

高能中微子实验

对弱电统一理论的验证

张家铨

弱电统一理论是近二十年来在高能物理领域中最成功的理论之一，它已经成功地通过了各种类型的实验的验证，其中高能中微子实验起了重要的作用。

高能中微子实验已有二十年的历史了，在所有高能质子加速器上它一直是一个很活跃的研究领域，其中 $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ 和 $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$ 弹性散射对于检验弱电统一理论尤为重要。

在弱电统一理论中有一个自由参数 $\sin^2 \theta_w$ ，理论预言这个参数应该具有单一的值，还预言有弱中性流存在。在 1973—1974 年实验上发现了存在弱中性流相互作用过程以后，实验物理学家们才纷纷开始安排实验检验理论所预言的参数。许多类型的实验结果都与弱电统一理论的预言相符。然而大多数精密的实验测量都是限于有强子参加的电磁相互作用和弱相互作用过程，例如， $e^- D \rightarrow e^- X$ ， $\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu N$ 和 $\nu_\mu N \rightarrow \mu^\pm X$ 等。对于纯轻子过程的测量，例如， $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ 和 $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$ 过程，由于实验上的困难，得到的事例数较少。但是，这些纯轻子过程的实验结果，由于不存在因强子参加所带来的复杂性，对弱电统一理论提供了特别有价值的检验，对理论的验证有决定性的重要意义。

高能中微子实验的重要性是由于中微子所具有的特殊性质决定的。中微子是很轻的、自旋为 $\frac{1}{2}$ 的类点粒子，它与物质的相互作用只有弱相互作用，这就可以在没有强相互作用和电磁相互作用效应的影响下研究在高能下的弱相互作用。一旦对于弱相互作用有了清楚的了解之后，又可以用类点的高能中微子来探索和研究强子(例如质子和中子等)的结构。然而，高能中微子实验是非常困难的。其原因是弱相互作用的截面很小。为了获得具有一定统计精度的实验结果(要求取得足够多的事例数)，就需要高能量、高束流强度和巨大的探测器。纯轻子过程实验 $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ 比有强子参加的作用过程实验 $\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu N$ 和 $\nu_\mu N \rightarrow \mu^\pm X$ 还更困难得多，这是因为：(1) $\nu_\mu e^-$ 作用截面更小，很难得到大量事例；(2) 很难鉴别这种事例。由于高

能 $\nu_\mu e^-$ 散射电子的飞行方向基本是朝前的，散射电子的出射方向与中微子的人射方向之间的夹角大约只有 0.6 度，因此只有用高角分辨率及较高能量分辨率的探测器才能真正鉴别它们；(3) 本底很大。主要本底来自 $\nu_e n \rightarrow e^- p$ 和 $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ 作用过程。为此，需要极为细致的物理分析，才能排除本底事例，鉴别出真正的 $\nu_\mu e^-$ 和 $\bar{\nu}_\mu e^-$ 事例。在下表中给出了近十多年来全世界的各实验组得到的 $\nu_\mu e^-$ 作用过程和 $\bar{\nu}_\mu e^-$ 作用过程的事例数。由此可见 $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ 和 $\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$ 弹性散射实验的重要性和它的困难程度。

表 $\nu_\mu e^-$ 弹性散射实验

年 代	$\langle E_{\nu_\mu} \rangle$ GeV	$\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$		$\bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^-$		作 者
		事例数	本底	事例数	本底	
1973	2.2	1	0.3 ± 0.1	3	0.4 ± 0.1	Gargamelle
1975	2.2	11	3	8	1.7	Aachen- Padua
1978	30	11	0.5 ± 0.2			BNL- Columbia
1979	25	9	0.5 ± 0.2			Gargamelle
1979	16.8	40	12			BMWOP*
1979	31	11	4.5 ± 1.4	41 ± 10		CHARM
1982	31	46 ± 12	64 ± 10	77 ± 19	146	CHARM
1983	2.2	51 ± 9	25 ± 3			BNL

下面一般地介绍一下高能中微子实验的方法和在验证弱电统一理论方面具有重要意义的一些实验结果。

高能中微子束流。

至今，高能中微子实验全部都是在 μ 中微子束流上进行的。 μ 中微子是由 π 和 K 介子的衰变 $\pi(\pm) \rightarrow \mu(\pm) \nu_\mu$ 和 $K(\pm) \rightarrow \mu(\pm) \nu_\mu$ 得到的。用高能质子束轰击厚靶产生 π^\pm 和 K^\pm 介子，然后对带电的 π 和 K 介子进行带电符号(正电荷或者负电荷)和动量的选择，并且进行聚焦，形成 π 和 K 介子束流。 π 和 K 介子在飞

行中发生衰变,产生 μ 和 μ 中微子 ν_μ ,最后用吸收体将 μ 和尚未发生衰变的 μ 吸收掉,就得到了实验上需要的 μ 中微子束流。过去在高能中微子实验中用的 μ 中微子束主要有两种类型,即所谓的窄带束和宽带束。这两种 μ 中微子束的差别可以从图1中给出的 μ 中微子束束流半径1.5m,离靶距离1550m的中微子能谱得到说明。这两种中微子束在实验上各有所长。

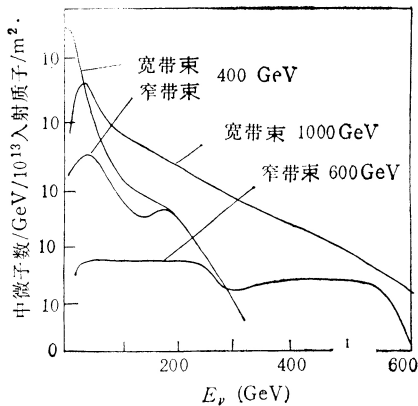


图1 μ 中微子束的能谱

高能中微子实验的探测器。

在高能中微子实验中探测器和实验靶必须构成一个单元。因为中微子与物质之间的相互作用截面很小,这就要求用很大质量的实验靶,同时 μ 中微子束的横截面也很大,所以探测单元必须包在靶中,构成一个靶和探测器在一起的单元。

现在,在高能中微子实验中主要有下述四种类型的探测器:

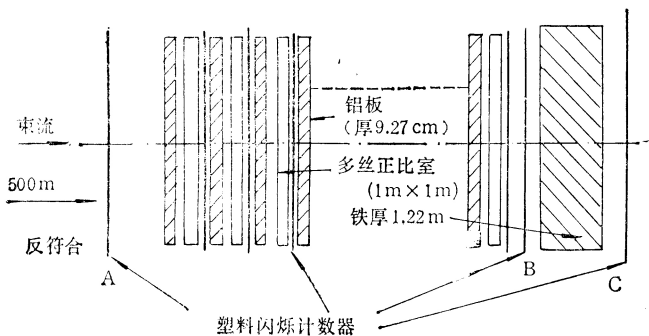


图2 BMWOP组的 $\nu_\mu e^-$ 散射实验装置

(1) 低质量密度的电子学探测器。这种探测器采用低原子序数的物质,例如铝或者大理石等作为实验靶材料,能够鉴别单个电子簇射并测量它的能量以及角度,还能够测量 μ 中微子束的方向和总能量。这种类型的探测器适合于纯轻子过程 $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ 弹性散射的测量。在图2中给出了这类探测器的一个例子,

是BMWOP组在 $\nu_\mu e^-$ 散射实验中用的探测器。这个探测器也是一种典型的取样量能器。它的核心部分由49个相同的取样单元组成,每个取样单元有一层厚度为1个辐射长度的铝板作为实验靶,一层多丝正比室和一层塑料闪烁计数器,尾部的铁吸收体和塑料闪烁计数器用来鉴别 μ ,区别中性流和带电流事例。这个探测器的标定实验结果表明,在4GeV时,探测器的角分辨率达到 ± 0.3 度(FWHM),能量分辨率大约为15%。图3是这个探测器得到的一个典型的单个电子簇射信息的显示图。

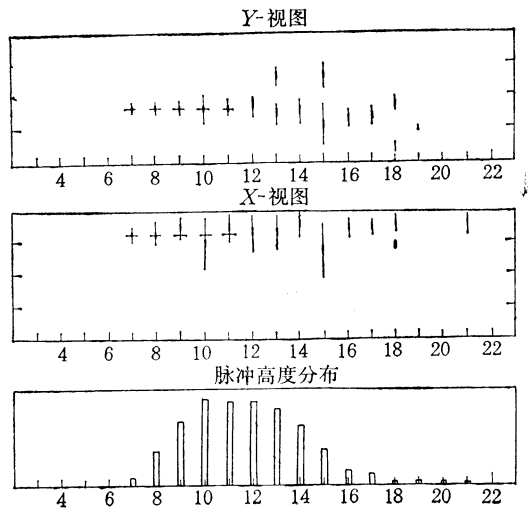


图3 一个典型的 $\nu_\mu e^-$ 事例显示图。

(2) 高质量密度的电子学探测器。这种探测器采用高原子序数的物质,例如铁作为实验靶材料。这种探测器常常重达几百吨,具有很大的探测器有效质量,适合于研究单举深度非弹 $\nu_\mu N$ 散射,测量多 μ 事例和寻找稀有事例。在图4中给出了这种探测器的一个例

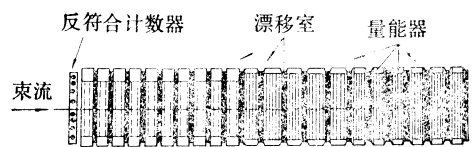


图4 CDHS组在 $\nu_\mu N$ 散射实验中用的探测器。

子,是CDHS组在 $\nu_\mu N$ 散射实验中用的探测器。CDHS探测器由21个单元组成。每个单元用磁铁,闪烁计数器和漂移室相间叠置,作为实验靶, μ 中微子量能器和 μ 能谱仪的一部分。这个探测器具有最高的物质密度,最大的 μ 接受度和最大的探测器有效质量。因此,这个探测器在研究单举带电流散射方面可以获得高统计精度的实验结果,在研究多 μ 稀有事例方面也是很好的。

(3) 大气泡室(包括重液气泡室,氢气泡室和氘气

泡室). 在高能中微子实验中用的气泡室一般都有由吸收体和电子学探测器构成的外 μ 鉴别器. 这种探测器能够测量末态单个强子, 鉴别在强子簇射内的电子并测量 μ , 能够比较精确地测量单个电子的能量和角度, 能够看见事例的顶点. 所以, 这种探测器适合用于 $\nu_{\mu}e^{-}$ 散射实验, 研究在自由中子和质子上的单举过程和某些短寿命的衰变过程. 但是, 由于气泡室的靶质量和数据处理速度的限制, 不能很快得到具有较高统计精度的实验结果.

(4) 一些特殊的探测器, 例如水契伦科夫探测器, 乳胶室与电子学探测器构成的混合探测器等. 这些探测器一般是为了某些特定的实验或者研究某些特定的过程而设计和建造的.

一些重要实验结果——弱电统一理论的基石.

归根到底, 理论的基础是那些具有决定性意义的实验结果. 弱电统一理论在实验上现在已经被证明是描述电磁相互作用和弱相互作用的一个很好的理论. 高能中微子实验的一些实验结果在验证弱电统一理论方面起到了基石的作用. 这些实验结果是:

(1) 1973 年 Gargamelle 实验发现了弱中性流事例, 证实了弱电统一理论关于弱中性流的预言. 这一发现引起了人们对这个理论的重视.

(2) 1975 年发现了用中微子与物质相互作用产生的粲粒子, 证明了 GIM 机制的正确性.

(3) 在 $\nu_{\mu}N$ 散射实验中获得了高统计精度的实验结果, 精确地测定了弱电统一理论参数 $\sin^2 \theta_w$ 的值并确定了弱中性流的结构.

(4) 1979 年 BMWOP* 组和 CHARM 组发表了具有一定统计精度的 $\nu_{\mu}e^{-}$ 散射实验结果, 给出了矢量耦合常数, 轴矢量耦合常数和参数 $\sin^2 \theta_w$ 的值.

这些实验与其它不同种类的实验都得到了一致的结果. 在图 5 中给出了各种实验测量得到的 $\sin^2 \theta_w$ 值

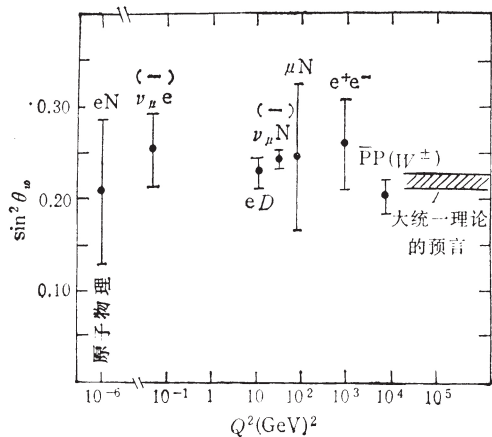


图 5 各种类型实验测量 $\sin^2 \theta_w$ 的结果.

和大统一理论的预言值. 各种实验都证明了弱电统一理论是一个正确的理论. 在过去的二十年中, 高能中微子实验在验证弱电统一理论方面起了重要的作用. 在即将建成的更高能量的质子加速器上, 高能中微子实验仍将是一个很活跃的研究领域, 在高能物理的发展中还将继续发挥它的独特作用.

* BMWOP 是莫玮教授领导的一个国际合作实验组. 这几个字母表示的意思是: B——维吉尼亚工艺学院和州立大学, M——马里兰大学, W——华盛顿美国国家自然科学基金会, O——牛津大学, P——北京高能物理研究所.