

今年3月2日,在美国费米国家实验室举行的报告会上,CDF和D0两个实验组分别报告了他们的实验结果,正式宣布发现顶夸克(Top Quark,也称t夸克)。此一宣布经由新闻媒体的报道,举世瞩目。CDF组和D0组的发现再一次证明了粒



邓炳坤 郁忠强

子物理学中标准模型的正确性。依据此模型,应存在六种夸克,而顶夸克即是高能物理学家过去十几年来捕获未果的最后一个夸克。本文仅就探寻顶夸克的历史以及CDF和D0两实验组发现顶夸克的实验证据,作一简介。

### 一、寻找顶夸克漫长而艰苦的历程

粒子物理学的标准模型告诉我们:组成自然界的基石是夸克和轻子。质子、中子和所有的原子核都是由夸克组成的。轻子有带电的和不带电的,带电的轻子是电子、 $\mu$ 子和 $\tau$ 轻子,不带电的是相应的三种中微子,即电子中微子 $\nu_e$ 、 $\mu$ 子中微子 $\nu_\mu$ 和 $\tau$ 中微子 $\nu_\tau$ 。夸克有6种,分别称为u(上)夸克、d(下)夸克、s(奇异)夸克、c(粲)夸克、b(底)夸克和t(顶)夸克。由相互作用的理论知道,夸克和轻子都是成对的,即有三对夸克和三对轻子,一般称为三代。第一代夸克和轻子包括u夸克、d夸克、电子和电子中微子。第二代有c夸克、s夸克、 $\mu$ 子和 $\mu$ 子中微子。第三代包括b夸克、t夸克、 $\tau$ 轻子和 $\tau$ 中微子。

作为物质结构基本单元的夸克,最初是在60年代关于基本粒子的分类法基础上提出的,很大程度上是逻辑推理的结果。它的真实性甚至连最初提出夸克模型假设的盖尔曼(M.Gell-Mann)也半信半疑,一再宣称它们只不过是一些数学符号。关键性的实验是“深度非弹性散射”。在这类实验中,用高能电子和中微子作“探针”首先探测到了质子内部有“又小又硬”的

东西,这表明了夸克是有可能真实存在的。确立夸克理论决定性的事件是1974年 $J/\psi$ 粒子和1977年 $\Upsilon$ 粒子的发现,这两个发现是c夸克和b夸克存在的实验证据。假如粒子物理的标准模型正确的话,b夸克必须有一个伙伴——t夸克。自1977

年b夸克发现以来,高能物理学家一直致力于寻找这个t夸克。

从发现 $J/\psi$ 粒子(由c夸克组成)到发现 $\Upsilon$ 粒子(由b夸克组成)只用了不到三年的时间,物理学家们激动不已。为了寻找新的第六种夸克——t夸克,两台能量几乎相当的正负电子对撞机分别在德国汉堡的电子同步加速器中心(DESY)和美国的斯坦福直线加速器中心(SLAC)兴建。这是一对孪生子,为了同一个目的,几乎同时破土动工。竞争是激烈的,时间就是胜利。人们普遍认为谁能先建成运行,谁就可能抢先发现t夸克。DESY建造的正负电子对撞机叫PETRA,总能量达46GeV。SLAC建造的机器叫PEP,总能量达30GeV。在PETRA和PEP上分别聚集了世界上优秀的物理学家300余人,各组成5个合作组,同时建造了共10台大型谱仪。每台大型谱仪都由多种探测器组成,配有最先进的电子仪器和计算机。这两台加速器分别于1979年春和1980年建成,10个实验组历经数载,投入了大量的人力物力,遗憾的是没有找到所期望的新粒子。实验结果说明,假如t夸克存在的话,它的质量不会小于 $23\text{GeV}/c^2$ 。

1981年欧洲核子研究中心(CERN)的质子-反质子对撞机SPPS建成并投入运行,实现了能量各为270GeV的质子和反质子的对撞。两台更大的探测器UA1和UA2分别在两个对撞点上进行质子-反质子对撞实验,期望在实验

上发现新粒子,以证实  $t$  夸克的存在。1984 年的一次高能物理的国际会议上,UA1 组宣布了他们的最新结果。从测量到的数据中,发现了几个事例可用  $t$  夸克解释,这有可能是实验上证实  $t$  夸克存在的证据,由于事例数太少,统计性不高,不能作最后的肯定。要是 UA1 组宣布的这几个事例是  $t$  夸克的话,那么  $t$  夸克的质量应该在  $30-50\text{GeV}/c^2$  之间。

这个消息对日本的物理学家无疑是一个沉重打击,当时日本筑波的高能物理研究所(KEK)正在建造一台  $30\text{GeV}$  正电子和  $30\text{GeV}$  负电子的正负电子对撞机——TRISTAN。他们期望  $t$  夸克的质量在  $23-30\text{GeV}$  之间,这就可在他们新建的 TRISTAN 上发现。UA1 宣布的结果如果正确,那么说明 TRISTAN 的能量还不足以产生由  $t$  夸克组成的新粒子。然而,自从 1984 年 UA1 组宣布他们的结果以后,随着数据量的增多,再没有新的报道,说明那几个事例只是本底而已。这给日本 TRISTAN 的建设者们带来了新的希望。几乎在同时,SLAC 的正负电子对撞机 SLC ( $50\text{GeV}$  正电子和  $50\text{GeV}$  负电子对撞)和 CERN 的正负电子对撞机 LEP ( $55\text{GeV}$  正电子和  $55\text{GeV}$  负电子对撞)开工兴建。物理学家们期望在这三台对撞机上发现新粒子,最终从实验上证实  $t$  夸克的存在。KEK 的 TRISTAN 于 1987 年投入运行,SLAC 的 SLC 和 CERN 的 LEP 都于 1989 年投入运行。10 台新的大型探测器在这三台加速器上运行数年,数据分析结果表明,还是没有找到期望的新粒子。特别是 LEP 上 4 个探测器实验组,对数据进行了详细的研究后指出,假如  $t$  夸克存在的话,它的质量大约在  $140-180\text{GeV}/c^2$  的范围。这样,人们的眼光都集中到了位于美国伊利诺伊州的费米国家实验室。1987 年费米实验室建成了一台  $900\text{GeV}$  质子和  $900\text{GeV}$  反质子对撞的加速器(TEVATRON),质子和反质子对撞时的总能量达  $1800\text{GeV}$ 。在 TEVATRON 上有两个对撞点,每个对撞点上建有一台大型探测器,CDF 探测器在一个对撞点,另一个对撞点是 D0 探测器。

## 二、CDF 探测器和 D0 探测器

TEVATRON 是一台质子-反质子对撞机,在近似圆形的贮存环的轨道上,有 6 个质子束团和反向旋转的 6 个反质子束团。每个束团之间等间隔,每隔  $3.5\mu\text{s}$  在两个对撞点发生一次质子束团和反质子束团的对撞。在这两个对撞点分别放置一台大型探测设备,它们分别是 CDF 探测器和 D0 探测器,专门用来研究质子和反质子对撞中产生的物理现象。TEVATRON 的贮存环上装有静电分离器,使轨道中的质子束团和反质子束团作螺旋线运动,使得束团仅仅在探测器所在位置才发生相互作用。TEVATRON 质子-反质子对撞时的质心系能量为  $1.8\text{TeV}$ 。质子束团中的质子数目约  $20 \times 10^{10}$ ,反质子束团中的反质子数目约  $6 \times 10^{10}$ 。对撞开始时的亮度达  $1.3 \times 10^{31}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,束流寿命约 12 小时。当亮度降低时,束流寿命增加到约 20 小时。

两台探测器从总体结构看十分相似,但也有许多不同之处。对于发现新粒子和新现象而言,两台探测器的独立的实验结果可以互相印证,互相补充。

CDF 探测器是由多种子探测器组成,它们一层一层地围绕在对撞点周围。在束流管外最靠近对撞点的是精密的径迹室,由四层硅微条探测器组成,可以测量带电粒子的位置精度达 10 微米。这种精密的径迹探测器第一次成功地用于质子对撞机,使 CDF 有可能观测到  $b$  夸克衰变前几个毫米的衰变路径。它的外面是一个大的带电粒子径迹室,在 1.4 万高斯的磁场内,可以精确地测出对撞中产生的带电粒子的动量。在径迹室的外面是电磁量能器和强子量能器,大部分粒子,包括带电的和不带电的,他们的能量沉积在这些探测器内,在探测器中产生的电信号正比于粒子沉积的能量。电子、光子和物质的相互作用主要是电磁相互作用,它们的能量主要沉积在前面的电磁量能器内,而  $\pi$  介子、K 介子、质子、中子等强子的能量大部分沉积在外面的强子量能器内。 $\mu$  介子能穿透量能器而不被吸收,由量能器外的  $\mu$  计数器

和内层探测器探测到的信号结合起来,可以测出 $\mu$ 介子的径迹.整个探测器大约12米宽、12米高和28米长,总计有10万多个探测单元.

许多从探测器来的信号直接送到触发判选电子系统,该系统十分迅速地用各种逻辑线路判断每一次质子-反质子对撞,选择那些有物理意义的有用的对撞事例,而排除掉那些看来无用的对撞事例.对选择出的有用事例,将探测器上所记录的信息都读入数据采集用的高速计算机.在计算机上完成初步的数据处理和分析后,再将有用的数据储存到磁带上.磁带送到大型计算中心供物理学家分析.

CDF 实验组目前包括来自美国、意大利、日本、加拿大和台湾的36个研究所的数百位科学家和研究生.CDF探测器的建造始于1981年,1987年完成.1988年、1992年和1993年经过几次改进.建造经费主要来源为美国能源部、意大利核物理研究所、日本文部省和美国国家科学基金会.台北中研院物理所高能实验组10余位科学家参加了CDF合作组,在探测器的运行、改进和物理分析中作出了他们的贡献.

D0探测器的结构和CDF探测器相仿,它的特点是有一个大的液氙量能器用于测量粒子的总能量.由于液氙量能器分辨很高,所以对一个事件的丢失能量的测量比CDF探测器测量得更精确.D0探测器的中心区域没有磁场, $\mu$ 子的动量是借助于围绕在液氙量能器外面的磁铁进行的.目前,D0探测器还没有采用硅微条顶点探测器,中心区也没有磁场,所以它对带电粒子径迹动量的测量不如CDF探测器.正是由于两台探测器之间的差异,它们在寻找 $t$ 夸克的实验技术上自然是互补的.

D0实验组有来自美国、法国、印度、俄国、巴西、韩国等42个研究所或大学的数百位物理学家和研究生.中国科学院高能物理研究所(北京)20余位科学家参加了D0合作组的研究工作,在探测器的建造、运行、改进和物理分析中作出了贡献.

### 三、顶夸克产生的实验证据

在费米实验室的TEVATRON上,当质

子-反质子对撞时释放出的能量足以产生出一对 $t$ 夸克——即 $t$ 夸克和它的反夸克(称 $t$ 反夸克,通常以 $\bar{t}$ 表示)时,这种过程就有一定概率产生. $t$ 夸克(和 $\bar{t}$ 夸克)几乎立即衰变到 $b$ 夸克和一个 $W$ 玻色子. $W$ 玻色子是弱作用的传递子,它也迅速衰变,它衰变到任何一种夸克对或轻子对,例如电子和电子中微子.每一个终态夸克在探测器中形成一个粒子喷注.

CDF实验组寻找 $t$ 夸克采用了三种方法.第一种方法是寻找这样的事例,在该事例中有 $t$ 夸克和 $\bar{t}$ 夸克衰变出的 $W$ 玻色子继而衰变出两对轻子对,即电子和电子中微子或 $\mu$ 子和 $\mu$ 子中微子.CDF组分析的实验数据包括了1992年8月—1993年6月记录的数据(总积分亮度为 $19(\text{Pb})^{-1}$ )和1994年上半年所采集的数据(总积分亮度为 $48(\text{Pb})^{-1}$ ),总的积分亮度为 $67(\text{Pb})^{-1}$ .从这些数据中观察到了6个这样的事例,而预期的本底是1.3个事例.第二种方法和第三种方法是寻找这样的事例: $t$ 夸克和 $\bar{t}$ 夸克衰变出来的2个 $W$ 玻色子,其中一个 $W$ 玻色子衰变到一对轻子对,即电子和电子中微子或 $\mu$ 子和 $\mu$ 子中微子,而另一个 $W$ 玻色子则衰变到一对夸克对.这样的衰变模式预期的事例率要比第一种寻找模式略大,但是有更大的本底.第二种寻找方法和第三种寻找方法的区别在于:第二种寻找方法还要另外观察 $b$ 夸克在衰变前的很短的飞行距离.第三种方法中还必须找到一个 $b$ 夸克衰变出的一个电子或一个 $\mu$ 子.用第二种和第三种方法一共观察到了37个事例.

由于质子和反质子对撞产生的事例相当复杂,在上述三种寻找方法中都有可能将不包含 $t$ 夸克的事例误认为是 $t$ 夸克事例,这就是分析过程中可能的本底.在过去所发现的许多新粒子,例如 $J/\psi$ 粒子和 $\Upsilon$ 粒子,一个事例中仅仅包含2条或几条带电粒子径迹.而质子-反质子对撞时,产生一个 $t$ 夸克和一个 $\bar{t}$ 夸克,还有另外的粒子,每一个 $t$ 夸克又很快衰变到 $b$ 夸克和一个 $W$ 玻色子,这些粒子都是不稳定的,它们继续衰变到电子、 $\mu$ 子、中微子、 $\pi$ 介子、 $K$

介子等。对一个典型的 t 夸克事例，大约总共有上百个终态粒子进入探测器。这就给分析数据，特别是估计本底带来很大的困难。然而，大部分重要的本底都能从 CDF 探测器所采集的数据中估算出来。

从观察到的 t 夸克产生的事例信息，可以计算出 t 夸克的质量值为  $176 \pm 8 \pm 10 \text{ GeV}/c^2$ ，第一项误差指统计误差，第二项为系统误差。产生顶夸克对的截面为  $(6.8^{+1.9}_{-1.4}) \text{ Pb}$ 。

D0 组总共分析了大约积分亮度为  $50 \text{ Pb}^{-1}$  的数据，分析了双光子和单光子的衰变道，有的标记 b 夸克的喷注，有的不标记 b 夸克的喷注，共分析了七种不同的衰变道。观察到了 17 个事例，预期的本底事例是 3.8 个，t 夸克质量的测量值为  $199^{+19}_{-22} \text{ GeV}/c^2$ ，tt 的产生截面为  $(6.4 \pm 2.2) \text{ Pb}$ 。

去年四月，CDF 组曾经向世界新闻媒体发布了重要消息，宣称第一次在实验上给出了 t 夸克存在的证据。在那时，他们没有简单地宣布为发现，而只称给出了 t 夸克存在的直接实验证据。CDF 实验组的物理学家们如此谨慎是有原因的，这是他们严肃的科学态度。在去年的物理分析结果中，他们发现了 12 个 t 夸克产生的候选事例，比预期的本底事例超出很多。但他们仍然不放心，这样大的超出是不是有可能来自本底事例的统计涨落？经过详细的估算，这种可能性只有 1/400。显然，这种概率出现的可能是很小的。然而，CDF 组的科学家们还是十分谨慎，希望有更多的数据来证实 t 夸克的存在。经过十个月的努力，CDF 组分析了比去年多 3 倍的数据。找出了 43 个 t 夸

克产生的候选事例，证实了去年的结果，并大大提高了统计性，从而他们确信发现了 t 夸克。

D0 实验组完全独立地发现了 t 夸克，他们用自己的 D0 探测器，采集质子-反质子对撞数据，并进行数据的分析。去年，由于他们没有得到足够数目的 t 夸克候选事例。所以去年 CDF 组宣布给出了 t 夸克存在的实验证据时，D0 组的物理学家们没有宣布他们的结果。直到今年，他们分析了更多的实验数据，确认了 t 夸克的存在，在今年 3 月 2 日费米实验室举行的报告会上，D0 组和 CDF 组同时宣布他们发现了 t 夸克。

b 夸克发现至今已有 18 年了，经过成百上千物理学家的努力，终于在实验上发现了 t 夸克，再一次证明了粒子物理学中标准模型的正确性。18 年来，各国高能实验物理学家和理论物理学家密切配合，共同推动，耗费巨资建造高能加速器和探测器，对物质结构进行大规模的深入的探索。t 夸克的发现再一次证明了国际合作的重要性，特别是像高能实验物理这样的“大科学”尤其重要。TEVATRON 正在运行，CDF 和 D0 实验组还在继续积累更多的数据，期望将 t 夸克的质量测量得更精确。今后，物理学家还将对 t 夸克的特性作进一步的研究。因为 t 夸克有极大的质量（几乎和金原子一样重），将允许物理学家更进一步地了解那些需要获得很大质量的物理过程。对于今后的 10 年，这些工作只能在费米实验室的 TEVATRON 上进行，因为在今后 10 年内，它仍然是世界上能量最高的加速器。

---

（上接第 6 页）

近火星的尘暴不再像过去那样频繁，也不再像 1970 年那么猛烈。

为什么这些风暴会减弱呢？是否天气变冷了，没有人能说明白。要找出它的线索，要等待太空船再上火星去观察了，只可惜一些太空船，已在 1993 年准备进入绕火星的轨道时却突然

失踪了。到现在还没有其他太空船去代替，火星科学家也只好依靠哈勃望远镜，作远距离的观察，这样做，还要依靠气候周期性的转变，才能用肉眼看到火星。

（译自《科学》267 卷 31 页，1995 年 3 月号）