

斯坦福直线对撞机

THE STANFORD LINEAR COLLIDER

约翰 R. 里斯

1989年4月11日，星期二，清晨。当太阳开始染红环绕斯坦福直线加速器中心（SLAC）的草山上的过冬草时，我的值夜班的同事们开始回家了。几分钟之前，当时我们中的任何人都不知道，有一个大能流脉冲突然冲进了有三层楼高的、重达1800吨的铁制庞然大物，即马克-2探测器的外壳。这个事例仅发生在一个极短的瞬间。随后，加州理工学院的博士后巴雷特·米利肯（Barrett Milliken）发现了某些不寻常的东西，它们不同于由前一天储存进计算机中的数据所研究得到的东西。两个旋转的粒子喷注从中心喷出，且撞击到探测器，存积下650亿电子伏的能量。米利肯意识到，这个短暂的脉冲表现出明确的、被称为 Z^0 粒子的特性。 Z^0 粒子能传递弱核力，它是自然界中的基本力之一。中午时分，这个消息传遍了世界：在SLAC实验室，我们终于达到了已使我们困惑了几乎一年的目标。

关于4月事例，值得注意的是，并没有对六年前就发现了的 Z^0 粒子有太多的观察，而是这种粒子确在斯坦福直线对撞机（SLC）上产生了。SLC对撞机的设计是前所未有的。它使高能电子束和正电子束（即电子的反粒子）互相对撞，这是一种研究物质的基本相互作用的极有效方式。对撞机最早建于1960年，从那以后，人们总认为在对撞机内电子束和正电子束以相反方向沿着圆环运动，并在环的某些位置对上撞，产生新的簇射。但SLC打破了这个常规，它使两个直线束互相对撞。

强烈的愿望激励着斯坦福人选择革新的办法。

在一定的条件下，直线对撞机的建造和运行都比储存环对撞机稍便宜些。储存环加速器的建造费用，大致按束流能量的二次方迅速增长，部分原因是由于荷电粒子的能量越高，它沿曲线轨道运动时，以同步辐射方式辐射出去的能量也越多。相反，直线加速器的费用仅按束流能量的一次方增长。在低能时，储存环比较经济，但能量很高时，如两个对撞束的总能量高于1000亿电子伏时，直线对撞机就比储存环对撞机便宜。

斯坦福人的另一个同样强烈的愿望是建造一个“ Z^0 工厂”，即用于详细研究 Z^0 粒子的装置。这种粒子是1983年在日内瓦附近的欧洲粒子物理实验室（CERN）发现的。研究它的基本特性，特别是它的质量和寿命是当今粒子物理的主要课题之一。1981年，CERN的工程师们破土兴建他们自己的 Z^0 工厂，即大型正负电子对撞机（LEP），它是一个周长为27公里的传统储存环式对撞机。与此同时SLAC实验室的物理学家决定将世界上最长的，即长达2英里的斯坦福直线加速器，改建成能产生 Z^0 粒子的直线对撞机。SLAC人希望通过改造现有的直线加速器，而不是建造新的直线加速器，并以相对较低的经费，获得世界上第一个 Z^0 工厂。

过去没有人建过直线对撞机，因此建造第一个直线对撞机的愿望是很强烈的。但伴随创新的诱惑力同时到来的，还有事物的另一个方面，即冒险。在SLAC实验室，我们选择了某些未知的领域进行冒险，在那些领域内，我们可能面临意外和失败，但最终仍使我们的冒险得益。SLC已探测到200多

个 Z^0 粒子，且会继续探测到更多。

什么是 Z^0 粒子？为什么它很重要？为了回答这些问题，人们需要了解物质和力的现代模型。在宇宙中，所有的物质是由少量的构成块组成的，这是物理学家，或者绝大多数物理学家所相信的。物质块可以被分割或再分割到构成块的层次，直到分割过程终止。基本粒子不能被再分割（这就是为什么人们称它们是基本的）。基本粒子只有两类，即夸克和轻子。三个夸克组合在一起，构成中子或质子。中子和质子（即人们熟知的强子）组合在一起，构成原子核。一群电子与一个原子核组合成一个原子。电子属于轻子，另外的轻子包括缪子和中微子。组合过程再进行下去，就是由原子组合成分子，由分子构成气体、液体和固体。

根据近代的理论，只存在几种基本粒子：6 种夸克和 6 种轻子。（实际上，近代理论也称别的粒子，如黑格玻色子为基本粒子，但人们不涉及它们也能解释基本粒子间的相互作用）。夸克和轻子组合成三代，每一代有 2 个夸克和 2 个轻子。这样就构成了 12 个基本构成块（黑格子除外），若计入它们的反粒子，则有 24 个基本构成块。是什么东西使它们组合在一起呢？没有灰泥，砖块就没有什么用处。对这个问题，要得到一个满意的回答，其难度如同要回答什么才是基本粒子的全部组成一样。从 19 世纪起，粒子间的吸引和排斥现象是用力来描述的，即某个粒子作用在另一个粒子上的力。一个完整的理论，不仅应包括基本粒子，还应包括它们之间相互作用的机制。

狭义相对论指出，一个物理作用的速度不可能超过光速。因此物理学家发展了量子场论。量子场论认为，两个粒子之间的作用力，起因于一种“媒质”的交换。这种媒质“带着力”，并以一有限的速度移动。其中一个粒子发射这种媒质，而另一个粒子吸收这种媒质。媒质在空间中传播：并在一个短暂的时间内依附于发送粒子或接收粒子。这些媒质具有与基本粒子相同的特性，它们有质量、电荷、自旋等。因此尽管它们在自然界中的规律与基本粒子大不相同，物理学家通常也把它们叫做基本粒子了。媒质就是粘接构成块的灰泥。

然而，物质的完整理论应由两部分组成，一是基本粒子表，二是对粒子通过媒质进行相互作用的所有方式的描述。这样的理论，至少在原理上可解释物质的发生和行为。人们应当确切地知道系统的物理规律，尽管在现实世界的许多状况中，也许不可能去解决了解系统的行为所面临的数学问题或进

行所有的计算。（这种情况咋听起来觉得奇怪，但在实际科学中却是常见的，即人们知道物理规律，但计算的容量或能力不足以去找到现实世界问题的解。例如，描述地球大气的热力学方程是已知的，但没有足够的计算能力来精确地预言气候）。

物理学家相信，他们正处在获得一个关于物质的完整理论的边缘。这个理论，已能很好地描述参与组成原子核、原子和分子的力。它在这些方面很成功，且被广泛地接受，以致人们就简单地称它为标准模型。在这个模型中，唯一不能包含在内的力，是引力。理论家们正在努力，以弥补这个缺陷。同时，粒子物理学家的任务，是在尽可能广的范围内，检验现有的理论。其它任务还包括必须测量每一种基本粒子和媒质的基本特性。在测量 Z^0 媒质的特性中，SLC 将作出创造性的贡献。

现在，人们知道存在着三种媒质：光子、胶子和弱力媒质。它们分别对应自然界四种力中的三种。光子传递电磁力；胶子传递使夸克结合在一起的强核力；弱力媒质传递支承放射衰变的弱核力。可能存在的第四种媒质，即传递引力的引力子，但至今还没有观察到。

把光子和胶子作为实验课题，已有几年的历史了。对于它们，人们已知晓甚多。但弱力媒质仍属未知领域，只是在 1983 年，在 CERN 证实了它的存在。有三种弱力媒质： W^+ 、 W^- 和 Z^0 。至今人们对它们了解不多，因为利用建于 SLC 以前的所有加速器来研究它们都很困难。

为了明白为什么会有这样的困难，人们首先应当知道这些媒质是怎样产生的。如果一个基本粒子和它的反粒子，如一个电子和一个正电子，互相接近或者对撞，那么其中的一个基本粒子可发射一个 Z^0 ，而另一个可吸收它。标准模型认为，还会有一些别的情况同时发生。如果粒子的能量足够高，则其中的一个粒子，如电子，可发射一个 Z^0 ，然后正电子能吸收这个电子，也就是说粒子互相湮灭，而留下瞬间自由的 Z^0 。然后， Z^0 必须衰变成一对基本粒子，例如一个电子和一个正电子，或者一个夸克和一个反夸克。

CERN 的质子-反质子对撞机和位于美国伊利诺斯州巴达维亚（Batavia）的费米国立加速器实验室的 Tevatron 加速器，都用质子和反质子的对撞产生 Z^0 。前面已提到过，质子和反质子都是由三个夸克组成的，因此质子和反质子的对撞，也就是许多夸克和反夸克的对撞。在对撞过程中产生的任何 Z^0 ，最有可能衰变成强子。但不幸的是，夸克间其

他种类的相互作用也产生大量的强子。结果，这些机器不但产生 Z^0 ，而且产生了许多酷似 Z^0 衰变模式的别的反应，从而掩盖了真正的 Z^0 事例的出现。所以，在 CERN 和费米实验室产生的 Z^0 中，只有转变成轻子的那一小部分才能被证实。

相反，SLC 使两个基本粒子，即电子和正电子对撞。经特殊设计，可产生大量的 Z^0 和少量的外来事例，以致在所有的衰变模式中可探测到几乎每一个产生的 Z^0 。粒子物理学家需通过研究大量的 Z^0 ，以精确地测量它的质量、寿命和其他特性。利用象 SLC 和 LEP 这样的机器进行研究， Z^0 将成为第一种具有完全确定特性的弱力媒质。

SLC 实验计划的基本目标之一，是尽可能精确地测定 Z^0 的质量。在标准模型中，媒质处在基本构成之间，所以它们的质量是基本常数。也就是说，它们的质量不能由模型算出，而必须直接地测量。质量是怎样测定的呢？研究结果是，产生媒质的过程是一种“共振”：两个相向对撞粒子的总能量越接近于 Z^0 粒子的静止质量，产生 Z^0 粒子的几率就越大。在预期的 Z^0 质量附近，实验物理学家选择不同能量的两个粒子对撞，画出在不同能量上观察到的 Z^0 粒子数。连结这些实验点得到的曲线，类似一个山丘，其峰值位置所对应的两个对撞粒子的总能量是 912 亿电子伏。这就是 SLC 实际测到的 Z^0 静止质量。

Z^0 共振曲线的形状是很重要的，因为波峰的宽度就是存在多少个基本粒子的不同家族的测量。为什么是这样的呢？正如我在前面已说到的，电子和正电子的湮灭留下了裸露的 Z^0 ，它在其短暂的寿命，即 10^{-25} 秒后，进行衰变。如果人们把 Z^0 想象成充满水的口袋，那么这个口袋上的孔越多，口袋就空得越快。同样地，如果 Z^0 的衰变道越多，它的衰变就越快。因此，借助测量 Z^0 的寿命，人们可以知道有多少个基本粒子家族。共振曲线的宽度与粒子的寿命有什么关系呢？这里我们必须求助于量子力学的测不准原理。这个原理说，共振宽度，即 Z^0 能量的不确定性与衰变粒子的寿命成反比。

对标准模型，共振曲线的宽度意味着什么呢？模型提出了 6 个夸克和 6 个轻子。然而， Z^0 却不能衰变成任意的粒子对。粒子对的结合质量不能大于 Z^0 的质量，否则这个过程将违反能量守恒定律。人们已知，12 个基本粒子中的 11 个，其质量之小，足可由 Z^0 成对地产生。在这个前提下，理论预言共振曲线的宽度为 25 亿电子伏。如果测到的

宽度比这个大，这就意味着除标准模型通常所包含的外，还存在别种夸克和轻子，它们形成了基本粒子的第四代。某些物理学家认为，属于第四代基本粒子的中微子，在宇宙中表现为“丢失质量”。

然而，SLC 具备很多实验机会。它提供了研究 Z^0 的每一个衰变道的第一次机会。在质子-反质子对撞机中，由于本底很高，这是做不到的。SLC 还可能提供一份关于质量小于 Z^0 的一半的所有基本粒子的完整记录。

此外，SLC 还可提供丰富的 Z^0 衰变产物来源，从而提供研究那些粒子自身的一个很好的实验室。为展示所有这些特点，SLC 的实验计划将使它忙碌若干年。

在 SLC 上将要做的物理工作确实是很重要的。欧洲的物理学家在 LEP 对撞机建成后也将做同样有价值的工作。但 SLC 还有另一个重要的意义：作为第一个建造的直线对撞机，它显示了加速器物理(建造加速器的物理)上的一个成就。

最简单的直线对撞机，可由两台直线加速器组成，并使两股束流互相对撞。建造直线对撞机，比建造具有同样性能的储存环对撞机更困难些。在储存环中，两团相向运动的粒子束沿着环重复回转，因而在 1 秒种内有大约 10 000 次对撞的机会。但在直线对撞机中，两相向运动的粒子束只能有一次对撞的机会。SLC 每秒可提供 100 个束流脉冲。由于直线对撞机的对撞频率较低，因而粒子束团的密度必须是储存环对撞机中的 100 倍。要做到这一点，我们必须使大约 500 亿个粒子约束在一个束团内，且使束团的尺寸只有几个微米。关于这一点，我们将在下面进一步叙述。

SLC 的困难还在于它的新设计要基于已运转了 20 年的老机器。原来的直线加速器的设计性能远低于对直线对撞机的要求。利用现有的一台直线加速器作对撞机，必须先在同—个方向上加速电子和正电子，然后用一个绝妙的方法，使两种束流对撞。我们采用的方法是在直线加速器的末端用一块简单的二极磁铁将两股束流分开，即让电子向左偏转，让正电子向右偏转。然后，分开的两股束流沿着两个大圆弧——形同一对巨大的钳子——运动，最后在两圆弧的连接点上对撞。(见彩图)。

电子束的产生比较简单：在一个短暂的时间内，给一个阴极加电压，由阴极发射的电子流进入直线加速器前端，在那里，电子受到加速电场的作用，很快群聚成强束团。正电子束的产生比较困难：将一高能电子束团轰击靶，正电子束就从产生

的粒子簇中筛选出来。

虽然电子团和正电子团都含有一定数量的粒子，但它们仍太稀松。如果我们让这样的束团互相碰撞，就不可能产生很多的反应。为使束团变得足够密集，我们应将它们的横向尺寸做得很小，使得粒子都挨得很紧。这个压缩过程是在两个小储存环，或叫“衰减”环内进行的。先将粒子团加速到大约 10 亿电子伏，然后注入到环内，在那儿粒子团的横向宽度被压缩到足够窄。这个过程类似气体的冷却：由于粒子在衰减环内发生同步辐射，使粒子间的平均距离减小。

电子和正电子在衰减环内保持十分之几秒。粒子团的能量仍保持在 10 亿电子伏，然后注回到直线加速器，在那里它们受到很强的高频波的推动，即波峰的冲击，而被加速到更高能量。当粒子团到达直线加速器的末端，它们就得到所要求的能量——大约 500 亿电子伏——并通过两个大圆弧，使它们相撞。粒子团行程中的最后一步，是通过磁透镜系统，这个系统使束团在碰撞前，即在所谓的相互作用点上达到尽可能最小的横向尺寸。

至此，我只叙述了 SLC 运行的一个周期。实际上，加速器在一秒钟内重复好几次这样的周期。为使这台直线加速器有多用途，我们采取了一些独特的设计和安排。在每个周期内，两次点燃阴极，从而在一个周期内获得两个电子束团。它们进入直线加速器，并伴随着一个正电子团（读者会从下面知道，正电子团是从何处进入的）。这三个粒子团，占空间长度约 20 米，进入衰减环，并在环内保持十分之几秒。然后它们由环内引出，以正电子团打头，一个接一个地注回进直线加速器。大约在直线加速器的 $2/3$ 长度位置上，用一个快脉冲磁场将后面的那个电子团踢出直线加速器，并让它打靶，产生正电子。留下的另一个电子团和正电子团一起，继续行进在直线加速器中，最后使这两个束团碰撞。同时，将新产生的正电子团返回到直线加速器的始端，再与两个新电子团一道开始它们的行程。至此，机器运转了一个完整的周期。一秒钟内重复这样的周期达 60 或 120 次。

SLC 的建造者们曾面临许多在加速器物理方面的新挑战。为使束团在直线加速器中加速到高能量，并使束团在高密度的情况下稳定运动，这就对加速器提出了新的要求。

首先，必须使 SLAC 实验室的电子直线加速器的最高能量，由原来的 300 亿提高到 500 亿电子伏。这就要求加速器中的加速电场比原来的要高得

多。被加速的束流所通过的 2 英里长的真空管道，较容易承受这样的高电场。但问题在于束调管。它们是 6 英尺高的管子，用于产生建立加速场所需要的高频功率。即使在建造 SLC 以前，SLAC 实验室的束调管所产生的脉冲功率（35 兆瓦），已是全世界制造的常规束调管中最高的，但它对于改建直线对撞机来说还不够。SLAC 实验室的物理学家，必须设计能产生 67 兆瓦功率的束调管（见彩图）。

束调管的制造十分困难，且报废率较高。需要几百个束调管，但起先只有 30% 的管子能工作。另一个严重的问题是铝陶瓷窗，束调管产生的功率是通过它进入直线加速器的，而它在爆发性的功率释放时容易破碎。改进束调管的早期努力，都令人失望。当时许多旁观者认为 SLC 不可能将束流的能量加速到足以产生 Z^0 粒子的要求。

我们克服了一个又一个困难。对窗的困难是这样克服的：将功率分成两股，进入两个通道，并经两个窗释放它们。这样，每个窗只承受一半功率。经艰苦努力，确保了材料和工艺质量，使建造管子的成品率提高到 85%。当 SLC 进入首次试验的时候，它已拥有产生 Z^0 所要求的足够的束调管数。新型的管子改进了非常规的维护。1989 年初，SLAC 实验室已制造了 500 个管子，且有了足够的备品。

第二个主要的挑战是要产生高密度的电子和正电子团。在相互作用点上，束流的横截面直径只有几个微米，其粒子密度几乎与室温和常压下的气体密度一样高。听起来，这似乎不难，实际上对于通常的气体分子可以这样说，但对于电子和正电子，这却是不寻常的。通常，带电粒子束的密度要比气体密度小 1 000 倍，因为它们是在高温状态产生的。电子是从热阴极中产生的，正电子是在高能相互作用中产生的，这使它们在行程中处于前后摆动的混乱状态。

为了压缩不规则的束流，SLC 的设计者提出了一种新的装置，这就是我在前面提到的衰减环。当粒子在环中辐射出能量，它们的前后运动就减弱或衰减。这种环的设计是一种新技术。设计者很难在环上安排“冲击磁铁”，它的作用是用一个很窄的磁场脉冲将粒子从环中踢出。为了达到每秒有 120 个周期的最高重复频率，在任一给定时刻，衰变环中必须有两个束团。因为每个束团在衰变环中转一圈所需时间为 800 纳秒（ 800×10^{-9} 秒），新的挑战在于产生一个足够窄的脉冲，将一个束团从环中踢出而不干扰另一个束团。对第二个束团，磁铁脉冲的

开和关必须在大约 50 纳秒内完成，这样的短时间已可使光飞过 50 英尺的距离。SLC 的工程师们仍在努力使冲击磁场达到这样的指标。目前，机器运行的重复频率是每秒 60 个周期。

第三个挑战是当束团由衰减环引出，送回到直线加速器，沿加速器前进，最后借助偏转磁铁进入圆弧的整个过程中，仍保持压缩状态。实际上，直线加速器的环境会干扰束团。处在束团前部的粒子将在加速管壁感应一个电磁场，称为尾场。这个场将反作用于束团尾部的粒子，使束团渐渐分散。也就是说，束团将扰乱其自身的尾部。如果束团不是精确地处在管道的中心，尾场干扰就很严重。因为实际管道的几何形状不是十分完美的，所以控制尾场的实际方法是在调试中摸索，微量改变束流的导向，使尾场的影响尽可能小。

最后，SLC 的所有部件在运行时必须非常稳定和精确。用计算机控制几千块磁铁和电源，其中一部分要求控制在万分之一的精度内。对所有的部件，都要求这样严的公差，也是一个可怕的挑战。若达不到所要求的性能指标，束流就不能对撞。当束流最后到达对撞点时，要求它的直径小到如同蜘蛛网丝，而且还要求这样细的两股束流对中，这也是相当困难的。

1987 年春，对撞机的所有部件都已就位。在首次试验中，形成好束团和引导它们实现对撞都十分艰巨——尽管又是可望的，因为如此严格地导航粒子束是前所未有的。SLC 在运行中的其他困难有些

出乎意料之外：计算机控制系统的正常工作比我们预期的要困难得多；1988 年夏天的几次热波导致功率下降和设备的“中暑”，迫使我们停机几个星期。

为使 SLC 投入正常工作所作的努力，持续了两年。SLAC 实验室成干个强有力的工作人员昼夜运行值班。最后，在 1989 年 4 月 11 日太阳刚刚升起的时候，庞大的马克-2 探测器找到了第一个 Z^0 粒子。这个媒质通过衰变，转变成一个夸克和一个反夸克，即几乎立即转换成两簇强子。这个事例表明，物理学家第一次观察到 Z^0 粒子做了它最有可能做的事情，即转换成强子。

当 SLC 开始产生 Z^0 的时候，LEP 对撞机已克服了若干技术上的新挑战，正在加紧完成。SLC 和 LEP 的不同技巧，意味着两个机器有不同的潜力。LEP 可向更高的能量和束流强度发展，使物理学家可在更高能量的王国研究诸如黑格子那样的粒子；而 SLC，可产生具有完全相同自旋的粒子束使实验物理学家从某些实验中得到更有用的信息。此外，虽然 SLC 建成早些，但 LEP 将在长期的运行中，成为能产生更多 Z^0 的源。最后，SLC 最重要的意义将是证实了一种新的加速器技术。许多物理学家认为，如果粒子物理实验进入比正负电子储存环对撞机所能达到的更高能量的王国，这种技术将是最关键的技术。

(桔红译自《科学美国人》1989 年第 10 期)

斯坦福直线对撞机彩色插图说明

图 1 斯坦福直线对撞机：在 2 英里长的直线加速器中加速电子（红色）和正电子（蓝色），它们在总能量约为 1 000 亿电子伏时对撞。电子枪阴极接连发出两个电子团（1）。电子团加速到 10 亿电子伏，且在衰减环中被压缩（2）。经压缩后的电子团注入直线加速器，并在那里伴随一个经压缩的正电子团（3）。领头的电子团和正电子团被加速到末端，经偏转后进入两个大弧环内（4）——电子向左偏，正电子向右偏。磁场控制束流并将束径聚到几个微米（5）。束流在马克-2 探测器内对撞（6）。同时，尾部的电子团从直线加速器中偏出，打靶产生正电子簇射（7）。正电子团返回到直线加速器始端（8）。经压缩后再注入直线加速器作为下一个运行周期所需的正电子团（9）。右下图表示：SLC 见到的第一个 Z^0 粒子直接衰变成一个夸克和一个反夸克，即产生两个强子喷注。

图 2 由 Z^0 媒质参与的六个弱相互作用的费曼图。用一根轴表示距离，另一根轴表示时间。理论预言：若左列图

示的过程发生，则右列图示的过程也能发生。一个轻子和一个反轻子的对撞（右列的上两个过程）产生一个轻子和一个反轻子，或者一个夸克和一个反夸克。经特殊设计的 SLC 对这两类相互作用均可研究。

图 3 在 SLC 上测到的 Z^0 共振表明， Z^0 的质量 91.2 亿电子伏。

图 4 世界上功率最大的 67 兆瓦束调管，提供 SLC 速粒子的功率。由阴极发射电子，聚焦成电子束，并注入口腔。腔壁的交变电场，使一部分电子加速，另一部份减速。快速电子赶上慢速电子，形成了一个密集束团，并撞于输出腔。群聚的电子波产生高频波，送入波导。用一个集器捕获余留电子。将高功率分成两股，进入两个通过并经铝陶瓷窗进入直线加速器。

图 5 尾场效应，即一个电子团在加速管壁感应的电场，反作用于这个束团尾部的粒子（上图）。如果束团严

(下转第 33 页)