



τ 轻子的发现 ——历史的追溯

李 金 漆 纳 丁

在北京正负电子对撞机上,由北京谱仪实验组完成的 τ 轻子质量精确测量工作被国内外一些著名科学家(包括李政道、杨振宁、丁肇中、吴大猷、周光召等)评价为近年高能物理最重要的实验成果之一。这一标志着中国高能实验物理走上本领域国际前沿的成绩,又促使 τ 轻子更加受到国内读者的关注和厚爱。我们愿借《现代物理知识》杂志的一角,介绍一些关于 τ 轻子发现和确认的若干背景知识。

提到 τ 轻子,有两个人是重要的:一个是美国人马丁·佩尔(Martin L. Perl),他是 τ 轻子实验发现的主持人和领导者;一个是美籍华人蔡永时,他在 τ 轻子发现之前,以“可能存在的重轻子”为假设客体,建立了论述此客体方方面面的理论体系,还对假定它的质量是 $1.8\text{GeV}/c^2$ (在数值上与 BES 的 $1776.9\text{MeV}/c^2$ 惊人的接近)的情况提出许多定量预期值。这些预见后来都被证实,因此蔡的理论直到现在基本不用修正,它仍指导着 τ 物理的理论研究和实验工作。写 τ 物理文章的人没有不引用蔡文的,真可谓“无 τ 不蔡”。蔡永时为炎黄人士争得了荣誉。

τ 轻子的预言、发现和对其性质的早期研究均是二十年以前的事。本文追溯那一段历史,意在引出具有启示性和指导作用的意义。

(一) τ 轻子发现之前(1970年到1974年)

1. $e-\mu$ 之迷和轻子的多样性

近些年,由 LEP(欧洲核子中心的质心能量为 100GeV 的正负电子对撞机)和 SLC(美国斯坦福直线对撞机)完成的实验向我们展示了关于轻子知识的一幅清晰图画,即轻子家族中只有三代。第一代是电子和 ν_e ,第二代是 μ 和 ν_μ ,第三代是 τ 和 ν_τ ;在质量限 $45.5\text{GeV}/c^2$ 以下没有新类型的轻子存在。

但在二十多年前,关于轻子的图画并不清晰。当时存在一个所谓的“ $e-\mu$ 之迷”。人们弄不明白, μ 子究竟算什么,它应被归到哪一类?能因为自旋是 $1/2$,而归到重子类?否。能因为质量轻而归于介子类?否。让它单独顶门立户是长期被采纳和似乎无奈的一种选择。总之, μ 子使人困惑。

1971年,佩尔在《今日物理》(Physics Today, 34, July, 1971)上发表一篇文章,题为“ μ 子与电子有

何不同”。在综述了人们的困惑之后,他提出了理解电子和 μ 子关系的两种可能的途径。一条是认定 μ 子与电子不是一类粒子,这就要求实验工作者发现除质量相异之外的附加不同点。另一条是假定电子和 μ 子是同类粒子,且假定它们是成系列的一类粒子中的头两个成员。此文中使用了如下符号:

$$e, \mu, \mu', \mu'', \dots$$

$$\nu_e, \nu_\mu, \nu_{\mu'}, \nu_{\mu''}, \dots$$

若沿第二条途径前进, $e-\mu$ 之迷仅仅是一个大问题的序幕。发现新成员并研究清楚它的性质,这个大问题才会得到解释。

佩尔和他的合作伙伴首先沿第一条途径进行了尝试。利用 SLAC(美国斯坦福加速器中心)的设备,研究了 μ 子与质子的非弹性散射。这个实验花费了几年时间,然后与其他实验组的电子与质子的非弹性散射进行了散射截面的比较。被期待的大动量转移过程中电子与 μ 子的不同表现没有获得支持。同时代的各种工作都未提供电子和 μ 子相异的证据。

由此,他们不得不考虑解决 $e-\mu$ 之迷的第二种思路,即尝试寻找“下一个”轻子 l 。当时 B. Richter 等人正在 SLAC 筹建 SPEAR(质心能量在 2.5 到 8GeV 范围的正负电子对撞机),因此,有可能使用 SPEAR 进行 $e^+ + e^- \rightarrow l^+ + l^-$ 的研究。同一时间,意大利 Frascati 实验室也有类似的计划。

利用正负电子对撞湮灭来寻找新粒子的优越性在现在是被公认的,但那时,并不显而易见。为寻找可能存在的新类型轻子,人们建议了若干种不同方法,其目标也分别指向不同类型的假定轻子。例如: sequential leptons(与 e, μ 排序的轻子一序列轻子); excited leptons(激发态轻子); ortholeptons(正交轻子); paraleptons(平行轻子)和 spin-0 leptons(自旋为0的轻子)等。寻找方法,除正负电子湮灭外,还包括中微子与核子对撞,荷电轻子与核子对撞,光生反应,电子捕集法和质子捕集法等等。

2. 序列轻子理论

在各种令人眼花缭乱的轻子假说和寻找方法中,佩尔等人的兴趣是以 e^+e^- 寻找法和序列轻子概念为中心的。同在 SLAC 工作的蔡永时的理论工作是非

常重要的。他的文章“在 $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$ 过程中重轻子的衰变相关性” (Y. S. Tsai, Phys. Rev. D4, (1971) 2821) 从最开始阶段即为佩尔等人的实验工作提供了产生与衰变的理论。在蔡文的表 2 中给出的与不同质量轻子(其中之一假定 $m_l = 1.8\text{GeV}/c^2$) 相对应的衰变模式及其分支比,在今天仍然有价值和指导意义。蔡永时的论述被吸收到 SPEAR 储存环和 MarkI 探测器的设计建议书中,明确指出它们的建造目的之一是寻找重轻子。其他人(例如 H. B. Thacker 和 J. J. Sakurai 等)也讨论过重轻子的基本理论,但论述最杰出的是蔡的文章。

3. MarkI 的研制建议书

在这个建议书的第十六页,明确写上了寻找重轻子的基本思想,即“利用重轻子到 $e\mu$ 联合衰变终态(the $e\mu$ joint decay modes)”作为标志。特别有趣的一点是这个建议书并未提及对轻子之外新粒子的寻找。但正是这个探测器,在 3.1GeV 的能区发现了 J/ψ 粒子,而发现 J/ψ 粒子的时间仅比重轻子 τ 的发现早一年。若把 τ 比做有心插的花,把 J/ψ 比作无心栽的柳,则真可谓“无心栽柳柳成荫,有心插花花也发”了。这是题外的话。

SPEAR/MarkI 筹建期间,意大利人已开始了在正负电子对撞机 ADONE 上的寻找。从 1970 年到 1974 年期间,发表了几篇介绍他们寻找过程的文章。在 ADONE 上运行的实验组有两个,第一组由 M. Bernardini 和 A. Zichichi 领导,第二组由 S. Orito 领导。他们没有找到重轻子,仅仅指出了在 $1\text{GeV}/c^2$ 质量限以下不存在重轻子。

(二) τ 轻子存在的第一个证据(1974 年到 1975 年)

1. $e\mu$ 被观察到

MarkI 探测器从 1973 年开始运行,收集 SPEAR 的正负电子对撞数据。它是用在对撞束流实验中的第一代大立体角通用探测器中的一个。原始的 MarkI 没有 μ 子鉴别系统,到第一次改进时,才增加了纵深为三层的 μ 子探测器。它们很粗糙,由混凝土板和火花室交替排列而组成。1974 年,开始观察到 $e\mu$ 事例,到 1975 年初已收集到几十个 $e\mu$ 事例。这能否说重轻子被发现了呢?实验组内外充满了怀疑论调。怀疑主义的焦点是 τ , e 和 μ 的分辨正确性和是否低估了强子被误判为轻子的比率。佩尔等人用在不同地方的一次又一次的讲演和报告来回答和克服这些怀疑,有时还要带回怀疑者的观点和问题,转过头重新分析数据。当确信自己的分析结果正确无误之后,1975 年 6 月在加拿大的蒙特利尔,佩尔作了第一个关于 $e\mu$ 事例的国际性学术讲演:“关于正负电子湮灭的讲座”,其中的第二部分是反常轻子产生(Lectures on e^+e^- Annihilation-Part II: Anomalous Lepton Production)。报

告公布了在单一能量(质心能量 $E_{CM} = 4.8\text{GeV}$) 对撞数据样本中发现的 24 个 $e\mu$ 事例。今天可以说,这是对 τ 轻子存在的强有力的实验证据。但当时,佩尔并未这么讲。

2. 新发现在物理评论快报上发表

1975 年 12 月, MarkI 实验组把它的这一新发现送到刊物上发表了,题目叫“在正负电子湮灭过程中,产生反常轻子现象的证据”(Phys. Rev. Lett. 35 (1975) 1489)。此文的最后一段是:“我们断定,上述由 $e\mu$ 标记的事例,既不能被解释为来自任何已知粒子的产生和衰变,也不是任何熟知相互作用导致的终态。一个可能的解释是这些事例来自某种新粒子(对)的衰变,单个此类粒子具有在 1.6 到 $2.0\text{GeV}/c^2$ 范围的质量。”

当时 MarkI 实验组并未斩钉截铁地宣布发现的是一种新的荷电轻子,而仅仅声称可能发现了新东西。这种心态反映在他们在 1975~1977 年期间的文章中,用 U 代表它,这是英文 unknown (“未知”)第一个字母的大写。到 1977 年才采用了 P. Rapidis 的建议,改用 τ (τ 在希腊语中是“第三”之意,寓第三种荷电轻子)。

(三) 从迷惑到确认(1975 年到 1977 年)

1. 困惑时期

第一篇文章发表后相当长一段时间,对 MarkI 结果的评价并未达到一致,也未得充分肯定。这种困惑状态的存在出于如下几个原因:

(1) 许多人很难相信,新发现的 c 夸克和 MarkI 建议的新类型轻子会在这一狭小的能量区间 ($3.1\sim 3.6\text{GeV}$) 内同时存在。

(2) 第四种夸克 (c 夸克) 的存在是理论上需要的,对第三种轻子的存在并无理论上的需要。刚获得公认的 (u, d 和 e, ν_e) (c, s 和 μ, ν_μ) 两代模型已近于完善。因此,甚至可以说当时的理论是排斥第三种轻子存在的。所以颇有市场的一种主张称 $e\mu$ 事例是 c 夸克衰变中一种复杂过程的结果。

(3) 有的讨论暂不支持第三种轻子,是因为仅仅一个模式(即 $e\mu$) 被观察到。如果第三种轻子确实存在,就应当有其它衰变模式,例如电子-强子模式和 μ 子-强子模式。在未观察到这些模式之前,还是暂不讨论第三种轻子的存在为宜。

对待怀疑论的最好态度是继续实验发掘。

2. τ 到 μ 子-强子衰变模式的发现

$e\mu$ 事例之后的第一个进展来自关于反常 μ 子-强子事例的三个实验结果。正象 $e\mu$ 事例可以被描述为 $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$, 然后 τ 轻子对中,一个衰变为电子,一个衰变为 μ 子(相伴的中微子是探测不到的)一样, μ 子-强子终态模式也是由 τ 轻子对衰变而来的。

(1) 第一个实验是 MarkI 在 SPEAR 上做的,质

心能量为 5.8GeV 。在 1976 年 6 月 3 日的 MarkI 记录上写到：“在对粒子误判作了修正之后可知，此数据样本包括有 8 个 μe 事例和 17 个 μ 子-强子事例。因此，如果强子的接收效率与电子的接收效率大致相等，并假定这两种反常信号同源，那么在稍大的误差范围内，强子衰变道的分支比是电子衰变道的二倍。这几乎一点不差的正是人们对那种重轻子行为的预期值。”这个实验结果发表时的题目为“正负电子湮灭时的反常单举 μ 产生” (Phys. Rev. Lett. 38(1977)117)。

(2) 第二个实验也是在 SPEAR 上完成的，质心能量为 4.8GeV ，但完成者是不同的实验组。它们的结果支持了 MarkI，发表在题为“ 4.8GeV 能量下正负电子对撞导致的高能 μ 子的反常产生” (Phys. Rev. Lett. 36(1976)558) 的文章中。

(3) 最让 MarkI 的佩尔等人欣慰的结果来自运行在 DORIS 正负电子储存环 (西德汉堡 DESY 实验室) 上的 PLUTO 实验组，因为另一个文化 (美国人直到二十年以前仍把欧洲看成是另一个文化) 的实验结果具有更强的独立性和客观公正性。它对 MarkI 发现的重轻子提供了最强有力的支持。PLUTO 发表结果时，使用了直言不讳的题目：“正负电子湮灭导致 μ 子的反常产生是重轻子存在的证据” (Phys. Lett. 68B(1977)297)。只是在 μ 子-强子事例被观察到之后，多数人才开始相信，关于存在一个排在电子、 μ 子序列之后的重轻子 τ 的考虑可能是对的，但事情并不算完，因为反常电子-强子模式还未观察到。

3. τ 到电子-强子衰变事例的发现

证明电子-强子事例存在的前提是改进探测器的电子识别能力 (MarkI 的这种能力尚不够强)。在这点上，DELCO 探测器最先迈出了实质性的一步。它继 MarkI 之后也在 SPEAR (第二对撞点) 上运行。MarkI 探测器随后也作了改进，在电磁簇射系统中增加了铅玻璃墙。用改进后获取的数据分析出了结果并发表了文章，题目为“正负电子对撞中的电子- μ 子产生和电子-强子产生” (Phys. Rev. Lett. 39(1977)1058)。

(四) τ 重轻子确认的完成 (1977 年到 1978 年)

1. 1977 年汉堡国际大会

这是高能物理界例行的轻子-光子国际大会中的一次。在会议上，三篇综述性报告描绘了当时关于 τ 知识的图画。报告人分别是来自 DASP 实验组的 S. Yamada，来自 DELCO 的 J. Kirkby 和 MarkI 的马丁·佩尔。三篇报告的共同精华是：“由正负电子对撞湮灭后产生的反常双叉事例是与存在一个质量约为 $1.9\text{GeV}/c^2$ 的荷电轻子的假说相吻合，它不能被解释为源于粲粒子的衰变。”

2. τ 到 $\pi\nu$ 衰变模式

截止到 1977 年，奠定 τ 理论的唯一缺项被认为是对于 τ 到 $\pi\nu$ 的衰变分支比实验上尚无定论。这是个必须解决的问题。在 1978 年的新加坡会议上，报告了 MarkI (当时被称为 SLAC-LBL 实验组)，PLUTO，DELCO，MarkII 等四个实验组由 $e^+e^- \rightarrow \mu\pi$ (或 $e\pi$) 得出的分支比结果： $\text{Br}(\tau \rightarrow \pi\nu) \approx 10\%$ 。这与理论预期值一致。

到 1978 年底，关于 τ 轻子的第一乐章——发现和确认——终于完成了。所有可靠测量都与 τ 是由已知的电磁作用产生且通过传统的弱作用衰变的一种序列轻子的假说相吻合，因而被广泛承认。

(五) 发现 τ 轻子带来的影响

τ 轻子的存在对当时刚刚完成的，具有美学上对称特色的 (u, d 和 e, ν_e) (c, s 和 μ, ν_μ) 两代模型直接提出了挑战。一切怀疑均被排除， τ 被广泛接受之后，就促成了对第五种夸克的寻找，并且找到了 b 夸克。

随着时间的推移和更多 τ 物理工作的开展， τ 轻子的重要性日渐明显。过去只有从强子到轻子的衰变，并建立了一套完整理论。有了 τ 轻子，由于它的质量大，可以衰变到各类强子，因此，使人们能从逆的方向检验这些理论。例如卡比伯混合角理论，V-A 理论，helicity 理论等等。 τ 轻子目前被称为是进行粒子物理研究的一个大实验室。

北京谱仪实验组的关于 τ 轻子质量的精确测量结果 (Phys. Rev. Lett. 69(1992) 3021) 帮助了对轻子普适性理论的验证。中国高能实验物理工作者还将在更广阔的领域里作出让国际同行更加欣慰的贡献。

《现代物理知识》1994 年学术论文增刊 征稿启事

为庆祝《现代物理知识》创刊五周年，本刊将于 1994 年出版学术论文增刊。

主要刊登：现代物理学与边缘学科最新进展；现代物理学在经济建设中的应用；物理学史；现代物理学在教学中的应用；大、中学物理教材教法及实验；奥林匹克物理竞赛例题分析等。

欢迎广大、中学教师及各行各业科研人员踊跃投稿。具体出版事宜，请与本刊编辑部秋浦联系。来稿截止日期：1994 年 3 月底。由于增刊需自筹资金出版，将依国家有关规定收取一定版面费。来稿请寄：北京 918 信箱秋浦收。邮编：100039；联系电话：(01)8213344—782。凡符合论文标准者，可参加本刊召开的“现代物理学与边缘学科”学术研讨会。(秋浦)