

ILC——TeV 能量正负电子直线对撞机计划

童国梁

2004年8月20日,在北京举行的第32届世界高能物理大会结束的前两天,国际未来加速器委员会(ICFA)主席乔纳森·多芬(Jonathan Dorfan)在大会上宣布:国际未来加速器委员会已经批准了国际技术推荐专家委员会(International Technology Recommendation Panel)的推荐,专家委员会正式推荐在未来的正负电子直线对撞机上采用“冷技术”。这样,差不多已有10多年历史的冷、热技术之争终于尘埃落定。这个原本预期在2004年底给出的结论提前了。正是这个结论在高能物理界引起了极大轰动,成了本届高能物理大会的热点。人们还给它一个专门名称——北京决定(Beijing Decision)。

ILC(International Linear Collider)是国际直线对撞机的英文缩写,这是筹划中的下一代高能加速器。本文打算简单介绍这个已拟议了十几年的正负电子直线对撞机计划在未来高能物理发展中有着什么样的地位,为什么已在CERN建造了强子对撞机LHC后,还要建造正负电子直线对撞机,该计划的概貌如何,为什么它必须是“国际的”,国际高能物理界已经为该计划做了什么,打算如何最终实现这个计划。希望本文能使读者对这样一个重大的国际高能物理项目有更多的了解。

大家知道,高能物理正在进入一个新纪元。一些最重要的实验应该对基本的物质构成单元、它们的相互作用以及它们与宇宙的关系产生更深刻的理解。目前,欧洲核子研究中心(CERN)的LHC接近建成,世界高能物理界主张建造另一个大型加速器设备。并在建造什么样的加速器上已经达成共识:他们一致同意建造一台约30千米长、对撞能量最终达到 1TeV° 左右的正负电子直线对撞机。

过去40多年来的实验结果和理论发展已经证明了粒子物理的一种很坚实的理论,即所谓的标准模型。标准模型把3种基本相互作用归因于力的传递者——自旋为1被称之为规范玻色子——的交换。由无质量胶子传递的强相互作用把夸克——即物质的基本构成单元——束缚成质子、其他强子和原子核。电磁相互作用则在束缚原子、分子和凝聚态物质方面起作用,它是由无质量的光子传递的。

描述原子核 β 衰变以及中微子的弱相互作用则是由 W^+ 和 Z^0 玻色子传递的。由于 W 和 Z 的质量很大(分别为80.4和91.2GeV,几乎为质子质量的100倍),所以弱相互作用的有效力程很短。

标准模型正确预言了当时的加速器尚不能产生的 W 和 Z 玻色子的质量。 W 和 Z 玻色子是1983年在CERN被发现的。10年后, t 夸克在美国的费米实验室(Fermilab)也被发现了。 W 、 Z 玻色子以及 t 夸克都是在质子对撞机上发现的。这些发现显示了标准模型的巨大成功。时至今日,几乎所有为标准模型预言的粒子以及相互作用力的传递粒子都已经被发现了。

整个20世纪90年代,有2个高能正负电子对撞机,即美国SLAC的斯坦福直线对撞机(SLC)和CERN的环状对撞机(LEP)都在运行。这些正负电子对撞机都能产生中性的 Z 粒子,并能对其作详细研究。20世纪90年代末,LEP的对撞能量达到了209GeV,这是正负电子对撞机上达到的最高对撞能量。在这个能量下, W 粒子能成对(W^+W^-)产生,这为 W 粒子的性质提供了详细的信息。

电子、正电子与其他轻子一样,都被认为是点粒子,这一点是与质子、反质子以及其他强子不同的。此外,正负电子对撞机的能量可选、可调的特点使他们(如LEP和SLC)在做精确测量方面明显优于强子对撞机。

希格斯(Higgs)机制

标准模型虽然已经取得了很大成功,但也带来了许多问题。我们仍不能完全了解产生 W 、 Z 和基本费米子——夸克和轻子——的非相消质量的那种机制。在标准模型中,这些质量起源于一个新的、迄今尚未发现的、中性粒子希格斯玻色子的相互作用。通过这种所谓的希格斯机制,每一种粒子取得了质量,而它们的质量正是正比于它与希格斯玻色子的耦合强度。

希格斯耦合也被认为与CP对称性破坏有关,CP变换即连续进行电荷共轭(把所有的粒子用它的反粒子替换)和空间反演变换。CP破坏现象最初是在1964年 K 介子的衰变中观察到的。现在,CP破坏

则在比 K 介子重得多的 B 介子的衰变中进行观察。

许多实验已经对希格斯粒子作了搜寻。但在 LEP 能区上没有观察到希格斯粒子的信号，这意味着希格斯粒子的质量 M_H 超过 114GeV。希格斯玻色子的性质也间接地体现在标准模型理论对各种可测量，例如 W 和 Z 的质量和衰变性质量子修正的预期上。通过对那些测得很好的参量做全程标准模型拟合，得出了希格斯粒子质量的最佳估计值 117GeV，上限约为 250GeV。质量在更高能区的希格斯粒子将在 LHC 上进行搜寻。LHC 是一台正在 CERN 建造的质子-质子对撞机，质子束能量为 7TeV，这是美国费米实验室正在运行的质子-反质子对撞机 Tevatron 能量的 7 倍。LHC 预计在 2007 年运行。关于 LHC 计划，笔者已在本刊做过介绍（《LHC 实验计划纵横谈》，13 卷第 2 期 18 页）。封二的图 1 展示了标准模型全程拟合图。通过对测得的低能参数的全程标准模型拟合给出了 t(顶) 夸克质量和希格斯粒子质量之间的约束。希格斯粒子的质量位于红色的椭圆内(68% 的置信度)。绿色带展示了包含了不确定性的 M_t 的测量值，而 M_H 的黄色区域已被 LEP 上希格斯粒子的直接寻找实验排除。根据此拟合图，现有的对希格斯粒子质量 M_H 预言的最佳值为 117GeV，而上限为 250GeV。

LHC 是设计来寻找希格斯粒子的，可以探测它的质量究竟是多少。但如果探测不到，那么就排除它的存在。如果希格斯粒子被发现了，LHC 就可以以较大的准确性测量它的质量并决定它的一些耦合强度。不过 LHC 测量的精确度以及检验对希格斯假定的作用的能力将是有限的，这是由于质子-质子对撞机中不可避免的复杂性造成的：实验的本底非常大，而理论对作为 M_H 函数的希格斯粒子的产率所作预言的精确度也受到强子结构复杂性的影响。

在标准模型中， M_H 一旦确定，就足以预言它的性质。特别是，希格斯粒子的不同衰变模式的分支比完全由 M_H 的值决定。希格斯粒子总是衰变到一对粒子-反粒子。一台能量高到足以产生希格斯粒子的正负电子对撞机就有可能做一系列的希格斯粒子的衰变测量，并揭示标准模型所假定的希格斯机制是否正确。

图 1 展示了标准模型对希格斯玻色子衰变到各种粒子-反粒子的分支比随着仍然未知的希格斯粒

子质量 M_H 的变化。所谓的希格斯机制，该理论的中心原理需要希格斯粒子对任何特定粒子的耦合强度简单地正比于该粒子的质量，而与它的其他性质无关。图 2 给出了希格斯粒子衰变到 b 夸克对、胶子对和光子对的费恩曼图。

W 粒子质量很大，80.4GeV，而预期的 M_H 小于 161GeV，希格斯粒子衰变成的 W 粒子中的一个必须是虚的。更重的 t 夸克是作为一个虚粒子与衰变希格斯粒子耦合的。而希格斯粒子对虚的 t 和 W 粒子对的耦合可以产生希格斯粒子到无质量胶子(g)对和光子(γ)对的衰变，衰变率也可由对应的费恩曼图预言。分支比图中曲线的展宽表示了理论的不确定性，而模拟数据点给出了在一台直线对撞机实验中所预期的误差大小。如果 M_H 超过 200GeV，那么，希格斯粒子主要衰变到 W^+W^- 和 Z^0Z^0 粒子对。

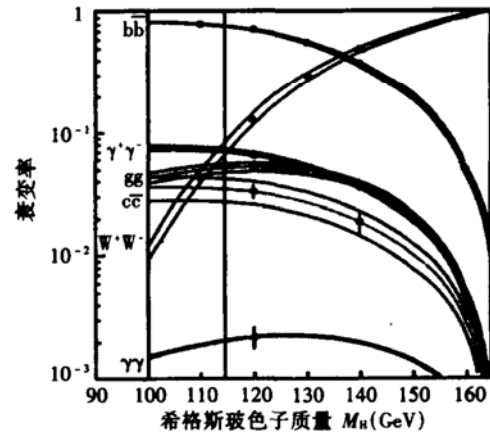


图 1 希格斯粒子的衰变

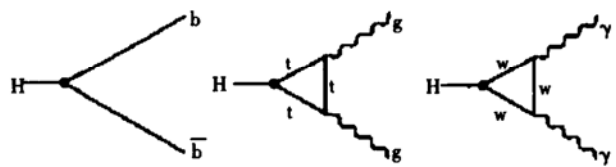


图 2 希格斯粒子衰变到 $b\bar{b}$ 、 gg 和 $\gamma\gamma$ 费恩曼图

希格斯玻色子的观测必将经历详尽地寻找标准模型所预言的所有基本粒子的过程。然后，某些理由使人相信：一些新物理将突破标准模型，标准模型不可能是基本粒子的最终理论。标准模型忽略了引力。但是，如果一种基本粒子具有 10^{19} GeV 的质量或能量，即所谓普朗克(Planck)标度，这时，它的引力相互作用就变得重要并可与弱相互作用相比较。

若把基本粒子的强、弱以及电磁的耦合向远高于加速器可以达到的对撞能量外推，我们就会发现

当能量达到比普朗克标度小3个量级时,这几种相互作用的耦合强度变得彼此接近。这是存在3种力“大统一”可能性的证据。

我们仍然可以预期,对W、Z以及希格斯质量的量子修正应该把它们的质量推至普朗克质量值。但这使它们的实际质量和普朗克质量之间的巨大间隔很难理解。不过,引入一个具有中间质量标度和量子修正的(超标准模型的)新物理就可以解决这个所谓的级列问题(hierarchy problem)。新物理的标度如果在1TeV左右,级列问题就会消失。

新物理有几类候选理论。超对称性理论是其中的一类例子,它的额外对称性引入的相消减轻了量子修正对提高玻色子质量带来的冲击。另一类模型引入了新的质量标度,在此标度下,理论改变了性质。例如可能存在超过3维的空间维度。尽管额外维度可能太小不足以引起注意,但它们可以使标准模型到普朗克标度的自然外推变得无效。使人感兴趣的是所有这些模型都给出了明确的预言,并可以在足够高能量的 e^+e^- 对撞机上试验这些预言。

近年来,天文观察者观察到很强的事实,即宇宙的约25%的质量-能量是具有未知特征的非重子物质。虽然标准模型对暗物质没有提供确切的候选者,但是由这个理论引入新的对称性的扩充可以预言暗物质候选者的存在,即这是一种在早期宇宙中产生并存活至今的弱相互作用的稳定粒子。下一代加速器的主要目标之一即是揭开这一类新物理的面纱,并理解它与宇宙的关系。

超对称性

标准模型以外(beyond the standard model)最成熟的模型是超对称性。通过对每一种标准模型粒子引入超对称性伴子,这理论就可实现量子修正中的相消,而这相消正是克服级列问题所渴望的。这种新的、尚未见到的超对称性粒子具有比它们的标准模型伴子更大的质量。并且,它们具有相反的统计:费米子具有玻色子伴子,而玻色子具有费米子伴子。例如,自旋1/2轻子的较重的伴子将是被称为slepton的标量(自旋为0)玻色子。

超对称性模型同时还保证了标准模型的几种耦合强度在能量非常高的时候变得相等。此外,这种理论还预言了一种具有恰当质量和耦合强度的稳定粒子的存在,而它们的存在是宇宙暗质量密度以及

宇宙大范围结构演化的原因。

如果超对称性在宇宙中是真实的,那么就有许多新粒子等待去发现和测量。比slepton更重的是squarks,即自旋为1/2的夸克(quark)的标量超对称性伴子。LHC是一台强子对撞机,很可能发现质量小于3TeV的强相互作用的超对称性伴子——squarks和gluinos(自旋为1的胶子的超对称性伴子,伴子的自旋为1/2)。但是只有很少几种sleptons可以直接产生,因为它们只参与电弱相互作用。在LHC上,强子背景将使这些粒子很难被探测到。

标准模型只预言了一个希格斯粒子,超对称性模型却预言了几个具有不同质量的希格斯粒子。如果果真存在几种希格斯粒子,LHC也许至少能发现其中的一种并测量它的一些性质。但一个具有足够能量的 e^+e^- 对撞机有可能发现全部希格斯粒子,并得到一个完整的图像。而精确测定最轻的超对称性稳定粒子和那些slepton的质量对于理解超对称性是否是暗物质的原因是非常重要的。

一台 e^+e^- 对撞机上的某个特殊过程(例如希格斯粒子的产生)的事例率取决于该过程的截面以及对撞机的亮度。所谓亮度,也即每单位截面机器产生的事例率。对撞机亮度依赖于束流强度以及对撞机束流的聚焦性能。高能 e^+e^- 对撞机的产生截面随着束流能量 E_b 的增加而迅速减小。典型的亮度值为 $20\text{fb}/E_b^2$ 。这里 E_b 以TeV为单位, $1\text{fb}=10^{-39}\text{cm}^2$ 。

能量越高的对撞机需要更高的亮度。为了在 $E_b=0.5\text{TeV}$ 的对撞机上运行一年得到10000个有兴趣的事例,对撞机亮度需要高至 $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。这是LEP在其达到最高束流能量 $E_b=0.1\text{TeV}$ 时最高亮度的100倍。得到如此高的亮度是下一代直线对撞机的设计者所面临的巨大技术挑战。

通过 $e^+ + e^- \rightarrow Z^0 + H$ 过程产生希格斯玻色子的本领使 e^+e^- 对撞机成为详细研究希格斯粒子的一个理想实验室。中性 Z^0 的动量可以通过它衰变成的带电轻子对得到精确测量,而对撞机束流能量是准确知道的。于是,我们可以推断出从 Z^0 反冲的希格斯粒子的质量,而不必测量希格斯的衰变产物。即使希格斯粒子的衰变产物没有被探测到,但通过如封二上的图2(b)所示的确定的反冲质量峰就可以揭示希格斯粒子的存在。各种夸克、轻子和规范

玻色子与希格斯粒子之间的耦合可以由希格斯粒子到不同粒子-反粒子对的相对衰变率准确决定。这样,我们就可以试验希格斯机制的基本结论:也即这些耦合强度简单地正比于衰变粒子的质量,而不论它的其他性质。那种正负电子直线对撞机同时也可以试验希格斯玻色子的自相互作用。通过全面测量就能确立标准模型提出的单一希格斯玻色子作为所有基本质量根源的结论;或者,由于发现了差异,给我们指向具有多种类似希格斯粒子的一种扩充的理论。

封二上的图 2 展示了在直线对撞机上发现和测量希格斯玻色子的一个例子。(a)模拟的探测器显示图,这是一个在直线对撞机中心垂直于束流线平面上的投影显示图。该图展示了 $e^+ + e^- \rightarrow H + Z$ 的反应可能是怎么样的一个图像。中心径迹室的外面被量能器环绕。Z 衰变为 $\mu^+ \mu^-$ (向右下方的两条贯穿径迹),它可以以被比希格斯粒子(H)测量精度高得多的精确度被测量。H 粒子则衰变成一对重的 b 夸克, b 夸克最终碎裂成飞向左边的两束喷注。放大的嵌入图展示了在 b 夸克衰变中的有些径迹并不来自对撞中心。(b)在 μ 子事例中,即使不测量喷注,我们也能通过测绘 μ 子对的反冲质量得到清晰的希格斯信号和它的质量。在这模拟研究中,假设希格斯的质量为 120GeV。模拟研究的反冲质量图中,红色区域表示是真的 $e^+ + e^- \rightarrow HZ$ 事例,而黑色数据点包含了背景过程,但没有把希格斯峰遮掩起来。

在 LHC 情况下,质子复杂的组成结构意味着不是每次 pp 对撞的 14TeV 能量都能用来产生新粒子。但对质量低于 1TeV 的新粒子,我们在 LHC 上仍可预期有较大的产生率。在多数超对称性模型中, sleptons 预期具有几百 GeV 的质量。对一个标准模型希格斯粒子,高于希格斯粒子质量 150GeV 的 e^+e^- 对撞机对 $Z + H$ 过程具有最佳的产生截面。许多详细的研究已经得出结论:LHC 和 e^+e^- 对撞机可以起到重要的互补作用。

直线对撞加速器

当比 LEP 的最后几年达到的 100GeV 束流能量高得多的时候,环状的 e^+e^- 储存环加速变得完全不可能了。因为那时,反方向沿环旋转的电子和正电子发生的同步辐射损失成了致命问题。(质子因为重得多,在储存环中的同步辐射损失要小得多。)于

是,由两个直线加速器分别加速的 e^+ 和 e^- 束流的对撞便成了提高正负电子对撞能量唯一可能的方法。

下一代的 e^+e^- 对撞机预期将包容非常广泛的物理研究计划。在它的对撞能量低端,必须能运行在 Z 粒子产生的阈值,即碰撞能量 ($2E_b$) 为 91GeV (即为 Z 质量) 处,但是要求比 LEP 和 SLC 已达到的 Z 事例的产率高得多。这些详尽的低能数据将加深标准模型对 M_H 的预言,在 e^+e^- 对撞机上得到的预言可能与 LHC 上已经发现的实验结论符合,也可能不符合。并且这些数据将对在 LHC 上发现的一些新粒子提供补充的信息。

当对撞机的能量更高时,则要求直线对撞机能以比 LHC 可能达到的高得多的精确度测量 t 夸克质量以及耦合强度。在 t 夸克能量范围,直线对撞机必须能在 LHC 探测的有效夸克-夸克碰撞能量下寻找新现象。实际上,在质子-质子对撞中,被夸克所携带的只是质子动量的很小一部分。这个要求意味着 e^+e^- 对撞机的对撞能量必须达到 1TeV。

对撞能量的范围从 Z 质量到 1TeV 这样的要求是空前的。当然,对撞机的亮度还必须随着束流能量的增加不断提高,以补偿产生截面随能量增加而下降的因素。为了在可管理的对撞机长度 30 千米左右和可接受的功率消耗(几百兆瓦)的条件下把束流能量加速到设定的最高能量,这就需要具有极高的加速梯度^②和高效率的射频(RF)腔。

为了达到足够的亮度,需要使对撞束保持在非常密集的状态,并且最终在对撞点的地方被聚焦到毫微米(nm)的大小。近 20 年来,已提出了 3 种供选择的加速技术,即室温的铜射频腔、超导射频腔和驱动束流加速,进行了研发。设计的最佳化以及必要的试验已在世界上几个最主要的加速器实验室的大型设备上进行。研发的目标是展示存在这种所需要的直线加速器的基本单元、阻尼环以及最终的聚焦系统。封二的图 3 展示了下一代直线对撞机的电子-正电子对撞区示意图。 e^+ 和 e^- 束流分别在 15 千米的隧道内从相反的方向被加速到设计的高能量,并在安装一台直径为 15 米探测设备的对撞点相撞。隧道内布置了调束管(Klystron)(图中展示的是 SLAC 模型)和输入射频功率的加速腔(图中展示的是超导 TESLA 方案的设计)。正电子是通过用一部分被完全加速的电子束在对撞区附近打靶产生的。

现代物理知识

从靶出来的低能正电子被送到地上的一个小的同步加速器阻尼环以减小加速前的相空间散度。

射频、室温铜加速腔是 SLC 成功运用过的技术的自然发展。该方案使用 12000 个运行在 11.4GHz (X 波段) 来产生 50 或 60MV/m 的加速梯度, 那样一种对撞机在总长度 30 千米左右可以达到 1TeV 的对撞能量。这种“热铜”X 波段方法是 SLAC 和在日本的 KEK 实验室联合发展的设计的基础。原理性的证明近来已被确立。

热铜技术的替代方案是超导管。他们通过使用较长持续时间的射频脉冲加速束流, 这样可以得到更好的功率转换效率。超导管技术是 1990 年代引入到 LEP 对撞机上的, 当时他们达到 6MV/m 的加速梯度。现在, 他们已达到的加速梯度好于 25MV/m。TESLA 计划的全部研发和设计活动在以汉堡的德国同步加速器实验室(DESY) 为中心进行。此方案设计的直线加速器包括 21000 个运行在 1.3GHz 的超导铌腔。TESLA 计划是一台高亮度并把对撞能量范围定在 90G ~ 500GeV 的 e^+e^- 直线对撞机, 以后还可以把对撞能量升级到 1TeV。

在 DESY 的 TESLA 模型设备已经显示了生产超导管以及把超导管运行于低温条件下以满足一台 500GeV 对撞机所需要的加速梯度的可行性。

建造更高能量的几个 TeV 的对撞机就会遇到更多的问题, 因此被搁在较远的未来再考虑。CERN 的一种紧凑的直线对撞机 (CLIC) 计划的目的是在非常高的亮度下把对撞能量提高到 3 ~ 5TeV。CLIC 采用双束加速, 一个低能高强度驱动电子束流把 30GHz 微波功率提供给主高能束流。原则上, 那种方案可达到的加速梯度为 150MV/m 的量级。

从长远的要求看, 极化电子和正电子束是很有用的。因为弱相互作用过程宇称不守恒, 左旋和右旋电子在对撞中表现出不同的行为。例如, 作为新粒子寻找的本底 W 粒子对, 则可以通过用以右旋电子为主的方案加以压低。极化电子束在 SLC 上是可以得到的, 他们被证明在分析 Z 玻色子的耦合强度中是至关重要的。极化正电子可以为分析老的和新粒子的耦合强度提供进一步的手段, 并可以减少系统的实验不确定性。

另一个有用的选项是通过由电子或正电子的反向散射激光产生高能光子束: 用一个 500GeV 电子束, 我们能够得到 400GeV 的光子。由此造成的光子

——光子对撞机可以在与其他任何终态粒子隔离的情况下产生和研究希格斯粒子。

在为直线加速器选择“冷”超导技术时, ICFA 的直线对撞机国际指导委员会 (International Linear Collider Steering Committee) 主席美国加州理工学院的巴立·巴立时 (Barry Barish) 是这样解释的: “热”X 波段技术和“冷”超导技术似乎对直线对撞机都行, 每一种技术都有它自己的优点, 并且都已由一群天才而富有献身精神的科学家和工程师研发了多年。但是, 如果为建造一台直线对撞机继续同时发展这两种技术的话, 那就太花钱、太耗时了。但在这两种技术中作出推荐某一种技术的决定是一件很为难的事情, 因为这两种技术都是很先进的; 此外, 我们的推荐必将对参加研发的研究所产生明显的影响。为了做好这项推荐工作, 专家委员会发展了一种评估标准的模型。这些标准包括了诸如价格、时间进度以及技术和物理操作等因素。最后, 超导技术受到青睐, 多少还是源自它使用了较低的频率。超导技术需要的功率消耗也要低得多, 专家委员会指出超导技术的较大的腔孔径、长的束间隔, 使其便于操作, 减低了对大地运动的敏感性, 容许束之间的反馈并有可能增加束流强度。专家委员会也得出了这样的结论, 即采用超导技术的直线加速器和射频系统具有较小的风险。建造超导 X 射线自由电子激光器可以对直线加速器许多方面的试验提供模型, 并且那种直线加速器的大部分部件的工业化生产已经起步。专家委员会强调指出, 被 ICFA 接受的他们的推荐还仅是一种技术选择, 而不是一项设计。但是这次 ICFA 的决定将使得发展这种技术使 ILC 变成可能的步子大大加快。直线对撞机国际指导委员会 (ILCSC) 是由来自北美、亚洲和欧洲的 12 位专家组成, 这个委员会可以很好地协调全世界高能物理界为了实现这个目标进行共同研发。

探测器

直线对撞机研究深层次问题的能力不仅依赖于高能条件下高的事例率, 同样依赖于实验者是否能够解释对撞中发生的真相。围绕对撞点的庞大的探测器联合体必须要能够精密地对每次对撞后的终态粒子进行重建。尽管存在强大的背景, 仍要保持很高的精确性。虽然在可比较的能量下, 强子对撞机的背景要坏得多, 但在高能 e^+e^- 对撞机中的背景

也仍是很强的。

考虑直线对撞机的任务,作为两个例子,我们来看一下它的径迹探测器以及电磁量能器应该具有什么样的要求。

顶点探测器是安置于紧挨束流对撞区周围的一种径迹探测装置。为了证明希格斯粒子确实就是造成基本费米子质量的原因,就得高精度地测量它对每种夸克和轻子的耦合强度。希格斯粒子衰变到重的**b**(底)夸克和**c**(粲)夸克所形成的粒子喷注中包含了寿命为 10^{-12} s的粒子。以极高的精密度把粒子径迹反推到它的产生点,我们可以测得它们的寿命并以此来区分各种重夸克喷注、来自胶子的喷注或是较轻的夸克喷注。LHC探测器没有设计来鉴别**c**夸克,而在鉴别**b**夸克的效率上也低于在直线对撞机上所要求的。这是因为 e^+e^- 对撞机在它的顶点探测器上的抗辐射要求比强子对撞机低好多,这就有利于新一代硅像素传感器比现有的顶点探测器上最好的径迹探测精密度好得多。

直线对撞机上的探测器必须要发现并测量电子、 μ 子和强子(包括带电的和中性的)的能量。对强子的测量具有特殊的挑战性。要求对一个很宽能量范围的终态粒子保持足够的测量精度。在LHC上,喷注的能量是使用量能器测量的,喷注中粒子的所有能量都沉积在量能器中。而在 e^+e^- 对撞机中,每次对撞产生的粒子数要少很多,我们可以测量形成喷注的每个粒子的能量。带电粒子的动量可以通过在大体积磁场中的轨迹的曲率测得,光子则由它们在高分辨率的电磁量能器中沉积能量测得,而如中子这样的中性强子则在强子量能器中被吸收和测量。

为了避免那些已在径迹探测器中被测量的带电粒子的重复计数,一个粒子接着一个粒子的喷注重建,要求量能器具有比现有量能器更好的空间分辨。嵌入硅探测层的钨吸收体层式结构现正在被选作电磁量能器的模型单元进行研发。它们的分块优化设计需要满足沉积能量的精确定位并能与很密的喷注中的相对应的粒子匹配。封二的图4展示了一个模拟喷注图。这喷注是在一个800GeV的 $e^+ + e^-$ 对撞中产生的1个W玻色子衰变的单夸克喷注。喷注中包含了成打的强子和轻子。这个圆柱型带电粒子径迹室(底部的细径迹)和周围的电磁量能器(顶部的粗点)的联合输出显示图把在两个区域(即径迹

室和量能器)的同一个粒子进行了匹配,并给它们赋予相同的颜色。量能器是由设计成细块分割的钨层构成的,带电粒子和中性粒子在里面发生电磁或强相互作用,而镶嵌在钨层中的硅层则承担了探测相互作用产物的任务。在钨中的能量损失的不同情况可用来区分不同类型的粒子,例如 μ 子几乎不受薄金属层的影响。量能器的空间分辨要求好到可以把局部的能量沉积与径迹探测室中的径迹可靠地进行匹配。下一代直线对撞机需要这样性能的量能器。

经过10多年在这方面的研究,欧洲、美国和日本已在探测器设计上形成了一致意见。未来的正负电子直线对撞机上的探测器将是一个直径15米、长也为15米的圆柱体探测器,装备有大型径迹室,环绕径迹室的是量能器,再外面是超导线圈,它对径迹室提供4Tesla③的螺旋磁场。为了在接近它们的产生顶点精密地重建带电粒子径迹,环绕束流真空管道安装了高分辨的顶点径迹探测器。

还需要做许多其他的事情。特别是,径迹探测器必须尽可能减少装置总体的物质质量,减小散射和光子相互作用,而这些散射和光子相互作用是对测量有危害的。在LHC上,需要进行严格的预选以减少强大的背景而有效地把真正有兴趣的事例记录下来;与LHC的情况相反,在 e^+e^- 对撞机上的事例率低得多,容许把所有的事例都记录下来,以提供给以后的离线分析之用。这样做,保证了探测器对所有过程的灵敏性。

如何实现这个计划

近两年来,下一代直线对撞机计划正作为准备被批准的项目朝着完全成熟的方向迈开了大步。2004年8月20日无疑是个重要时刻,因为国际技术推荐专家委员会正式推荐在未来的正负电子直线对撞机上采用“冷技术”,这必将在团结国际高能物理界对直线对撞机计划起到显著的推动作用。可以预期,“超导”方案的所有加速器器件的发展和优化将为产生一份包括预算在内的项目建议书奠定基础。

虽然未来正负电子直线对撞机项目的造价目前尚不可能给出非常准确的数字,但50亿美元的预算还常常被人引用。昂贵的造价和复杂性使直线对撞机必然成为一个国际合作项目,东道国或地区将负担较大责任。核聚变反应堆模型计划(ITER)在造价和复杂性上是一个与直线对撞机接近的项目,也被

计划作为一个国际合作项目。在 ICFA 的支持下, 2002 年成立了国际直线对撞机指导委员会, 委员会的成员包括了世界上各主要高能物理实验室的负责人。指导委员会已开始朝一个正式的世界合作项目方案以及以国际合作模式建造和运行的方向上开始工作。

加速器和探测器考虑采用可被世界上多个控制中心遥控的技术。天文学家已经在较小的规模上用卫星和大型望远镜实现了这一点; 但对直线对撞机那样大的规模和复杂的设备, 这还是第一次。

全世界广大粒子物理学家对把 e^+e^- 直线对撞机作为下一步大规模设备的计划已经表示了压倒性的支持。因为他们需要提升对从夸克到宇宙的大自然的理解。美国能源部科学办公室的 20 年计划已经把直线对撞机排在中期项目顶级优先级的地位。经济合作和发展组织, 一个 30 个工业化国家联盟, 也盛赞对撞机在科学研究未来发展中的潜能。

30 千米长的对撞机选址工作也正在进行。考虑的因素包括地球物理的稳定性, 出入方便以及购置土地的便利等等。已提出的候选地点包括欧洲、北美和日本等地区的八九个地方。

预计 3 年后, CERN 的 LHC 上可以出第一批结果, 而直线对撞机项目也将进入批准阶段。这样, 直线对撞机有望在 2015 年左右产生第一次对撞。

高能物理正在走向具有决定性发现的新时代。LHC 将确保我们接近许多紧迫的问题的答案。但是还有一些重要的测量, LHC 不能以所需要的精确度完成, 其中的一些测量在 LHC 上就根本不能做。直线对撞机将提供这种精确性以及为完善图像所需要的补充测量。在可比较能区的 LHC 和 e^+e^- 直线对撞机所提供数据的配合对回答粒子物理学以及粒子物理学与宇宙学的交叉问题是至关重要的。

数年前的 LEP 和 SLC, 以及在 CERN 和费米实验室的强子对撞机上的类似的配合把我们引入到今天对标准模型的理解。如果这个直线对撞机和 LHC 确认了希格斯机制并揭示了可以解释暗物质的新物理, 这将是粒子物理学和宇宙学的共同胜利。20 年来, 直线对撞机已经成为世界范围的努力发展的目标。今后几年将是把该计划转变为基础研究的一个成功国际装置的关键时刻。

(北京市玉泉路 19 号乙院中国科学院高能物理研究所实验物理中心 100049)

① TeV、GeV 和 MeV 均为能量单位, $1\text{TeV} = 10^{12}$ 电子伏特, $1\text{GeV} = 10^9$ 电子伏特, $1\text{MeV} = 10^6$ 电子伏特。

②文中加速梯度用了 MV/m 单位, 即百万伏(10^6 伏特)/米。

③ Tesla 是磁场强度单位, $1\text{Tesla} = 1$ 万(10^4)高斯。

科苑快讯

分析超纯材料 成分新工艺

美国国家标准和技术研究所(NIST)专家研制成一种专门的程序保障系统, 它能查明超纯材料和合金中存在的极少量杂质。该所提出的程序包分析了利用光栅扫描电子显微镜收集的资料, 这种显微镜的工作原理可归结为: 对被研究样品辐射一电子束, 随后记录反射的电子和二次电子, 并且进行 X 光分析, 除了有关表面轮廓信息之外, 还能获得有关样品化学成分的数据, 因为被辐射材料不同部位的电子能量各不相同。确实, 由于这种显微镜分析的复杂性, 通常只用来确定合金的主要成分。新研制的程序包能确定样品中含有的极微量成分, 使研究人员能发现镍铝合金中极微量的铬杂质。美国国家标准和技术研究所计划, 将来这种新方法能检查具有特殊性质超纯材料制取过程, 也可以在新一代半导体微电路生产中获得应用。

(周道其译自俄《计算机在线》2004/12/12)

书讯

《微观纵览》

由郑志鹏和江向东著、肖启明主持出版、韦南山任责任编辑的《微观纵览》, 于 2005 年 1 月由广西师范大学出版社出版发行。

该书用通俗易懂的语言, 深入浅出地介绍了 20 世纪物理学的两大基础理论即相对论和量子力学的发展脉络。该书材料翔实, 见解独到, 能切实反映科技前沿的研究成果和发展趋势。此外, 此书还揭示了认知过程的深刻内涵, 诸如思维方式、研究方法和创新思想等启人心智的东西。此书既有文献价值, 又有现实指导意义, 兼具提高和普及两种功能。适合大学生、研究生和中、高级干部阅读, 也可供广大物理学爱好者研习或者鉴赏。欲购者请按每本 18 元汇款到: 100049 北京 918 信箱现编部。