

粒子物理的

新实验进展

高 崇 寿

最近几年,高能物理的发展非常迅速,在实验上取得了许多令人兴奋的进展,也提出了许多有待进一步研究和解决的问题。

1983 到 1984 年,在欧洲核子研究中心的对撞实验中先后发现了传递弱相互作用的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 ,它们的质量、产额以及衰变行为都很好地与格拉肖-温伯格-萨拉姆(Glashow-Weinberg-Salam)的弱电统一理论的预言相符,这个重要进展进一步再次确认弱电统一理论的正确性。自然界中存在四种相互作用——强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用,这四种相互作用的性质和强度完全不同。几十年来许多物理学家探索是否可能将其中两种或多种相互作用统一为一种统一的相互作用,或能介绍它们来自统一的来源都没有满意的结果,中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 粒子的发现确认了电磁相互作用和弱相互作用有统一的“来源”,它们是统一的弱电相互作用在低能时的不同表现。这个发现具有重大的意义,同时,也提出了一个重要的问题:既然现在电磁相互作用和弱相互作用统一地由弱电统一理论正确描写,而强相互作用看来可以用量子色动力学来很好地描写,那么一种比由弱电统一理论和量子色动力学合起来的标准模型更深入一层的理论将是什么;这更深入的理论所对应的新物理是什么?“新物理在哪里?”这就是理论物理学家和实验物理学家目前共同关心的问题。

在人类探索物质微观结构的过程中发现,新的物质结构层次、新的运动形态的出现一般说来往往是随着空间尺度缩小 3 个量级,即能量提高 3 个量级而出现。按照这样来估计,既然 W 粒子和 Z 粒子出现于质心系能量为 10^2 GeV 的碰撞中,新物理现象有可能将在质心系能量量级为 $10^3 \text{ GeV} = 10^2 \text{ TeV}$ 的碰撞中出现。然而这样高能量的碰撞实验,在近几年内是不可能实现的,因为世界上最大的加速器,包括现已作了计划但尚未造的加速器,能量都低于这个值。

1984 年,实验上发现了几个使人兴奋的新现象。首先是发现 Z^0 粒子衰变为一对正反带电轻子和一个硬光子的几率与只衰变为一对正反带电轻子的几率之

比为 0.21,这比按照弱电统一理论所预言的大了一个数量级;接着又发现在高能质子和反质子对撞实验中有一些事例有很大的“丢失”横能量,“丢失”的含意是指探测不到的。也就是说这些事例中按照能量守恒应有很大的能量沿对于对撞轴来说横向射出然而并没有被探测到。对这种事例一个最自然的解释是出现了过去没有发现的新粒子,这种新粒子的质量似乎应在 $150 \text{ GeV} - 180 \text{ GeV}$ 范围,然而弱电统一理论中并没有预言存在这样的粒子。这个新现象的出现给人们一个启示:“有可能人们期望的新物理已开始显露出来”,有的科学家惊呼:“没想到新物理来得这么快。”

1984 年到 1985 年,高能物理学家们都密切注视这方面的进一步的实验结果。1985 年秋,实验的结果确认这些“新现象”实际并不存在,过去实验中显现的新现象迹象是在事例数不多时的统计涨落。当观察到事例数多时,统计涨落相对减小,就不再显现出“新现象”的迹象。在这以后,人们的注意力再次回到与标准模型并不矛盾的实验结果的研究中去,特别是对理论的发展有重要意义的新现象。

Ω^{*-} 粒子的发现

在 60 年代,大量强相互作用共振粒子被发现时,粒子物理学家在同位旋和奇异数的基础上研究究竟存在什么样的更高的对称性。在确立味 $SU(3)$ 对称性理论以及进一步建立夸克模型过程中,科学家们预言存在 Ω^- 粒子,随后又在实验中发现 Ω^- 粒子起了关键的作用。按照 $SU(3)$ 对称性理论的八正法方案,自旋为 $3/2$, 宇称为重的重子应有 10 个成员构成一旋——即“重子十重态”。当时已发现了 9 个粒子,它们都是可以通过强相互作用衰变的短寿命粒子,它们的质量以及衰变行为都符合理论上的预言。按照这个理论预言,第 10 个成员 Ω^- 应该是奇异数为 -3 并且只能通过弱相互作用衰变的长寿命的粒子。后来实验上果然发现了 Ω^- 粒子,理论得到了判定性的支持。

很长时期以来,各种熟知的强子都发现有更高的激发态。在味 $SU(3)$ 理论以及在此基础上发展的夸克模型所预言的重子单态、八重态与十重态的各成员

中除 Ω^- 粒子外,都已有多个激发态被发现. 1981年,赵光达, Isgur, Karl 等人从夸克模型讨论了 Ω^- 的激发态,预言了其质量和衰变行为,其中一个激发态的质量为 2265 MeV,主要衰变方式为 $\Omega^{*-}(2265) \rightarrow \Xi^*(1530) + \bar{K}$. 最近在 $\Xi^- + \text{Be}$ 和 $\text{K}^- + \text{P}$ 的实验中,先后发现了一个 Ω^{*-} 态,其质量为 (2252 ± 7) MeV,宽度为 (55 ± 18) MeV. 这个态是在 $\Xi^- + \pi^+ + \text{K}^-$ 末态中发现的,从它的质量和主要衰变方式来看,与理论的预言完全符合.

Ξ_c^+ 粒子和粲介子激发态的发现

在含有粲夸克的重子 Λ_c 和 Σ_c 被发现后,人们的注意力自然转向寻找 $\Xi_c \cdot \Xi_c$ 中应该含有 1 个粲夸克和 1 个奇异夸克,即可以有两种荷电状态: $\Xi_c^+ = (usc)$ 和 $\Xi_c^0 = (dsc)$. 它们衰变时主要是由于 c 夸克衰变 $c \rightarrow s + u + \bar{d}$, 即衰变后末态中应含有两个 s 夸克. 最近在美国费米国家实验室和欧洲核子研究中心都在 $\Delta K^- \pi^+ \pi^+$ 末态中找到 Ξ_c^+ 粒子存在的证据,其质量为 (2459 ± 5) MeV. 在美国费米国家实验室还发现质量为 (2384 ± 5) MeV、衰变为 $\Sigma^0 K^- \pi^+ \pi^-$ 的 Ξ_c^+ 粒子. 最近在含粲夸克介子的激发态的探寻中又取得了进展: 发现了一个质量为 (2422 ± 5) MeV 的 D_s^+ 粒子,还测定由 c 夸克和反 s 夸克组成的 D_s^+ 粒子,质量为 $(2109.3 \pm 2.1 \pm 3.1)$ MeV. 这些进展都为系统地研究和分析含粲夸克介子和重子谱的规律提供了有利条件.

Υ 粒子衰变之谜

底夸克 b 和反底夸克的自旋为 1 的束缚态称 Υ 介子,现在已经发现 Υ 介子有几个径向激发态,它们的各种量子数都相同,但质量有差别. 现在用 $\Upsilon(1s)$ 代表 Υ 介子, $\Upsilon(2s), \Upsilon(3s), \dots$ 代表 Υ 的径向激发态. 实验上已发现 $\Upsilon(2s)$, 它可以衰变为 $\Upsilon(1s)$ 和 2 个 π 介子,人们自然可以期望 $\Upsilon(3s)$ 亦应可以衰变为 $\Upsilon(1s)$ 和 2 个 π 介子,并且两个过程的衰变机理应当相似. 实验上果然发现 $\Upsilon(3s)$ 的这个衰变过程,但是出乎意料的是两个衰变过程却有极大的不同. $\Upsilon(2s)$ 的衰变中产生的两个 π 介子合系统的质量分布和理论的估计一致,而 $\Upsilon(3s)$ 的衰变中产生的两个 π 介子合系统的质量分布则要在理论估计的基础上加上两个 π 介子是由一种新的不稳定粒子衰变而来的贡献. 分析实验表明这种新的粒子质量应为 300 MeV,能级宽度亦应为 300 MeV. 这个粒子使人想起二十几年前在强子谱研究中著名的 ABC 粒子,ABC 粒子是当时从分析实验中给出的,质量约为 300 MeV 的不稳定粒子,它可以衰变为两个 π 介子. ABC 粒子的这些性质都和 $\Upsilon(3s)$ 粒子衰变中显示出可能存在的粒子相同,差别在于 ABC 粒子的宽度要窄得多. 60 年代关于强子谱的仔细研究最终否定了 ABC 粒子的存在,而现在在研究 $\Upsilon(3s)$ 的衰变过程中一个类似的粒子又涌现

出来. 如果这个粒子存在,最使人不可理解的是为什么在 $\Upsilon(2s)$ 的类似的衰变过程中却又完全没有存在的迹象,这就是 Υ 粒子衰变之谜. 当然,如果这个粒子存在,它究竟是什么类型的粒子,还需要进一步研究,从几个可能的答案来看,比较大的可能是胶球.

t 夸克在哪里

现在,大家都知道轻子和夸克是按代出现,自然界最少存在 3 代轻子和夸克. 这 3 代轻子和夸克中只有第 3 代中电荷为 2/3 的顶夸克 t, 虽然理论上早已预言,可是直到现在还没找到. 寻找 t 夸克的工作一直在进行,对于 t 夸克质量所在的范围愈来愈小,去年给出的范围是 $45 \text{ GeV} \leq m_t \leq 220 \text{ GeV}$. 值得注意的是, t 夸克和反 t 夸克组成的顶偶素的质量将等于或重于 z 粒子的质量,这样,顶偶素和 z 粒子之间可能会有很强的耦合和混合,并会显示出一些新的现象.

与寻找 t 夸克相应,人们还特别注意自然界中是否存在第 4 代轻子和夸克的可能性. 第 4 代中电荷为 -1/3 的 b' 夸克的质量下限为 $m_{b'} > 30 \text{ GeV}$, 这表明有可能 b' 夸克比 t 夸克要轻. 如果真是这样, b' 夸克在作弱衰变时就不能衰变到 t 夸克,只能衰变为 c 夸克或 u 夸克,但这时代的数码将改变为 2 或 3. 这时 b' 将表现为出奇的长寿命,实验家和理论家都将对它特别地感兴趣. 如果自然界中存在第 4 代轻子和夸克,那么它们的质量应重于第三代中相对应的粒子,这时最重的粒子应是 t' , 但是 t' 的质量也要受到限制. 弱电统一理论真空的稳定性要求最重夸克的质量上跟随着希格斯(Higgs)粒子的质量增高而增高;反过来也可以说: 希格斯粒子的质量下限随最重夸克质量的增高而增高. 例如,最重夸克质量为 80 GeV 时,对希格斯粒子的质量实际没有限制;但当最重夸克质量为 200 GeV 时,希格斯粒子的质量至少需为 370 GeV. 因此当实验上对 t 夸克或 t' 夸克的质量得到信息时,同时也就得到希格斯粒子质量范围的信息.

新粒子的探寻

几种理论预言可能存在的新粒子,仍然是实验家努力探寻的对象. 这方面并没有新的肯定的发现,但却把原有质量下限又提高了. 对于第 4 代带电轻子 L^+ , 给出 $m_{L^+} > 41 \text{ GeV}$. 对于电子和中微子的超对称伴子 \tilde{e} 和 $\tilde{\nu}$, 如果 $m_{\tilde{e}} = m_{\tilde{\nu}}$, 则有 $m_{\tilde{e}} = m_{\tilde{\nu}} \geq 30 \text{ GeV}$. 如果存在重的中间玻色子 w' 和 z' , 则有

$$m_{w'} > 232 \text{ GeV}; m_{z'} > 188 \text{ GeV}.$$

这些结果虽然以平稳的形式出现,但对于增进人们对粒子物理本质的认识是重要的.

高能物理实验中取得的这些新进展是重要的有意义的,但总起来还是常规的,平稳的. 科学家们都在密切注视 1988 到 1989 年,因为世界上又将有几个更高能量的对撞机投入运转,人们期待出现新的振奋人心的消息.