

# $\tau$ 轻子物理

吴 济 民

(中国科学院高能物理所 北京 100039)

粒子物理学中所研究的粒子,如果按照它们自身所具有的相互作用力来划分,可以分为强子和轻子两大类,各种相互作用的性质是十分不同的,具有了某一种相互作用力的粒子就会按照这种相互作用力的性质发生衰变、反应过程,强子具有强相互作用力,电磁相互作用力和弱相互作用力.但是,轻子就只具有电磁相互作用力(如果它带有电荷的话)和弱相互作用力.所以,强子和轻子的各种行为是十分不同的.

现在知道,属于轻子这一大类的粒子有正负电子,正反电子型中微子,正负 $\mu$ 子,正反 $\mu$ 子型中微子,正负 $\tau$ 轻子,以及可能存在的 $\tau$ 子型正反中微子(目前尚未发现).早在约一百多年前的1897年,人类就已经发现了电子,它的性质也早已被人们研究得清清楚楚了.现在,在人类的生产、生活和军事活动中,电子起了巨大的作用,这是人所共知的.1936年,人们在宇宙线中发现了 $\mu$ 子,除去它的质量比电子质量大200多倍外, $\mu^+$ 和 $e^+$ 的性质几乎都是一样的.研究指出, $\mu$ 子和电子是两种粒子, $\mu$ 子并不是电子的激发态,科学家们十分不理解这种现象,问道:“自然界既然已经有了电子,为什么还要有 $\mu$ 子呢?”不仅如此,1930年,人们分析实验结果时,从理论上提出应当存在质量为零的,只有弱作用力的粒子:中微子,它也应当属于轻子这一大类的.果然,到50年代,人们在实验中发现了中微子和反中微子,而后又发现,存在电子型中微子和 $\mu$ 子型中微子两类不同的中微子.70年代初,为了解释新的实验现象,又有人提出自然界可能存在比电子, $\mu$ 子更重的轻子.果然,在1975年,在SLAC正负电子对撞机上发现了比电子重3400多倍的 $\tau$ 轻子.研究历史又掀开了全新的一页.关于 $\tau$ 轻子的一系列基本问题提了出来,被列入了研究课题.整个轻子类的研究活动一直是很活跃的,而且卓有成就,

获得诺贝尔物理奖的就有下列各项:

1932年,安德森(Anderson)发现正电子,获得了1936年度的诺贝尔奖;

1962年,莱德曼等人(Lederman, Schwartz, Steinberg)证实存在两类中微子,获得1988年度诺贝尔奖;

1953年,莱因斯(Reins)发现反中微子,1975年,佩尔(Perl)发现 $\tau$ 轻子,两人获得了1995年度诺贝尔奖.

粒子物理学界对 $\tau$ 轻子的研究工作表现了很大的兴趣,不仅仅因为这个粒子被发现时间不长,有很多问题尚未研究清楚;还因为 $\tau$ 轻子比 $\mu$ 子、电子重很多(它的质量为1777MeV,是质子质量的1.89倍),因此,只要符合有关的选择规则,它可以发生很多衰变过程.它可以衰变到轻子,也可以衰变到强子去.这样可以充分地展示 $\tau$ 轻子自身以及属于轻子共性的许多性质,这是 $\mu$ 子和电子所不具备的条件.这样,不仅可以用来检验过去我们已经从 $\mu$ 子、电子身上发现的轻子性质,还会展现出过去我们无法知道的轻子性质.如果发现了异常现象,无疑是十分重要的基本发现.

自然界还有一个重要的现象,就是轻子和夸克(强子的基本组成体)一起形成了一代又一代的“代结构”.例如,电子型中微子,电子,u夸克,d夸克组成了第一代, $\mu$ 子型中微子, $\mu^-$ 子,c夸克,s夸克组成第二代,尚未发现的 $\tau$ 子型中微子, $\tau$ 轻子,新近发现的t夸克,b夸克被预期组成第三代.已经发现,它们的种种性质一代一代地重复出现,各代粒子的质量也是一代比一代重,显然这里有更为深刻的物理原因.至于是什么样的新原理现在仍然是一个谜.所以,仔细地研究处在第三代的 $\tau$ 轻子是在为解开这个谜积累必要的知识.

现在,人类远远没有做到像了解电子、 $\mu$ 子

那样了解  $\tau$  轻子.  $\tau$  子型中微子  $\nu_\tau$  还没有被发现. 所以, 留下了相当大的空白, 究其原因, 还是因为到现在为止, 人类产生了而又能记录在案的  $\tau$  轻子事例数目太少太少了. 想利用数目不多的  $\tau$  轻子事例来回答众多的关于  $\tau$  轻子性质的问题是不可能的. 而且,  $\tau$  轻子的寿命极短(为  $2.91 \times 10^{-13}$  秒), 要测量如此短寿命粒子的性质, 实验条件太苛刻了. 同时也因为在理论上处理  $\tau$  轻子也有不少为难之处. 换句话说, 人们有大量的艰苦细致的工作要做.

就现在的认识水平, 我们可以列举出若干项  $\tau$  轻子物理的重大研究课题如下:

一、 $\tau$  轻子全部通过弱相互作用顶角衰变, 整个衰变包括纯轻子衰变和半轻子衰变两种. 按照标准模型预言, 基本顶角为  $\tau^- - W^- - \nu_\tau$  顶角, 而且预言这个顶角和  $\mu^- - W^- - \nu_\mu$  顶角一样, 也是 V-A 型的. 这个预言须要通过实验加以验证, 对于  $\mu^- - W^- - \nu_\mu$  顶角, 已经通过了实验验证, 为 V-A 型的, 对于  $\tau^- - W^- - \nu_\tau$  顶角, 实验验证工作才刚刚开始.

例如, 测量  $\tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e$  衰变过程中终态电子的能谱, 就可以用来显示  $\tau^- - W^- - \nu_\tau$  顶角相互作用的性质. 单这一个实验, 目前还只完成了部分测量, 而且精度没有达到要求. 理论分析指出, 要进行五个不同的有关实验才能完成这项检验工作, 其中包括目前很难进行的  $\tau$  子型中微子的散射实验. 所以, 预计这个检验工作要进行相当长的时间, 要求能收集到足够多的  $\tau$  轻子的纯轻子衰变事例. 但是, 这项检验工作又是十分必要的. 如果一旦发现实验结果偏离了 V-A 型耦合顶角预言的结果, 这将是重大发现.

二、 $\tau$  轻子的半轻子衰变过程中, 从  $\tau^- - W^- - \nu_\tau$  顶角产生的弱中间玻色子  $W^-$  演变成强子, 这是一个很干净地显示相互作用性质的过程. 许多弱作用和强作用的理论预言在这里要接受检验. 例如: 关于相互作用的矢量流守恒的理论预言, 关于寻找弱作用第二类流的假设, 关于  $\tau$  轻子衰变中结构函数的理论预言等

等. 又例如,  $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^-$  衰变过程, 看起来这是个很简单的衰变过程. 这个过程可以显示束缚态  $\pi^-$  介子和弱作用流的耦合性质, 它和  $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$  等过程一起同样地显示这种耦合性质, 也为研究其中的非微扰效应( $\pi^-$  介子束缚态)提供了极好的材料. 十分不幸的是, 目前在理论上还缺少对这些看来简单的过程的深层次上的认识. 实验上收集到的衰变过程的事例数目也不多.

三、 $\tau$  子型中微子  $\nu_\tau$  的质量问题. 虽然到目前为止, 实验上还没有直接测量到  $\tau$  子型中微子, 但是, 如果这种中微子存在的话, 由它引起的种种效应是应当可以在  $\tau$  轻子的衰变过程中显示出来. 目前关于  $\tau$  子型中微子的研究是围绕着它的质量问题展开的. 没有任何理由可以肯定地说, 任何一种中微子的静止质量应当为零, 中微子的质量究竟多大就成了实验上应当问答的问题. 如果中微子的质量不为零, 那么就会引起一系列可观察的物理结果. 也许由于中微子的质量太小了, 这些相应的物理效应也就很小, 测量工作要求相当精密地进行. 首先要求的条件, 仍然是要求产生足够多的  $\tau$  轻子, 使得实验的误差变小, 得到精确可信的测量结果. 中微子质量是否为零, 这有很大的物理上的兴趣, 如果中微子的质量不为零, 它的质量本征态就不是它们在弱作用下衰变的本征态, 在几种中微子之间就发生混合现象, 就像在 d, s, b 夸克之间存在混合现象一样, 同样在 e,  $\mu$ ,  $\tau$  轻子之间也会发生混合现象, 那么这几种轻子之间就可以发生跃迁, 电子数守恒,  $\mu$  子数守恒,  $\tau$  子数守恒规律就要被打破, 这就成为轻子物理中的重大变革. 同样, 重的中微子就会向轻的中微子衰变. 有的中微子将成为不稳定粒子. 另外, 如果中微子的质量不为零, 它还可被天体物理学家们用来解释宇宙学中的黑暗物质和太阳中微子的短缺现象. 他们认为, 宇宙中的不发光的质量很大的物质就可能是中微子. 虽然单个中微子的质量不大, 但是宇宙体积很大, 占据在其中的中微子总质量值仍然会是很大. 它们就是黑暗物质. 他们还认为, 中微子如果具有非零质量, 就会在几种中微子之间存在“振荡现象”. 太阳中微子是在这种振荡效应下观察

# 大型集装箱辐射检测系统

王 经 瑾

(清华大学工程物理研究所 北京 100084)

物理学发现任何一种新的辐射,也就发现了一种新的能量传播方式.信息工程都会设法把它用作新的载体来传输信息,或设法利用这种新辐射来探查物质(物体)内部的新信息.

由于物质的原子间距为零点几纳米( $10^{-9}\text{m}$ ,粗略地说,波长大于1纳米的辐射适于以波的发送、接收方式来传递信息,波长小于1纳米的辐射适于以粒子和物质相互作用的形式来探查物体内部信息.这些应用都有赖于物理学和信息工程的结合.1888年赫芝发现了麦克斯韦预言的电磁辐射,通信工程师们在11年后就实现了跨越英吉利海峡的无线电报传输.1895年伦琴宣布发现X射线时,同时就公布了用X射线拍摄的手骨图象.一个世纪以

\*\*\*\*\*

的,所以造成了观察值小于理论值的结果.人们在地球上研究 $\tau$ 子型中微子的质量问题只有通过 $\tau$ 轻子的衰变过程进行.目前,也只有从正负电子对撞机上产生 $\tau$ 轻子对才能用于研究 $\tau$ 轻子的衰变.人们再一次提出要提高对撞机的亮度,使得能产生足够多的 $\tau$ 轻子,才能更精确地测得中微子质量.目前,已经测得各种中微子的质量上限值分别是: $m_{\nu_e} < 4.5\text{eV}$ ,  $m_{\nu_\mu} < 160\text{KeV}$ ,  $m_{\nu_\tau} < 24\text{MeV}$ .可以看到, $\nu_\tau$ 的质量上限值还是比较大的.人们普遍相信, $\nu_\tau$ 的质量值不应当在MeV这么大的量级上.

四、在轻子范围内,是否也存在CP破坏效应呢?这也是粒子物理学家思考的问题.在强子范围内,CP破坏效应已经被发现了,没有理由认为在轻子范围内一定不存在CP破坏效应.不少人提出,如果在轻子范围内存在CP破坏效应的話,应当从哪些过程的哪些观察量中去寻找,这

来,所有医院的放射科应用的都是同样的X射线,而信息工程的发展使放射图象的处理不断现代化了.70年代发明的X射线层析技术(CT),更是物理学的不朽发现和当时方兴未艾的计算机图象处理技术的光辉结合.X射线也已广泛用于材料分析、天体探测、工业探伤和机场小件物品核查.80年代末,由于集装箱运输的发展,海关极需不开箱就能核查箱中货物的技术.90年代初出现了利用X射线的大型集装箱检测系统.对于宽2.5米、高4米、长近20米的大型集装箱货车,两、三分钟内就可透视完毕,实时显示出箱中几十吨货物和运载车辆的图象.这是物理学和信息工程结合的又一创举.在此之前,人工开箱检查一个大型集装箱,搬出搬进几十吨货物,需半天时间.而一个大点的海关口岸,集装箱流通量每天以万计!

## 一、大型集装箱检测系统的工作原理

大型集装箱检测系统的工作原理如图1所示,利用电子直线加速器作为辐射源,产生能量高达9MeV的X射线,在距靶1米处可获得每

\*\*\*\*\*

些过程无一不是 $\tau$ 轻子的各种衰变过程.这无疑是一个十分吸引人的课题,它又一次涉及到基本性质,目前还主要是从理论上加以讨论.

仅就以上几项就可以看到, $\tau$ 轻子物理中正在探索的这些课题都是带有基本性质的课题.上述各个实验都属于精确实验范围之内.要提高实验结果的准确性和精度,必须大大增加测量事例数.目前,只有从 $e^+e^-$ 对撞机上产生的 $\tau$ 轻子对才能用于 $\tau$ 轻子物理研究.因此,提高对撞机的亮度成为十分关键的一步.质心能量在 $\tau$ 轻子对的产生阈以上的 $e^+e^-$ 对撞机都可以产生 $\tau$ 轻子对,它们的研究结果可以相互检验,但是在 $\tau$ 轻子对的产生阈附近进行 $\tau$ 轻子研究有其独到之处的优点.在这个能量条件下(质心能量: $2m_\tau \sim 5\text{GeV}$ ), $\tau$ 轻子对产生截面最大,本底很小,粒子分辨好.十分有利于 $\tau$ 轻子物理实验.正在讨论中的 $\tau$ -charm工厂就是为了利用这些优势而提出来的.利用 $\tau$ -charm工厂从事 $\tau$ 轻子物理研究成为国内外粒子物理学界推崇的项目.