

发现中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的实验

谢 一 冈

(中国科学院高能物理研究所)

一、前 言

物质世界存在四种基本相互作用力: 万有引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力。1967年 Weinberg 和 Salam 提出了弱电统一理论, 从理论上预言了传递弱作用的带电中间玻色子 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——光子之间的内在联系。他们因此而获得了 1979 年诺贝尔物理学奖。但是, 所预言的 W^\pm 和 Z^0 的质量很大, 约为质子质量的 80 倍和 90 倍, 所以直到七十年代中期, 世界上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, 欧美一些国家不惜化费巨资去建造巨型加速器对撞机和粒子探测装置。

1976 年日内瓦欧洲核子研究中心 (CERN) 的 C. Rubbia 等人建议, 在该研究中心的能量为 450 GeV 的超级质子同步加速器 (SPS) 上进行质子和反质子对撞, 建成世界上最高能量 (可达 540 GeV 质心系能量) 的加速器对撞机。

对撞的质子束可以比较容易地通过聚焦得到, 但是要得到高密度的反质子束流是比较难的。经过几年的努力, 在荷兰物理学家 Van de Meer 的领导下, 于 1980 年 7 月建成了反质子储存环。它利用随机冷却原理, 能使偏离平衡轨道的“热”的反质子受到反馈作用而“致冷” (即回到平衡轨道), 从而使反质子形成高密度束团。这是实现质子反质子有效碰撞的关键。在探测器方面, 1981 年秋, 由意大利物理学家 Rubbia 领导的 UA-1 和法国物理学家 P. Darriulat 领导的 UA-2 大型探测粒子的实验装置建成了。就是在这些装置运行期间, 于 1982

年 11 月至 12 月发现了带电的中间玻色子 W^\pm , 于 1983 年 4 月至 5 月发现了中性中间玻色子 Z^0 。这一发现, 如欧洲核子研究中心所长 H. Schöpper 所说, 是三十五年以前发明晶体管以来物理学领域中最重要发现, 它使弱电统一理论从实验上得到证实。

人们自然想起一百年以前麦克斯韦将电力和磁力统一起来的理论, 它对后来的科学技术和工业的影响是革命性的。中间玻色子的发现及其实验又具有何等意义呢? Rubbia 说, 如同铅笔粗细的质子束和反质子束互相碰撞, 形成比氢弹的热核反应温度还高一百万倍的高温状态, 同时产生大量的各式各样的基本粒子, 这种现象可以用来解释宇宙起源, 因此这一现象本身对于天体物理和宇宙学等也是有深远意义的。

国内对中间玻色子的发现已有评介^[1]。本文着重介绍发现 W^\pm 和 Z^0 的实验系统、分析方法和结果。

二、产生中间玻色子的条件^[2]

实现质子反质子的对撞机系统如图 1 所示: 质子经质子直线加速器 (LINAC)、质子同步加速器的增强器 (PSB) 及质子同步加速器 (PS) 加速到能量为 28 GeV, 然后通过隧道 E 进入周长为 6.7km 的超级质子同步加速器 (SPS) 的主环, 使质子加速到 270 GeV; 由 PS 产生的 28 GeV 的质子与静止靶作用, 产生 3.5 GeV 的反质子, 这些反质子注入反质子储存环 AA, 形成密集的束流后, 再逆向注入 PS 并加速到 26 GeV, 然后通过隧道 B, C, D 导入 SPS 主环。在主环内互相反向运行的质子和反质子

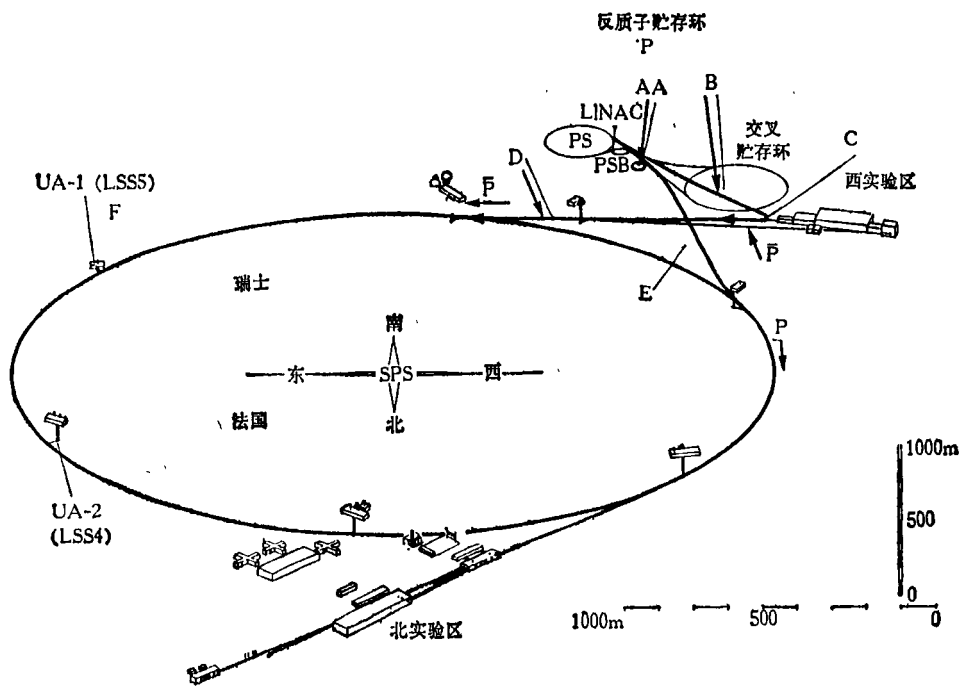


图1 CERN 质子反质子对撞机

当加速到 270 GeV 后, 进行对撞, 可以达到 540 GeV 质心系能量。对撞区有两个, 即图中的 LSS5 (UA-1 等实验) 及 LSS4 (UA-2, UA-5 实验)。

这个能量足够用于产生 W^\pm 和 Z^0 。大家知道, 质子 P 由三个层子 q (即 uud) 组成, 反质子 \bar{p} 由三个反层子 \bar{q} (即 $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$) 组成, 而 W^\pm 及 Z^0 是由一个层子和一个反层子碰撞湮没产生的, 如图 2 所示。 W^\pm 和 Z^0 的质量由 $q\bar{q}$ 携带的能量提供。考虑到相应的胶子平均携带一半能量, 故 $q\bar{q}$ 系统的质心系统的能量平均约为 $540/6 \sim 90$ GeV。再考虑到质子和反质子内的层子的能量分配围绕平均值有很宽的分布, 因此 $q\bar{q}$ 系统

质心系能量可以足够大于 W^\pm 和 Z^0 的不变质量, 这使 W^\pm 及 Z^0 产生成为可能。

除了质心系能量, 对撞反应的另一个重要参数为亮度 L 。它的时间平均值可用公式

$$\bar{L} = 1.43 \times 10^7 \times N_p \times N_{\bar{p}} / n$$

表示, 其中 N_p 为质子束流强度 ($10^{11} \sim 10^{12}$ 左右), $N_{\bar{p}}$ 为反质子束流强度 ($10^9 \sim 10^{11}$ 左右), n 为束团数 (例如 $n = 5$)。这样, 平均亮度可达 $10^{28} \sim 10^{29} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1982 年 11 月至 12 月发现 W^\pm 所用的运行时间为 500 小时, 用 T 表示, 则总的积分亮度 L_i 为

$$L_i = \bar{L} \cdot T = (1 \times 10^{28}) \times 500 \times 3600 \approx 1.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} = 18 \text{nb}^{-1}.$$

1983 年 4 月至 7 月运行期间, 平均亮度提高到 $1.4 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 总积分亮度达到 130nb^{-1} (积分亮度的量纲恰为作用截面的倒数)。

质子和反质子的碰撞几率 $R_{p\bar{p}}$ 为

$$R_{p\bar{p}} = L_i \cdot \sigma_{p\bar{p}},$$

其中 $\sigma_{p\bar{p}}$ 是质子反质子作用的全截面, $\sigma_{p\bar{p}}$ 为 67.6mb。例如, 在 1982 年底约

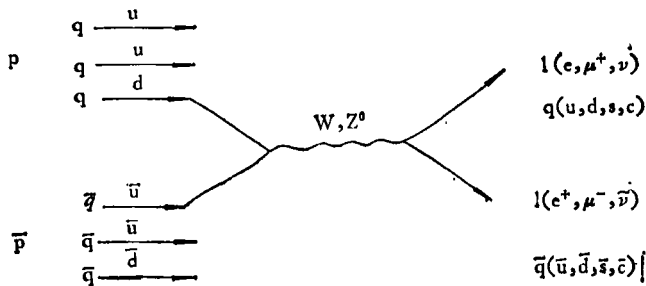


图2 W^\pm, Z^0 的产生及其衰变产物

500 小时的运行时间内，质子反质子总碰撞次数为

$$R_{p\bar{p}} = 67.6\text{mb} \times 18\text{nb}^{-1} \approx 10^9.$$

在这十亿次质子反质子碰撞中能产生中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的次数是多少呢？理论预言，产生 W^\pm 的截面 σ_{W^+} 或 σ_{W^-} 为 $2.3 \times 10^{-33} \text{cm}^2$ ，产生 Z^0 的截面 σ_{Z^0} 为 $1.6 \times 10^{-33} \text{cm}^2$ 。 W^\pm 衰变为轻子对 ($W^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e$ 及 $\mu^\pm \nu_\mu$)¹⁾ 的分支比 B 为 $1/4$ ，而 Z^0 衰变成轻子对 e^+e^- 及 $\mu^+\mu^-$ 的分支比只占 $1/10$ ，故

$$\sigma \cdot B(W^\pm \rightarrow e^\pm \nu \text{ 及 } \mu^\pm \nu_\mu) / \sigma \cdot B(Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-) = 7.2.$$

因为 W^\pm, Z^0 衰变成强子 ($W^\pm, Z^0 \rightarrow q\bar{q}, q\bar{q}$ 物质化后生成强子) 的部分不容易与不通过 $W,$

Z^0 中间状态而产生的强子产物区别开，因此目前不作为探测到 W 和 Z^0 存在的标志。由上面的讨论可见，1982 年在 500 小时运行期间 (总积分亮度为 18nb^{-1})，应观测到 20 个 $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu$ 和 $\mu^\pm \nu$ 事例和 3 个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ 事例。

三、探测器

由上述可见，为了寻找 W 和 Z^0 粒子，必须在碰撞点周围建造能探测轻子 e, μ, ν 和强子 π 等的探测器。这里只介绍 UA-1 探测器^[3] (关于 UA-2 探测器可参阅文献 [4])。UA-1 的构造如图 3 所示。整个探测器重二千吨，安

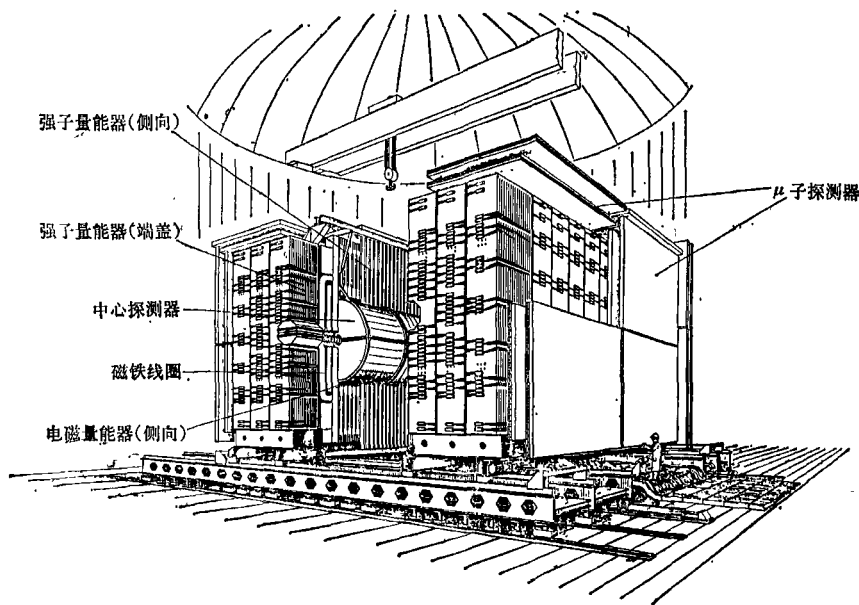


图 3 UA-1 探测器主体示意图

装在地下 30m 的对撞点四周。这个极重的实验装置可以在铁轨上移动以便移出束流隧道检修。紧靠探测器主体外侧，有三层楼的活动房屋，屋内安装快电子学系统，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处理系统和控制系统相连。

探测器主体部分长约 12m，高 9m，宽 10m。整个探测器系统在隧道内延伸长达 40m。主体部分从内到外由以下几部分组成。

1. 中心探测器

它是一个长为 5.8m，直径为 2.3m 的图象漂移室，由 6 个半圆柱形的室体组成，约有 6000 根灵敏丝，17000 根场丝。信号由灵敏丝两端 12000 路电子学线路读出，再经过 200 个微处理器系统，就可以定出粒子通过室体的三维空间坐标 (x, y, z) 。 x 由漂移时间决定，精度可达

1) ν_e, ν_μ 分别称为电子中微子和 μ 子中微子。

200 μm ; y 由丝坐标决定, x 由电荷分配法决定。这方法的简单原理是, 粒子径迹在灵敏丝附近某一点感应的信号因为向丝两端传输的距离不同, 而使信号电荷衰减不同, 这样由两端信号电荷之比就可定出 x 方向的坐标。前、后室的 x 方向与中心室的 y 方向对应; 而前、后室的 Y 对应于中心室的 X 。这样的配置是为了最有效地记录大量辐射状的末态粒子, 因为当粒子径迹既垂直于漂移电场又垂直于灵敏丝时, 可得到最多而又精确的径迹位置信息。这个中心探测器能使径迹图象重建得非常好, 这是 UA-1 探测器的一大特色。由读出的信号, 还可以测定电离损失 dE/dx , 从而可以鉴别粒子, 判断是单次和还是多次击中。电离损失精度可达 10%。几米长的粒子径迹可以很快地用计算机在线系统重建在电视屏幕上。根据径迹在磁场中的曲率, 可以测定粒子的动量, 动量精度为 $(\Delta p/p) \cdot (1/p) = 0.5\%$ 。例如, 对径迹为 1m 长的动量为 40 GeV/c 的粒子, $\Delta P/P = 20\%$ 。

2. 电磁量能器

它由侧向圆筒形部分和端盖部分组成。前者由两个半圆筒形的 24 块闪烁体单元组成。每个单元有四层, 总厚度为 27 个辐射长度, 即 36cm。各层皆由 2mm 厚的铅和 2mm 厚的塑料闪烁体叠成。电磁簇射粒子在每个单元的每层中所产生的闪烁光用装置在闪烁体片四角上的光电倍增管收集, 共约 1200 个光电倍增管。根据四个光电倍增管收集的光脉冲幅度的总和及其比例, 可以定出产生电磁簇射粒子的能量和准确位置。能量分辨率为 $\Delta E/E \sim 0.15/\sqrt{E}$ 。端盖由 64 块扇形闪烁体——铅叠层组成。总厚度为 36cm, 也分成 4 层。在其间夹有一层漂移室以精确决定粒子位置, 精度约 2mm。利用电磁量能器可探测 W^+ , Z^0 粒子衰变的电子的能量和方位, 对电子能量的吸收达 99%, 而对强子如 π 等的吸收率则很小。把强子误当作电子的可能性小于千分之三。

3. 强子量能器和磁铁

强子很容易通过电磁量能器而进入在其外面的强子量能器。它由两套呈相对的“C”形部

件构成(检修时可以拉开)。每套有八列, 每列分成 10 个单元。每个单元由方形磁铁片和塑料闪烁体夹层组成, 体积约 $90 \times 80 \times 96 \text{ cm}^3$ 。铁片和闪烁体各厚 5cm 和 1cm。将每个单元前后两层内各片闪烁体夹层所发出的光用一种含有称为 BBQ 的波长移位剂的光导棒收集到一起, 以记录强子在其中沉积的能量。端部与侧向类似, 厚度也是 5 个核作用长度。每个单元体积约 1 m^3 。覆盖的轴向角 θ 为 $5^\circ < \theta < 30^\circ$ 和 $150^\circ < \theta < 175^\circ$ 。端盖部分和侧向部分覆盖约 4π 立体角。此量能器能量分辨率为 $0.8/\sqrt{E}$ 。这些强子量能器的铁叠层也起到磁轭铁的作用, 它产生垂直方向的偶极磁场, 场强为 0.7T。

4. μ 子探测器

电子和强子绝大部分被电磁量能器和强子量能器吸收, 只有 μ 子能穿出而被最外层的 μ 子探测器探测到。 μ 子探测器由 8 层 X, Y 方向漂移管组成, 分成两组, 组间相距 62cm。覆盖面积合计 500 m^2 , 如图 3 所示。漂移管可定出 μ 子通过的两个位置, 它与中心探测器内 μ 子在磁场内的弯曲径迹外插连接起来, 即可准确地定出 μ 子的动量和全部径迹。漂移管的空间精度为 $300 \mu\text{m}$, 动量分辨率 $\Delta p/p \sim 0.25$, 角精度为 1 mrad 。

下面谈一谈中微子的探测问题。因为中微子的穿透能力极强, 很难直接测量。本实验采用丢失能量法。简单地可以这样说明: UA-1 是一个接近全封闭的探测器, 由于有束流管道, 只有与束流方向夹角为 0.2° 的空间没有被包围住。对每个量能器单元, 引入能量矢量(即在该单元中沉积的能量与单位矢量的乘积), 矢量方向为碰撞点与量能器单元的连线方向。根据运动学能量和动量守恒原理, 任何一个事例所产生的全部粒子在 4π 方向电磁量能器和强子量能器中所沉积的能量矢量之和等于零。当某一个碰撞事例的末态粒子总能量矢量不等于零时, 就说明这不为零的部分是被中微子所携带的。这就是丢失能量。

四、发现 W^\pm 的实验分析方法

根据 1982 年和 1983 年两次运行的实验数据, UA-1 组到 1983 年 7 月, 已得到 52 个 $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e$ ^[5] 和 10 月报道的 18 个 $W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ ^[6] 事例, UA-2 组得到 35 个 W . 这里我们仅以 1982 年 11 月至 12 月的 500 小时运行期间发现的五个 W^\pm 事例为例, 介绍寻找和判别如此稀有事例的方法^[7].

如前所述, 500 小时峰值亮度为 $5 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的积分亮度为 18 nb^{-1} , 共产生十亿次质子反质子碰撞. 每次碰撞产生十几个到百余个末态粒子, 平均产生 27 个粒子. 我们不可能也没有必要记录这十亿(10^9)次事例, 而用触发条件只选取我们感兴趣的事例. 理论模型预言, 两个层子的硬碰撞所产生的 W 在小于 10^{-20} s 的极短时间内衰变成的轻子对 $e\nu$ 或 $\mu\nu$, 它们都具有大横动量. 为此, 本实验设置了四种触发条件: (1) 电子触发, 即在两个邻接的电磁量能器单元中沉积的横能量大于 10 GeV 的触发. 横能量是能量矢量在垂直于束流方向上的分量. (2) μ 触发, 即至少有一个 μ 粒子通过对撞点的触发. (3) 喷注 (Jet) 触发, 即在相邻的两个强子量能器单元和在它们内侧八个电磁量能器单元中沉积的总横能量大于 15 GeV 的触发. 喷注是末态层子 q 或 \bar{q} 物质化后产生的一大群密集的强子束. (4) 总横能量大于 40 GeV 触发.

我们先根据 $W \rightarrow e\nu$ 的方式搜索 W 粒

子. 在上述四种触发方式中, 电子触发率约为 0.2 次/s, 共有 14 万次. 在这 14 万次电子触发事例中, 满足在相邻电磁量能器单元内沉积能量大于 15 GeV, 而且其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 个事例再进行孤立条件筛选后, 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, 还剩下 72 个事例. 由图 4(a) 可以清楚看到, 在某一个 (θ, ϕ) 方向 (轴向角 θ 常用赝快度 η 表示, $\eta = -\ln \text{tg } \theta/2$) 的电磁量能器 EM 单元中, 有大约 40 GeV 的能量沉积 (最大横能量 $E_{t\text{max}}$ 为 25.5 GeV), 而与它相同方向上的强子量能器单元内则无能量沉积, 如图 4(b) 所示. 利用中心探测器测量到的动量 p_{cd} 和电磁量能器测到的能量 E_{em} 的符合程度判据 $(1/p_{cd} - 1/E_{em}) < 3\sigma$ (σ 是电磁量能器分辨率, $\sigma = 0.15/\sqrt{E}$, E 是电子能量), 选择出 40 个事例. 至此, 利用计算机离线分析已告一段落. 再对这 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. 恰好这五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, 这就证实了这五个事例就是 $W \rightarrow e\nu$ 衰变, 其中有四个 W^- , 一个 W^+ .

也曾丢失能量的方法对前述的 2125 个事例进行筛选, 得到了同样的结果.

人们最关心的是 W 粒子的质量. 可以用三种方法确定 W 粒子的质量^[8], 其中一种方法

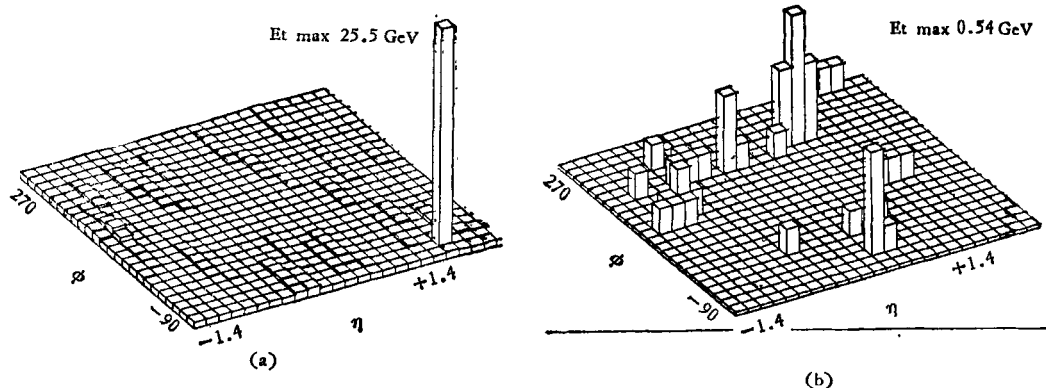


图 4 $W \rightarrow e\nu$ 事例的电磁量能器和强子量能器中沉积能量

是测出每一选中事例的孤立电子和中微子的横动量及其夹角。由公式

$$M_t^2 = 2p_t^e p_t^{\nu}(1 - \cos \phi),$$

即可确定 W 的横质量 M_t , $M_t \leq M_w$. 上式中 p_t^e 为电子横动量; p_t^{ν} 为中微子横动量; ϕ 为电子和中微子之间的夹角。图 5 为 27 个 W 的横质量分布, 由图得

$$M_w = 80.9 \pm 1.5 \text{ GeV}/c^2$$

$$\Gamma(\text{半宽度}) = 7 \text{ GeV}$$

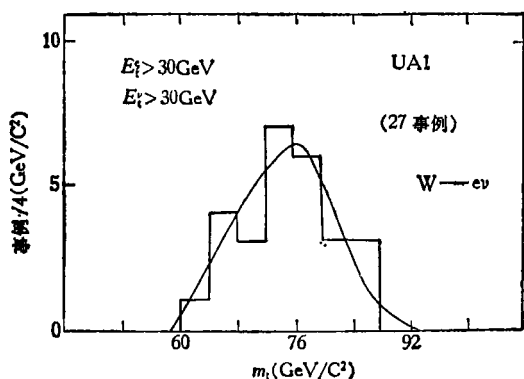


图 5 W 横质量谱

关于本底的考虑, 主要是考察哪些事例可能被误认为是 W 粒子的产物。例如, 一大横动量的 π^\pm 粒子与中性 π^0 粒子可能偶然重叠。这时, π^0 产生的两个 γ 被电磁量能器吸收, 但是它们在中心探测器中都不能留下径迹, 而重叠的 π^\pm 却可能留下径迹, 这样就有可能被误认为是一个大横动量电子了。经计算, 这种可能性很小, 可以忽略。其他本底因讨论分析繁琐, 此处不再赘述。

五、 Z^0 实验分析

在 1983 年 4 月至 6 月 UA-1 的实验运行期间, 发现了六个 Z^0 事例, 其中有四个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$, 有一个伴随硬光子 γ , 一个 $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ [6]。最近又分析出一个伴随 γ 的 $\mu^+\mu^-$ 事例 [6]。7 月 UA-2 报道了八个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 事例, 其中四个不太可靠 [9]。这里简单介绍 UA-1 的处理方法。快触发条件与本文第四节中所述

的基本上一样。由 CAMAC 系统获取的粗数据, 首先利用 168E 快速位片式计算机实时在线选出三类事例, 即 (1) 两对相邻电磁量能器单元的沉积横能量大于 25 GeV (为了找 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$); (2) 一对相邻电磁量能器单元中沉积横能量大于 15 GeV (为了找 $W \rightarrow e\nu_e$ 事例); (3) 双 μ 事例。这样的实时筛选称为特快线 (express line)。以下简述产物为双轻子的两种情况。

1. $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 的离线分析

两对电磁量能器单元中沉积的横能量大于 25 GeV, 且其中至少有一个的方向与中心探测器内径迹相吻合。这样的事例共 152 个, 其中在强子量能器中能量沉积小于 800 MeV 的只剩六个, 而只有四个满足孤立条件 (中心探测器内所选径迹周围的其他径迹总横动量小于 3 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)。表 1 列有这四个事例在中心探测器 (图像漂移室)、电磁量能器和强子量能器中的有关特征量。由表 1 的数据和图 6 可以很清楚地看出, 每个事例有两个电荷相反的大横动量电子, 它们的夹角 ϕ 都接近 180° , 在电磁量能器中总沉积能量约为 100 GeV, 而在强子量能器中沉积的能量都几乎等于零。由上述质量公式, 可推得 Z^0 的质量为 $M_z = (95.2 \pm 2) \text{ GeV}/c^2$ 。

2. $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的分析

由特快线选出带有 μ 标记的事例, 经过 μ

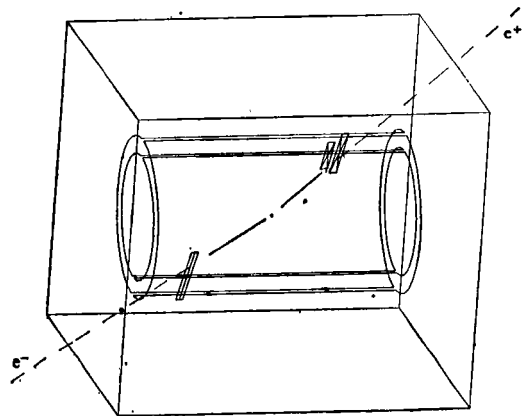


图 6 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 观测扫描图

表1 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 测量参量

事例号	中心探测器测量						量能器测量 (GeV)					
	p^* (GeV)	Δp (GeV)	Q	dE/dx^{**}	y^{***}	$\phi(^{\circ})$	E_{tot}^{****} (GeV)	四层电磁量能器				强子量能器 H
								S_1	S_2	S_3	S_4	
A 7433 1001	33	+9 -6	+	1.8 ± 0.3	1.01	144	44	14	27	3	0.0	0.0
	63	+23 -13	-	1.7 ± 0.2	-1.19	-31	48	6	37	4	0.2	0.0
B 7434 746	27	+19 -8	+	1.6 ± 0.3	-0.36	131	42	2	18	20	1.3	0.1
	93	+66 -28	-	1.8 ± 0.2	-1.45	-60	102	42	56	4	0.2	0.0
C 6059 1010	32	+11 -6	+	1.3 ± 0.2	0.64	67	61	1	37	22	0.6	0.0
	9	+1 -1	-	1.4 ± 0.1	0.24	-121	48	1	23	23	1.3	0.0
D 7739 1279	$d)$	$d)$	$d)$	$d)$	-0.19	169	51	1	13	34	2.4	0.0
	50	+50 -17	-	1.5 ± 0.2	-0.79	-9	55	8	38	9	0.0	0.1

* 电子动量; ** 相对于 π 的最小电离; *** 快度; **** S_1, S_2, S_3, S_4 为电磁量能器四层单元中吸收的能量, E_{tot} 为吸收的总能量。

漂移管定位和中心探测器内的径迹重建, 定出 μ 横动量大于 $7\text{GeV}/c$ 的事例只有 42 个, 再用扫描方法排除不通过对撞点的宇宙线 μ 子。同时, 考虑了 μ 子在量能器中的沉积能量条件、电离损失及中心探测器—— μ 漂移管位置拟合条件后, 只剩下一个事例。

对 Z^0 的本底分析, 主要是考虑容易误判为 Z^0 产物的那些事例。例如在产生一对喷注的事例中, 两个喷注产物中各有一个横动量特别大的强子, 而这两个强子又被误认为是电子。

六、结 果

UA-1 在 136nb^{-1} 积分亮度下得到的主要结果如下:

(1) 在 52 个 $W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} \nu_e$ 的事例中有 24 个带负电荷, 14 个带正电荷, 另外 14 个不易肯定。

根据 27 个 W^{\pm} 事例, 得到 W^{\pm} 的质量为 $M_W = (80.9 \pm 1.5)\text{GeV}/c^2$ 质量半宽度 $\Gamma \leq 7\text{GeV}/c^2$ (90% 置信度), 如图 5 所示。理论预言为 $82 \pm 2.6\text{GeV}/c^2$ 。

$W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} \nu_e$ 的产生率 σB (W 产生截面与物理

衰变分支比的乘积) 为 $0.53 \pm 0.08\text{nb}$ 。

根据 52 个 W 事例, 观察到在 W 质心系内 W 衰变的 $e^-(e^+)$ 与 $p\bar{p}$ 碰撞轴方向夹角 θ^* (即 e^-p 夹角和 $e^+\bar{p}$ 夹角) 的角分布 $dN/d\cos\theta^*$ 有明显的不对称性, 其角分布为

$$dN/d\cos\theta^* \propto (1 + \cos\theta^*)^2,$$

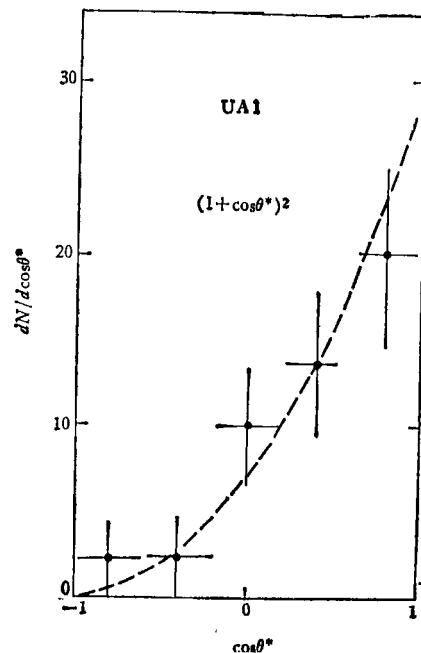


图7 W 衰变产物角分布

如图 7 所示,符合 V-A 理论预言, W 自旋为 1.

由 M_W 的质量推出的 Weinberg 角为

$$\sin^2 \theta = 38.5/M_W = 0.226.$$

以上皆符合 Weinberg-Salam 理论及目前国际上公认的“世界低能数据”。

(2) 根据 1983 年 8 月实验设备进一步校准后,由五个 Z^0 事例(四个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$, 一个 $\mu^+\mu^-$) 得到的 Z^0 质量为

$$M_{Z^0} = (95.6 \pm 1.4) \text{ GeV}/c^2,$$

$$\text{质量半宽度 } \Gamma \leq 8.5 \text{ GeV}/c^2$$

(83 年 6 月第一次公布的 $M_{Z^0} = 95.2 \pm 2.5$, W-S 理论值为 $94 \text{ GeV}/c^2$).

(3) W 和 Z^0 的双轻子横动量谱符合量子色动力学理论,如图 8 所示。

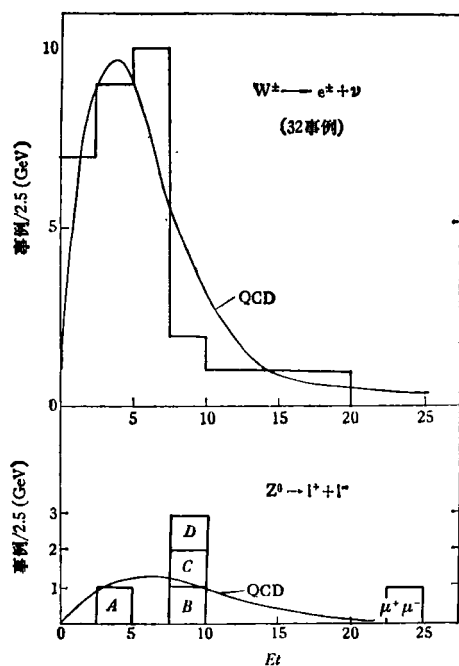


图 8 W^\pm, Z^0 双轻子横能量 E_t 分布

UA-2 的主要结果如下:

(1) 由 35 个 $W^\pm \rightarrow e\nu$ 事例得到 W^\pm 质量 $M_W = 81 \text{ GeV}/c^2$

(2) 今年 7 月公布的由四个 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 事例得到的 Z^0 质量 $M_{Z^0} = (91.9 \pm 1.3) \text{ GeV}/c^2$, 半宽度 $\Gamma \leq 2.6 \text{ GeV}/c^2$. 另外还有四个 Z^0 事例,因不太可靠,未计入。

最后,值得特别提一下的是,今年 4 月 21

日在东京国际基本粒子讨论会上宣布了最新分析结果: 在 17 个 Z^0 衰变中发现了两个 $Z^0 \rightarrow e^+e^- \gamma$ 和一个 $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^- \gamma$ 衰变,即伴随硬光子的衰变^[6,7];同时提出了重电子结构理论。但是,在 52 个 $W \rightarrow e\nu_e$ 和 18 个 $W \rightarrow \mu\nu_\mu$ 衰变中却未发现伴随有硬 γ (大于 10 GeV) 的结果。

七、展 望

今后将进一步研究 W 及 Z^0 的许多性质及双 W 和 Z^0 的产生等。这需要更大的统计量和更高的对撞机能量。还待寻找希格斯 (Higgs) 粒子和顶层子 (top quark 或称 t 夸克) 等新粒子。一方面验证已有的理论,另一方面将在发现新现象的基础上探讨新理论。例如,最近报道的 Z^0 衰变伴随硬光子而 W^\pm 衰变却不伴随的反常现象,将促进各种理论探讨。例如电子有内部结构的见解,可以对人们思考基本粒子更深层次问题带来新启发。另外,近一年来在发现 W, Z^0 的同时,也研究了不少喷注本身的规律,今后尚有大量实验现象有待观察,促进强作用量子色动力学理论等的发展。

从实验设备看,欧洲核子研究中心正在改进 540 GeV 大型反质子质子对撞机,预计三年后将建成新的质子反质子储存环,这将使亮度提高五倍。与此同时,UA-1 探测器也将作重大改进。1985 年美国将建成质心系能量为 2TeV (比目前 CERN 540 GeV 的能量大 4 倍) 的质子反质子对撞机。另外,1983 年 9 月已在日内瓦 CERN 开始兴建周长为 27km 的正负电子对撞机 LEP。预计 1987 年建成,它将成为那时世界上最大的对撞机系统,每天可产生一万个 Z^0 粒子,可以说是一个 Z^0 粒子工厂。

参 考 文 献

- [1] 黄 涛,高能物理, 3(1983), 1.
王祝翔,高能物理, 3(1983), 2.
张肇西,物理, 10(1983), 638.
张文裕,自然辩证法通讯, 2(1984), 6.

(下转第 608 页)