

W与Z粒子的发现

谢一冈 摘译

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1. 引言

本文描述了弱中间玻色子W与Z发现的科学研究过程。其中包括将CERN当时已存在的高能质子加速器及其相关设备改建成质子反质子对撞机的最初建议,以及之后的探测器的设计、建造和运行的全过程,由此为第一次观测到这两种基本粒子的产生和衰变提供了相应的证据。

回顾1967~1976年,这10年是一个不平凡的实验和理论相互促进的时期,1967~1968年温伯格(S. Weinberg)、格拉肖(S. Glashow)和萨拉姆(A. Salam)已经在轻子方面将弱力和电磁力统一起来。他们还预言理论中的带电和中性两种中间玻色子W[±]、Z的质量分别约为65 GeV/c²和80 GeV/c²。三位理论物理学家,经过不懈的努力,终于创立了弱-电统一理论。从而进一步推动了1973年在CERN利用大型气泡室成功地确认中性流的存在,也就是说在中微子与电子和核子散射过程中必须有传播弱力的重的虚媒介子——中性中间玻色子Z参与。在这以前的一些实验中已经提出了与带电流相应的带电的虚中间玻色子W[±]的存在。到1979年,虽然实验还没有观测到实体的两种带电的W[±]和中性的Z中间玻色子粒子,但由于三位理论家卓越的工作,并且在实验上测量到带电流和中性流的物理结果都与他们的理论预言很好地符合,因此他们共同获得了1979年诺贝尔物理学奖。特别是从弱-电统一理论中的温伯格角Sinθ_w确定出W[±]的质量范围大约在60~80 GeV/c²之间和Z粒子质量在75~92 GeV/c²。这就要求质子-质子或质子-反质子对撞的质心系能量约为W[±]、Z粒子质量的6倍,要

求建造对撞机的能量为540 GeV。到1976年时,实际探测W[±]粒子和中性Z粒子已经是十分紧迫的课题了。要观测到这样重的粒子,在现有任何加速器的能量下都是不可能达到的。这样在20世纪70年代,建设足够高能量的加速器和相应的粒子探测器装置就成为极为迫切的任务了。

2. CERN的质子反质子对撞机

大家知道利用高速粒子束流轰击固定靶产生的有效激发能量要比两个粒子对撞产生的有效激发能量小得多,这是因为整个末态固定靶系统要消耗相当大的动能。早在20世纪60年代初已经发明了电子-正电子对撞机,70年代建成了质子-质子对撞机交叉储存环ISR(见图1)。虽然能够产生这两种弱玻色子的理想设备是欧洲物理学家于1976年提出建造的电子-正电子对撞机(LEP),其对撞能量至少需要比Z粒子质量大,即大于90 GeV。据此要建设一台100 GeV的机器大约需要建设一个约

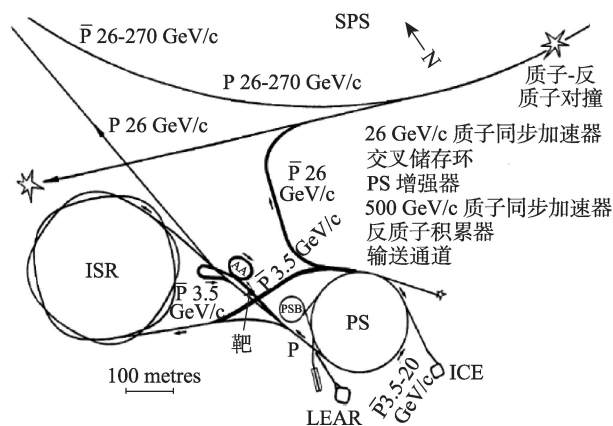


图1 CERN的质子-反质子对撞机系统Sp pS由PS,AA,SPS及其交互传输路线系统

27千米的加速环,这要用5~6年时间。这显得太长了。卢比亚(C.Rubbia)、克莱(D.Cline)与麦金泰尔(P.McIntyre)提出了一个将现有的高能质子加速器快速且经济地改建成对撞能量高于产生W与Z阈值的质子反质子对撞机的方案。在这个方案中,能量都为 E 的质子(p)与反质子(\bar{p})束流互相在相反方向的环形路线内以质心系能量 $\sqrt{s} = 2E$ 对头相撞。

在这里对这个庞大的设备做简单描述。W和Z玻色子在 $\bar{p}p$ 对撞中产生,因为每个质子与反质子包含3个夸克与反夸克,因此为了能产生W和Z, $\bar{p}p$ 对撞的质心系能量必须等于玻色子质量的6倍,即500~600 GeV。卢比亚等人强力推动在CERN已有的地下一个周长6.5千米,能量可达450 GeV的超级质子同步加速器SPS上面进行,因此用于270 GeV质子-反质子对撞是绰绰有余的。这台SPS加速器已经用于固定靶实验数年。先看一看质子的加速过程:如图1所示,命名为SPS(Super Proton Synchrotron)的超级质子同步加速器由几个部分组成:质子由直线加速器LINAC(图中小矩形框)进入增强器(Booster)PSB再注入到质子同步加速器PS达到质子能量26 GeV,这个能量的质子束流进一步从左面输运管道注入到6.5千米的主环,使质子沿着顺时针方向加速到270 GeV。

接着谈一谈反质子束流:在CERN工作的荷兰工程师范德梅尔(S. van der Meer)已于1972年提出粒子随机冷却的概念,即反质子在特殊的称为“踢出器”的高频电磁场作用下按确定方向一束一束的聚集形成极高密度束团,就好比一批一批杂乱奔跑的羊群在两旁牧羊狗的轰赶下逐渐顺向聚集一样。1978年CERN批准建设反质子随机冷却积累器AA(Anti-proton Accumulator)(图2)并于1981年7月研制成功。利用这种高反质子束流密度,达到束流顺向密集的所谓“冷却”才能有效地同质子对撞。图1所示为产生高能反质子聚集束流和输运路线,从CERN的质子同步加速器(PS)输出的能量为26 GeV质子,每个质子脉冲中有 10^{13} 个质子与靶作用后得到动量为3.5 GeV/c的反质子,输入AA集束

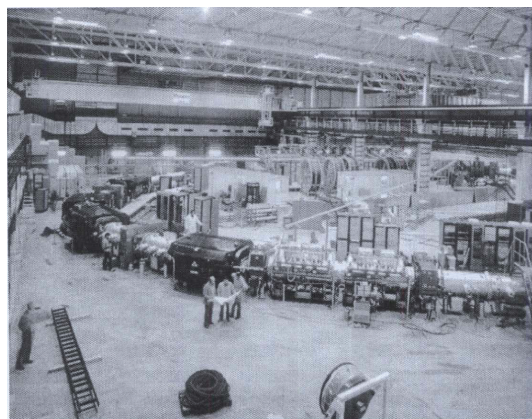


图2 建造期间的反质子积累器

后得到每2.4秒内有 7×10^6 个反质子的束团,再反过来沿着逆时针方向进入PS加速到26 GeV,经右侧输运管道进入SPS沿着逆时针方向加速到270 GeV,并在两个对撞点同质子对撞,这样就组成了质子-反质子对撞机系统 $Spp\bar{S}$ 。附带说一句,AA也作为低能反质子物理研究用,同高能对撞没有直接关系。

$Spp\bar{S}$ 对撞机系统的束团对撞过程大概是由3个 p 束团(1986年以后为6个束团),每个束团大约有 10^{11} 个质子,在PS中加速到26 GeV后注入到SPS(参看图1)。然后3个 \bar{p} 束团(1986年以后为6个束团),每个束团1个小时后可达到约 10^{10} 个反质子(即每注入15个脉冲积累后,每2.4秒 \bar{p} 的总量达到 7×10^8 ,逐渐积累形成有核心出现的束块,1天后在核心内已经包含足够的 \bar{p})。 \bar{p} 按与 p 运行方向相反(图1中从右方进入主环)的方向被输运到 $Spp\bar{S}$ 。这些束团的相对注入时间被控制在1纳秒以内,以便保证束流在 $Spp\bar{S}$ 中交叉对撞恰好发生在探测器的中心。从1981到1990年对撞能量由546 GeV提高到630 GeV,峰值亮度由 5×10^{28} 提高到 $3 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

3. 发现W和Z的实验的探测装置

1981年7月在 $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ 的对撞能量下第一次观察到了 $\bar{p}p$ 对撞,1982年年底对撞率已经足以观察到 $W \rightarrow e\nu$ 衰变,1983年春夏接续的运行中

又观察到了 $Z \rightarrow e^+e^-$ 和 $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 。

为了能够探测到 $Z \rightarrow e^+e^-$ 衰变所需要的最小撞击亮度是:根据 Z 粒子在 600 GeV 时的单举产生截面约为 1.6 nb 和 $Z \rightarrow e^+e^-$ 衰变的分支比约为 3%, 这样, 当 $\bar{p}p$ 对撞的亮度为 $L=2.5 \times 10^{29} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时, 大约每天会得到一个事例, 这就要求建造极为灵敏的能够探测到多种末态粒子的实验装置。为此在地下大约 100 米深处的隧道中建立了两个“地下实验区”。第一个实验称为 UA1, 它很快于 1978 年 6 月 29 日获批。接着 1978 年年底, 称为 UA2 的第二个实验也获批。这一重要发现获得了 1984 年诺贝尔奖。

3.1 UA1 实验

UA1 是一个具有几乎覆盖全立体角的通用磁场型探测器, 由图 3 可以看到磁铁打开后的探测器的两半部分。中心部为直径 2.5 米、长 5.5 米的圆柱型图像漂移室。在此空间内可以重建出 3 维带电粒子的轨迹, 是当时最先进的技术。包围着这个中心径迹探测器的是电磁量能器和更外面的磁扼铁与强子量能器, 形成 4π 立体角全覆盖到与束流夹角 0.2 度。这种后来被称为“密闭性”的性质, 对于重建探测不到的 $W \rightarrow e\nu$ 衰变的中微子以及尚未发现的从直接探测逃出的中性粒子是非常有效的, 也是下一代 e^+e^- 和强子对撞机 (LEP, 费米实验室的 $\bar{p}p$ 对撞机和 LHC) 上所有的通用探测器的基本特征之一。

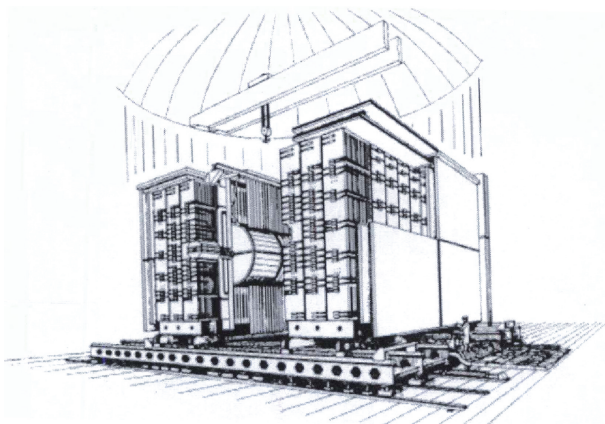


图3 两个半扇磁铁开启时的 UA1 示意图

电磁量能器由多组铅-闪烁体夹层组成。它们由两个半圆柱形壳层组成, 每个为厚度 24 厘米的半壳层, 昵称为冈斗拉, 因为其形状类似威尼斯船 gondolas, 一共有 24 个单元, 对电子的能量分辨率为 $\sigma(E)/E=0.15/\sqrt{E}$ 。相当于动量为 40 GeV/c 的电子的动量分辨率为 $\pm 2.5\%$ 。

磁铁系统的线圈与磁铁是层状的, 各铁板间插入闪烁体, 形成强子量能器。该量能器被分成 450 个独立的单元。在强子量能器外是由漂移管系统组成的探测器。对动量为 40 GeV/c 的 μ 子径迹, 其动量分辨率的典型值为 $\pm 20\%$ 。在建造的初期, UA1 合作组由 13 个机构的 130 位科学家组成。可以看到如此多的科学家在一个共同的计划中一起工作, 这还是第一次, 这为此后产生的 LEP 和 LHC 两个实验上所开展的数十年的更大规模的国际合作铺平了道路。

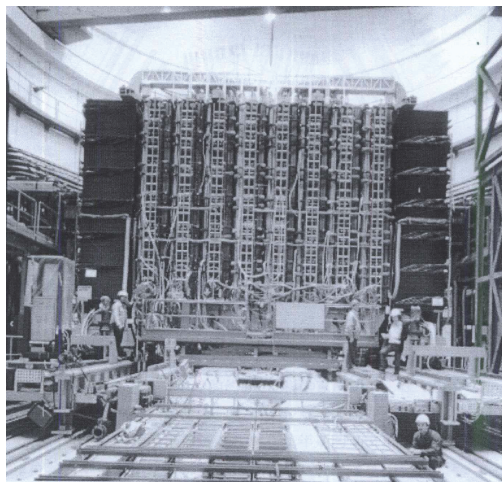


图4 安装期间的 UA1 的侧视照片

3.2 UA2 探测器

UA2 探测器不是一个为通用目的而设计的探测器, 它没有测量 μ 子的部分, 而是专门用于探测 W 和 Z 衰变为电子的探测器, 并且在与束流的不同有限夹角区域配置不同的探测器。图 5 为侧视的截面图, 中心区包括一个“顶点探测器”, 它由不同类型的径迹室组成, 其外为中心球形量能器。沿着与束流前后方向夹角 (常称为极角 θ) $20^\circ \sim 37.5^\circ$ 的范围内

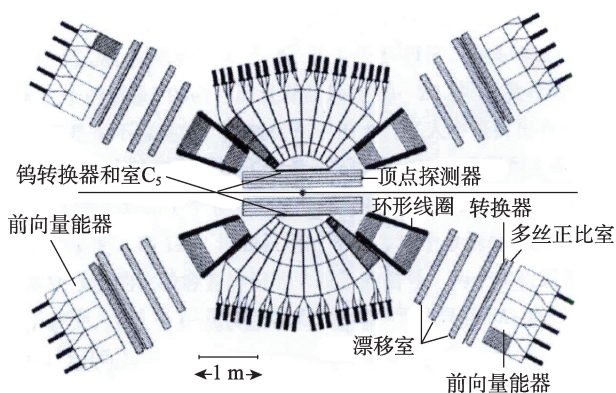


图5 1981~1985年期间UA2探测器配置示意图(侧视截面)

为前后两组环状探测器,按不同的轴向角 ϕ (垂直于纸平面)分为12个部件。在其内部有环流形磁场,该磁场也由12部分组成,按相同的轴向角配置。每一部件由里向外包括磁线圈、漂移室组和多丝正比室,在最后一个多丝室旁有由转换体组成的“预簇射计数器”,其后为5层由闪烁体组成的簇射计数器。这些对于鉴别电子是至关重要的。位于中部的多层球形量能器,它覆盖约为 300° 接近整个轴向角 ϕ (垂直于纸平面),并进一步划分成240个独立单元,每一个单元指向的角度范围为 $\Delta\theta \times \Delta\phi = 10^\circ \times 15^\circ$,并由电磁量能器(Pb-闪烁体夹层)与强子量能器(Fe-闪烁体夹层)两部分组成。该中心量能器对电子的能量分辨率为 $\sigma(E)/E = 0.14/\sqrt{E}$,对80 GeV强子的能量分辨率大约为10%。在这个区域内没有磁场。

在初期,UA2合作组由5个单位的约60位科学家所组成。在1985~1990年期间探测器也进行了升级,如前向探测器增加了束流夹角范围,中心径迹室增加了硅-探测器和穿越辐射探测器等。图6给出的是1987~1990年期间UA2的装置组合。在那段时间,又有5个单位参加,使合作组科学家增加到约100人。

4. W和Z玻色子的发现

4.1 W玻色子的发现

1982年12月UA1探测到了4个 W^+ 和1个 W^- 事

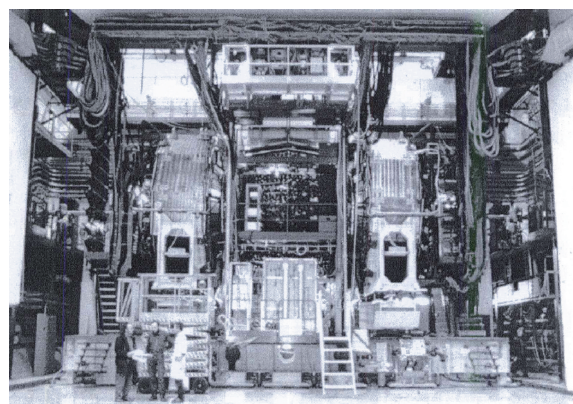


图6 1987~1990年期间UA2探测器的配置

例。例如 W^- 衰变到一个电子和一个中微子。 W^- 粒子的质量为79 GeV,而且寿命只有 10^{-20} 秒(要在约10亿次碰撞中探测到几个 W^- 粒子是很不容易的,这就像在中国十几亿人中查找出有几个特殊的人一样)。1983年6月两个实验组都报道了测量到Z粒子。UA1观察到4个Z衰变到正负电子事例 $Z \rightarrow e^+e^-$ (图7)和1个衰变到正负 μ 子事例 $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 。UA2报道了6个Z衰变到正负电子的事例。到1983年底报道的W和Z粒子事例分别约为100个和十几个,为了尽快得到本底最少的比较容易辨识的W粒子的信号,两个实验组都选择通过鉴别W的轻子中的电子和 μ 衰变, $W^+ \rightarrow e^+\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 用以探测W,另外只有UA1通过 μ 子衰变也探测到W,即 $W^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 。

从 $W \rightarrow e\nu_e$ 衰变所得到的信号具有以下特征:大横动量(p_T)的孤立电子; p_T 峰值出现在 $m_W/2$ 处;中微子大的丢失横动量。这些特征是产生W的主要机制(夸克-反夸克湮灭)的结果,也就是说,那些发射方向与束流轴有很大的夹角的电子和中微子具有大横动量 p_T 。测量大的丢失横动量的方法是这样进行的:对全部量能器各单元建立一个

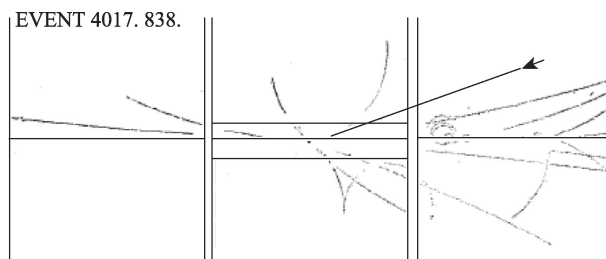


图7 UA1的 $W \rightarrow e\nu$ 事例,箭头表示电子的方向

矢量,该矢量方向为沿事例顶点与某量能器单元中心的连线,而矢量长度等于在该量能器单元内的沉积能量。最后对所有不为0的沉积能量单元求矢量和,所得到的总的沉积能量是矢量,按某事例的总能量守恒原理,总能量矢量的带负号的反向矢量就是中微子带走的能量和动量,称为丢失能量和动量 \vec{P}_T^{miss} 。按照动量守恒,这就等于中微子动量。1983年1月20日CERN报告会上公布了这一结果。图7所示的图像为这些事例中的一个。

UA2关于 $W \rightarrow e\nu$ 的结果在翌日1983年1月21日公布于CERN报告会上。6个包含 $p_T > 15 \text{ GeV}/c$ 的电子从1982个数据中鉴别出来,即电子的平均能量在40 GeV附近有4个事例。这些事例具有 $W \rightarrow e\nu$ 所期望的特性。

4.2 Z玻色子的发现

图8表示UA1寻找 $Z \rightarrow e^+e^-$ 的衰变。第一步的分析要求两个量能器单元内电子具有的沉积横能量为 $E_T > 25 \text{ GeV}$ 。在1982~1983年的对撞运行期间所取得的数据中,有152个事例满足这些条件。下一步要求出现一条孤立径迹要满足条件 $p_T > 7 \text{ GeV}/c$,这样就排除了图8(a)所示的那些小横动量杂乱事例,从而得到指向两个量能器单元中有高的不变质量值。在这些事例中,发现有4个满足 $p_T > 7 \text{ GeV}/c$ 并指向两个单元,其中一个事例显示于图8,它们同 e^+e^- 的不变质量值在量能器的分

辨率范围内完全一致。

在1983年UA1收集的数据中,发现了一个与 $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 一致的事例(图9)。图10给出UA1于1982~1983年期间分析发现的全部轻子对的质量分布。所得到的平均质量为

$$m_Z = 95.2 \pm 2.5 \pm 3.0 \text{ GeV},$$

其中第一个误差为统计误差,第二个误差为量能器标度出的系统误差。

由1982~1983年数据,UA2寻找 $Z \rightarrow e^+e^-$ 衰变的结果显示于图11。首先选择在量能器中要求有一对孤立电子的沉积能量 $E_T > 25 \text{ GeV}$ 。并且要求有一个孤立径迹为电子指向至少一个量能器单元。有8个事例满足这些条件:其中3个事例为孤立径迹的电子指向2个量能器单元。对这8个事例做不变质量权重平均后得到

$$m_Z = 91.9 \pm 1.3 \pm 1.4 \text{ GeV},$$

其中第一个误差为统计误差,第二个误差为量能器标度出的系统误差。后者的值小于UA1的值,这是因为UA2的量能器的尺寸比UA1的小,并且因为它的模块容许频繁地在CERN SPS的已知电子能量的束流线上进行刻度,这样系统误差就更加小一些。

图11给出了在 $W \rightarrow e\nu$ 和 $Z \rightarrow e^+e^-$ 过程中UA2量能器的能量分布。这种三维图的分布显示出该类事例的典型拓扑结构,即绝大部分能量分布在很少的几个量能器单元内,而其他大部分单元内

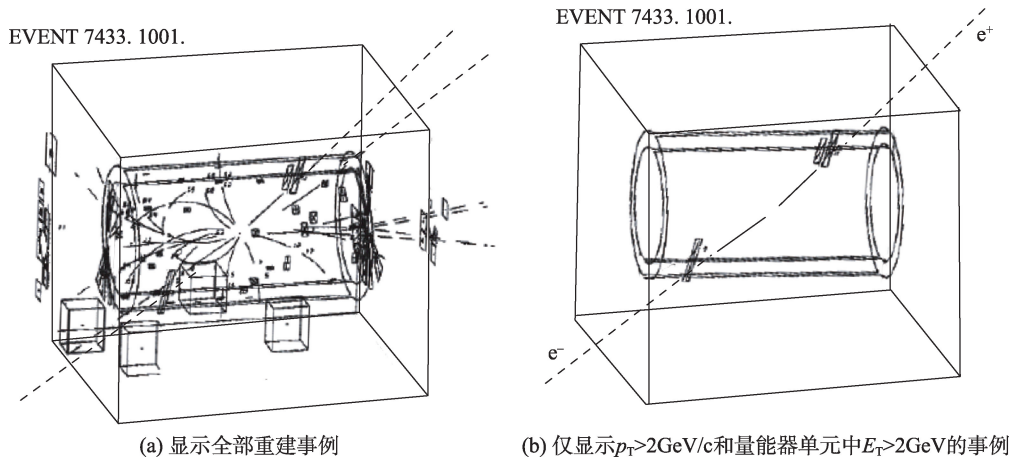


图8 UA1 $Z \rightarrow e^+e^-$ 中的一个事例的衰变

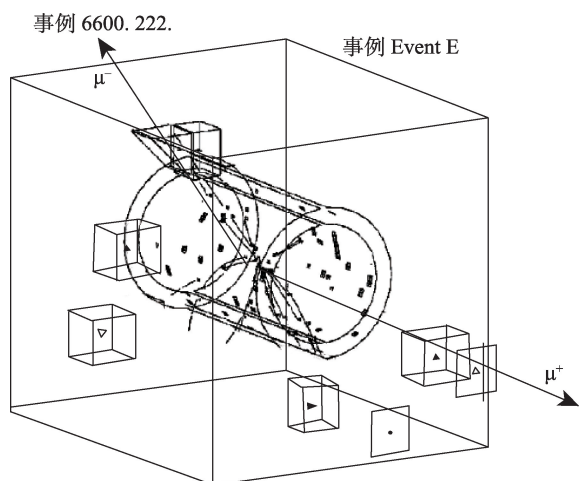


图9 UA1中的 $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例

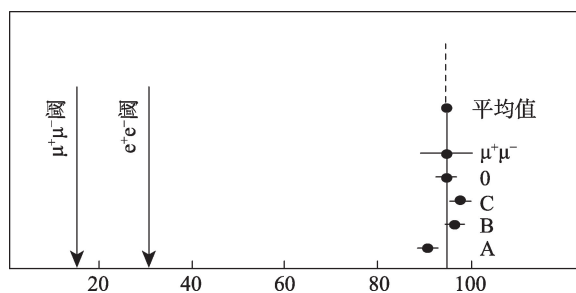


图10 UA1~1982~1983年期间全部轻子对的不变质量分布

只有很少或者没有能量分布。

5. 对撞机继续运行后的物理结果

5.1 W和Z质量测量

在1982~1983年对撞机运行期间历史性的发现W和Z玻色子之后的几年内又进行了更多轮的运

行。CERN对撞机到1990年底关闭的期间进行了多轮物理运行。由两个实验得到了另外一些重要的物理结果。

直到1985年底的第一阶段,两个探测器基本上没有改动,对撞机能量由 $\sqrt{s} = 540$ GeV 提高到 630 GeV 和峰值亮度增加了一倍。利用这批新数据得以更加细致地研究W与Z的产生和衰变性质,得到了许多标准模型所期待的结果。

到1985年底,UA1实验记录了290个 $W \rightarrow e\nu$, 33个 $Z \rightarrow e^+e^-$, 57个 $W \rightarrow \mu\nu$, 21个 $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 。作为一个例子,图12给出了 $W \rightarrow e\nu$ 的横质量 (M_T) 分布,其中 $M_T = [2p_T^e p_T^\nu (1 - \cos \phi_{e\nu})]^{1/2}$, $\phi_{e\nu}$ 是电子与中微子之间所夹的轴向角,用电子和中微子的横动量 p_T^e 和 p_T^ν 得到的横质量是因为由它的分布可以较灵敏地看到QCD和 τ 轻子的贡献。

将以上全部W和Z的约400个事例综合起来得到以下的W和Z不变质量,其中第一个误差为统计误差,第二个误差为量能器标度出的系统误差。可见其精度比1982~1983年的结果已有明显改进。

$$m_W = 82.7 \pm 1.0 \pm 2.7 \text{ GeV},$$

$$m_Z = 93.1 \pm 1.0 \pm 3.1 \text{ GeV}.$$

在1982~1985年同样的物理运行轮中,UA2实验记录到251个 $W \rightarrow e\nu$ 的样本和39个 $Z \rightarrow e^+e^-$ 个事例。UA2测得的W与Z的质量值为:

$$m_W = 80.2 \pm 0.8 \pm 1.3 \text{ GeV},$$

$$m_Z = 91.5 \pm 1.2 \pm 1.7 \text{ GeV},$$

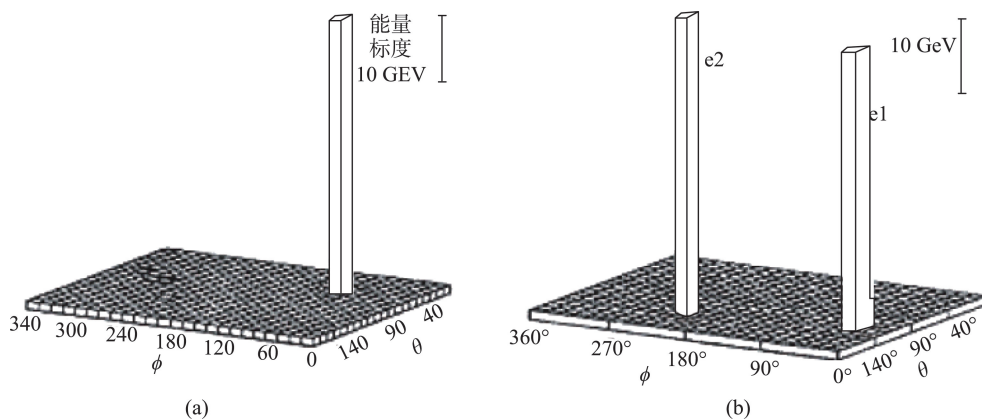


图11 UA2的量能器中的能量分布:(a) $W \rightarrow e\nu$ (b) $Z \rightarrow e^+e^-$

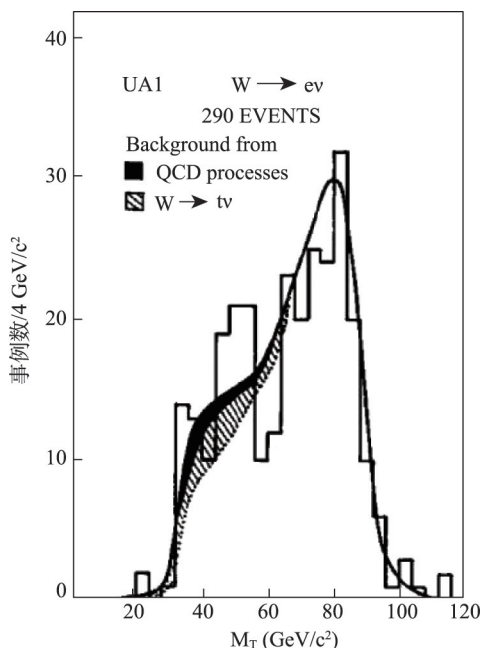


图12 UA1 1982~1985年期间290个 $W \rightarrow e\nu$

其中第一个误差为统计误差,第二个误差为量能器标度出的系统误差。这些实验的测量性质都同UA1的结果符合得很好。

5.2 W和Z的产生和衰变以及强子喷注

利用已知的质子-反质子对撞的亮度测量得到的W与Z的产生几率(常用截面 σ 表示)是很重要的物理量。产生后大概在 10^{-20} 秒内快速衰变成多种末态,例如W衰变为一个电子和一个中微子的衰变分支比(BR)为3%。UA1得到的 σ_w 和 σ_z 乘以相应的BR分别为

$$\sigma_w \text{BR}(W \rightarrow e\nu) = 630 \pm 50 \pm 100 \text{ pb};$$

$$\sigma_z \text{BR}(Z \rightarrow e^+e^-) = 74 \pm 14 \pm 11 \text{ pb}.$$

因为W和Z玻色子的轻子衰变容易判别,因此对早期发现有特别重要的意义,前面已经介绍较多,由于强子衰变的末态比较复杂,杂乱本底较多,而分辨出特别重要的喷注是非常重要的。W和Z玻色子主要衰变为夸克-反夸克对(70%)。它们很快“强子化”即表现为两个强子喷注。喷注信号实际上是约束在窄的圆锥形空间内射出的几个强子,如 π 介子等。它们容易被从硬部分子散射来的QCD本底所淹没。然而,在对撞机上探测 $W \rightarrow q\bar{q}'$ 和

$Z \rightarrow q\bar{q}$ 衰变是很重要的。这不仅是实验挑战,而且双喷注的不变质量重建的展示已经为推进在下一代强子对撞机LHC上的喷注研究和对QCD的检验等开辟了道路。

UA1还观察到32个 $W \rightarrow \tau\nu$ 衰变和 τ 的强子衰变。在探测器中有高准直性的低多重数的喷注出现。

在UA2喷注能量的测量所用的量能器的分辨率为 $\sigma E/E \approx 0.76/\sqrt{E}$ 。从UA2在1983~1985年期间收集到的数据得到的双喷注的不变质量表示在图13中。这个分布在W和Z的双喷注末态质量区域有一个清晰地凸起结构(在部分子-部分子散射的连续本底表现为单调下降的曲线,其中凸起包含 632 ± 190 事例)。我们注意到图中将双喷注的质量值的坐标乘以5次方以便移去快速下降并且采用了线性标度。这样的凸起结构才能勉强的将W和Z的双喷注事例分辨开来,可见判别强子喷注末态是多么困难。

5.3 W和Z玻色子的精密测量和顶夸克质量的预期

在对撞机运行的最后3年期间(1988~1990),UA2收集了大量 $W \rightarrow e\nu$ 和 $Z \rightarrow e^+e^-$ 衰变事例样本。这一期间测量 m_w/m_z 的比值,是因为量能器标

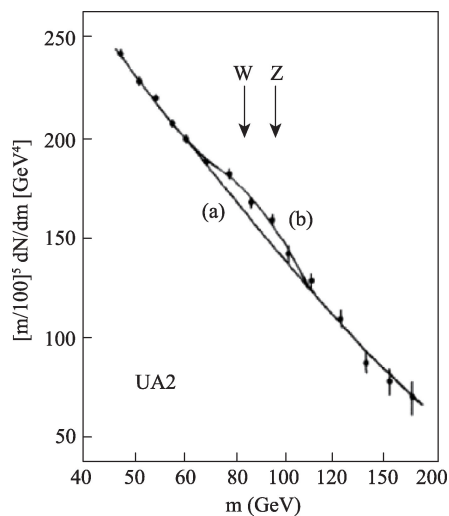


图13 UA2测量的双喷注的不变质量分布,曲线(a)排除 $65 < m < 105 \text{ GeV}$ 的最佳拟合,(b)包括两个W、Z质量标称值的高斯中心的全部数据点

度系统的不确定性在这个比值中大地被抵消掉。还有一个附加原因,就是1989年7月LEP开始运行。当时期待 m_z 的精确测量很快可以实现,这样,将两方面的测量联合起来就可以精确地确定 m_w 了。这个期间UA1完成了2965个 $W \rightarrow e\nu$ 事例的衰变横质量分布。UA2测量 $Z \rightarrow e^+e^-$ 事例的不变质量分布,包括95个事例(图14(a))和156个事例(图14(b))两个谱。根据这两个谱平均后,得到 $m_z = 91.74 \pm 0.28 \text{ GeV}$ (仅为统计误差)。由 m_w 、 m_z 两个独立的测量得到:

$$\frac{m_w}{m_z} = 0.8813 \pm 0.0036 \pm 0.0019,$$

其中第一个误差为统计误差,第二个为计入由量能器引入的很小的系统误差(前面已经介绍UA2的量能器有其优越性)。1991年LEP已经得到 m_z 的最精确的测量结果,为 $m_z = 91.175 \pm 0.021 \text{ GeV}$ 。利用这一结果乘以UA2得到的 m_w/m_z 比就确定了精确的 m_w 值。

$$m_w = 80.35 \pm 0.33 \pm 0.17 \text{ GeV},$$

再用 m_w 的精确测量结果来获得顶夸克的质量范围。如科学家所指出的:在标准模型的框架内,相对于固定的 m_z , m_w 的值依赖于顶夸克质量的平方,UA2给出:

$$m_{\text{top}} = 160_{-60}^{+50} \text{ GeV}。$$

UA2给出的 m_{top} 质量为在费米实验室1.8 TeV对撞机上测量到 $m_{\text{top}} = 174 \pm 10 \pm 13 \text{ GeV}$ 提供了重要信息。另外,由CERN和费米实验室的 $\bar{p}p$ 对撞机早期直接寻找的 m_{top} 的质量下限为 $m_{\text{top}} > 89 \text{ GeV}$ 。这个结果明确表明顶夸克的质量很大,对顶夸克的寻找也是有贡献的。最近LHC得到的为 $m_{\text{top}} = 173.21 \pm 0.51 \pm 0.71 \text{ GeV}$ 。

6. 结语

经过1982~1983年期间CERN的质子-反质子对撞机和UA1和UA2成功的运行,确信了W和Z中间玻色子的存在,为此卢比亚和范德梅尔获得了1984年度诺贝尔物理学奖。W和Z粒子的证实检验了电弱统一理论,为在接续的LEP上精密测定W和Z粒子质量及各种有关物理量和对QCD与希格斯粒子的预期都铺平了前进的道路。最后,它不仅表明质子-反质子对撞机是成功的,而且为CERN的质子-质子对撞机LHC的建成树立了信心。

摘译自 60 year of CERN Experiments and Discoveries 中 Luigi Di Lella 和 Carlo Rubbia 所著的 *The Discovery of the W and Z Particles*。希望了解更多细节的读者也可参考“CERN 60年的实验与发现”中译本(将于近期由科学出版社出版)的相应章节。

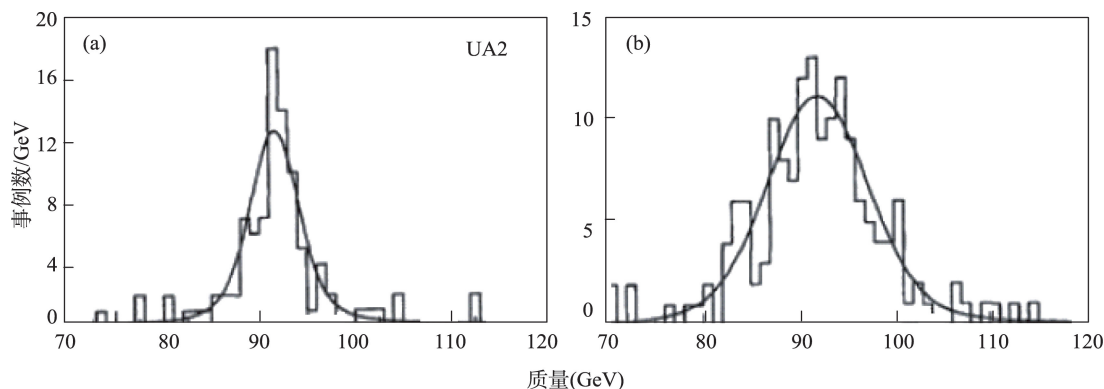


图14 UA2测量 $Z \rightarrow e^+e^-$ 事例的不变质量分布谱,包括95个事例(图13(a))和156个事例图13(b))