(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{B_e(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}$	$1.06 \pm 0.10$	0.97

(3) 关于  $\tau^-$  和  $\nu_\tau$  的自旋

$\tau^-$  和  $\nu_\tau$  的自旋可由测量衰变分支比得到. 目前实验上获得的最好结果与理论值的比较列于表 3. 这个结果再一次证明  $\tau^-$  和  $\nu_\tau$  的自旋值是 1/2.

表 3  $\tau^-$  和  $\nu_\tau$  的自旋值

	实 验	理论, 在不同 $(\tau^-, \nu_\tau)$ 自旋假设下			
		$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(\frac{1}{2}, \frac{3}{2})$	$(\frac{3}{2}, \frac{1}{2})$	$(\frac{3}{2}, \frac{3}{2})$
$\frac{B(\tau \rightarrow \pi \nu_\tau)}{B(\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau)}$	$0.52 \pm 0.07$	0.59	0	0.25	1.33

(4) 其它衰变方式

$\tau$  重轻子还有其它一些衰变方式. 由于这些衰变分支比较小, 在实验上的研究还是很粗浅的.

(5) 第四代轻子和轻子激发态

在 DELCO 组发表的实验数据中, 在质心能量  $E_{cm}$  高于 6GeV 的地方测量得到的截面值有很明显的增大, 在实验误差范围之外明显地偏离理论期望值, 是否有比  $\tau$  更重的轻子? 几个组的实验均未找到质量  $m$  在  $m_\tau < m < 15.5 \text{GeV}$  范围内有轻子存在的证据. 寻找轻子的激发态  $e^*$  和  $\mu^*$ , 也没有得到肯定的结果.

三、一些有待进一步研究的问题

目前在实验方面对  $\tau$  重轻子和  $\nu_\tau$  中微子的研究还是很粗浅的. 由于事例数目不够多, 数据的统计性很差, 有一些问题需要进一步累积数据和改善实验条件, 提高测量的精确度. 令人特别感兴趣的问题有以下几个方面.

- (1)  $\tau$  的寿命;
- (2)  $\nu_\tau$  中微子的质量;
- (3)  $\tau-\nu_\tau$  顶点耦合, 并检验与  $V-A$  理论是否相符;
- (4)  $\tau^-$  和  $\nu_\tau$  的自旋;
- (5)  $\tau$  的半轻子衰变  $\tau \rightarrow \nu_\tau h$ ;
- (6)  $\tau$  的稀有衰变, 检验轻子数守恒问题.

在今后相当长的时期内,  $\tau$  重轻子物理将是人们十分注意的一个研究领域.