

τ 轻子的发现和电子反中微子的首次观察

——1995 年诺贝尔物理奖介绍*

顾以藩

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 美国物理学家马丁·珀尔(Martin Perl)和弗雷德里克·雷恩斯(Fredrick Reines)共同获得了 1995 年诺贝尔物理奖。珀尔及其合作者于 70 年代间发现了 τ 轻子, 雷恩斯与已故的克拉埃德·考温(Clyde Cowan)于 50 年代间首次成功地观察到电子反中微子。他们在轻子研究方面的先驱性工作为建立轻子-夸克层次上的物质结构图像作出了重大贡献。

关键词 三代轻子, 电子反中微子, 反应堆, τ 轻子, 对撞机

Abstract American physicists Martin Perl and Fredrick Reines shared the 1995 Nobel Prize for physics for the discoveries of two of nature's most remarkable subatomic particles. Their pioneering contributions in lepton physics underpinned subsequent developments in establishing the present picture of matter at the lepton-quark level.

Key words three generation of leptons, electron antineutrino, reactor, τ lepton, collider

1 三代物质粒子图像

按照粒子物理标准模型, 构成物质的基本单元是 12 种物质粒子, 包括 6 种夸克和 6 种轻子。它们都有各自的反粒子, 就像是粒子的一种“镜像”。在物质粒子之间作用的力有强力、电磁力和弱力(引力可以忽略)。夸克与轻子之间的区别是后者不受强力影响。

物质粒子的一个重要性质是它们成代地出现。如表 1 所示, 它们一共组成三代, 每代成员为两个夸克和两个轻子, 其中一种夸克带 $+\frac{2}{3}e$ 电荷, 一种夸克带 $-\frac{1}{3}e$ 电荷, 一种轻子带 $-1e$ 电荷, 一种轻子则是中性的, 即中微子。这种类似元素周期表的排列满足了标准模型理论要求消除反常的条件, 而不是简单的形式上的排列。三代粒子一一对应地具有相似性质, 除了质量不同(一代比一代的质量大)。

表 1 夸克-轻子周期表

电荷(e)	-1	0	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
第 I 代	e	ν_e	d	u
第 II 代	μ	ν_μ	s	c
第 III 代	τ	ν_τ	b	t

这张形式上看来简单的夸克-轻子周期表是几代实验与理论工作者共同努力的成果总结。从第一个轻子即电子(e)的发现(1897 年), 到最后一个夸克即顶夸克(t)的实验证明(1995 年), 花了差不多 100 年时间。电子反中微子(ν_e)和 τ 轻子(τ)的发现是这一世纪历程中的两个重要里程碑, 它们对于粒子物理实验领域的开拓以及粒子物理标准模型的建立产生了重大影响。

* 1995 年 12 月 8 日收到。

2 反应堆中微子实验

众所周知,中微子是泡利为了挽救原子核 β 衰变过程中能量守恒定律而“发明”出来的一种粒子(1930年)¹⁾。泡利当时觉得自己做了一件“要命的事”,设想了一个看来永远无法探测的粒子(不带电荷,质量小到可以忽略不计,与一般物质几乎不起作用)。但是费米立即采纳了这个假设,并据以建立了一套完整的弱力理论,对原子核 β 衰变作出定量描述(1933年)。这篇光彩照人、意义深远的划时代的经典之作,对泡利的中微子假设给了有力的理论支持。

但是,要使人信服中微子的存在,终究需要实验证明。1934年,H. Bethe 和 R. Peierls 给出了一个著名的估算,即能量为兆电子伏量级的中微子在原子核上俘获的截面大致是 10^{-43}cm^2 ,因而能够穿透成百光年的水层而不与任何原子核发生碰撞。这个估算对当时物理学界产生了很大影响。在30年代和40年代的很长一段时间里,舆论普遍认为,讨论自由状态中微子的探测是毫无意义的。那时,所有关于中微子存在的实验证据都是非直接的²⁾。

正是在这种背景下,雷恩斯和考温着手思考他们毕生奉献的这项实验难题。首先需要解决的是强中微子源的问题。雷恩斯一开始想到利用原子核爆炸。在和考温讨论以后,他们认识到,只要探测器灵敏度足够高,采用原子核反应堆作为中微子源将是更加切实可行的途径。按照他们制定的实验方案,先是在汉福特(Hanford)反应堆上于1953年进行了试测。为了增加实验统计性,又于1956年转到了萨瓦纳河工厂(Savannah River Plant)更大功率的反应堆上,那里的反中微子通量达到 $5 \times 10^{13}/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ 。如图1所示,探测是利用倒逆 β 衰变过程 $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ 。从反应堆来的电子反中微子($\bar{\nu}$)打到含氢靶物质上,后者采用了400L加入醋酸钨的水,分装在两个高7.6cm、长15.9cm、宽10.8cm的容器中,并夹放在三个液体闪烁计数

器之间。每个闪烁计数器使用1400L工作液体,由110个直径为5in的光电倍增管读出信号,经电子学线路后在三束示波器上照相记录

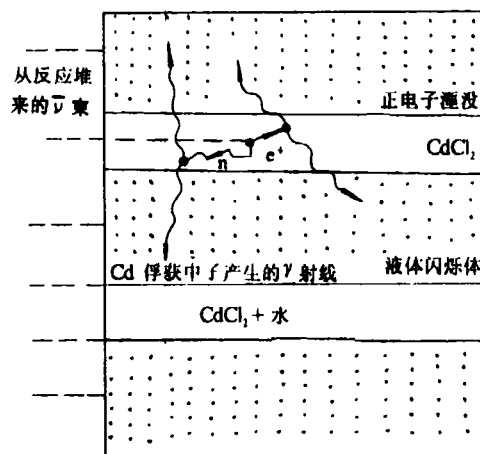


图1 在反应堆上探测电子反中微子的实验

下来。反中微子与水中质子(p)发生作用后产生一个正电子(e^+)和一个中子(n)。正电子通过电离损失迅速(10^{-9}s 量级)停止下来,湮没为一对 γ 射线;中子则在水中慢化(10^{-5} — 10^{-6}s 量级),为其中的镉原子核俘获而释放若干 γ 射线。因此,一个反中微子在靶物质中生成的事例具有十分典型的特征:首先是一对反向出射的能量各为511keV的 γ 射线分别同时进入两个不同的液体闪烁计数器中,产生快脉冲信号,经过若干 μs 之后,又有几个总能量为若干MeV的 γ 射线在闪烁计数器中同时产生一组信号。满足以上特征的事例可以比较容易地与各种本底事例区别开来。在整个实验过程中,针对实验中低计数率和本底的特点,雷恩斯和考温还采取了其他一些措施,例如采用大面积铅板进

1) 泡利原来把它称作中子,后经费米正名为中微子。实际上,从核衰变产生的中微子是电子反中微子。

2) 我国物理学家王淦昌于1942年刊登在“Physical Review”第67卷第97页的文章中,建议采用K电子俘获的方法来获得中微子存在的证据,启发并推动了其后的一系列非直接的实验验证工作。

行全屏蔽等,最后得到每小时事例数为 2.88 ± 0.22 . 这个结果具有足够的统计显著性,并与根据中子寿命实测数值通过细致平衡原理估算得到的 $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ 反应截面一致. 在泡利的中微子假设提出 25 年之后,自由状态中微子的存在终于获得了确凿的实验证明.

雷恩斯-考温的实验打破了长期盛行的中微子无法探测的消极观点. 从此,中微子从一个“概念”的粒子成为“实在”的粒子,并积极参加到粒子物理实验中来. 继反应堆中微子实验之后,可用的中微子(反中微子)束于 60 年代初开始在高能加速器上建立起来. 第一个加速器中微子实验证明了电子中微子和 μ 子中微子(ν_μ) 是两类不同的中微子(L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger 等, 1962 年). 这样一直到 1974 年由 J/ψ 粒子的发现开始而最终证明了粲夸克(c)的存在为止,实验上确认了两代轻子和两代夸克,第一次展现了轻子-夸克平行性,即轻子和夸克之间的对称性.

3 正负电子对撞机上的发现

是否存在比 μ 子更重的轻子的问题,从 60 年代起就已经成为实验考虑的内容. 一些固定靶实验和在较低能量的正负电子对撞机上的实验,先后给出了否定的结果:看来不存在质量低于 1.5GeV 的新的带电轻子. 珀尔在 1966 年间参加了在斯坦福直线加速器中心(简称 SLAC)电子直线加速器上的实验,开始了对于新轻子的艰苦探索.

1972 年,SLAC 建成了 SPEAR 对撞机. 这是在美国建造的第一台正负电子对撞机. 它虽然晚于法国、前苏联和意大利,但是具有当时最好的亮度水平,并且覆盖了新的更高的实验能区. 与建立 SPEAR 对撞机的同时,还建造了世界上第一台用于对撞实验的高性能通用型粒子探测装置(在它的第二代探测器出现后它被称为 MARK I 探测器). 这是一台由不同功能的探测器、电子学线路及磁体组合而成的实验装

置. 该装置在当时看来十分复杂,但其构造原则却一直沿用了现在. 以上这些实验条件为探索与发现未知世界提供了绝好机会. 在 70 和 80 年代里,接连取得了一系列重大研究成果,包括粲偶素 $J/\psi, \psi(2s)$ 与 η_c , 粲介子 D , 胶球候选态 ι, θ 与 ξ , 强子喷注和 τ 轻子的发现或首次观察.

珀尔和他的合作者参加了 SPEAR 对撞机上的实验,继续从事新轻子的寻找工作. 在正负电子对撞过程中,新轻子如果存在,则将以成对产生的简单并且易于诠释的方式生成. 在经过不到一年的努力之后,珀尔从质心能量在 4GeV 上下的 e^+e^- 碰撞数据当中发现了一类奇特事例,它们共有 24 个(图 2). 每个事例仅含两条电性相反的径迹,经鉴别为电子及 μ 子;另外根据能量守恒定律,可以判定在每个事例中还有几个未被探测到的中性粒子. 在对于这些

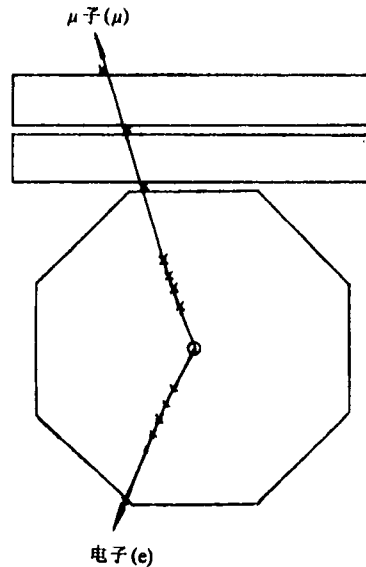


图 2 珀尔等观察到的 τ 轻子事例

事例进行了细致分析并排除了一系列可能的常规解释后,珀尔和他的合作者把它们的来源归结为一对重轻子(质量在 $1.6-2.0\text{GeV}/c^2$ 之间)产生与衰变的二级过程,即新轻子通过 $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$ 产生后立即以 $\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\tau$ 和

$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ 或它们的电荷共轭模式衰变. 在衰变产物中,除了电子和 μ 子外,其他的中微子和反中微子都未被探测到,它们所携带的能量表现为“丢失”的能量.

珀尔在 1975 年的夏天宣布了这项发现. 新粒子的存在当即解决了稍早时候在对撞机实验中出现的 R 值(即 e^+e^- 湮没总截面与 μ 子对产生截面之比)问题,即当质心能量达到 $\geq 4.5\text{GeV}$ 时, R 值的测量结果($4\frac{1}{3}$)与夸克模型预期数值($3\frac{1}{3}$)之间出现的明显分歧. 新粒子 $\tau^+\tau^-$ 对的产生恰好消除了这个分歧. 但是,人们对这项结果还存在争议. 在确定地证明珀尔小组所发现的事例确是重轻子之前,还有大量细致的分析研究要做. 这类珀尔称为“一致性检验”的工作花了大约一两年时间分别在 SLAC 和德国 DESY 实验室的若干个实验组中进行. 到 1977 年中,所有正式发表以及在会议上报道的数据结果都肯定了新粒子的存在,并与序贯带电轻子的假设完全一致. 这时新轻子正式被命名为 τ , 表示这是第三个(轻子)的意思.

应当指出,在 τ 中微子的发现中, SPEAR 对撞机起了重要的作用. 正负电子对撞机的固有特点和 SPEAR 所覆盖的能区为这项发现提供了其他实验无法相比的高产额、信号干净和易于分析的有利条件. 然而有趣的是, SPEAR 从设计到建造始终未曾获得政府正式批准与拨款,全靠 SLAC 当时的所长潘诺夫斯基(W. K. H. Panofsky)有远见的领导与支持,在项目濒临夭折之际,从常规经费中挤出钱来,使项目得以实现. 而在粒子物理发展史上, SPEAR 恰恰是取得重大成果最多的一个实验装置. 潘诺夫斯基实在是功不可没!此外,还必须提到理论工作者所起的重要作用. 长期在 SLAC 工作的华裔理论物理学家蔡永赐(Y. S. Tsai)曾对可能的带电轻子进行了十分细致系统的研究,并就其可能质量情况下的衰变性质等作出许多正确的预言,从而导引了实验的进行,并在实验中得到证实. 这些工作对于 τ 轻子的实验发现作

出了关键性的直接贡献.

τ 轻子的发现(以及随后对于 τ 轻子中微子的确认)打破了轻子与夸克之间的原有对称性,但同时揭开了人们认识第三代物质粒子的序幕. 很快发现了底夸克(b)(1977 年). 第三代夸克的另外一名成员顶夸克,虽然命名在先,却花了 10 年多的时间才在实验中得到了确证. 第三代物质粒子的存在对于粒子物理标准模型来说是十分重要的;这个模型缺少了第三代就是不完整的,也将无法容纳实验上观察到的电荷共轭—宇称破坏现象,或称 CP 破坏现象(J. Cronin 和 V. Fitch 等, 1964 年).

4 不断发展中的实验研究领域

自从雷恩斯和考温首次观察到反中微子以来,过去了将近 40 年. 中微子不仅本身继续保持为研究的对象,而且已经成为研究其他粒子结构函数及相互作用的有力手段. 中微子物理发展成为一个举足轻重的实验分支领域. 60 年代初,高能加速器上强中微子束的建立导致了弱相互作用研究的迅速发展. 70 年代以来,一系列中微子散射实验在验证标准模型预言的弱中性流相互作用以及其他方面,为确立弱电统一理论的地位发挥了巨大作用. 今天的中微子实验已不限于利用反应堆和加速器中微子束,来自太阳、大气以及超新星的中微子都已成为研究的对象和工具. 中微子探测装置的规模越来越大. 与雷恩斯和考温的实验相比,体积成万倍地增加,使用的材料(如铁)重达上千吨. 一些实验在深层的地下进行,有的实验甚至将大面积的海水和南极的冰层当作探测中微子的工作物质. 中微子物理研究的内容包括中微子质量测量、中微子振荡、双 β 衰变、中微子衰变以及中微子反应等,涉及到了粒子物理、原子核物理、天体物理与宇宙学的许多方面.

τ 轻子发现也已有 20 年的历史,虽然有关它的许多性质的研究不断取得进展,但在相当一段时间里,它在人们心目中仍然作为一个奇

物理

特粒子而受到有限的重视. 这种情况到 90 年代以来有了明显改观. 出现了许多高质量的研究工作, 突出地表现为统计性高、事例样本干净以及测量技术显著改进的特点, 标志着 τ 物理开始成为粒子物理学中精密测量的实验领域. 由中国和美国科学家组成的北京谱仪(BES)合作组在北京正负电子对撞机上近年来完成的 τ 轻子质量的精密测量是一个典型的例子. 这个组所测得的 τ 轻子质量为 $1776.88^{+0.22}_{-0.23} \pm 0.29$ MeV/ c^2 (其中第一项误差为统计误差, 第二项为系统误差), 修订了国际上原来的测量值, 在精度上提高了整整一个数量级. 根据这个结果和最新的 τ 轻子寿命及轻子衰变分支比测量值, 检验三代带电轻子弱耦合常数, 确认在一个标准偏差范围以内是一致的, 从而基本上澄清了近年来粒子物理学家对于 $e-\mu-\tau$ 普适性的质疑.

80 年代以来, 国际粒子物理学界逐渐形成了一种新的认识: 在不断致力于建造更高能量加速器的同时, 值得重视在已有能区中的高亮度加速器的潜在价值. 在这种认识的基础上, 1987 年在西欧原子核研究中心首先提出了 τ 轻子与粲夸克工厂(简称 τ -c 工厂)的建议. 设想中的 τ -c 工厂是一台峰值亮度达到 $10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 运行在 3—5 GeV 质心能量下的正负电子对撞机. 它所产生的成对 τ 轻子数目

可以达到 10^7 , 比目前水平高出 2—3 个数量级; 不仅如此, 它还提供了干净的实验环境, 本底小而易于控制, 从而成为 τ 物理精密有力的研究工具. 是否在中国建造一台 τ -c 工厂成为我国粒子物理学界近年来讨论的话题.

从 τ 轻子物理和中微子物理这些年来的发展情况可以看到, 对于一些科学发现来说, 它们在历史上所占地位的重要性以及它们对科学发展影响的程度往往需要经受时间的检验而看得更加清楚. 这也许可以部分地说明为什么这两项成果经过 20 年和 40 年之后才获得诺贝尔奖的原因.

珀尔 1927 年生于纽约, 现为 SLAC 及斯坦福大学教授; 雷恩斯 1918 年生于新泽西州, 现为加州大学欧文分校教授. 两人都长期坚持工作在带电轻子物理和反应堆中微子实验领域, 如今都已经接近或超过古稀之年了, 而雷恩斯的合作者考温则未能等到这个成果获奖而已作古了.

参 考 文 献

- [1] C. L. Cowan, Jr., F. Reines et al., *Science*, **124**(1956), 103.
- [2] F. Reines and C. L. Cowan, Jr., *Phys. Rev.*, **113**(1959), 273.
- [3] M. L. Perl et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 1489.
- [4] M. L. Perl et al., *Phys. Lett. B*, **63**(1976), 466.
- [5] Y. S. Tsai, *Phys. Rev. D*, **4**(1971), 2821.

高能物理新进展*

郑志鹏 黄涛

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要 叙述了近年来高能物理研究取得的新进展, 如顶夸克的发现、三代夸克的实验证据、轻子普适性的实验检验. 文章还对国际高能物理发展的趋势及中国高能物理的计划进行了介绍.

关键词 高能物理, 顶夸克, 轻子普适性

* 1995 年 6 月 6 日收到初稿, 1995 年 10 月 4 日收到修改稿.