

# 中间玻色子及其发现后的十年

江向东 黄涛

(中国科学院高能物理研究所)

十年前,1983年1月25日,西欧中心(CERN)向全世界宣布了一项重大发现:该中心的UA1和UA2两个实验组在正-反质子对撞机上发现了带电中间玻色子 $W^+$ 和 $W^-$ 。这一捷报引起的科学界的激动尚未平复,两个实验组又分别于同年6月和7月宣告了 $W$ 粒子的电中性伙伴——中性中间玻色子 $Z^0$ 的发现。这两种传递弱相互作用的媒介子的发现,直接有力地证实了电-弱统一理论的正确性。当时,西欧中心所长索培尔评价说:“这是三十五年前发明晶体管以来物理学领域中最重要发现”。这项举世瞩目的物理成果,马上赢得了科学界的最高荣誉。两位领头人,一位是促使西欧中心将超级质子同步加速器(SPS)改建成质子-反质子对撞机,并负责这个反质子课题的意大利物理学家卢比亚,一位是发明随机冷却技术,从而使反质子便于处理的荷兰物理学家范德梅尔,荣获1984年诺贝尔物理学奖。

## 一、从费米理论到电-弱统一

多年来,人们把宇宙中一切物质运动形式归结为四种基本的相互作用:引力作用、电磁作用、弱作用和强作用。现代粒子物理学中某些最激动人心的进展,乃是发生在弱作用物理领域内。实验最早观测到的 $\beta$ 衰变(中子 $\rightarrow$ 质子+电子+反中微子),便是一种自发弱衰变过程。通常,一种相互作用的性质是由它的强度(即耦合常数)和作用类型(如矢量型、标量型等)来表征。这种强度决定了衰变反应的比率,或说衰变寿命,而作用类型决定了诸如电子的能量分布,核子的自旋

是否在衰变中改变方向,以及其它细微效应。

1934年,费米建立的四费米子直接相互作用的弱作用理论,是矢量型的,它不改变自旋的方向。在此理论中,费米引入一种在类型上与电流相同都为矢量型的弱流概念。一个带电费米子与一个中性费米子构成一个带电弱流,四个费米子场构成的两个带电弱流在同一时空点上直接发生相互作用。两弱流都使费米子的电荷改变一个单位,一个改变 $+1$ ,另一个改变 $-1$ ,从而在弱作用过程中电荷仍然守恒。从空间对称性质看,很长时间人们都以为弱流只能是矢量型的流。1956年,针对弱衰变实验中显现出来的一系列疑难问题,李政道和杨振宁提出在弱作用中宇称不守恒的假定。次年,吴健雄便在钴-60衰变实验中证实了这个假定。于是,描述弱作用的理论不必受空间反射不变性的限制,其数学形式的选择范围得以扩大。在这方面,苏达珊和马尔夏克有过很多贡献。1958年,费曼和盖尔曼提出了矢量型的流与轴矢量型的流相减,即(V-A)型的弱作用普适理论。所谓普适性,是指所有弱作用过程都可用同一个普适强度常数,或说普适耦合常数,即费米常数( $G_F=1.166\times 10^{-5}\text{GeV}^{-2}$ )来描写。弱作用强度的普适性,是弱作用的一个基本性质,也是弱作用能与电磁作用统一描述的前提。

弱作用普适理论,虽然很好地描述了低能情况时的多种弱作用现象,也得到大量实验的验证,但从理论基础反映出的一些问题,表明该理论只是一个在一定范围内的近似理论,而不是一个完备的理论。1)弱

## 三、俱往矣,而今迈步从头越

成绩已成过去,放眼未来看今朝。那破空而来的拍天浪,带着初春的清新气息,带着无数刊友的真挚热爱,带着改革开放的磅礴气势,扑进我们的胸怀!在改革大潮面前,以往的那点成就何足挂齿!当你悠哉陶醉之时,别人又跑到前面去了。实在没有半点理由自满。骄兵必败,固步自封必垮!

当新的一年到来的时候,我们怀着真诚的感激之

情,向一切关心我们的领导、朋友、读者、作者致意!同时,我们也向他们庄严而郑重地保证:《现代物理知识》编辑部决不会为过去的业绩飘飘然,一定要按照中国科学院院长周光召最近讲话的精神,深化期刊工作的改革,探索走向经济实体的方法与途径,增强自我发展能力、为使《现代物理知识》杂志在新的竞争中立于不败之地,再加一把劲,更上一层楼。

衣带渐宽终不悔,为伊消得人憔悴。弄潮儿向涛头立,含笑击水迎未来!

作用的耦合常数  $G_F$  不是一个象电磁耦合常数 ( $\alpha=1/137$ ) 那样的纯粹的数, 而是一个带有质量负二次方量纲的量。根据重整化理论判断, 这种相互作用理论是不可重整化的。因此, 由于高阶效应涉及的发散项不能通过重整化方法来消除, 故而无法计算弱作用的高阶效应;  $\bar{2}$ ) 一旦弱作用过程的能量达到费米常数所表征的能量标度, 即费米常数倒数的平方根, 大约  $300\text{GeV}$ , 该理论就不再适用。此时, 根据这种点相互作用理论算得的散射截面会破坏按么正性的普遍要求对截面的大小所给的限制。通常称它为么正问题。

物理学家们早就想到, 用交换有静止质量的粒子来传递弱相互作用, 可能会解决费米理论中的问题。这种思想可追溯到汤川秀树和克莱茵, 他们早在三十年代就在这方面探讨过。1949年, 李政道、罗申布鲁斯和杨振宁在《物理评论》上发表了一篇通讯, 提出了中间玻色子假说。物理学家们设想的中间玻色子, 是类似于电磁场量子—光子角色的传递弱作用的弱场的量子, 因而用英文“弱”的打头字母  $W$  来命名。为了与已知的弱作用的实验相符,  $W$  粒子应具有如下性质: 它是带电粒子, 从而能与费米子构成的带电流耦合; 它是自旋为 1 的矢量玻色子, 从而使弱作用具有 (V-A) 型的特征; 它的静止质量应很大, 从而保证在低能弱作用过程中与费米理论等效。  $W$  粒子的质量, 用  $M_W$  表示, 应反映出弱作用力程的短程特点。假如在点相互作用这种极端情况下看, 由于力程被假定为零, 故要求  $M_W$  无穷大。根据弱作用耦合常数和么正性限制来估算, 得到  $M_W$  的下限为  $30\text{GeV}$ , 上限为  $350\text{GeV}$ 。

在中间玻色子假说中, 由于弱作用是通过交换  $W$  粒子来实现的, 故而在计算散射截面时, 比点相互作用多了一个含  $M_W^2$  的因子, 这个因子在高能时使截面值减小。只要  $M_W^2$  不太大, 就不会破坏么正限。另外, 由于引进了  $W$  粒子与带电流耦合的新耦合常数  $g$ 、弱作用的耦合常数  $G_F$  等效于  $g^2/M_W^2$  这个量, 而新耦合常数  $g$  是个无量纲常数, 这就符合可重整性的必要条件, 表明弱作用有可能是可重整的。

中间玻色子假说, 不仅可以克服费米理论中的一些基本困难, 还使弱作用的力程、强度和作用规律显得与电磁作用的相似。这些相似之处, 提供了统一描述弱作用和电磁作用的可能性。不过, 这方面的发展紧紧依赖于规范理论的发展, 需要解决下列基本问题: 其一, 电磁理论是  $U(1)$  规范理论, 对电弱统一理论, 选什么样的对称性合适? 其二, 规范粒子是无静止质量的粒子, 怎样使  $W$  粒子获得很大的质量? 其三, 这样的理论能否实现量子化和重整化? 后两个问题, 自 1954 年杨振宁和密尔斯建立非阿贝尔规范场理论以来, 一直是令人感兴趣但又十分棘手的问题。

1961 年, 格拉肖解决了第一个问题。他选择了  $SU(2) \times U(1)$  对称性, 提出了一个电弱统一模型。1967

年和 1968 年, 温伯格和萨拉姆分别在格拉肖群论模型框架内引入了真空对称性自发破缺的希格斯机制, 使电弱统一模型趋于完善。借助希格斯机制, 解决了第二个问题。第三个问题, 直到 1971 年才由特霍夫解决。

电弱统一模型的基本思想是: 将同位旋空间中的定域  $SU(2)$  对称性和超荷空间中的定域  $U(1)$  对称性结合起来, 让弱作用和电磁作用统一由  $SU(2) \times U(1)$  规范场传递。通过对称性自发破缺, 使对称性由  $SU(2) \times U(1)$  定域规范不变性破缺到只剩下一个对应电荷的  $U(1)$  不变性。破缺掉的对称性所对应的三个规范场分量则获得质量, 为中间玻色子  $W^+$ 、 $W^-$  和  $Z^0$ 。残留的  $U(1)$  对称性对应的电磁场分量仍无质量, 表现为光子。

电弱统一模型有两个重要预言: 第一, 预言了中性弱流的存在。中性弱流, 形式上与带电弱流相同, 只是不改变费米子的电荷, 它是过去的理论中所没有的。该模型不仅预言了中性流弱相互作用的存在, 还完全确定了它的结构和相互作用强度。因此, 检验这一预言, 对该模型来说, 是带判定性的; 第二, 预言了中间玻色子  $W$  和  $Z$  的质量分别为  $83\text{GeV}$  和  $93\text{GeV}$  左右。当时的实验能量还达不到足以产生这些粒子的水平。

1973 年, 西欧中心的实验证实了中性流弱相互作用的存在。1979 年, 格拉肖、温伯格和萨拉姆因电弱统一理论的成功而荣获诺贝尔物理学奖。值得注意的是, 他们获得这一荣誉是在发现中间玻色子之前四年。1983 年实验上发现了  $W^\pm$  和  $Z^0$ , 而且其质量与理论预言值惊人地相符。这不仅直接证实了电弱统一理论, 也是对当年诺贝尔奖的再次肯定。

## 二、机遇与挑战并存的十年

发现中间玻色子不久, 1984 年, 在西欧中心的对撞机上又发现一系列激动人心的反常结果。为惊喜所冲动的物理学家甚至将某些“新”结果确定无疑地写进了书刊。出乎意料的是, 1985 年, 西欧中心在更高精度下的实验结果完全否定了它自己在 1984 年发现的反常事例。这种否定, 一方面是对格拉肖-温伯格-萨拉姆 (G-W-S) 电弱统一模型的进一步肯定, 一方面是对顶夸克和希格斯粒子产生困惑。

1964 年由盖尔曼和兹韦格建立的关于强子结构的夸克模型, 发展到七十年代, 人们已认识到至少有 6 种夸克存在, 它们是上、下、粲、奇、顶、底, 用符号表示依次为  $u$ 、 $d$ 、 $c$ 、 $s$ 、 $t$ 、 $b$ 。每种夸克带有三样“色荷”, 由 8 种带有色荷的胶子传递夸克之间的强相互作用。自然界的所有普通物质都是由电子和上、下两种夸克构成的。根据“色禁闭”论的解释, 夸克和胶子都不能脱离强子而单独存在。描述夸克之间的作用力的动力学理论叫做量子色动力学 (QCD)。将量子色动力学模型与电弱统一模型组合起来的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范理论模型, 便是著名的描述强、电磁和弱三种相互作用的标准模型。作为标准模型的基石的 6 种夸克,

到 1977 年止,其中 5 种夸克的存在已得到实验证实,唯独顶夸克的存在是个悬案。

发现顶夸克无疑是一项可获诺贝尔奖的研究成果,自然是众多高能加速器的主要物理目标之一。西欧中心在发现中间玻色子的同年,于 9 月 13 日在日内瓦近郊举行了盛况空前的大型正负电子对撞机(LEP)奠基庆典。这台耗资九亿瑞士法郎,质心能量为 91GeV 的对撞机,于 1989 年建成并运行,同年 11 月 13 日举行落成典礼。在 LEP 运行之前,全世界找到的中间玻色子很有限。例如,在首次发现时,W 的事例只有 5 个,Z 事例也只有 13 个。LEP 运行后,Z 粒子的来源大为丰足,四大探测组已经收集到数百万个 Z 事例。Z 粒子物理业已成为常规物理,已经获得的精确数据使人们对标准模型有了更深刻的了解。通过分析 Z 粒子的质量和中微子类型数之间的关系,确认了自然界存在的中微子不会超过三种的结论。如果轻子和夸克之间果真存在一种对称关系,那么这个结论就对标准模型预言的夸克种类有了确定的限制,导致自然界只存在 6 种夸克的结论。美国费米实验室 CDF 实验组近来的结果给出顶夸克的下限为 103GeV。另一方面一系列的间接实验结果的分析也给出顶夸克的质量范围可能在 100—200GeV 之间。

为了检验标准模型的自洽性,还必须在 81GeV 处对 W 玻色子进行精确测定。Z 粒子可以直接产生于正负电子湮灭,但 W 粒子只能成对产生,因而要求更高的对撞能量。为此,LEP 计划在 1995 年将目前的束流能量提高一倍(称为 LEP200 工程)。

在生产中间玻色子的行列里,美国的费米实验室是西欧中心的主要竞争对手。费米实验室的千京电子伏加速器(Tevatron),是世界上第一台大型超导粒子加速器,于 1985 年第一次实现质子-反质子对撞,束流能量达到 800GeV。该机 1988 年达到设计指标:束能为 1000GeV=1TeV,亮度(即粒子产额)为  $10^{30}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ 。费米实验室自 1987 年得到第一个 W 粒子事例以来,取得了一系列有意义的实验结果。它的固定靶实验研究强子物理引起国际高能物理学家的重视。尤为重要的是近年来 CDF 实验组对顶夸克的寻找,如果顶夸克的质量确实在 100—200GeV 之间,可望在近期内发现顶夸克。美国斯坦福实验室的直线对撞机(SLC),正负电子束的单束能量为 50GeV,于 1988 年首次实现对撞,次年获得首批 Z 粒子,继而得到了 Z 的质量和微子类型数的关系。

德国汉堡 DESY 实验室的电子-质子对撞机(HERA)于 1992 年 10 月 1 日举行落成庆典。HERA 的电子束能量为 27.5GeV。该实验室在 1986 年之前,曾将原有的束流能量为 45GeV 的正负电子对撞机(PETRA)开到创记录的水平,也不曾在正负电子湮灭中看到顶夸克的迹象。无论在老加速器还是在新加速

器上,寻找顶夸克的情形颇令人困惑。正如在 HERA 的庆典上一位物理学家说的:“谁都知道在哪儿可能找到顶夸克。究竟在哪儿?又谁都不知道”。

比顶夸克不露面更费解的问题,是自发对称性破缺的希格斯机制。它是电弱统一图象成功的关键。电弱统一标准模型本身,很难限制必需的希格斯场多重态的数目。G-W-S 模型只引进一个希格斯场二重态,这样只预言了一种中性希格斯标量粒子的存在。因而人们称这个含有最少希格斯场的模型为最小标准模型。其它在此基础上推广的模型,其预言就不只是一种希格斯粒子,而是多种,有中性的,有带电的。理论上,希格斯粒子的质量与希格斯场的自作用势能的形式有关,是个不确定的量。这种不确定性,无疑给实验探测带来了盲目性。从七十年代起,世界各国的加速器大都竭力寻找希格斯粒子。从几个 MeV 的能区找起,直到上百 GeV 的能区,始终不见这神秘的粒子。1992 年,西欧中心 L3 协作组根据 LEP 上 Z 粒子强衰变的 408000 个事例,在 95% 置信水平,给出了最小标准模型预言的希格斯粒子的质量下限为 52GeV。至于人们推测的希格斯粒子的质量上限,已从几十 GeV 提高到 1000GeV。从 52GeV 到 1000GeV,这样大的质量范围,好比是告诉渔夫鱼在河里。

此外,标准模型含有不能由理论本身来确定的二十来个任意参数,其中半数以上来自希格斯部分。这大大减弱了该理论的预言能力。不少人认为,虽然现有的实验结果都不排斥标准模型,但该模型的预言能力已受到限制,必须寻找新现象,探索新物理。

超越标准模型的理论探索大都起始于七十年代。例如:对称性的动力学自发破缺理论,以及视希格斯粒子为“多彩夸克”的复合粒子的“多彩”理论,企图是弄清希格斯场的实质和对称性自发破缺的物理机制。多种复合模型理论,则是从物质结构的更深层次出发,来看看下一层次的物理信息对它上面的夸克层次的研究有无启迪。这种方法,好比从原子的结构着手来研究分子。上述多彩理论就是复合理论的一种。大统一理论、超对称理论和超弦理论,则是引进更高的时空对称性或更广义的对称性,以期给出更多、更确定的理论预言。电弱理论的统一描述,用的就是这种方法。最近十年,无论是从更深层次探微,还是从更高对称性鸟瞰,这两方面的尝试都进展缓慢,甚至举步艰难。近年,进行这些尝试的人少了,而致力于发展和检验标准模型的人多了。

物理学的飞跃,或依赖理论概念的突破性发展,或依赖实验上的突破性发现。在发现中间玻色子之后的十年,对粒子物理学而言,无论在理论上还是实验上都难说有突破性进展。不过,这十年求索的收获,可能为下一个突破口开辟了通路。这十年,与其说是缓慢发展的十年,不如说是机遇和挑战并存的十年。