

实验回顾和展望

发现中间玻色子的

谢一冈

早在30年代费米在弱作用理论中就提出了中间玻色子存在的设想,到1967年温伯格和萨拉姆提出的弱电统一理论完满地从理论上预言了传递弱作用的带电的中间玻色子 W^\pm 和中性中间玻色子 Z^0 的存在,以及它们和传递电磁作用的粒子-光子的内在联系。但是,所预言的 W^\pm 和 Z^0 质量很

大,分别约为质子质量的80倍和90倍,所以直到70年代中间,世界最高能量的加速器还不能产生如此大质量的粒子。为了寻找 W^\pm 和 Z^0 ,十几年来,欧美一些国家不惜花费巨资去建造大型加速器和粒子探测装置来寻找这些粒子。

直至欧洲核子中心质子反质子对撞机建成后,UA-1和UA-2两个实验组于1983年1月宣布发现了 W^\pm 粒子,同年6月和7月又发现了 Z^0 粒子。这一发现,正如该研究中心所长朔佩尔所说,是35年前发明晶体管以来物理学领域中最重要发现,因此卢比亚和凡·德·麦尔获得了1984年度诺贝尔物理奖。

一、实验设备

1976年日内瓦欧洲核子研究中心(CERN)的意大利物理学家卢比亚等人建议改建这个研究中心的450 GeV 超级质子同步加速器,实现质子反质子对撞。在荷兰物理学家凡·德·麦尔的领导下仅用了两年时间于1980年7月建成了反质子储存环。在主环内互相反向运行的质子和反质子当加速到270 GeV 后进行对撞,可以达到540 GeV 质心系能量,这个能量足够用于产生 W^\pm 和 Z^0 。

为了寻找 W^\pm 和 Z^0 粒子除有高能的对撞机外,

还必须在对撞点周围建造能探测轻子和强子的精密度探测器。1981年秋,由卢比亚领导的UA-1和法国物理学家达累拉领导的UA-2大型探测粒子的实验装置建成。这是非常庞大而复杂的设备。仅以UA-1探测器为例,它的总重达2000吨,安装在地下30米处,主体部分长12米,高9米,宽10米,外侧有三层楼的活动房屋安装快电子学系统,并通过数万条电缆与地面控制室内由数十台中小型计算机组成的数据获取系统和控制系统相连。整个探测器系统包围在束流管道周围,几乎是全封闭型的,只有0.2度张角让束流管道通过。为了探测较多的产物,整个探测器系统在隧道内延伸达40米。

产生的 W^\pm 和 Z^0 可以有很多种衰变方式,为方便起见,实验上只采用 W^\pm 和 Z^0 衰变成轻子对作为判据。 W^\pm 衰变为轻子对($W^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e$ 及 $\mu^\pm \nu_\mu$)的分支比为1/4,而 Z^0 衰变成轻子对 e^+e^- 及 $\mu^+\mu^-$ 的分支比只是1/10。所以在1982年500小时的运行中只发现了5个 W^\pm 事例,没有能发现 Z^0 ,当1983年4月至7月的运行期间,亮度提高10倍以上后才发现了 Z^0 。

二、 W^\pm 和 Z^0 的发现与结果

利用这样复杂的设备来寻找几个 W^\pm 和 Z^0 ,当然是十分困难的事,就相当于在十亿人中寻找几个有特征的人一样,仅以1982年发现5个 W^\pm 粒子的筛选判定过程为例,首先,我们不可能也没必要记录这十亿次事例,先用触发条件只选择那些我们感兴趣的事例。理论预言,两个夸克的硬碰撞所产生的 W 在小于 10^{-20} 秒的极短时间内衰变成的轻子对 $e\nu$ 或 $\mu\nu$ 都具有大横动量。为此,本实验设置了四种触发条件:(1)电子触发;(2) μ 触发;(3)喷注触发;(4)总横能量大于40 GeV 的触发。

我们先按 $W \rightarrow e\nu$ 的方式搜索 W 粒子,在上述四种触发方式中,电子触发共有14万次。在这14万次事例中,满足在相邻电磁量能器单元内沉积能量大于15 GeV,而且由量能器定出的电子方向与中心探测器内好的径迹相吻合的事例只有1106个。对这1106个事例再通过各种孤立条件筛选后,得到167个事例。因为电子不应该在强子量能器中有能量沉积,所以进一步选择那些在强子量能器中沉积能量小于0.6 GeV的事例后,只剩下72个事例。再利用电磁量能器和中心探测器所测得的动量相符这一判据,筛选出40个事例。至此,利用计算机离线分析已告一段落。进一步对这40个事例进行空间几何扫描观测,排除掉35个有喷注的事例后,剩下5个无喷注的事例。恰好这5个无喷注的事例都伴随有与一个孤立大横动量电子方向相反的能量丢失,这就是中微子 ν 。末态粒子的总动量近似为零,而总能量为 2×40 GeV左右,恰好是 W 的不变质量。这就证实了这5个事例就是 $W \rightarrow$

W 衰变。由径迹在中心探测器内的弯曲取向,可以得出有 4 个 W^- 、一个 W^+ 。图 1 为其中一个事例,可以清楚地看到在中心探测器内的一个孤立的大横动量电子的径迹。

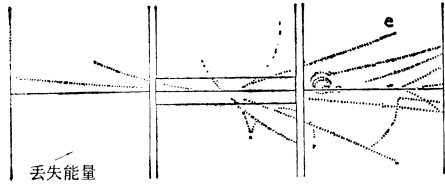


图 1 事例 4017 电子的径迹

1983 年 4 月到 6 月 UA-1 组的实验运行期间发现了 5 个 Z^0 衰变为轻子的事例,其中 4 个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 、一个 $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 。另外还有一个伴随硬光子。7 月 UA-2 组报道了 8 个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 事例,其中 4 个不太可靠。UA-1 组搜索 Z^0 的方法与寻找 W 的方法类似,只是这时的末态是大横动量轻子对 e^+e^- 或 $\mu^+\mu^-$ 。因此采用的筛选条件是(1)两对相邻电磁量能器单元的横能量沉积大于 25GeV; (2)双 μ 事例。经过筛选条件(1)的事例中至少有一个电磁能量沉积的方向与中心探测器内径迹吻合的事例共 152 个,其中在强子量能器中能量沉积小于 800MeV 的只剩 6 个。这当中只有 4 个满足孤立条件(即中心探测器内所选径迹周围的一定锥角内的其它径迹的总横动量小于 3

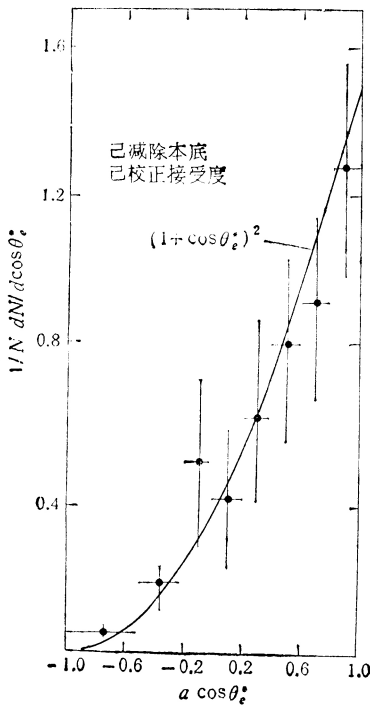


图 2 UA-1 75 事例

GeV/c,且在选中的电磁量能器两侧的单元内总沉积能量小于 4 GeV)。所得到的这些事例的两个大横动量电子其夹角都接近 180° ,而总沉积能量为 90—100GeV 左右。用上述质量公式得到

$$M_z \simeq (95.2 \pm 2)\text{GeV}/c^2.$$

经过筛选条件(2)的事例中 μ 横动量大于 7 GeV/c 的事例只有 42 个,再用扫描方法

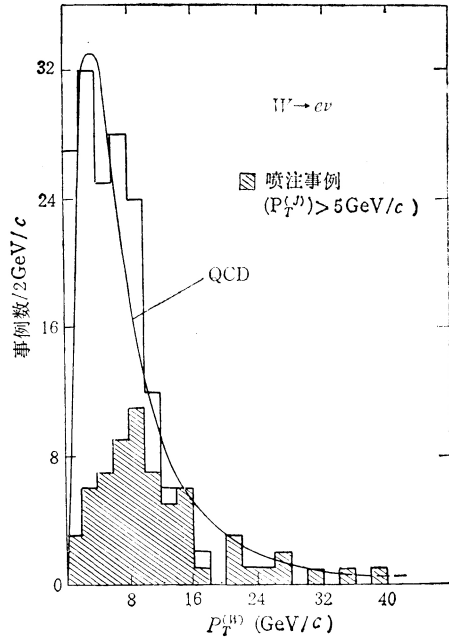


图 3 UA-1 172 事例

排除不通过对撞点的宇宙线 μ 子。同时,考虑了 μ 子在量能器中沉积的能量条件、电离损失,中心探测器径迹与外层 μ 漂移管位置拟合条件后,只剩下一个 $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 事例。

1982—1983 年和 1984 年两个阶段 CERN 的 $P\bar{P}$ 对撞机运行中,UA-1 和 UA-2 组分别累积了 399nb^{-1} 和 452nb^{-1} 的积分亮度,对 W^\pm 和 Z^0 的性质作了更精确的测量,其中包括对它们的质量、半宽度和截面分支比的测量,并由此定出温伯格角的值。还测量了 $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu$ 事例中 e^\pm 的角分布,如图 2 所示,测量结果与弱电统一理论的预言一致,图 3 为双轻子横动量的分布,也符合量子色动力学的预言。

三、近况与展望

W^\pm 和 Z^0 的发现使弱电统一理论得到了直接的实验验证,而且实验结果与理论符合得非常好,从而使以弱电统一为重要基础的“标准模型”有了坚实的基础。标准模型综合了夸克模型、三代夸克轻子图像、QED 和弱作用的已有成果;在广义规范不变性、自发对称破缺和 Higgs 机制这三部分思想的基础上建立起来,即 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 理论。可以说是对物质基本组成现阶段最好的回答。但也如卢比亚两年前所说“我们不可能说已经站在梯子的顶端了”。近两三年来,人们除了进一步完善标准模型,如细至测量分析 W , Z^0 有关参数等以外,同时对 UA-1, UA-2 的一些“奇怪”事例作分析,寻找标准模型以外的“新物理”。属于完善标准模型方面的如 1984 年 7 月 UA-1 组报

道了 6 个夸克的候选者。即 $P\bar{P} \rightarrow W^\pm \rightarrow t\bar{b}$ (3 个 $t \rightarrow c\bar{b}$, 3 个 $t \rightarrow \mu\nu b$, 其中 b 及 \bar{b} 夸克表现为两个喷注)。分析得出 t 夸克的质量在 40GeV 左右。由于背景复杂且统计不够, 目前尚未做出明确结论。属于“新物理”现象的例如有以下几个: (1) 1984 年 UA-1 组报道了 2 个 Z^0 的轻子衰变伴随硬光子的事例 ($e^+e^-\gamma, \mu^+\mu^-\gamma$)。UA-2 也报道了一个衰变为 $e^+e^-\gamma$ 的事例。但令人费解的是在大量的 W 衰变中却未发现一个。理论家们试图用轻子具有组合结构来解释。(2) 1985 年 UA-1 报道了 29 个单喷注事例。这 29 个事例中只有 9 个可以用 $W \rightarrow \tau\nu$ 来解释。 τ 是重轻子, 它衰变为 3 个或更多个 π 介子。很像一个喷注。其他 20 个目前还只能用单喷注来解释。大家知道 $q\bar{q}$ 碰撞后, 一般产生一对夸克或还有胶子, 这表现为双喷注或三喷注(以至多喷注)。因此单喷注是反常的。人们称它为“禅”事例, 用这个佛教名词表示神秘莫测的意思。(3) UA-2 报道了存在 147GeV 的大不变质量事例。这预示有比 Z^0 重半倍的新粒子存在。(4) 1985 年 UA-1 组报道了由 212 个同号异号双 μ 事例分析存在重夸克 B 及反重夸克 \bar{B} 之间的振荡现象。也许人们太想寻找“标准模型”以外的新物理了。因此高能物理界把 1984 年称为“反常年”。1985 年其中的一些实验结果(如 (1), (3) 等)已被否定。但所有这些“反常”现象活跃了实验家和理论家的头脑。

从实验条件的发展上看, 一年前欧洲核子研究中心 (CERN) 的质子反质子对撞机已经建成了新的反质子贮存环, 从而可提高亮度 5 倍以上。UA-1 和 UA-2 三年来又作了相当大的改进, 美国费米实验室的 2TeV (比 CERN 的能量高 4 倍) 质子反质子对撞机已开始投入运行。1986 年 6 月 CERN 的大型正负电子对撞机 LEP 即将投入运行。估计那时每天可产生约 1 万个 Z^0 粒子。美国的正负电子直线对撞机 SLC 也即将运行。这些都为更精确地测量 W^\pm, Z^0 的参数, 寻找新粒子如 Higgs 粒子等, 研究 Z^0 能区物理创造了物质条件。

再向前看, 人们正在规划质心系能量为 $20-40\text{TeV}$ 能区的质子反质子(或质子)对撞机。这相当于 $q\bar{q}$ 碰撞的质心系能量已进入了亚夸克层次的结合能(约 1TeV)。它的主攻目标是质量的根源, 粒子的组合性和四种力的统一这三个根本性问题。为此, 欧洲提出了在 LEP 隧道中建造 $17-20\text{TeV}$ 质子反质子(或质子)对撞机 LHC。美国提出了建造周长 84 公里的 20TeV 超级超导对撞机 (SSC) 的计划。计划于 1996 年完成。可以想见, 在 W, Z^0 能区卓有成效的工作基础上, 于本世纪末或下一世纪初, 这一新的能区的开拓将以现在尚难以预见的新发现开辟广阔天地。