

# 寻找带电中间矢量玻色子的实验方法

王 祝 翔

今年一月,西欧核研究中心的二个实验组同时宣布了观察到弱电统一理论 W-S 模型所预言的,传递弱相互作用力的中间矢量玻色子  $W^\pm$ 。这个发现受到了国际物理学界的广泛重视。关于这两种粒子的性质,它们在弱相互作用中的功能以及利用什么样的加速器使它们产生等问题,已在本刊今年第二期作了介绍。现在再简要地介绍一下其中一个实验组的寻找  $W^\pm$  的实验方法。这个国际合作组的实验代号为 UA1,共有 8 个国家,12 个单位参加,其中仅物理学家就达 135 人,是一项费用非常昂贵的大型实验。

## 1. 寻找 $W^\pm$ 粒子的一般方法

我们先设想一下:假如理论上预言的中间玻色子  $W^\pm$  确实是存在的,质量也如预言的那样,约为 80 京电子伏,而且在它产生后会立即衰变成一个电子  $e^\pm$  和一个中微子  $\nu$ ,即  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$ 。那么,从实验的观点看,需要解决哪些问题,才能把它们找出来?一般说来,需要解决以下四个问题:①使  $W^\pm$  粒子产生,且有足够的数量。②根据  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  的衰变特性,了解衰变产物  $e^\pm, \nu_e(\bar{\nu}_e)$  的运动学性质。③设计专门的探测器,有效地探测  $W^\pm$  的衰变产物  $e^\pm$  和  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ ,并鉴别它们是否是由  $W^\pm$  衰变产生的。④排除一切可能混淆为  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  事例的本底。在这四个问题中,第一个问题,即如何使  $W^\pm$  粒子产生,只是与  $p\bar{p}$  对撞机本身的性能有关。而后三个问题,即产生了  $W^\pm$  后,如何用实验方法把它们探测到,则需要由实验物理学家来解决。

① 使  $W^\pm$  产生,且有足够的数量。这个问题主要靠加速器本身(即 270+270 京电子伏的  $p\bar{p}$  对撞机)来解决。由于  $p\bar{p}$  对撞的质心能量为 540 京电子伏,比  $W^\pm$  的质量( $\sim 80$  京电子伏)大得多,因此产生  $W^\pm$ ,能量上是完全足够的。即使从质子中的夸克和反质子中的反夸克对撞产生  $W^\pm$  来看,能量也是足够的。再加上累积的束流强度已达到一定程度,使产生一定数量的  $W^\pm$  成为可能。(因为  $p\bar{p}$  碰撞产生中间玻色子的几率非常小)。

② 根据  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  的衰变特性,了解衰变产物  $e^\pm, \nu_e(\bar{\nu}_e)$  的运动学性质。在  $p\bar{p}$  作用产生  $W^\pm$  ( $p + \bar{p} \rightarrow W^\pm + X$ ) 之后,  $W^\pm$  很快就衰变。由  $W^\pm$  衰变产生的  $e^\pm$  和  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ ,在多数情况下与  $p\bar{p}$  束流方向

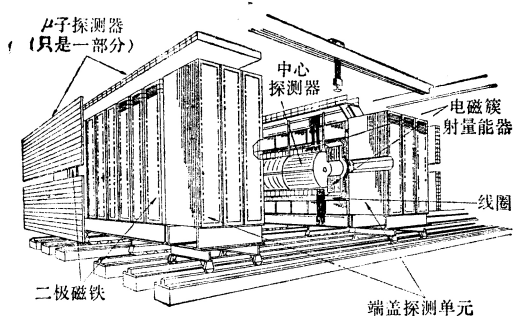
成较大的角度,且有很大的能量(因为  $W^\pm$  本身质量为  $\sim 80$  京电子伏,它衰变的  $e^\pm$  和  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$  必然具有很大能量)。它们表现在实验上,就是在  $p\bar{p}$  作用事例中出现孤立的大横能量(记  $E_T$ )的电子和大横能量的中微子。

③ 设计专门的探测器,以有效地探测  $W^\pm$  的衰变产物  $e^\pm$  和  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ ,并鉴别它们是否是由  $W^\pm$  衰变产生的。为探测大横能量  $E_T$  的电子,需要有效地测定: i) 确实是电子。 ii) 具有很大能量。 iii) 具有较大的飞出角度(相对于束流方向)。同样,为探测大横动量的中微子,也要有效地确定: i) 确实是中微子。 ii) 具有很大能量。 iii) 具有较大的飞出角度。然而,探测  $e^\pm$  和探测  $\nu$  在方法上是完全不同的。电子  $e^\pm$  可以直接被探测到,而中微子  $\nu$  却不能直接被探测。因为中微子与物质发生作用的几率实在太小,探测器对它们实际上是不灵敏的。确定中微子存在的唯一有效方法是根据由它带走的能量,称之为丢失能量。换句话说,根据  $p\bar{p}$  作用过程的能量守恒和动量守恒,如发现某一方向丢失了很大能量,而该方向又没有粒子出现,那么就可以认为这是一个中微子,而由它带走了作用中所丢失的能量。由此可见,探测中微子实际就是探测在能量守恒中的丢失能量。

④ 排除一切可能混淆为  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  事例的本底。得到了既有大横能量的  $e^\pm$ ,又有大横丢失能量的事例以后,要确定它们为由  $W^\pm$  产生,还必须排除掉这些事例用其他过程解释的可能性。这一点非常重要,不然的话,表明  $W^\pm$  存在的证据不会被人信服的。

## 2. 实验装置及测量的物理量

UA1 的实验装置是一个外形大小约为 7 米  $\times$  7 米  $\times$  12 米的庞然大物(如图)。它主要由以下几个部分组成: (1) 一个横向的大二极分析磁铁。它产生 7000 高斯的均匀磁场。磁场覆盖的空间为 3.5 米  $\times$  3.5 米  $\times$  7 米。此磁场的任务是测定带电粒子的动量和电荷正负号(根据粒子径迹的曲率)。对于 1 米长的,动量为 40 京电子伏/c 的径迹(在垂直于磁场的平面上),相对精度约为 20%。(2) 一个中心探测器。实际上它是一个圆柱形漂移室,直径为 2.3 米,全长 5.8 米。它能给出所有带电粒子径迹的极为清晰的照片。除了可以根据径迹的曲率测量粒子动量及粒子飞行方向外,还可以测定所有带电粒子的电离。电离的精度可达到 10%。(3) 电磁簇射量能器。包括二个不同的部分: i) 圆柱形电磁量能器。由 48 个半圆柱形的闪烁体片和铅片交替叠合的单元组成一个中空的圆柱形电磁簇射量能器,把中心圆柱形漂移室包围起来。电磁簇射粒子在每个单元中产生的闪烁光被四个光电倍增管收集。光电倍增管的安排是二个在顶上,二个在底下。到达计数器二端的闪烁光的衰减程度(通过顶



和底的光电倍增管脉冲高度的比较) 被用来确定簇射所在处的方位角. ii) 端盖电磁量能器. 由 64 片电磁簇射计数器组成, 放置在中心探测器的二端, 离束流交叉点约 3 米处. 其中包括探测簇射位置的位置探测器, 由截面为 2 厘米 × 2 厘米的正比管的二个正交列组成. 探测电磁簇射重心的位置精度可达 ± 2 毫米. 以上两种电磁簇射量能器的功能是探测由  $e^{\pm}$  (或  $\gamma$ ) 引起的电磁簇射, 从而可以确定  $e^{\pm}$  以及它们的能量. 此外, 为了可靠地求得丢失能量, 几乎使量能器把中心探测器全部包围起来. 由于加速管道的原因, 只留下  $0.2^{\circ}$  (相对于束流方向) 的空间没有被包住. 而磁铁本身就是作为量能器的一部分. (4)  $\mu$  子探测器. 由漂移室的共 8 个平面叠加组成. 它被放置在全部仪器和大磁铁的外面, 以探测穿透能力很强的  $\mu$  子. 放置  $\mu$  子探测器的目的是为了避开  $\mu$  和  $\nu$  的混淆. 因为如在  $p\bar{p}$  作用事例中丢失能量方向也出现  $\mu$  子径迹, 则说明此丢失能量是被  $\mu$  子带走的, 而不是中微子.

这个装置总的功能是: 1) 可以从高能带电粒子(强子, 电子,  $\mu$  子等)中鉴别出电子  $e^{\pm}$ . 2) 可以测出  $e^{\pm}$  的动量及空间飞行方向. 3) 根据能量和动量守恒, 可以确定出丢失能量(由  $\nu$  所携带的)及其消失方向, 且可把  $\mu$  和  $\nu$  区分开. 由此可见, 此实验装置是具备了寻找  $W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  事例所需要的条件.

### 3. 测得的结果

在 1982 年 11 月—12 月的 30 天的实验运行中, 总共约发生了  $10^9$  次  $p\bar{p}$  碰撞, 质心能量为 540 京电子伏. 共收集到  $9.75 \times 10^5$  个触发事例, 其中  $1.4 \times 10^5$  个是具有一个电子触发的特征的. 经过对量能器信息的甄别, 留下 28000 个事例, 带有  $E_T > 15$  京电子伏. 之后, 再用中心探测器来作粒子径迹的重建处理, 剩下了 2125 个质量好的照片, 且带电径迹都具有横动量  $P_T > 7$  京电子伏/c.

(1) 寻找大  $E_T$  电子候选者. 在 2125 个事例中, 为保证电磁簇射是由单个电子产生, 而不是由喷注(集中发射的多个粒子)产生, 又作了进一步的处理. 结果只留下 39 个电子候选者. 其中 5 个不带有喷注行为, 11 个带有一个喷注行为, 23 个带有二个喷注行为. 实

验发现, 凡带有喷注的电子候选事例都没有丢失能量, 而没有喷注的那些事例, 大多有相同大小的丢失能量, 这表明单个电子与丢失能量是同时发生的.

(2) 寻找大横能量  $\nu$  的事例. 在同样的 2125 个事例中, 要求根据所有探测到的粒子径迹的测量来选出带有一个大横丢失能量的事例. 同样经过各种条件的严格筛选, 只留下了 18 个候选事例, 分成二类: 11 个带有喷注行为, 7 个没有喷注行为.

把以上二种用不同方法得出的结果加以比较. 在 7 个没有喷注行为的  $\nu$  事例中, 正好包含了 5 个不带有喷注行为的  $e^{\pm}$  事例. 而多出来的二个  $\nu$ , 估计很可能是由  $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_{\tau}$  衰变出来的  $\nu_{\tau}$ . 这 5 个既带大  $E_T e^{\pm}$ , 又带大横丢失能量  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$  的事例, 显然是由某种粒子衰变产生的. 根据  $e^{\pm}$  和  $\nu_e$  的动量和飞行方向作  $W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  二体衰变的运动学计算, 并经过各种因素的校正, 最后得到在误差范围内各事例的  $W^{\pm}$  具有一致的质量, 其值为  $m_W = 81 \pm 5$  京电子伏/c<sup>2</sup>.

### 4. 本底的考虑

在一个事例中既出现一个大  $E_T$  的  $e^{\pm}$ , 又出现一个大横丢失能量. 这有没有可能是由其他过程(即本底)所引起? 为此, 在实验上考虑了以下一些可能性.

① 带有大横动量  $P_T$  的带电强子 ( $\pi^{\pm}$  介子) 与一个或多个  $\pi^0$  介子重叠而被误鉴定为电子. 由于  $\pi^0$  衰变成  $2\gamma$ , 而在电磁量能器中, 光子  $\gamma$  和  $e$  是不能区分的. 因此, 如果在中心漂移室中测到的是带电  $\pi$  的径迹和动量, 而在电磁量能器中测到的是由  $\pi^0$  衰变的  $\gamma$ . 那么这种事例就可能是一种本底. 但是, 假如这种大  $P_T$  的  $\pi^{\pm}$  和高能  $\pi^0$  重叠事例存在, 那么一定会有更多的大  $P_T$  的  $\pi^{\pm}$  和高能  $\pi^0$  不重叠的事例(且带有大的丢失能量的), 可是在实验中并没有发现  $\pi^{\pm}, \pi^0$  不重叠的事例. 因此, 这种可能性是全然可以排除的.

② 大  $P_T$  的  $\pi^0$  (衰变成  $2\gamma$  或  $\gamma e^+e^-$ ) 和  $\eta^0$  (指衰变成  $2\gamma$  的), 由它们衰变出来的  $\gamma$  通过加速管道时可能转变成  $e^+e^-$  对, 而且有可能一个具有大动量, 另一个具有小动量(从而记录不到), 因而探测到的孤立电子是否可能就是  $e^+e^-$  对中的一个大动量的? 然而经过事先的 10—40 京电子伏的粒子束试验, 测得其衰变的各种分布, 以上这种可能性是极小的, 因而这种本底也是可以忽略的.

### 5. 结 论

根据实验测得的数据以及运动学和排除本底等分析, 可以认为  $W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e)$  的事例是确实存在的, 其质量为  $m_W = 81 \pm 5$  京电子伏/c<sup>2</sup>. 这 W-S 模型的预言极好地一致. 此外, 根据在 10 亿次  $p\bar{p}$  碰撞中观察到 5 个  $W^{\pm}$  粒子事例以及经过几何因子等修正, 可以得到其产生截面也与理论预言很好一致.