



高 崇 寿

1983 年对粒子物理学来说是不平凡的一年, 1983 年 1 月, 欧洲核子研究中心宣布发现了传递带电流弱相互作用的中间玻色子 W^\pm , 接着在 6 月, 欧洲核子研究中心又宣布发现了传递中性流弱相互作用的中间玻色子 Z^0 . 这是对格拉肖、温伯格、萨拉姆的弱电统一理论的直接验证, 对粒子物理的发展具有重大意义.

欧洲核子研究中心的两个实验组 UA-1 组和 UA-2 组, 分别对 W 粒子和 Z 粒子进行了测量. 测量结果与理论预言的比较见下表.

实验结果和理论预言符合得非常好, 这一方面表明理论在很高的精度下得到了实验的直接验证, 但是另一方面也带来了新的问题. 人们原来期望, 如果实验结果和理论预言之间呈现出某些即使不大但却是确定的偏离, 则这种偏离就明确启示我们理论还必须修改和发展, 并且对理论修改的方向提供线索. 这种偏离并没有明显地出现, 对进一步的理论探索带来了困难. 人们自然而然地密切注视与 W 粒子和 Z 粒子有关

的各种实验结果, 仔细审查它们是否与理论预言符合, 从偏离中探寻新物理规律的线索.

首先人们注视的是 W 粒子和 Z 粒子总宽度的测量. 按照弱电统一理论, W 粒子和 Z 粒子与其它粒子的耦合常数都是规范耦合常数, 从而是完全确定的. 这样 W 粒子和 Z 粒子的衰变宽度也就完全可以从理论上加以预言. 理论上要求自旋为 $1/2$ 的轻子和夸克的存在是分族的, 并且实验上已表明至少存在三族轻子和夸克. 如果实验上精确地测定了 W 粒子和 Z 粒子的宽度 Γ_W 和 Γ_Z , 则反过来可以推测质量比 Z 粒子的一半要轻的带电轻子数 N_l 和中微子数 N_ν :

$$N_l = 4.301 \frac{\Gamma_W}{\text{GeV}} - 9.101,$$

$$N_\nu = 5.848 \frac{\Gamma_Z}{\text{GeV}} - 2.163 \frac{\Gamma_W}{\text{GeV}} - 7.417.$$

这里假定目前尚未确认发现的顶夸克的质量为 20GeV . 如果顶夸克质量重于 Z 粒子的一半, 则上式变为

	UA1 组	UA2 组	理论预言
$W \rightarrow e\nu$ 事例数	52	37	
$m_W(\text{GeV})$	$80.9 \pm 1.5 \pm 2.4$	$83.1 \pm 1.9 \pm 1.3$	83.0 ± 2.5
$\Gamma_W(\text{GeV})$ (90% 置信度)	≤ 7		≤ 2.81
$W \rightarrow \mu\nu$ 事例数	14		
$m_W(\text{GeV})$	$81.0 \begin{smallmatrix} +6 \\ -7 \end{smallmatrix}$		
$Z \rightarrow e^+e^-, e^+e^-\gamma$ 事例数	3, 1	7, 1	
$m_Z(\text{GeV})$	$95.6 \pm 1.4 \pm 2.9$	$92.7 \pm 1.7 \pm 1.4$	93.7 ± 2.1
$\Gamma_Z(\text{GeV})$ (90% 置信度)	≤ 8.5	≤ 6.5	≤ 2.82
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-, \mu^+\mu^-\gamma$ 事例数	4, 1		
$m_Z(\text{GeV})$	85.6 ± 6.3		
$\sin^2 \theta_W = \left(\frac{38.5 \text{ GeV}}{m_W}\right)^2$	0.226 ± 0.015	$0.216 \pm 0.010 \pm 0.007$	0.215 ± 0.012
$\rho = \left(\frac{m_W}{m_Z \cos \theta_W}\right)^2$	0.968 ± 0.045	1.02 ± 0.06	1.000

$$N_l = 4.301 \frac{\Gamma_w}{\text{GeV}} - 6.265,$$

$$N_\nu = 5.843 \frac{\Gamma_z}{\text{GeV}} - 2.163 \frac{\Gamma_w}{\text{GeV}} - 7.446.$$

应注意的是 N_ν 的值对顶夸克质量的依赖性并不敏感。

通过实验上精确测量 Γ_w 和 Γ_z 的值来推测 N_l 和 N_ν 有重要的理论意义。如果自然界存在 N 族轻子和夸克,自然要求 $N_l, N_\nu \leq N$ 。格拉肖-温伯格-萨拉姆模型中物理真空可以稳定存在则要求 N 值不能大,很可能 $N \leq 4$; 而现有粒子物理理论上建立的宇宙论中根据宇宙中氦的丰度的观察值要求 $N = 3$ 。因此,对 w 粒子和 z 粒子宽度的精确测量是实验上关心的重要课题。如果由此估算出 $N \geq 4$, 则给理论的探索提出了新的课题。由于现在实验只给出 w 粒子和 z 粒子宽度的上限,还不能对 N 的取值给出明确的判断。

另一个人人们注视的问题是 w 粒子和 z 粒子以及光子之间的相互作用。最典型的是 w 粒子和光子的作用, w 粒子本身带电,它和光子的相互作用规律在理论上是完全确定的。在实验上发现 w 粒子和 z 粒子之后,就有可能对理论作直接的检验,同时也可从一个侧面给出关于 w 粒子和 z 粒子是否可能有内部结构的信息。

再一个人人们注视的重要问题是找寻希格斯粒子。在格拉肖-温伯格-萨拉姆模型中,希格斯粒子是不可缺少的,同时又是理论预言它应存在但仍未发现的粒子。希格斯粒子的质量在理论上并不确定,而其性质又很特别,因此发现希格斯粒子不仅是对模型的进一步验证,并且对理论如何进一步发展可以给出某些启示。

还有一个吸引人的重要问题是关于超对称弱电统一理论。超对称性是指不同自旋的粒子之间的某种对称联系,这方面的理论探讨在近十年来有很活跃的发展,但是直到目前还没有一个实验能够判定性地表明在粒子物理世界中存在着超对称性。当弱电统一理论得到实验的支持之后,许多理论家马上在此基础上推广建立超对称弱电统一理论。如果超对称性确实存在,所有的粒子都将有一个相应的自旋差 $1/2$ 的“配偶”存在,它的直接物理后果之一是 w 粒子和 z 粒子的宽度要变大,例如 Γ_z 将增至原来值的 1.5 倍。所以人们密切注视 w 粒子和 z 粒子宽度的精确测量。

以上所列举的这几个方面虽然意义重大,但现在的实验还难以给出明确结果。然而在 1983 年秋,一个重要的反常现象明显地显现出来。现在实验上对 z 粒子的观察主要是观察 z 粒子衰变到一对带电轻子,但是意外地发现在 17 个事例中竟然有 3 个事例中出现高能光子,这比理论估计要大一个数量级。这个衰变称为 z 粒子的反常辐射衰变。使人感到有兴趣的是 w 粒子衰变到一对轻子的事例虽然已经发现了 103 个,但其中并没有含高能光子的反常辐射衰变。 z 粒子的反常辐射衰变肯定不能用标准的格拉肖-温伯格-萨拉

姆模型解释,它应该是某种未知的新物理机制所造成的。这种新物理机制在可以解释 z 粒子的反常辐射衰变的同时,又要不违反弱电统一理论中已经得到实验验证的结论,其中包括并没观察到 w 粒子的反常辐射衰变。很多理论物理学家被吸引来探索 z 粒子反常辐射衰变,在这些探索研究中既要提出这些可能的新物理机制是什么。还要研究如何在进一步的实验中来检验和判别这些机制。

讨论有关解释 z 粒子的反常辐射衰变而提出的各种可能机制相当活跃。总起来说,许多人倾向于更深层次的结构效应,有人认为它是由于轻子是由更深层次的组分所组成的复合粒子,有人认为它是由于 z 粒子本身是复合粒子,也有人认为反常辐射衰变是由于虚磁单极子的出现所造成的。尽管这些不同机制谁是谁非还很难判定,但是大家都同意: z 粒子的反常辐射衰变说明新物理现象出现了,在弱电统一理论基础上需要进行的新的物理探索开始了。许多理论和实验物理学家期待和注视着这方面的每一个进展。

半年之后,1984 年上半年,一个更加使人兴奋和激动的新现象出现了。在研究高能质子和反质子的对撞实验时,发现具有大“丢失能量”的事例中,有一批用已有理论难以解释的事例。虽然由于事例数目还不够多,许多结果还不明朗。但是种种迹象表明,这些事例很可能显示存在若干种新粒子,其质量比 z 粒子要重大约半倍。这些新粒子如果存在,其性质还有待进一步的实验来确定。但是有一点可以断言:它们肯定不能用标准的弱电统一理论来解释。这个新现象的出现,再一次促使人们相信:新物理出现了,这个新发现又推动更多的理论物理学家致力于对新物理机制的探索,活跃地进行多方面的分析讨论从目前状况来看:许多人认为这个新现象和 z 粒子的反常辐射衰变来源于同一物理机制;有的人认为它来源于粒子具有更深层次结构,是复合粒子的效应;有的人认为它来源于粒子的超对称性等,但还很难作结论。现在许多理论家正以激动的心情,注视和期待着实验的进一步结果,以迎接新物理机制探索高潮的到来。

w 粒子和 z 粒子的发现标志着格拉肖-温伯格-萨拉姆模型得到了实验的决定性的直接验证,也显示着在此基础上进行新理论探索的开始。使人兴奋的是,在发现 w 粒子和 z 粒子的同时,又得到新物理机制存在的线索。从 z 粒子的反常辐射衰变到大丢失能量有关的新现象,都明确地显示出新物理机制的存在迹象。新的理论探索开始了。现在,我们不能把 w 粒子和 z 粒子的发现仅仅看作是标帜着旧的理论探索告一段落,必须看到它同时还标帜着一个新的理论探索阶段的开始。使人兴奋的是这两幕之间并没有间隙,新物理出乎意料快地到来。可以预言粒子物理学将会迅速取得重大的进展。