

关于 τ 轻子质量测定

中国科学院高能物理研究所一室 凌纳丁

从读者给《现代物理知识》杂志的来信中得知,众多高能物理界同行和广大爱好者有兴趣了解在我们这里(北京正负电子对撞机)将要进行的测量 τ 轻子质量实验的背景。我代表北京谱仪合作组(Beijing Spectrometer Collaboration)的同事向大家作个简略的介绍。

τ (希腊字母,音同“涛”)轻子和与之相伴的 τ 中微子 ν_τ 被称为第三代轻子。第一代轻子是电子和 ν_e ,第二代轻子是 μ 子和 ν_μ 。按目前的基本粒子分类法,基本粒子被分为三个家族:光子家族,轻子家族和强子家族。

(1) 光子家族只有光子一个成员,光子仅参加电磁相互作用;(2) 轻子家族由上面谈到的三代组成,轻子参加电磁相互作用和弱相互作用;(3) 强子家族由众多重子(质量比质子质量还要大的若干粒子)和介子(质量介于 μ 子和质子质量之间的若干粒子)组成,强子参加电磁相互作用,弱相互作用和强相互作用。

1975年 τ 轻子首次从实验中被观察到。之后, τ 轻子实验大量进行。由于 τ 轻子的质量大(重于质子),广泛开展对 τ 轻子性质(质量、自旋、寿命等)和 τ 轻子衰变过程的分析 and 测定,大大丰富了人类对基本粒子领域许多问题的认识,推动了高能物理在实验工作方面和理论工作方面的发展。近年来, τ 轻子研究成果异常丰富,因此促成了1990年9月在法国巴黎西南郊奥尔塞(Orsay)大学的第一次国际 τ 轻子物理讨论会。讨论会的举行,标志着 τ 轻子物理已被公认为一个独立的子学科。

目前描述基本粒子之间相互作用的最成功理论是标准模型理论(Standard Model Theory,简称SMT)。这个理论把几乎尽善尽美描述电磁相互作用的量子电动力学(Quantum Electromagnetic Dynamics)推广到了弱相互作用领域,统一为弱电相互作用理论。SMT定性和定量地预言了许多物理现象,并且,或定性预言从实验上得到了证实,或定量预言与实验测量结果达到了惊人的一致。普遍认为: τ 轻子的物理实验是验证SMT的最理想途径。由SMT推演出的一种很自然的假说是几代轻子的弱相互作用耦合常数应当相同。恰恰在这个具有根本意义的问题上,人们面临的是令人迷惑不解的现象。展开这个现象来谈,是这样的:大量的实验结果都一致地指出, τ 是和 μ 完全一样的粒子,唯一的区别仅在于不同的质量。如果假定 ν_e, ν_μ, ν_τ 均为质量等于0的粒子,SMT则给出如下

关系式:

$$\frac{G_\tau}{G_\mu} = \frac{M_\mu^2}{M_\tau^2} \frac{\tau_\mu}{\tau_\tau} \cdot \frac{BR(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau)}{BR(\mu \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\mu)} \quad (1)$$

式中 G_μ, M_μ, τ_μ 分别是 μ 子的弱相互作用耦合常数、质量、平均寿命; $G_\tau, M_\tau, \tau_\tau$ 是 τ 轻子的对应量。 $BR(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau)$ 是 τ 轻子衰变到 $e\bar{\nu}_e\nu_\tau$ 终态的分支比。 μ 子只有一个衰变终态,因此 $BR(\mu \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\mu)$ 等于1。

式中的 $M_\mu, \tau_\mu, M_\tau, \tau_\tau, BR(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau)$ 五个物理量都可以从国际物理界的权威机构“Particle Data Group”每两年公布一次的粒子性质表(Review of Particle Properties)中查到最新的数值。当前的数值(根据1990年版)是:

$$\begin{aligned} M_\mu &= 105.658387 \pm 0.000034 \text{ MeV} \\ &= 105.658387 \times (1 + 3.22 \times 10^{-6}) \text{ MeV} \\ \tau_\mu &= (2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6} \text{ 秒} \\ &= 2.19703 \times 10^{-6} \times (1 \pm 1.82 \times 10^{-3}) \text{ 秒} \\ M_\tau &= 1784.1^{+1.5}_{-1.7} \text{ MeV} = 1784.1 \\ &\quad \times \left(\frac{1 + 1.51 \times 10^{-3}}{-2.02 \times 10^{-3}} \right) \text{ MeV} \\ \tau_\tau &= (0.303 \pm 0.008) \times 10^{-12} \text{ 秒} \\ &= 0.303 \times 10^{-12} \times (1 \pm 2.64 \times 10^{-2}) \text{ 秒} \\ BR(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau) &= (17.7 \pm 0.4)\% = 17.7\% \\ &\quad \times (1 \pm 2.26 \times 10^{-2}) \end{aligned}$$

将上述数值代入式(1)中,发现

$$G_\tau/G_\mu = 0.937 \quad (2)$$

按照SMT, G_τ/G_μ 应当等于1。那么,是哪里出了毛病了呢?人们排除了毛病出自 M_μ, τ_μ 的可能性,因为这两个量已测得很准,相对误差小于万分之一;测量手段也无可挑剔。人们曾怀疑过 τ_τ 和 BR , 因为它们的测量精度最低,相对误差分别是百分之2.64和百分之2.26。对 τ_τ 和 BR 两个量,各实验组的测量次数总和都达几十次之多,大部分是近几年获得的。最近人们又获悉了在1991年8月国际轻子-光子会议上发表的在LEP对撞机上工作的四个实验组的结果,这些结果都与《粒子性质表》相一致。这样,众多的怀疑目光落到了 τ 轻子质量 M_τ 上。说来也可怜,迄今为止,对 M_τ 的测量仅作过四次,距今最近的一次也是十年以前完成的。国际上对 M_τ 的重新测定出现了前所未有的期待。正是在上述背景下,中国的高能实验物理学家筹划了在北京正负电子对撞机(BEPC)上用北京谱仪(BES)测 τ 轻子质量的实验。美国的六个研究机构(其中包括SLAC,加州理工学院,麻省理工学院等)也加入了北京的 M_τ 实验。

实验方法简述如下:

1) 由轻子数守恒律可知,正负 τ 轻子必须同时产生。在正负电子对撞湮灭时,若质心能量(当正电子束

STM在微细加工中的应用

◇ 王大文 ◇ 白春礼

(续前) 已提出的各种可能机理有束流引起的化学反应, 高电流密度使表面局部区域内原子加热导致的局部原子的蒸发、熔化、再结晶等, 有些结构可能是由于污染物或针尖材料在表面上的沉淀而产生的。当样品表面有覆层或处于特定的气体或液体氛围下时, 用 STM 仍可在其上产生各种细微结构, 其主要方法可分为两类, 其一是电子束光刻, 其二是电子束辅助沉积和刻蚀, 以下分别进行讨论。

三、电子束光刻

电子束光刻及电子束辅助沉积和刻蚀是聚焦电子束所通常应用的领域。STM 同样可应用在这些领域中, 尽管这些应用还很不成熟, 而且 STM 明显的在某些方面无竞争能力, 但由于 STM 所具有的独到的优点, 使得用它所进行的工作能获得许多新信息, 得到许多新结果。

用聚焦电子束进行光刻时, 可在涂覆抗蚀膜的样品表面上直接刻写曝光, 以形成各种图形。通常所用的抗蚀膜有聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 含有尿烷

能量与负电子束能量相等时, 两束能量之和即为质心能量 E_{CM} 大于或等于两倍 τ 轻子质量 M_τ 时, 就有正负 τ 轻子对产生。与两倍 M_τ 相当的质心能量被称为 τ 轻子的产生阈能量。在 M_τ 被假定为未知数的情况下, 可以依照此原理, 通过变化北京正负电子对撞机的 E_{CM} , 来发现 τ 轻子对开始出现 (或停止出现) 时 E_{CM} 的数值, 从而推出 M_τ 。

2) τ 轻子寿命太短 (平均寿命只有 3×10^{-13} 秒), 因此在北京谱仪上只能探测到由 τ 轻子衰变产生的长寿命粒子, 如光子、电子、 μ 、 π 、 k 、质子等, 同时伴随产生的中微子也是探测不到的。从众多衰变道中, 选择最容易与本底区别开的分支道作为“看见”正负 τ 轻子对产生的“标记”。BES 实验组准备选用的“标记”可能是由同时收集到的由一个电子、一个 μ 子 (及探测不到的中微子) 组成的事例。

3) 我们同与我们合作的美国同行 (SLAC 的 W. Toki, CMIT 的 F. Porter 等人) 有一个共识: 真实的 M_τ 数值不会比《粒子性质表》中给出的数值大太多或小太多。这样, 初步确定在 $E_{CM} = 3568$ MeV (等于两倍的 1784 MeV) 上下几十 MeV 范围内作 M_τ 实验。

4) 选用的 E_{CM} 点为十个左右, 记录下在每个能量

的聚丁二烯 (P4BCMU) 等, 它们一般只对低能电子 (< 20 eV) 敏感。故对通常所用的透镜聚焦的电子束来说, 由于入射电子能量很高 (> 5 kV), 这些抗蚀膜只能通过与一次入射束产生的二次电子的相互作用来曝光,

加之存在背散射电子, 结果导致抗蚀膜上实际曝光面积总是比一次束束径大许多。而对于 STM, 即使工作在场发射模式, 也能够提供能量很低的可直接与抗蚀膜发生作用的聚焦电子束, 由于针尖与样品的间距很近, 这个低能电子束在样品表面上的有效束径很小, 与该间距同一数量级; 另外 STM 装置可在水平方向上由计算机控制做精确的扫描, 故它非常适用于电子束光刻技术, 用来在抗蚀膜上进行直接刻写, 抗蚀膜的曝光只需通过与一次束的相互作用就可产生, 克服了由于与二次电子和背散射电子相互作用所引起的分辨率降低的缺点, 可获得更精细的结构, 最终提高集成电路的集成度。另外用 STM 进行光刻时, 在恒流模式及特定时间间隔内, 通过控制偏压 (电子能量) 就可精确控制曝光电子的能量, 研究在不同曝光电子能量下抗蚀膜的变化情况就可对抗蚀膜的曝光机理进行深入研究。还有, 诸如 PMMA、P4BCMU 等抗蚀膜在曝光时总是有化学反应发生, 故用 STM 进行光刻时, 它一般要工作在场发射模式, 以使电子具有足够高的能量而点“标记”事例出现的个数 (当不出现时记录为零)。

5) 把记录下的“标记”事例个数与相应的能量值放进一个与正负 τ 轻子对产生截面公式有依赖关系的似然函数中, 通过拟合、优化, 从而确定 M_τ 的数值和相应的精度。

M_τ 实验的要点就是这些。这个以中国人为主, 有六个美国研究机构参加, 在北京的土地上合作开展的实验从 1991 年 10 月已经开始。

读者一定会问: 在北京进行的 M_τ 测量实验一定能给出 SMT 正确与否的答案吗?

如果 $G_\tau = G_\mu$, 并假定 (1) 式中其它四个物理量的实验值不容怀疑, 则 M_τ 应当不大于 1770 MeV。从原理上讲, 测出 M_τ 等于 1770 MeV 左近的数值即证实了 SMT 的正确性, 若测出的 M_τ 数值与 1770 MeV 偏离较远时, 就可推算出 SMT 被破坏的程度。北京谱仪的 M_τ 测量无疑会推出一份相当重要的贡献。但我们也应当知道, 单独的一个实验也许不足以彻底解开这个谜团, 但这次 τ 轻子质量测量是中国高能实验物理学家向解开具有重大意义的基础物理问题之谜的一次有力冲击。