

(二)

顾以藩

六、发现  $\tau$  轻子

粲夸克发现以后，在物质的两类基本组成单元——夸克和轻子之间形成了一个对称的图象：两对轻子，即电子和电子型中微子( $\nu_e$ )、 $\mu$ 子和 $\mu$ 子型中微子( $\nu_\mu$ )，对应于两对夸克，即上( $u$ )和下( $d$ )、粲( $c$ )和奇异( $s$ )。它们可以分为两“代”：第一代是  $u, d, e, \nu_e$ ，第二代是  $c, s, \mu, \nu_\mu$ 。两代成员依次一一对应，对应的成员具有相同性质，区别主要表现在质量上面，第二代的比第一代的大。

包含有四种夸克(每种夸克可以处在三种不同“颜色”的状态：红、绿或蓝)的夸克模型解释了“11月革命”前夕观察到的  $R$  值随能量上升的疑案。在 SPEAR 和 CEA 对撞机的能量下，由于粲夸克的产生， $R$  值应当从 2 上升为 31/3。但是实际上，在质心能量超过粲介子对产生阈能(约 3.77 GeV)时，实验测定的  $R$  值不是 31/3 而是 41/3。这是为什么呢？

1975 年重轻子  $\tau$  的发现解决了这个问题。 $\tau$  轻子是“11月革命”以后 SPEAR 对撞机上的又一项重大发现。

在 SPEAR 上一开始寻找新的带电轻子纯属实验性质的尝试，没有什么理论上的根据。从质心能量为 4 GeV 上下的  $e^+e^-$  碰撞数据中发现了一类奇特的事例：它们都只含两条径迹，一条是电子的，另一条是  $\mu$  子的；也都有一部分能量是“丢失”了的(图 6)。基于 24 个这类事例的仔细分析，确定这是一对新的带电轻子产生与衰变的过程： $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ ； $\tau^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu\bar{\nu}_e$ ， $\tau^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$ 。新轻子被命名为  $\tau$ ；它衰变成电子(或  $\mu$  子)以及探测不到的中微子，后者所携带的能量因此表现为“丢失”能量。 $\tau$  轻子的质量为 1.784 GeV，显著重于已知带电轻子电子和  $\mu$  子；它在质心能量稍低于粲介子对产生阈处开始成对产生，这就解释了实验观察到的  $R$  值比 31/3 大出 1 的原因。

但是，因为粲夸克的发现而建立起来的夸克-轻子对称性却由于  $\tau$  轻子的出现而遭到了破坏。

$\tau$  轻子发现以后，在 SPEAR 和 DORIS 上相继

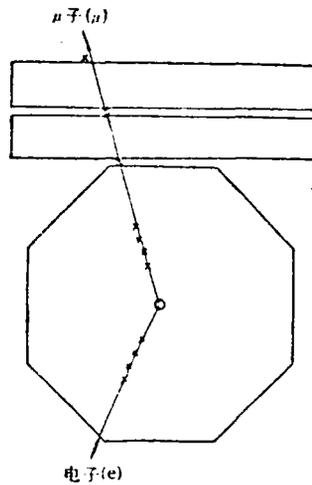


图 6 发现  $\tau$  轻子的  $e-\mu$  事例

开展了关于它的性质的系统研究，许多细致测量以后又扩展到了更高能量的正负电子对撞机上，积累了数量可观的实验资料。 $\tau$  轻子作为“序列”轻子的性质得到确证。它和电子及  $\mu$  子除开质量上的差别而外，在电磁力和弱力作用下表现出完全相同的性质。 $\tau$  轻子也象电子和  $\mu$  子一样，带有自己的轻子量子数，在衰变时也有一个对应的中微子  $\nu_\tau$  伴同产生。

在发现  $\tau$  轻子的同一年里，SPEAR 还作出了另外一项重要发现：在正负电子碰撞过程中首次观察到了强子喷注现象，证实了当时正在发展中的量子色动力学的预言。量子色动力学是描写强相互作用的理论。按照这个理论，高能正负电子湮没产生正反夸克对，当这对正反夸克互相分离时，作用在两者之间的强力积聚能量而转换成更多的正反夸克对，然后组合形成强子末态。鉴于强力具有弦的性质，末态强子趋于沿着初始夸克方向产生出来，形成背靠背发射的粒子流，称为喷注(图 7)。作用能量愈高，

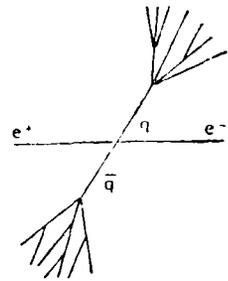


图 7 在  $e^+e^-$  湮没中强子喷注产生过程

喷注的直线性质意见明显，喷注中包含的粒子数目愈多。这个发现提供了夸克存在的实验证据，对量子色动力学理论是一个重要支持。

在  $e^+e^-$  物理发展史上，SPEAR 无愧为第一号功勋卓著的正负电子对撞机；但是它的全部造价只有 500 多万美元，被人称做“物理研究中最大的便宜货”。

### 七、三代轻子-夸克图象的建立

因为  $\tau$  轻子的出现而遭到破坏的轻子-夸克对称性，不久又因为底夸克(标记为  $b$ ) 的发现而得到部分弥补。提出了三代轻子-夸克的图象，如表 2 所示。对应于两个第三代轻子  $\tau$  和  $\tau$  子型中微子  $\nu_\tau$ ，应有两个第三代夸克，底夸克是其中的一个成员。

表 2 三代轻子和夸克 ( $Q$  为电荷, 括号内为质量值)

	轻子		夸克	
第一代	$e(0.511 \text{ MeV})$	$\nu_e(<50 \text{ eV})$	$u(\sim 300 \text{ MeV})$	$d(\sim 300 \text{ MeV})$
第二代	$\mu(105.7 \text{ MeV})$	$\nu_\mu(<250 \text{ keV})$	$c(\sim 1500 \text{ MeV})$	$s(\sim 500 \text{ MeV})$
第三代	$\tau(1784 \text{ MeV})$	$\nu_\tau(<35 \text{ MeV})$	$t(?)$	$b(\sim 5000 \text{ MeV})$
	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = 2/3$	$Q = -1/3$

底夸克的发现情况同粲夸克颇为相似。1977 年，在费米实验室的固定靶加速器实验中，测量 400 GeV 质子束与碳、铜、铂等原子核进行反应产生的  $\mu$  子事例，发现了一个质量为 9.5 GeV 的共振峰(改善分辨后又发现了质量为 10 GeV 的另一个峰以及 10.4 GeV 峰的迹象)。因为有了发现  $J/\psi$  粒子的经验，人们很快断定这是一个新的重夸克  $b$  及其反夸克  $\bar{b}$  组成的束缚态，并命名为  $\Upsilon$  粒子。

底夸克物理的实验研究不久转到了正负电子对撞机上。在 DORIS (改建后称为 DORIS II) 和以后建成美国康奈尔大学的 CESR 和苏联新西伯利亚核物理研究所的 БЭФИ-4 对撞机上(后者遭受火灾，一直未再恢复工作)。利用若干各有特色的探测装置，先后证实了  $\Upsilon$  及其激发态  $\Upsilon'$  和  $\Upsilon''$  的存在并找到底夸克偶素的其他一些态，还直接观察到了  $B$  介子。十多年里，在底夸克物理方面积累了大量实验资料，成为高能  $e^+e^-$  物理中仅次于粲物理的一个研究得比较多的领域。最近的一项重要发现是 1987 年在 DORIS II 和 CESR 上相继观察到正反中性  $B$  介子显著“混合”的现象( $B^0$  能够在发生衰变前转变为  $\bar{B}^0$ ，类似的现象过去在正反中性  $K$  介子的情况下观察到)，这在  $K^0$  介子系统以外研究 CP (电荷共轭-空间反演) 不守恒现象提供了新的实验可能性。

与底夸克物理研究同时，开始了寻找第三代夸克中另一个成员——顶夸克(标记为  $t$ ) 的努力。1978 年

西德 DESY 实验室建成了新的正负电子对撞机 PETRA，1980 年另一台新的正负电子对撞机 PEP 在美国 SLAC 投入运行。这两台设计指标相仿的对撞机把  $e^+e^-$  物理带进新的更高能区，它们的一个预定目标就是寻找顶夸克。在 PETRA 上，为了实现这项任务，将最高质心能量从原设计的 38 GeV 逐步提高到 46.78 GeV，以便在很宽的能量范围内按 30 MeV 的间隔扫描测量  $R$  值。但是，无论从  $R$  值的大小(顶夸克的产生使  $R$  值增加  $4/3$ ) 或是  $R$  值随能量变化的曲线(预期顶夸克偶素产生时应在曲线中出现共振峰) 都没有找到新夸克存在的迹象。

1986 年，又一台能量更高的正负电子对撞机 TRISTAN 在日本 KEK 实验室建成。在它的质心能量提高到 60 GeV 以上的情况下，仍然没有发现顶夸克的直接证据。人们推断顶夸克的质量比最初设想的要大得多，有可能处在 70 到 200 GeV 上下的范围里。因此，顶夸克的寻找需要在更高能量的对撞机上继续下去。

### 八、标准模型在行动中

PETRA 和 PEP 虽然没有按预想找到顶夸克，但仍然作出了许多重要的贡献，主要是在实验验证标准模型方面。

标准模型是最近二、三十年里逐步发展、建立起来的粒子物理理论体系。它综合了粒子物理已有的实验与理论成果，被公认为当前对于物质基本组成及其相互作用问题的最佳解答。按照这个模型，物质的基本

组成单元是三代夸克与轻子，它们之间作用着四种基本力即强力、电磁力、弱力和引力。描写强力的理论称为量子色动力学，把电磁力和弱力统一起来描写的理论则是弱电统一理论。标准模型不仅容纳了粒子物理的所有已知事实，而且作出了一系列重要预言，提供进一步实验检验的可能性。

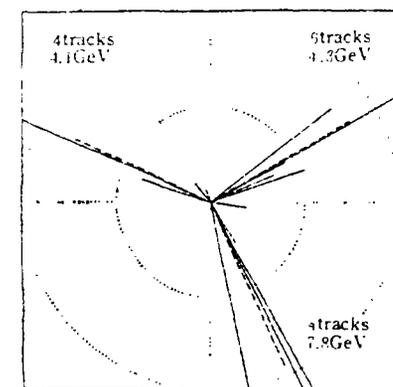


图 8 在 PETRA 上观察到的第一个三喷注事例

和弱力统一起来描写的理论则是弱电统一理论。标准模型不仅容纳了粒子物理的所有已知事实，而且作出了一系列重要预言，提供进一步实验检验的可能性。

在 PETRA 上的实验首先证实了胶子的存在，并且测定了它的自旋。按照量子色动力学，强力是由胶子传递的，就象电磁力是由光子传递的那样。量子色

动力学预言：胶子带有“色”荷，自旋为 1；高能  $e^+e^-$  湮没而产生正反夸克对的过程可能最终导致出现三个喷注的末态，其中除了两个夸克的喷注外，另外一个喷注是由其中一个夸克辐射出来的胶子造成的。图 8 是在 PETRA 上观察到的第一个三喷注事例，提供了胶子存在的确凿证据。对这类事例的实验数据进行细致分析，定出了胶子的自旋，结果同理论预言的一样；还推导出夸克与胶子之间的强耦合常数  $\alpha_s$ ，也和量子色动力学理论定性地一致。在 PETRA 和 PEP 工作的基础上，强子喷注物理迅速发展成为一个重要的高能物理研究领域。

其次，在 PETRA 和 PEP 对撞机上研究  $e^+e^-$  湮没产生轻子对的过程不再是对纯粹 QED 理论的检验：由于在较高能量下，除了电磁力外，弱力的作用趋于显著，因此可以观察到弱作用和电磁作用的干涉效应。图 9 给出这种干涉效应引起出射轻子的前后向不对称性，测量所得结果同标准模型弱电理论的预言是完全一致的。

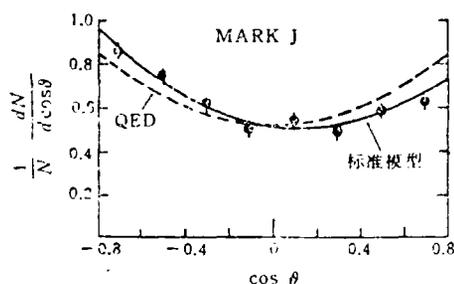


图 9  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  在质心能量 34.5 GeV 下的角分布；与标准模型预言一致

在 PEP 和 PETRA 上还积累起了关于  $\tau$  轻子、 $\rho$  介子乃至  $B$  介子的许多实验数据；没有发现同标准模型出现分歧的明显迹象。此外，还进行了大量寻找新粒子的工作。寻找的一部分新粒子是标准模型（及其延伸的理论）所预期的，除了上面已经提到的顶夸克外，还有希格斯粒子、轴子以及第四代夸克与轻子等。另外一部分新粒子则是超出标准模型范围的，诸如超对称性粒子和带电轻子的激发态等。这种粒子一旦发现，就标志着标准模型的失败和“新物理”的出现。迄今为止的实验结果都是负的。

PETRA 和 PEP 还开创并推动了双光子物理作为高能  $e^+e^-$  物理的一个重要实验研究领域的发展。碰撞的正负电子除了湮没形成一个虚光子然后进入粒子末态的过程外，还可能各自辐射一个虚光子，两者碰撞而产生粒子末态。这类过程称做双光子散射过程，写成： $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + X$  ( $X$  为末态粒子系统)。在正负电子束的能量不太高时，双光子过程的反应率（或称截面）比单光子过程要小得多（1974 年 ADONE 对撞机

曾经报导过两个可能的双光子事例），由于单光子过程的截面与能量平方呈反比关系，而双光子过程的截面则大致随着能量上升而相应地增大，当能量上升到 PETRA 或 PEP 那样大小时，后者的截面接近甚至超过前者而形成显著的效应。双光子物理为实验验证量子电动力学和量子色动力学开辟了新的途径。它可以研究单光子情况下无法研究的强子共振态（电荷共轭量子数  $C = +1$  的态），还可以研究深虚非弹性电子-光子散射，从中获取有关光子内部结构的信息。

## 九、 $Z^0$ 物理

标准模型弱电理论决定性的直接验证是发现了它所预言的传递弱力的三种粒子  $W^+$ 、 $W^-$  和  $Z^0$ 。这个历史性的发现是 1982—1983 年之交在西欧原子核研究中心的 540 GeV 正反质子对撞机上取得的。实验测出  $W^\pm$  和  $Z^0$  粒子的质量，和理论预言符合得不错。但是，正反质子对撞机不能胜任十分细致精确的研究。靠  $Z^0$  粒子来说，在上述对撞机苦心积累多年得到几百个事例的基础上，它的质量仅能确定到  $92 \text{ GeV} \pm 2 \text{ GeV}$  左右，它的宽度仅能给出上限至 5 GeV。为了进一步开展深入细致的  $Z^0$  物理研究，在西欧原子核研究中心和美国 SLAC 分别建造了被称做“ $Z^0$  工厂”的高能正负电子对撞机 LEP 和 SLC。

LEP 是当前世界上最大的正负电子对撞机，周长 27 公里，处在跨越瑞法两国边境的地下深处。第一期工程的最大质心能量为 120 GeV，今后改用超导高频加速器，质心能量可以达到 200 GeV。这台装置规模虽大，但是采用成熟的常规技术，工程进展顺利，在 1989 年夏天按期实现对撞。到 10 月上旬，设置在它上面的四个实验装置 (ALEPH, DELPHI, L3 和 OPAL) 一共采集了 11000 个  $Z^0$  事例，并同时发表了分析结果；计划在 1989 年结束前积累数以 10 万计的  $Z^0$  粒子事例。

SLC 是第一台采用“单次通过”对撞方案的装置，称做直线正负电子对撞机，以区别于常规的储存环对撞机。它目前最大质心能量为 100 GeV，可以进一步提高到 140 GeV。直线对撞机的想法是针对储存环型对撞机因同步辐射导致能量损失的问题而提出来的。为了解决这个问题而设置的高频加速系统使环形对撞机的建造费用随着束能量的平方而增长，而直线对撞机的费用则与束能量成线性的关系。因此，人们普遍认为，建造比 LEP 能量更大的环形对撞机是不合算的，今后发展的方向将是直线对撞机。但是，实现直线对撞机方案需要解决一系列新的技术课题；在具体建造 SLC 时，则又遇到了一些没有充分估计到的问题。原来计划赶在 LEP 之前两年建成，实际推迟了一年多，到 1989 年 4 月才取得了第一个  $e^+e^-$  对撞产生的  $Z^0$  粒子事例 (图 10)，到 8 月底总共积累了大约 350 个



图 10 第一个正负电子对撞产生的  $Z^0$  粒子衰变事例

事例数。SLC 的成功运行证明了直线对撞原理的可行性，但是要达到  $Z^0$  粒子工厂的亮度设计要求 ( $0.6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ )，看来还有许多工作要做。

LEP 和 SLC 发表的第一批实验结果是关于  $Z^0$  粒子的质量和宽度，前者达到了 0.07% 的测量精度，后者也已达到 5% 左右。在 LEP 上，预期质量精度最后可以达到 0.02% 的水平；而宽度精度可以达到 0.8% 的水平。这样，标准模型就可以象量子电动力学那样地进行严格精密的实验验证。

根据  $Z^0$  粒子测得的宽度可以获得轻的中微子(质量不大于 46 GeV；注意到目前已发现的最重的中微子  $\nu_\tau$  的质量估计不大于 35 MeV) 总共有几代(或几种)的重要信息。LEP 和 SLC 现有的测量数据已经足够令人信服地表明轻的中微子只有三代，四代的可能性小于千分之一。

LEP 和 SLC 通过  $Z^0$  粒子衰变大量产生各种轻子和夸克，因此既可以用来扩展较低能量下的粲夸克、底夸克和  $\tau$  轻子物理研究，又可以用来开展寻找新粒子的工作。在新粒子中，顶夸克仍是一个重要目标，虽经多年寻找未获结果，但物理学家对它的存在是深信不疑的。它的质量如果不大于  $Z^0$  粒子质量一半的话，通过观察  $10^4$  个  $Z^0$  粒子事例中的不寻常衰变图象可以不困难地发现它。寻找希格斯粒子也是人们密切关注的实验大事。希格斯粒子是标准模型为了赋予  $W^\pm$  和  $Z^0$  粒子质量而引进的一个新粒子，但是理论并未确定地预言它的质量。质量较轻的希格斯粒子可以通过  $Z^0 \rightarrow H^0 \nu \nu$  ( $\nu$  表示带电轻子) 过程去寻找，采集  $10^6$  个  $Z^0$  粒子事例可能得出明确结论；也可以在  $Z^0 \rightarrow H^0 \nu \bar{\nu}$  过程中寻找，它的分支比估计更大些。不排除这样的可能性，在 LEP 或 SLC 上得到的主要成果不是以上提到的内容，而是某种意料之外的发现，例如新轻子或者新型的力。

## 十、走向 2000 年

LEP 和 SLC 把  $e^+e^-$  物理带进了 100 GeV 能区，几年后能量还将继续推进到 200 GeV。继  $Z^0$  粒子之

后， $W^+$  和  $W^-$  粒子从大约 160 GeV 开始成对产生，它们的性质可以象  $Z^0$  粒子那样进行细致研究。完成这个能区 (100—200 GeV) 的实验研究可能需要差不多一个年代的时间。人们期望标准模型的局限性在实验上得到揭示，从而为理论的进一步发展指出正确方向。但是，如果在 LEP 能区仍然不发现新粒子(甚至顶夸克)和新现象，那将怎么办？

迄今为止的粒子物理实验(高能  $e^+e^-$  物理是其中的一个重要部分)证明：标准模型正确预言了能量尺度为 100 GeV 以下的物理现象。然而，标准模型本身不是完备的理论，它也不能回答许多早已提出的基础性问题，却又同时提出了新的问题。针对这种情况，理论上出现了各种“超出标准模型”的探索方向，例如关于希格斯粒子及其机制的本性问题，提出了超对称性理论、超弦理论、彩色模型和复合性模型。人们估计：新现象将在 1 TeV (=1000 GeV) 能量尺度上出现，在那里可能看到超对称性粒子或是彩色粒子；希格斯机制的本性问题可望得到解决。

在这种背景下，提出了对于能量的更高要求，目标是 TeV 能区。为此，或者是建造束能量为 1—3 TeV 的正负电子对撞机，或者是建造束能量为 5—20 TeV 的质子-(反)质子对撞机。不久前美国政府批准了一台称做 SSC (超级超导对撞机) 的 40 TeV 质子对撞机的建造计划，于 1990 年正式动工，1998 年实现对撞。质子-(反)质子对撞机和正负电子对撞机各有长短，两者在一些方面是互相补充的；考虑到当前的技术状况对强子对撞机有利一些，因此首先选择了它。至于 LEP 以后高能正负电子对撞机的发展方向，人们现在把希望寄托在直线对撞机上。美国、西欧、苏联和日本的一些实验室都在积极开展“下一代直线对撞机”(简称 NLC) 的研制工作。能量指标是 1—2 TeV。

除了高能的要求外，高亮度(强度)也愈来愈受到了重视。优化在已知粒子 ( $\phi, J/\psi, \tau, \gamma$  等) 产生阈能附近的高亮度正负电子对撞机称为“粒子工厂”；它们具有粒子产额高和实验本底小的特点，可以着重开展精细测量以及稀有过程研究。现在，各种“粒子工厂”方案已经提出，包括  $\phi$  工厂、 $\tau$ -粲工厂和 B 工厂等。它们建成以后将和高能对撞机互为补充，在未来粒子物理研究中发挥作用。

高能  $e^+e^-$  物理走向下一个世纪的前景是明朗的。人们相信，它将同在过去几个年代中的发展一样，在更高能量和更加深入的探索与发现中做出新的重大贡献。

勘误：第 2 期第 10 页左栏第 4 行“ $P$  介子”；第 5 行中的“ $P$ ”均应为希文  $\rho$ ；第 7 行“ $\phi$ ”应为“ $\varphi$ ”；第 11 页左栏 21 页“ $\rho$  介子”应为“ $\rho$  夸克”。