

张 家 铨

今年4月欧洲核研究组织在—项公报中宣布，高能质子-反质子对撞成功。这是高能物理史上又一重要进展。

多少年来人们想望着让高能质子和反质子对撞，以求获得更深入基本粒子内部的信息，现在终于在西欧联合核子研究中心的质子-反质子对撞机上实现了。人们正在等待着它将给出的新的实验结果。

质子是大家已很熟悉的，它是构成原子核的一个成份。原子核就是由质子和中子组成的。反质子是什么呢？顾名思义，大概它既具有质子的某些特性，又具有与质子相反的一些特性吧。的确是这样，反质子和质子的质量相同，寿命相同，至少约为 $10^{28}$ 年。但是，表征反质子和质子特性的其他量子数都相反。例如，质子的电荷为+1电子电荷单位，重子数为+1，同位旋第三分量为+1/2。反质子正好与质子相反，反质子的电荷为-1电子电荷单位，重子数为-1，同位旋第三分量为-1/2。

在实验室里，物理学家们已经能够得到反质子和其他一些反粒子。例如， $e^-$ 、 $e^+$ 电子就是一对正-反粒子。 $e^-e^+$ 电子湮没后可转化为2个或3个光子。最近几年来，用 $e^-$ 、 $e^+$ 电子对撞的实验已发现了许多种含有c层子或b层子的新粒子以及 $\tau$ 重轻子，对高能物理学的发展作出了重要贡献。质子-反质子也是一对正-反粒子。（注）它们对撞会产生什么呢？这正是高能物理学家们非常感兴趣的问题。质子由3个层子组成，反质子则由3个反层子组成。在高能下，反质子和质子对撞实际上就是反层子和层子对撞。

人们曾经用已有的设备实现过质子-反质子碰撞，例如，从现在最高能量的质子同步加速器引出质子束轰击静止靶，产生反质子。再令反质子束轰击实验用的靶子，就可使反质子和静止的质子相撞。这样得到的反质子束的流强是很弱的，能量也低，但这一类实验仍然得出了一些很重要的结果，为人们认识物质的更深一层次的结构提供了重要的情报。

现在，西欧联合核子研究中心的质子-反质子对撞机是让高能质子和高能反质子对头相撞，其效果要比反质子打静止的质子好得多，所能达到的高能区域，远远超过了现在最高能量的质子加速器所能达到的能量范围。具体来说，它对应的实验室系的能量比

现在用反质子束轰击静止的实验靶所能达到的能量要高出1500倍。因此，人们预期，这个质子-反质子对撞机的成功，将会开辟一个新的高能物理实验领域。目前大家公认很成功的一些理论，也将在质子-反质子对撞的实验中得到

决定性的检验。其中最吸引人的物理目标就是观测理论上预言的下列新现象：

(1) 带电的中间矢量玻色子 $W^\pm$ 和中性的中间矢量玻色子 $Z^0$ 。根据现有的实验数据，理论上预言这些粒子的质量约80京电子伏。这些粒子是弱电统一规范理论的基石。正如光子是传递电磁相互作用的媒介那样，在这个理论里，中间矢量玻色子是传递弱相互作用的媒介。

(2) 标量玻色子 Higgs 粒子。弱电统一理论为了解释 $W^\pm$ 和 $Z^0$ 的静止质量很大，假设了存在 Higgs 粒子。理论上估计，Higgs 粒子的质量 $M_H$ 在7到300京电子伏范围内。

(3) 磁单极子。理论上认为，可能存在一种磁单极子，它是磁荷最小单位的携带者。不过，它的质量可能比电子的质量重几十万倍

(4) 含有新的味量子数（如b数，t数，…）的重粒子和重层子素。对于重层子谱学的实验研究将有助于了解粒子间相互作用的规律和粒子产生的机制。

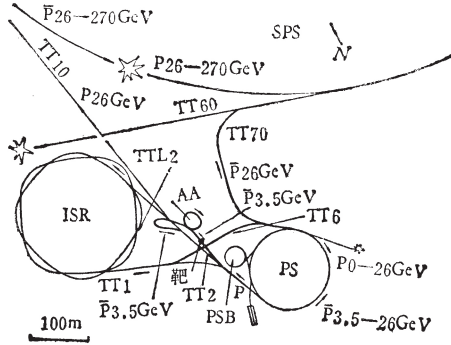
(5) 带有1/3或2/3电子电荷的粒子。这是层子从它们的束缚态中解放出来的证据。至今，物理学家们只观测到层子的束缚态，即由层子、反层子组成的介子和重子，没有观测到自由层子。多数理论家都相信，层子将永远是禁闭在介子和重子中的，没有自由状态。现在，人们就要在实验上真正弄清楚，层子到底有没有自由状态？（当然，也许需要更高能量的质子-反质子对撞机才能下最后定论）。

另外，超高能宇宙射线实验中观测到一些反常现象。这些反常现象暗示，可能存在新的物质状态或者新的很重的稳定粒子。但是，由于在宇宙射线中超高能粒子太少和其他一些不能控制的因素，宇宙射线实验不能得出肯定的结论。现在有了质子-反质子对撞机，就可以用来进一步检验超高能宇宙射线实验所提出的一些线索了，人们猜测，新的质子-反质子对撞机很可能给出一些新的意想不到的实验结果，使人们不得不改造现有的理论。

西欧联合核子研究中心的质子-反质子对撞机如

注：在我们目前所能观测到的宇宙空间里，总是反粒子远远少于正粒子，这个现象是宇宙学家们正在研究的一个课题。

下简图所示。它由现有的质子同步加速器 PS 和超级质子同步加速器 SPS, 新增建的反质子累积器 AA, 新增建的束流输运线和实验大厅组成。这里有两个问题必须解决。第一个是反质子的寿命问题; 第二个是如何得到足够强度的性能良好的反质子束。前一个问题



PS: 26GeV 质子同步加速器 ISR: 交叉储存环  
PSB: PS 的增强器 SPS: 500GeV 质子同步加速器 AA: 反质子累积器 - : 新增建的束流输运线运质子-反质子对撞机简图

比较根本, 如果反质子是不稳定的, 质子-反质子对撞机计划就要流产。根据电荷, 宇称和时间反演不变性定理 (CPT 定理), 反质子应该跟质子一样, 是稳定的。但是, 在实验上还缺少足够的证据。过去, 人们所观测到的反质子只是瞬时的次级粒子, 还没有一个实验测量过反质子的寿命。为了解决这个问题, 1978 年 7 月 29 日西欧联合核子研究中心的科学家们作了一个实验。他们把反质子注入到一个称为 ICE 的小储存环中。三天以后, 发现在注入的 240 个反质子中, 仍然有 80 个反质子还活着。丢失 160 个反质子的原因是由于反质子和储存环中残存的气体分子散射。这个实验结果使科学家们松了一口气, 证明反质子的确是稳定的, 可以在储存环中长期地储存。

至于第二个问题, 困难在于高能质子束打靶产生的反质子束强度既弱, 角散度和能散度又都很大。这样的反质子束注入到环形真空室中去后, 绝大部分反质子都将会飞向真空室壁而损失掉。为了解决这个问题, 他们建造了反质子累积器 AA, 利用近几年发展起来的电子“冷却”技术, 终于获得了性能良好的足够强度的反质子束。反质子累积器 AA 是质子-反质子对撞机的关键, 它的成败起着决定性的作用。

西欧这个质子-反质子对撞机的工作大致是这样的。由 26 京电子伏质子同步加速器 PS 引出的质子束打在一个直径几毫米, 长 11 厘米的钨靶上, 产生能量为 3.5 京电子伏的反质子束。然后, 反质子束被注入到反质子累积器 AA 中。随着一束团接着一束团的反质子被注入, 反质子束在累积器 AA 中, 逐步增强, 性能也由于“冷却”而大为改善, 达到一定强度后, 它再被注入到质子同步加速器 PS 中去。在这里反质子由 3.5 京电子伏被加速到能量 26 京电子伏。两条不同的束流输运线分别把 26 京电子伏的质子和 26 京电子伏的反质子束注入超级质子同步加速器 SPS。由于质子和反质子所带电荷符号相反, 所以在大加速器环中它们以相反的方向运动。大加速器 SPS 同时把质子和反质子加速到能量 270 京电子伏, 并使它们在特定的位置发生对撞。

西欧联合核子研究中心的质子-反质子对撞机计划的实现, 相当于把实验室系的入射粒子能量提高到了 150000 京电子伏, 但是还是远远不能满足高能物理学家们的要求。美国费米实验室正在计划建造一个能量更高的质子-反质子对撞机, 每束的能量为 1000 京电子伏, 相当于实验室系的入射粒子能量 2000000 京电子伏。随着人们对微观世界认识的不断深入, 要求加速器的能量也就越来越高。加速器的发展必然会有新的成就。