



(十二)

## 中性流的实验发现

### 一、前言

美国的格拉肖、魏恩伯格和巴基斯坦的萨拉姆因他们在弱电统一理论方面的贡献,共同获得了1979年度诺贝尔奖金的物理奖。这方面的理论在六十年代初期已经陆续提出,经过后来理论上的不断完善、实验上的反复努力终于得到了实验上发现弱中性流(以下简称中性流)的有力支持。1973年夏天西欧中心用重液泡室初次观测到中性流之后,世界上各方面的实验工作者做了多方面的实验,到1978年初美国斯坦福电子直线加速器中心用极化的电子束与氢及氘靶散射观测到不对称性为止,物理学家们认为弱电统一理论上预言的中性流与实验结果完全一致,所以决定授予诺贝尔奖金。

### 二、弱电统一理论与中性流

在普通物理学中,电现象和磁现象在外表上是不同的。麦克斯韦从理论上分析了这两者的内在联系,提出了电磁统一理论,并预言了电磁波的存在。

在基本粒子物理学中,目前人们把相互作用归纳为四种,即强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和万有引力作用。在积累了相当事实的基础上,人们就开始想把它们统一起来。这种称之为超级统一理论还没有成功。格拉肖、魏恩伯格和萨拉姆等人则从比较简单的做起,先把弱相互作用和电磁相互作用统一起来。

人们知道,两个运动的带电粒子,例如两个电子,之间的电磁相互作用可以形象地看作它们所产生的两个

电流之间通过交换虚光子进行的作用,如图1所示。在图1中,电荷守恒要求每一个分枝的电荷守恒,因而光子是中性的。这就是电磁相互作用的中性流过程。这种描述取得了

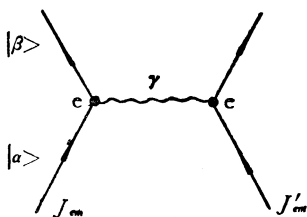
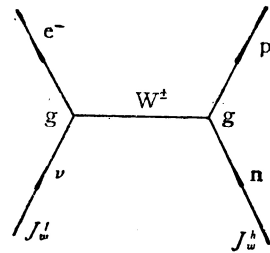


图1 电子-电子间电磁相互作用的示意图

很大的成功,在直到百万分之几以内,理论的一些预言与实验是符合的。因此,人们想借用这种方法来描述弱相互作用。假定弱相互作用是由弱的流-流相互作用所产生,如图2所示。在弱相互作用中轻子数守恒相应于电磁相互作用中的电荷守恒,每个弱流保持它的轻子数。图2中在顶点( $g$ )处,电荷的数值改变1个单位,例如中微子变成了一个电子。这是1973年以前对所有已知的弱过程的实验观测到的规律。因为在所有



所有的反应中,电荷必须守恒,所以与电磁相互作用中的媒介子 $\gamma$ 相当的弱作用媒介子 $w$ 必定是带电的,所以曾经认为弱相互作用中,中性流不存在。

图2 中微子与中子间弱相互作用示意图。其中 $l$ 和 $h$ 分别表示轻子和强子的弱流

为什么弱相互作用总是带电的?为什么弱相互作用与电荷的关系这么密切?是不是弱

相互作用和电磁相互作用有某种深刻的联系呢?格拉肖(1961年)以及后来的萨拉姆(1964年)和魏恩伯格(1967年)等人相继独立地提出,也许存在一种弱电统一的相互作用,弱相互作用和电磁相互作用是它的两种具体的表现形式。在这种理论模型中,要求弱相互作用除了有带电流相互作用(简称为带电流,在实验上当时只观测到这种相互作用)之外,还有中性流相互作用。于是就促进了实验高能物理学家在实验上寻找弱中性流。下面所谓中性流的发现,实际上是指弱中性流的发现而言,因为电磁相互作用的中性流早就知道了。

### 三、中性流是怎样发现的

弱相互作用最早是在原子核中发现的,这就是所谓 $\beta$ 衰变。但是并不是所有的弱相互作用过程都可以用来检验中性流是否存在。例如设想一个原子核当放出电荷相反的轻子(例如正电子和负电子)或一个中微子和反中微子时,可能是中性流存在的表现,但是这两种情况在实验上都是很困难的。因为,原子核放出电子和正电子的过程既可以是弱相互作用中性流跃迁

也可以通过电磁相互作用跃迁如图 3 和图 4 所示。

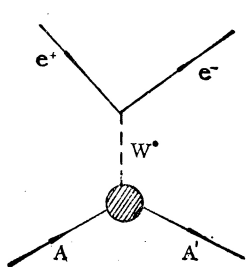


图 3 原子核衰变的弱中性流过程

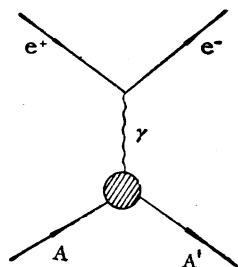


图 4 原子核衰变的电磁跃迁过程

前者的几率比后者小几个数量级。也就是说，即使弱中性流存在（如图 3）也很难显示出来，因为电磁跃迁也是中性流（如图 4），弱中性流湮没在电磁中性流的汪洋大海之中，要找弱中性流就像大海捞针一样。

原子核放出中微子和反中微子的过程，则只能通过中性弱流，如图 5 所示，但终态的中微子和反中微子都很难探测到。

后来人们终于想到了一些过程，它们只能通过弱中性流而不能通过电磁中性流实现，而且终态粒子又能全部或部分地用实验方法探测到。奇异粒子的一些衰变方式如果存在，可能是弱中性流的证据。人们已经确定，奇异粒子慢的衰变过程都是奇异数改变的，也就是说，凡是奇异数改变的奇异粒子的衰变过程必定通过弱相互作用而不会通过电磁相互作用，所以如果有

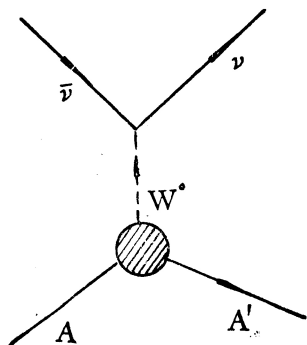


图 5 原子核放射中微子和反中微子的衰变的示意图

中性流的话，必定是弱中性流。例如，如果实验能观测到  $K^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-$  或  $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ ，则说明弱中性流的存在。这种努力，早在 1962 年就开始了。虽然经过了大量的探索，可是没有找到这种事例。

高能中微子反应提供了探索中性流的另一种方法。因为中微子只参与弱相互作用，不参与其他的相互作用，所以中微子反应没有电磁相互作用竞争的问题。如果在中微子反应中没有观测到带电的轻子，这就说明中性流存在，这种中性流既可以是奇异数改变的，也可以是奇异数不改变的。用高能中微子反应来研究弱相互作用的实验也在 1962 年开始了。由于人们受奇异数改变的中性流不存在的影响，对中性流的存在持怀疑态度，再加上高能中微子产生中性流的实

验比较困难（因为这种过程的终态产生的轻子是看不见的中微子，而不是带电的轻子。例如，为了确认带电的径迹不是  $\mu$  子而是强子，探测器的灵敏长度必须足够大，而当时没有这么大规模的探测器）。所以没有大力开展高能中微子作用的中性流的寻找，到 1973 年为止也没有看到中性流的事件。

这些结果曾经使人们相信，在自然界中，弱中性流或者不存在，或者非常稀少。

经过十来年的多方努力都没有找到中性流。对这种情况，不同的人有不同的认识。有些人被表面现象所迷惑，认为中性流不存在是确实无疑了。有些实验工作者即使从事高能中微子实验，也只注意带电流事例的积累；对中性流事例，或视而不见，或用种种理由解释为本底而丢掉。有些理论工作者开始在理论上解释中性流不存在的原因，甚至对提出的弱电统一理论进行修正，认为弱电统一理论可以通过中性流也可以不通过中性流等等。更有甚者，有些科学杂志编辑部竟把预言有中性流存在的论文退还作者，不让发表这类文章的理由是：“中性流不存在是人所共知的事实”。

可是另外一些人（包括理论物理学家和高能物理实验科学家）代表了正确的思想。不少理论物理学家在弱电统一理论的启发下，不仅预言中性流的存在，认为中性流比带电流弱不了多少，而且还预言了一种机制（或者叫做新的量子数，后来称之为粲数），由于这种机制，使得奇异数改变的中性流不容易出现。在这种正确的理论的指导和鼓舞下，有些高能物理实验科学家们认真分析研究了过去寻找中性流实验的情况。他们认为奇异数改变的衰变过程的中性流很小的结论比较可靠，而高能中微子实验却很不准确，不足以下结论。于是他们从两方面着手。一方面增加中微子束流的强度，另一方面建造比已有探测器的规模大得多的中微子探测器。经过了多方面的努力，结果在 1973 年，西欧中心的一个实验组，包括来自西德、比利时、瑞士、法国、意大利和英国等六个国家的高能物理实验科学家共五十多人利用庞大的重液泡室（有效长度为 4.8 米，直

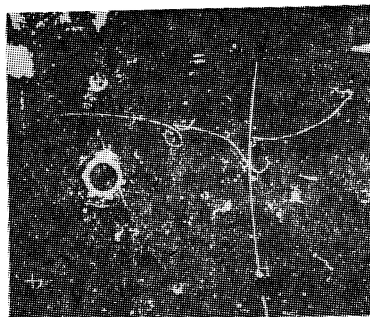


图 6 第一个中性流事例的照片。这是用西欧中心的重液泡室获得的。一个  $\mu$  子型反中微子从左边进入泡室并和一个电子发生相互作用，反冲的电子在泡室中显示出径迹。在径迹末端转弯处发生韧致辐射。在下游，两个韧致辐射光子转换成两个电子对明显可见

子探测器。经过了多方面的努力，结果在 1973 年，西欧中心的一个实验组，包括来自西德、比利时、瑞士、法国、意大利和英国等六个国家的高能物理实验科学家共五十多人利用庞大的重液泡室（有效长度为 4.8 米，直

径为 1.8 米, 灵敏体积为 7 立方米) 和能量为 28 GeV 的加速器所产生的中微子束, 终于找到了中性流. 第一个中性流事例的照片及典型的中性流事例的照片如图 6、7 和 8 所示.

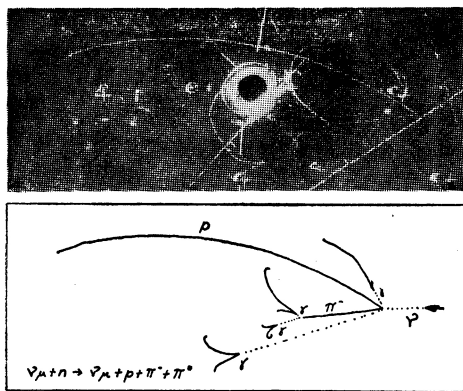


图 7 一个典型的中性流事例的重液泡室照片.  $\mu$  子型中微子从右边进入泡室并和一个中子发生相互作用. 从相互作用中没有看到带电的  $\mu$  子, 所以没有发生电荷交换. 重液泡室有足够的体积、能鉴别所有产生的粒子

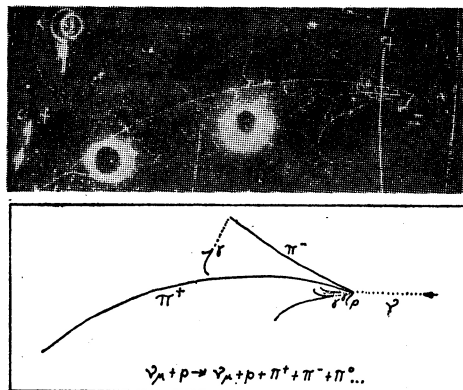


图 8 另一种典型的中性流事例的重液泡室的照片.  $\mu$  子型中微子从右边进入泡室并和一个质子发生相互作用. 所有看得见的径迹都鉴定为强子(利用它们的曲率和射程以及它们的次级相互作用)

图 6 的第一个中性流事例是在分析了 375,000 张中微子照片和 360,000 张反中微子的照片的基础上找到的唯一符合条件的事例. 但是仅有一个事例不能定案; 只有后来发现了大量的像图 7 和图 8 那样的事例之后, 人们才真正相信中性流的存在. 图 7 和图 8 的中性流事例是中微子和核子相互作用的过程, 这种过程的几率要比图 6 的中微子和电子相互作用过程的几率大两千倍. 实验分析了用中微子束的 83,000 张照片和用反中微子束的 207,000 张照片. 总共找到了 102 个终态没有  $\mu$  子的中微子事例. 有  $\mu$  子的中微子事例为 428 个. 用反中微子束的照片的相应事例数分别为 64 个和 148 个.

这个重大发现很快就在美国装备有世界上最大的加速器 (400GeV) 的费米实验室得到了证实 (图 9).

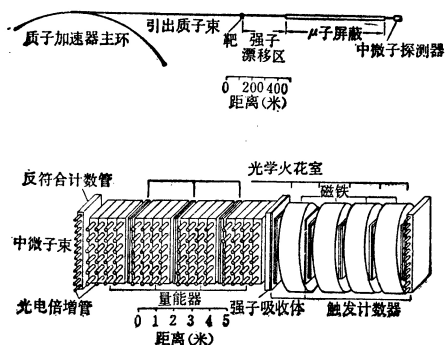


图 9 费米实验室首次证实中性流的装置与泡室方法完全不同, 电子学谱仪收集数据的方法不是拍下照片进行分析而是用复杂的快速的电子学逻辑讯号进行的

自从发现中微子过程的中性流之后, 人们很自然地进一步研究在其他反应中是否也存在弱中性流以及进一步研究中性流的性质, 特别是其与带电流的异同.

进一步的实验研究表明, 中性流也是宇称不守恒的. 这也给在其他反应中寻找中性流提供了方便. 因为电磁相互作用和强相互作用的宇称是守恒的, 所以可以利用反应产物的不对称性来把湮没在强相互作用以及电磁相互作用的汪洋大海中的弱中性流找出来.

自从 1956 年李政道、杨振宁、吴健雄等人证明原子核  $\beta$  衰变弱相互作用过程的宇称不守恒之后, 陆续有人寻找原子和原子核的  $\gamma$  跃迁过程中的宇称不守恒. 但是由于这些结果一方面数据不够肯定, 另一方面在数量上也测得不够精确, 所以为了检验弱电统一理论专门进行了用激光与铯原子作用等实验以及其他一系列原子核  $\gamma$  跃迁实验, 其总的结论是与弱电统一理论相一致的. 但是由于这些原子和原子核都比较复杂, 后来又有人利用  $n + p \rightarrow d + \gamma$  进行了实验, 结果也和弱电统一理论符合. 最有决定性意义的实验是 1978 年由斯坦福电子加速器中心完成的极化电子束与氦靶及氢靶散射的实验, 以高度的精确性和可信度证明了弱电统一理论与实验在中性流方面完全一致.

#### 四、结束语

中性流的发现过程是艰难曲折的, 既要克服技术上的困难也要克服思想方法上的障碍. 这是一个理论与实验密切配合、工作方法和思想方法严格要求的成功例子.

这一辉煌的成就鼓舞着人们进一步把弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用三者统一起来, 这种新理论称为“大统一”理论. 可以预料, 大统一理论的一些预言, 例如质子衰变等, 在不久的将来, 会取得激动人心的成果.

(杜远才)