

ILC：下一代对撞机

LHC叩开了物理学新世界的大门，但要深入研究新世界中的种种新奇现象，物理学家必须建造更加强大的正负电子对撞机。

撰文 巴里·巴里什 (Barry Barish)
尼古拉斯·沃克 (Nicholas Walker)
山本均 (Hitoshi Yamamoto)
翻译 陈国明

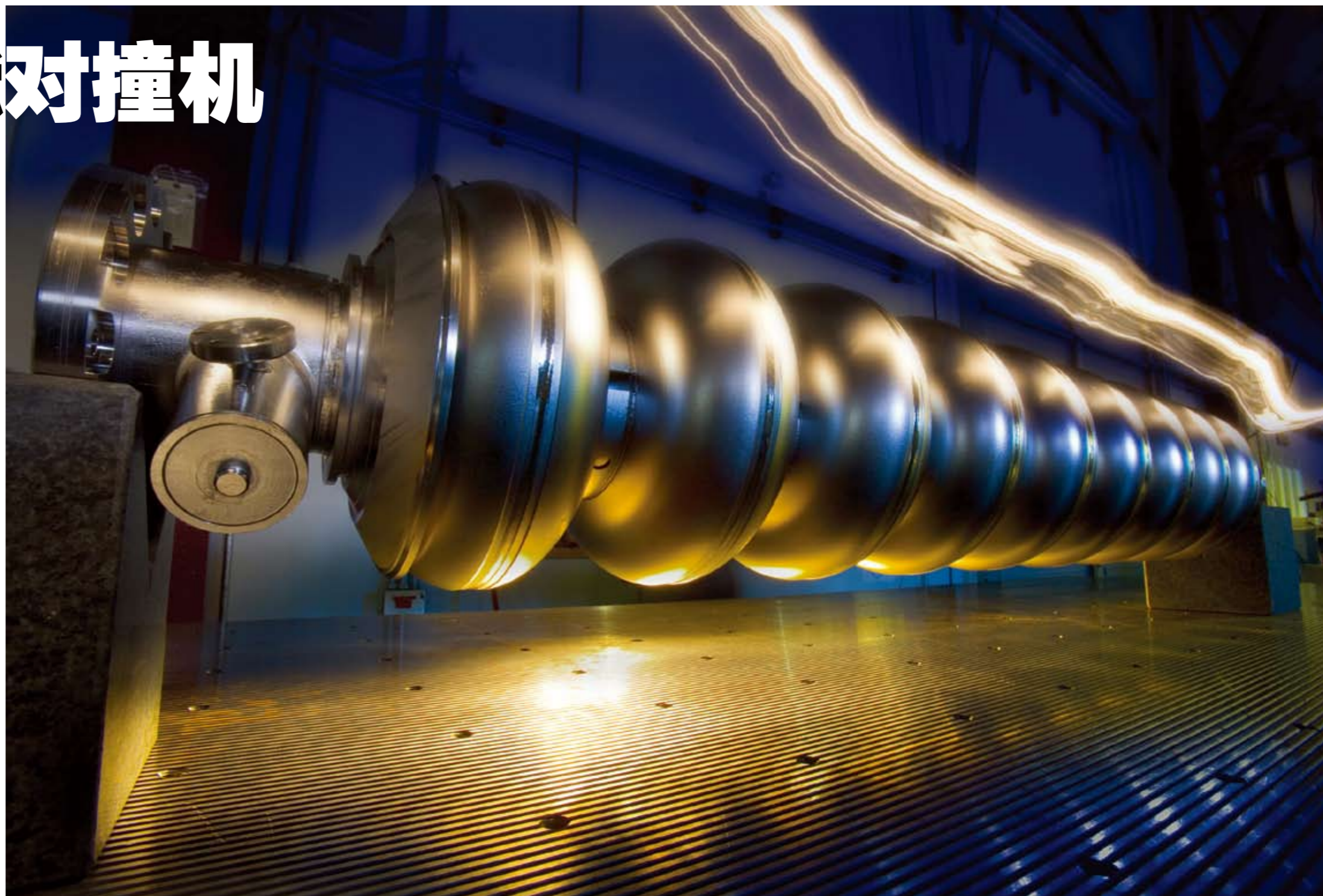
国际直线对撞机

- 大型强子对撞机的继任者应该是国际直线对撞机，这台计划中的设备可以让正负电子对撞在一起。
- 按照设计方案，ILC将有两个11.3千米长的直线加速器，利用一长串真空腔中的强电场使粒子加速。
- 要想建造ILC，除了必须攻克技术难关以外，规划者还必须合理使用项目经费，为对撞机选择一处理想的建造地点。

大型强子对撞机将开启物理学的新纪元，把人类对原子内部基本粒子的探索，延伸到前所未有的高能状态。LHC的主环横跨瑞士和法国边界，科学家尽管还没有启动环中的首次高能粒子对撞，却已经在预研下一台大型粒子加速器了。国际直线对撞机 (International Linear Collider, 简称为 ILC) 就是粒子物理学界的一致选择。这台对撞机的长度将超过 30 千米，能够让非常接近光速的电子和正电子 (positron) 对撞在一起。(正电子是电子的反粒子，与电子质量相同，电荷相反。正电子又被称为反电子，拥有负电荷的电子也被称为负电子。)

ILC 的威力将远远超过以往任何一台正负电子对撞机，让物理学家有能力深入研究 LHC 的任何一项新发现。LHC 是为研究质子对撞而设计的。质子实际上由夸克和胶子组成。夸克是目前已知的、组成物质的最小微粒，胶子则是将夸克约束在一起的黏合剂。(在标准模型中，胶子是传递强相互作用的粒子。) 由于夸克和胶子在质子内部不停地发生相互作用，质子和质子的对撞注定不会是“干净”的对撞。研究人员无法确定对撞时每个夸克各携带了多少能量，因此也就难以确定对撞产生的新粒子的性质。相反，电子和正电子本身就是基本粒子，因此利用正负电子对撞机从事研究的物理学家，可以非常准确地了解对撞时正负电子所携带的能量。这种性能将使 ILC 成为一个极其有用的工具，能够精确地测量新发现粒子的质量及其他性质 (参见第 42 页插图)。

来自全世界 300 多个实验室和大学的 1,600 多名科学家和工程师，正致力于 ILC



的设计及探测器的研发，这些探测器将用来分析 ILC 中正负电子对撞的产物。2007 年 2 月，我们设计小组公布了 ILC 的估计造价，约合 67 亿美元 (不包含探测器的成本)。我们已经比较了在三处不同地点建造 ILC 的造价，这些候选地点分别是：瑞士日内瓦附近的欧洲原子能研究中心 (CERN)、美国的费

米国家加速器实验室和日本某山区。我们还在为这个完全国际化的实验室设计切实可行的管理模式。虽然 ILC 的造价看上去有点吓人，但并不比 LHC 和 ITER 核聚变反应堆之类的大型科学工程昂贵多少。如果一切进展顺利的话，ILC 会在 21 世纪 20 年代“照亮”粒子物理学的最前沿。

直线对撞机的由来

要让正负电子对撞机达到万亿能标，直线加速器的造价要比环形加速器便宜许多。

2005 年 8 月，来自世界各地的 600 多名物理学家，齐聚美国科罗拉多州的斯诺



资料提供：《环球科学》
2008 年第 3 期



资料提供：《环球科学》
2008年第3期

马斯，讨论 ILC 的研发计划。不过这一计划的真正起点，可以追溯到 1989 年，当时 CERN 的大型正负电子对撞机 (Large Electron-Positron collider, 缩写为 LEP) 刚刚开始试运行。LEP 在一个周长 27 千米的贮存环 (storage ring) 中加速正负电子，再让它们对撞，对撞能量可达 180 GeV。不过很显然，LEP 是同类加速器中规模最大的一个，今后也不会再建造更大的环形正负电子对撞机。原因很简单，要把正负电子加速到万亿电子伏特，达到所谓的万亿能标，需要建造一个周长几百千米的圆环，它的造价是任何机构都不可能承担得起的。

环形加速器的主要障碍是同步辐射 (synchrotron radiation)：正负电子之类的较轻粒子在环中加速时，总是会遇到许多二极磁铁 (dipole magnet) 迫使它们转弯，每次

转弯都会产生这种辐射，使粒子丢失一部分能量。因此，加速正负电子就会变得越来越困难，此类对撞机的造价将与对撞能量的平方成正比。也就是说，一台对撞能量比 LEP 大一倍的机器，造价会是 LEP 的 4 倍。(如果加速质子之类的较重粒子，能量丢失就不会那么严重；因此 LEP 的圆环隧道成了现在 LHC 的栖身之所。)

直线对撞机则是一个比较省钱的方案，它能避免环形加速器的那种同步辐射。在 ILC 的设计方案中，两个 11.3 千米长的直线加速器 (linac) 分别加速正负电子，让它们互相瞄准，在中间发生对撞。直线对撞机的缺点在于，正负电子从静止状态加速到对撞能量必须一次成功，不能像环形加速器那样一圈一圈逐渐累加。要达到更高的对撞能量，就要建造更长的直线加速器。直线对撞机的

造价与对撞能量成正比，因此让它达到万亿能标所需的费用比环形对撞机便宜得多，这一优势是显而易见的。

在欧洲建造 LEP 的同时，美国能源部也在斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 建造了一台与它竞争的对撞机，第一次把直线对撞机从概念变成了现实。这台机器用一个 3 千米长的直线加速器交替加速正负电子束团，使它们的能量达到大约 50 GeV，再用磁铁使它们沿不同方向注入贮存环，加速对撞。这台对撞机从 1989 年一直运行到 1998 年，虽然只用了一个直线加速器，算不上是真正的直线对撞机，但它铺平了通向 ILC 的道路。

确切地说，万亿能标直线对撞机的设计规划工作，开始于 20 世纪 80 年代末到 90 年代初，当时物理学家提出了几个相互竞争的加速技术。随后 10 年里，科学家在不断

完善该技术的同时，也将关注点集中在如何控制造价方面。2004 年 8 月，由 12 名独立专家组成的小组对所有的技术进行了评估，最终决定采纳 TESLA 组提出的技术方案。TESLA 组由德国汉堡电子同步加速器研究中心 (DESY) 领导，成员来自 40 多所大学和研究所。根据这套方案，正负电子将穿过一长串真空腔 (cavity)。真空腔由金属铌 (niobium) 制造，冷却到极低温度时会产生超导现象，可以毫无阻碍地传导电流。超导现象能在真空腔内高效产生射频振荡强电场，振荡频率达到每秒十亿次。正负电子就在这种不断振荡的电场中加速冲向对撞点。

这种设计方案被称为超导射频 (SCRF)。它的基本构造是一节节一米长的铌腔，由 9 个能够冷却到 2K 的腔室构成。8 ~ 9 个铌腔首尾相连成一条直线，再浸入装满超液氮的冷却罐 [即冷却模块 (cryomodule)，参见第 43 页插图] 之中。ILC 有两个直线加速器，每个需要大约 900 个冷却模块，一共就要用到大约 16,000 个真空腔。DESY 的研究人员已经建造了 10 个冷却模块，其中 5 个目前被安装在 DESY 的自由电子激光装置 FLASH 上，这种装置利用高能电子辐射激光。DESY 即将建造的欧洲 X 射线自由电子激光器 (European X-Ray Free-Electron Laser, 缩写为 XFEL) 也将采用超导射频技术，共需 101 个冷却模块，它们构成的超导直线加速器可以将电子能量加速到 17.5 GeV。

如果每节真空腔能够产生更强的电场，ILC 的直线加速器就可以造得更短，造价也将更加便宜。因此，设计组制定了一个富有挑战性的目标：改进超导射频系统，让粒子每前进一米就获得 35 MeV (百万电子伏特) 的能量。已经有几个原型试验腔达到甚至超过了这一目标，但是这种设备的大规模生产仍有困难。实现这一目标的关键在于，确保真空腔内一尘不染、完美无瑕。制作真空腔并安装到冷却模块的整个过程，都必须在洁净环境中完成。

ILC 的实现之路

ILC 的设计方案已经确定，但要真正建造仍须攻克重重难关。

ILC 设计小组已经确定了对撞机的基本参数 (参见左图)。整机机器总长将达到 31 千米，主要由两个超导直线加速器组成，正

本文作者

巴里·巴里什、尼古拉斯·沃克和山本均，都在正负电子对撞领域有着不俗的学术造诣。巴里什是国际直线对撞机全球设计小组的主管，也是美国加州理工学院的物理学终身教授，研究领域包括中微子、磁单极子和引力波。沃克是德国汉堡电子同步加速器研究中心的加速器物理学家，从事直线加速设计已有 15 年之久，是 ILC 工程设计阶段三位项目经理之一。山本均是日本东北大学物理学教授，参与过美国斯坦福直线加速器中心、康奈尔电子贮存环及日本高能加速器研究机构的粒子对撞实验研究。

本文译者

陈国明，中国科学院高能物理研究所研究员，从事高能物理和天体物理的研究工作，目前是 CMS 实验中国组物理分析负责人。

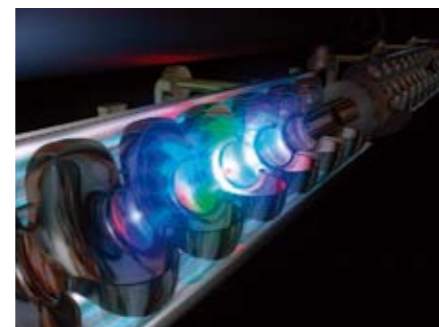
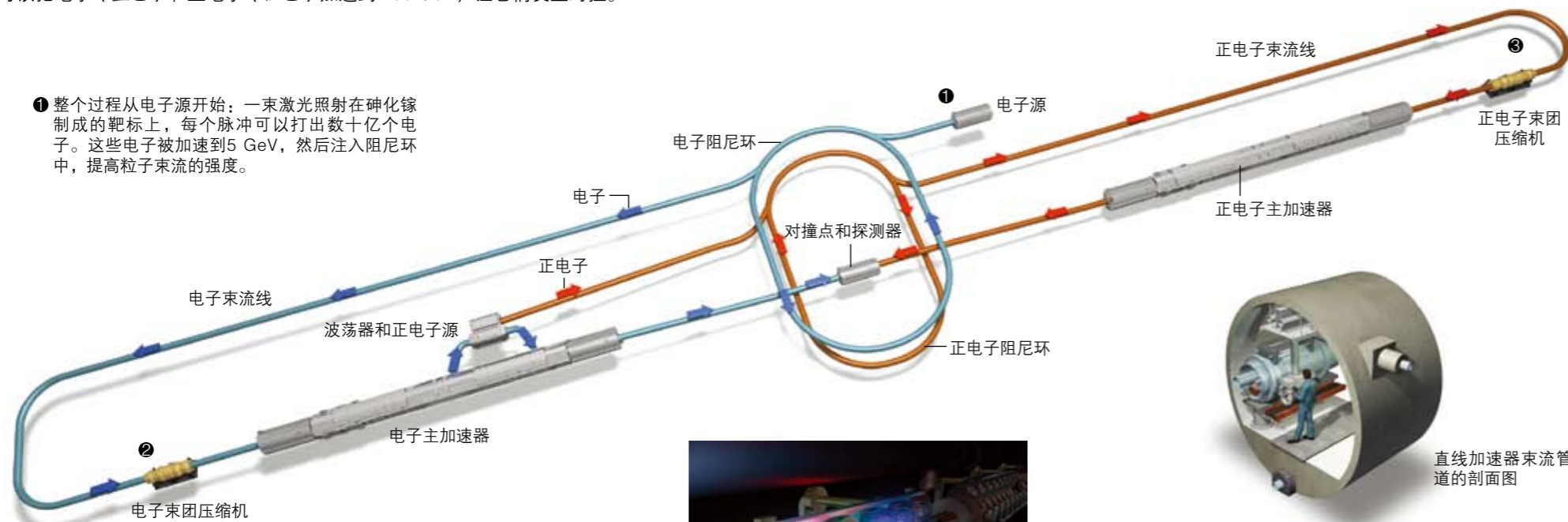
工作原理

未来的对撞机

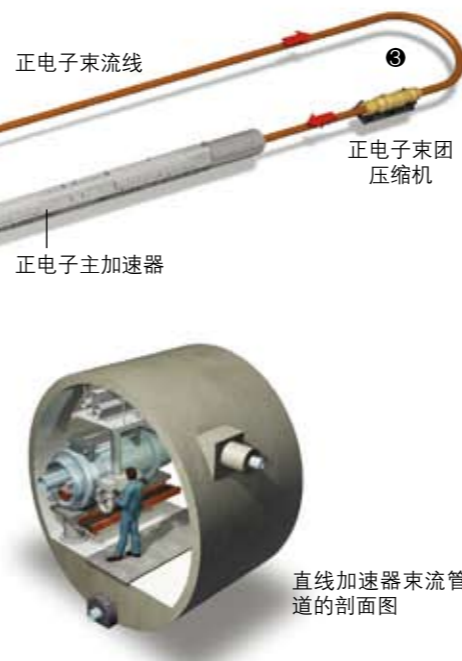
拟议中的 ILC 长度超过 30 千米，将是世界上最强大的直线对撞机。它的直线加速器可以把电子 (蓝色) 和正电子 (橙色) 加速到 250 GeV，让它们发生对撞。

① 整个过程从电子源开始，一束激光照射在砷化镓制成的靶标上，每个脉冲可以打出数十亿个电子。这些电子被加速到 5 GeV，然后注入阻尼环中，提高粒子束流的强度。

② 电子被引入束团压缩机中进一步压缩，并被加速到 15 GeV。随后，电子被注入一个主加速器加速到 250 GeV。不过在这个加速器的中间，电子束团会绕一个弯，被偏转到一个被称为“波荡器”的特殊磁铁中，将部分能量转换为伽马射线辐射出来。这些伽马光子再打到一个旋转靶标上，产生正负电子对。正电子被收集起来，先加速到 5 GeV，再注入另一个阻尼环。



▲ 直线加速器中加速粒子所需电场的计算机模拟图。



直线加速器束流管道的剖面图

③ 正电子束团运行到 ILC 的另一侧，先被压缩，再注入另一个主加速器，加速到 250 GeV。磁铁聚焦正负电子束流，让它们在碰撞点发生碰撞。碰撞点上的探测器将分析高能碰撞所产生的粒子。

候选地点

ILC 的规划者已经分析了在以下三处候选地点建造对撞机所需的成本：

欧洲

瑞士日内瓦附近的欧洲原子能研究中心 (CERN)。

美国

伊利诺伊州巴达维亚市的费米国家加速器实验室。

日本

一处没有确切说明的山脉。

对撞机对比

锤子和手术刀

大型强子对撞机和计划中的国际直线对撞机是互补的，它们的关系就像锤子和手术刀——锤子可以砸开核桃，手术刀则能细细剔出核桃仁。LHC 将把质子加速到 7 TeV，让质子和质子发生总能量达 14 TeV 的对撞，使研究人员第一次有机会直接观察这一能标的物理现象。对撞可能产生一些理论上预言的、而实际上还没有观测到的粒子，希格斯玻色子就是其中之一。（标准模型是一种得到广泛认可的粒子物理学理论，能够解释电磁作用、弱相互作用和强相互作用。该理论认为，希格斯粒子给所有其他粒子赋予了质量。）超对称理论预言的一些已知粒子的超对称伴子，也可能在 LHC 中现身。比如电子的超对称伴子“超电子”（selectron）和光子的超对称伴子“光微子”（photino）。此外，LHC 也许还会发现超维存在的证据，也只有在高能事例中才能检测到空间的额外维度。

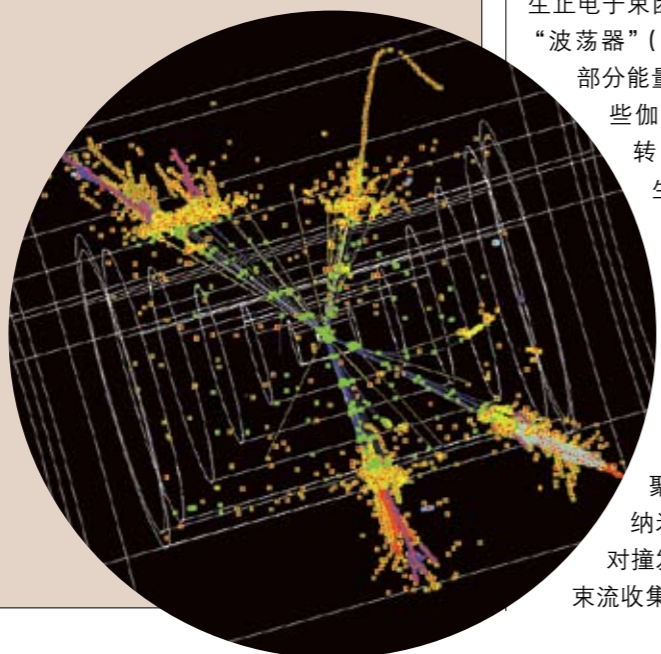
物理学家预计，如果希格斯玻色子确实存在，LHC 将探测到这种粒子，测量它的质量、确定它和其他粒子的相互作用。但是，由于 LHC 研究的是质子和质子的对撞，而质子本身又有复杂的结构，使得对撞结果非常凌乱，无法细致地研究希格斯粒子的性质。只有更加精密的 ILC，才能测量希格斯粒子的许多重要性质，比如它与其他粒子相互作用的强度。对于物理学家而言，这些信息是无价的，因为它可以检验标准模型的有效性。换句话说，ILC 可以判断标准模型能否准确描述高能物理事例，是否需要用其他理论模型替代标准模型。用 ILC 来研究超对称粒子，还将帮助物理学家丰富超对称理论的许多细节。实验结果也许能揭示所谓的暗物质是否由超对称粒子构成。

LHC 可能发现的另外一种新粒子是 Z' 玻色子（Z-prime boson），它是传递弱相互作用的 Z 玻色子的伴子。如果发现 Z' 玻色子，就意味着自然界中存在一种新作用力。物理学家将很有兴趣确定这种作用力的性质和起源，了解大统一框架下它与其他作用的关系，探索它在宇宙大爆炸的最初时刻所扮演的角色。所有这一切都有赖于 ILC 所起的决定性作用。

最后，历史经验告诉我们，LHC 和 ILC 很可能会发现一些意想不到的新现象，它们的有趣程度和重要意义，一定不会低于前面讨论过的任何一种粒子。

——巴里·巴里什、尼古拉斯·沃克、山本均

▶ 这张计算机模拟图显示了 ILC 中正负电子对撞后，粒子碎片从对撞点中喷射而出的情景。每个小方块代表对撞机探测器上的一个击中点；一堆堆同色方块代表一个个粒子簇射。从这些数据中，研究人员可以推算出粒子碎片的性质：黄线代表了中性粒子的径迹（主要是光子），蓝线则是带电粒子的径迹（主要是 π 介子，由一对夸克组成）。这一计算机模拟向研究人员展示了这样一个过程：正负电子对撞产生了一个希格斯玻色子和一个 Z 玻色子，这两个粒子都迅速衰变为质量更轻的粒子。



负电子的对撞能量将达到 500 GeV。（250 GeV 的电子与 250 GeV 的正电子迎头相撞，就会产生质心能量为 500 GeV 的对撞。）ILC 每秒将产生 5 次脉冲，每个脉冲持续 1 毫秒，能产生 3,000 个正负电子束团，使它们加速并发生对撞。每个加速器的平均束流功率约为 1 万千瓦。加速器将电功率转换为束流功率的总效率约为 20%，因此两个加速器的耗电功率将达 10 万千瓦。

为了产生电子脉冲，ILC 将用激光照射砷化镓靶标，每个激光脉冲可以打出数十亿个电子。所有电子的自旋方向都保持一致，这种性质被称为“自旋极化”（spin-polarized），对研究粒子物理学中的许多问题来说非常重要。这些电子将在一段较短的超导射频直线加速器中迅速加速到 5 GeV，然后注入 ILC 中央一个周长 6.7 千米的阻尼环（damping ring）。电子在环中绕行并产生同步辐射，与此同时，电子束团被压缩，体积减小，电子密度增加，因此实际上增加了束流强度。

200 毫秒后，电子束团离开阻尼环，每个束团的长度约为 9 毫米，直径比头发还细。为了提高加速性能，并在与正电子束团发生碰撞时取得最好的效果，电子束团将被进一步压缩到 0.3 毫米长。在这一压缩过程中，电子将被加速到 15 GeV。随后，束团被注入长达 11.3 千米的超导射频主加速器，并被加速到 250 GeV。

当电子在这个直线加速器中被加速到 150 GeV 时，这些粒子会拐个小弯，以便产生正电子束团。它们将被偏转到一个被称为“波荡器”（undulator）的特殊磁铁中，将部分能量转换为伽马射线辐射出来。这些伽马光子将被聚焦在一个每秒旋转 1,000 次的钛合金薄片上，产生大量正负电子对。正电子被收集起来，先加速到 5 GeV，再注入另一个阻尼环，最终被送入 ILC 另外一侧的另一个超导射频主加速器中。一旦正负电子被加速到 250 GeV，并迅速向对撞点汇聚，一系列磁透镜（magnetic lens）会把高能束团聚焦成扁平的带状束流，宽 640 纳米（十亿分之一米），高 6 纳米。对撞发生后，剩余的束团会被引导到束流收集器（beam dump）上，该装置



可以安全地吸收正负电子，并耗散掉它们的能量。

ILC 上的每个子系统都将挑战技术极限，面临重重工程难题。这台对撞机的阻尼环产生的束流品质，必须比现有电子贮存环高出好几倍。在整个压缩、加速和聚焦的过程中，束流的品质必须不受影响。这台对撞机必须采用精良的诊断系统、先进的调束工序和极为精确的准直技术。如何建造正电子产生系统，如何让纳米级束流瞄准对撞点，这些难题的攻克都需要科学家付出艰辛的努力。

建造一个能够分析 ILC 对撞结果的探测器也是一项挑战。举例来说，要想测量希格斯玻色子和其他粒子的相互作用强度，探测器就必须测量带电粒子的动量和它们的起始点，而且测量精度必须比以往的探测器高出一个量级。科学家正在研制新型径迹系统和量能器，以便在 ILC 上取得丰硕的物理学成果。

下一步

ILC 最终在哪里建造，将决定对撞机的许多设计细节。

虽然 ILC 小组已经选定了对撞机的设计方案，但是还有更多的计划有待落实。今后几年内，LHC 将采集和分析海量的质子对撞数据，我们也将努力优化 ILC 的设计方案，确保在合理的成本控制下，让这台正负电子对撞机获得最好的性能。目前，我们还不知道 ILC 将在哪里建造，地点的选择主要取决于哪个国家更愿意为此计划慷慨解囊。在最终选定之前，我们将继续对欧洲、美国和日本候选地点进行综合分析。候选地点的地质结构、地形地貌和当地的法律法规，都会对建造方案的规划和造价评估产生影响。最终，ILC 的许多设计细节都将取决于对撞机的确切建造地点。

无论如何，只要科学家在 LHC 中发现了值得进一步探索的最佳研究目标，现有计划都可以让 ILC 全力以赴接手后续研究工作。在从事技术设计开发的同时，我们还将创建 ILC 的管理模式，让参与项目的物理学家人人都有发言权。这个雄心勃勃的承诺，已经在 ILC 的概念提出和设计研发阶段的全球合作中实现，我们希望在碰撞机未来的建造和运行过程中也能如此。SA

◀ 冷却模块把一串由铌制成的 ILC 真空腔浸在液氦里，把它们冷却到超导状态。图中的设备已经在德国汉堡的 DESY 研究中心进行了测试。



资料提供：《环球科学》
2008 年第 3 期

国际直线对撞机上的每个子系统都将挑战技术极限，面临重重工程难题。

扩展阅读

- ◆ More information about the design, technology and physics of the International Linear Collider can be found at:
- ◆ www.linearcollider.org
- ◆ www.linearcollider.org/gateway
- ◆ www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437
- ◆ www.fnal.gov/directorate/icfa/ITRP_Report_Final.pdf
- ◆ http://physics.uoregon.edu/%7EElc/wwstudy/lc_consensus.html