

漫谈对撞机

张 闯

在读这篇文章之前，大家可能在想：什么是对撞机？为什么要造对撞机？对撞机是什么样子的？中国有什么对撞机？未来将有什么对撞机？现在，就让我们大家一起谈谈这些问题。

(1) 什么是对撞机

顾名思义，对撞机是一种让某种东西在其中对撞的机器。在研究高能物理用的对撞机里，对撞的可不是一般的东西，而是被加速到接近光速的微小粒子。因此，这里说的对撞机就是加速带电粒子并在其中进行对撞的加速器。对撞机是探索物质微观世界的强大工具。为了说明这个问题，还是让我们从头谈起。

人类赖以生存的世界是物质的，而物质世界是无限的。图 1 展示了物质世界的尺度和学科的分野。这张图来自格拉肖十多年前应邀在高能物理研究所作的题为“高能物理的未来”的演讲。这位与温伯格和萨拉姆一起建立电弱统一理论而分享 1979 年诺贝尔物理学奖的哈佛大学著名教授，用一条蛇向听众讲述了物质从宇观的天体、宏观的物体、介观的团簇直到微观的粒子的生动故事。谈到这条“格拉肖蛇”的首尾相衔，他强调这并不意味着天体物理把粒子物理吞没，而是指在足够小和足够大的尺度下($\sim 10^{\pm 30}$ cm)，两者具有统一的理论，即电、弱、强和引力相互作用“合四为一”。

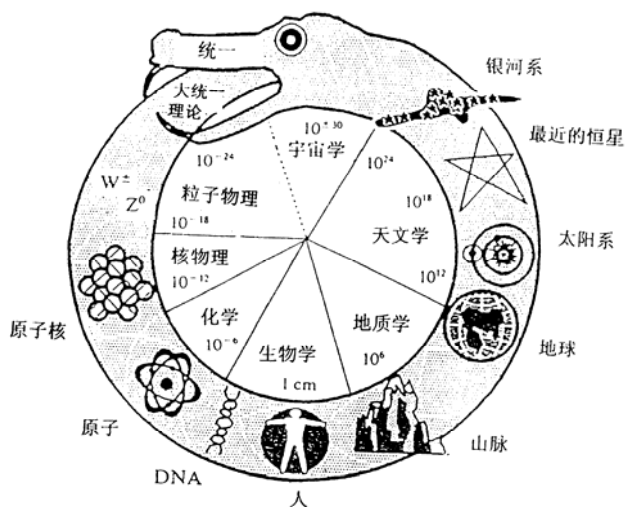


图 1 物质世界的尺度和学科的分野

作为一门基础科学中的前沿学科，粒子物理研究作为构成我们赖以生存的物质世界的“砖块”的“基本粒子”。粒子物理研究旨在回答一系列最基本的问题：宇宙间所有的物质与能量的基本要素是什么？我们所看到的物质的组成和性质及其转变规律是什么？上世纪以来，人类对于物质结构的认识，从原子分子层次、原子核层次，质子中子层次，逐步深入到强子内部，达到夸克和轻子的层次；了解到自然界的四种相互作用都是通过相应的媒介子传递的：光子传递电磁相互作用，中间玻色子 W^{\pm} 和 Z^0 传递弱相互作用，胶子传递强作用，而引力子传递引力作用；每一种粒子都有它们的反粒子。人们所熟悉的构成原子核的质子和中子，就是由上夸克 (u) 和下夸克 (d) 所组合而成的，称为第一代夸克，对应的第一代轻子是电子 (e) 和电子中微子 (ν_e)。后来又发现了第二代的奇异夸克 (s) 和粲夸克 (c)，对应的第二代轻子为 μ 子和 μ 中微子 (ν_{μ})。属于第三代的是底夸克 (b) 和顶夸克 (t)，对应轻子为 τ 子和 τ 中微子 (ν_{τ})。

“基本”粒子如此微小，如何对它们进行研究呢？粒子加速器是研究微观粒子的“显微镜”。用加速器作为“显微镜”研究物质微观结构，其分辨能力 λ (德波罗意波长) 与作为“探针”的粒子束流的能量 E 相关：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E\beta}$$

这里， p 为粒子动量， $h = 4.14 \times 10^{-24}$ GeV·s 为普朗克常数， c 为光速， β 为相对论速度，当粒子速度接近光速时 $\beta \approx 1$ 。我们把 h 、 c 和 $\beta \approx 1$ 代到上面的式子里，就得到一个非常简单的关系：探针束流能量 $E = 1.2 \times (\text{分辨率})^{-1} \text{ nm} \cdot \text{keV}$ 。从这个式子里，我们可以看出，用于探测物质结构的“探针”束流的能量愈高，其探测的分辨率也就愈高。因此，要探索更深层次的微观世界，研究更微小的粒子，就需要更高能量的加速器。这就出现了一个有趣的现象：研究的对象愈微小，需要的设备愈庞大。

用这个关系，我们就可以计算不同尺度的微小对象所需要的“探针”束流的能量和相应的观测工具了。计算的结果列在表 1 中。

表 1 微小对象的尺度和相应的观测方法

观测对象	尺度 (cm)	探针能量	实验工具
细胞/细菌	$10^{-3}\sim 10^{-5}$	0.1~10eV	光学显微镜
分子	$\sim 10^{-7}$	~1keV	电子显微镜同步辐射等
原子	$\sim 10^{-8}$	~ 10keV	同步辐射等
原子核	$\sim 10^{-12}$	>100MeV	低中能加速器
强子	$\sim 10^{-13}$	>1 GeV	高能加速器
夸克、轻子	$<10^{-16}$	>1TeV	对撞机

在上面的表格里，eV（电子伏）是粒子能量的单位，为电子通过 1V 电位差所得到的能量， $1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19}$ 尔格。而 $1\text{TeV}=1000\text{GeV} = 10^6\text{MeV} = 10^9\text{keV}=10^{12}\text{eV}=1.6 \times 10^{-7}$ 尔格。读者可能会问，1TeV 只有 0.16 微尔格，这不是一个很小的能量吗，为什么叫高能呢？实际上，对于微观粒子来说，这就是很高的能量了，要使每个粒子获得这么高的能量，需要十分庞大的加速器。而对撞机比普通的打静靶加速器更有效地达到高相互作用能量。

(2) 为何造对撞机

粒子物理深入到更微小的层次，也就是向“格拉肖蛇”的尾部挺进，就要求有更高能量的加速器。这里说的“更高能量”是指“打碎”粒子有效的能量，也就是质心系能量。打个比方，一辆汽车追尾撞向停在前面的另一辆汽车，往往是把车子推向前走，造成汽车的损坏比起两辆汽车迎面相撞来说要小得多。

著名的意大利物理学家费米在 1954 年曾提出一个质心系能量 E_{cm} 为 3TeV 的加速器设想。那时候，还没有对撞机的概念，下面我们将看到，为了得到 $E_{cm}=3\text{ TeV}$ 需要用 $E=5000\text{ TeV}$ 的束流与静止靶中的质子相互作用，如采用 2 Tesla 的主导磁场，5000 TeV 的同步加速器的偏转半径约为 8000 km，比地球的半径还要大。图 2 是这台地球加速器的构想图。当时估算这台地球加速器的造价为 1700 亿美元，需要 40 年建成。显然，这只是一个梦想。

对撞机能够使费米之梦成真。

高能物理需要寻找新粒子，研究新反应，就要尽可能把粒子“撞坏”、打开，因而关心的是质心系能量或有效作用能。在打静靶情况下，有效作用能

$$E_{C.M.} \approx \sqrt{2E_0E}$$

即大部分能量浪费在对撞粒子及其产物的动能上。这里， E_0 为粒子的静止能量。对撞机则可使束流的能量

得以充分利用：

$$E_{C.M.} = 2E$$

在 高能加速器中， E 远大于 E_0 ，因此对撞机可以大大提高有效作用能量。让我们再回到“地球加速器”的例子。美国费米国立加速器实验室(FNAL)的 Tevatron 已经实现了 0.9TeV 的质子和 0.9TeV 的反质子对撞，把质心系能量推进到 1.8TeV，离费米之梦的 3TeV 已近在咫尺。而正在欧洲核子中心(CERN)建造的大型强子对撞机 LHC 将能把质子加速到 7GeV 并进行对撞，质心系能量达 14GeV，对撞机的周长为 27km，远小于“地球加速器”的周长，预期在 2007 年底建成。



图 2 费米构想的地球加速器

对撞机赢得了有效作用能，但要获得能与打静靶加速器相比拟的反应事例率，必须提高对撞亮度(定义为事例率与反应截面的比值)，这对加速器物理和技术提出了许多挑战。

对撞机在粒子物理近 40 年激动人心的进展中崭露头角，已成为一种占主导地位的高能加速器。20 世纪 70 年代 J/ψ 粒子、 τ 轻子和 Υ 粒子等都是同时或相继在打静靶加速器和对撞机上获得的，而能量更高的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 以及近年发现的 t 夸克，则是在对撞机上找到并加以研究的。

(3) 多样的对撞机

挪威发明家 Rolf Wideröe 在 1943 年提出了对撞机的想法，在 20 世纪 50 年代，欧洲、美国和苏联的科学家提出了各自建造对撞机的计划。1962 世界上第一台对撞机，能量为 $2 \times 250\text{ MeV}$ 的正负电子对撞机 AdA 在意大利弗拉斯卡蒂实验室建成(图 3)。次年，美国和俄国也分别建成了正负电子对撞机 CBX ($2 \times 500\text{ MeV}$) 和 VEP-1 ($2 \times 130\text{ MeV}$)。在这以后，对撞机随着粒子物理的需求，如雨后春笋般地出现在世界各大高能物理实验室。表 2 是迄今为止对撞机家族的成员。

表 2 对撞机家族成员

国家	名称	类型	质心能量 (GeV)	建成时间
美国	CBX	e^-e^- , 双环	1.0	1963
	CEA	e^+e^- , 单环	6.0	1971
	SPEAR	e^+e^- , 单环	5.0	1972
	CESR	e^+e^- , 单环	12	1979
	PEP	e^+e^- , 单环	30	1980
	Tevatron	$p\bar{p}$, 双环	1800	1987
	SLC	e^+e^- , 直线	100	1989
	PEP-II	e^+e^- , 双环	10.6	1999
	RHIC	重离子, 双环	200/u	1999
俄国	VEP-1	e^+e^- , 单环	0.26	1963
	VEPP-2	e^+e^- , 单环	1.4	1973
	VEPP-4	e^+e^- , 单环	14	1979
CERN	ISR	pp, 双环	63	1971
	SppS	pp, 单环	630	1981
	LEP	e^+e^- , 单环	200	1989
	LHC	pp, 双环	14000	2007
德国	DORIS	e^+e^- , 双环	6.0	1974
	PETRA	e^+e^- , 单环	38	1978
	HERA	e^+p , 双环	160	1992
意大利	AdA	e^+e^- , 单环	0.5	1962
	ADONE	e^+e^- , 单环	3.0	1969
	DAΦNE	e^+e^- , 双环	1.02	1997
法国	ACO	e^+e^- , 单环	1.0	1966
	DCI	e^+e^\pm , 双环	3.6	1976
日本	Tristan	e^+e^- , 单环	60	1986
	KEKB	e^+e^- , 双环	10.6	1999
中国	BEPC	e^+e^- , 单环	5.0	1988

从表中可以看出, 按照对撞粒子的种类, 对撞机可分为电子对撞机 (e^+e^- 、 e^-e^- 或 $e^\pm e^\pm$), 质子-质子 (pp) 对撞机, 电子-质子对撞机 (ep) 和重离子对撞机等; 按照对撞机的形状, 又有环形 (单环或双环) 与线形之分。从能量和规模看, 第一台对撞机 AdA 质心系能量为 0.5GeV, 周长约 4m, 只有桌面大小; 而现代大型加速器的质心系能量最高为 14TeV, 周长 27 公里, 整个设施犹如一座小城镇, 造价高达 30 亿美元以上。

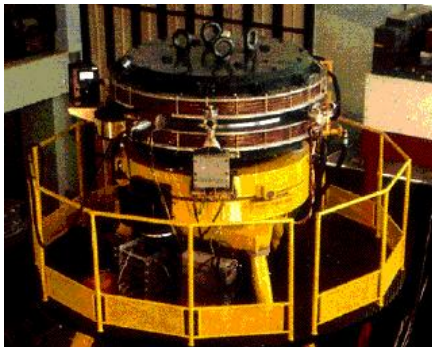


图 3 世界上第一台对撞机 AdA

从表 2 中可以看出, 电子对撞机共有 21 台, 是对撞机家族中的最大成员, 而且品种很多: 既有早期原理验证性对撞机 AdA、CBX、VEP-1 和 ACO 等, 又有规模最大的 LEP; 既有功勋卓越的 SPEAR (在其上发现了 J/ψ 粒子), 又有曾被寄予厚望的 PETRA、PEP、Tristan 和 CESR 等; 既有早年探索过高亮度的 DORIS 和 DCI, 又有先驱直线对撞机 SLC。近年来, 两台采用双环、能量不对称、多束团对撞的 B 介子工厂, 即美国的 PEP-II 和日本的 KEKB, 相继建成, 亮度达到 $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上, 成为目前世界上亮度最高的对撞机。它们正在大量“生产”B 介子, 深入进行 B 系统中的 CP 破坏等方面的研究。图 4 是 KEKB 隧道的照片。正负电子环在隧道里左右放置, 照片中央的是能量为 8GeV 的电子环, 其右侧是 3.5GeV 的正电子环。正负电子束在一个对撞点交叉对撞。照片近处是新安装的 Crab 高频腔, 它的作用是把夹角对撞变成对头碰撞。人们期望这个装置可以把 KEKB 的亮度再提高一倍以上。



图 4 KEKB 加速器隧道

上面已经谈过, 美国 FNAL 实验室的 Tevatron 的质心能量已达到 1.8TeV, 接近费米之梦的 3TeV。那么, 它是什么样子的呢? 图 5 是 Tevatron 的布局示意图。从图中可以看出, Tevatron 是一个多级的加速器复合体: 质子束由预注入器加速到 750keV, 送到一台 200MeV 的直线加速器, 注入到增强器并加速到 8GeV, 再输送到主注入器中, 加速到 120GeV, 一部分注入到 TEVATRON 中积累、储存, 另一部分通过束流输运线送到靶站, 打靶产生反质子, 并送到反质子环积累、冷却, 提高流强、减小发射度, 再送回主注入器加速到 120GeV, 最后注入到 Tevatron 中积累、储存, 并与质子对撞。在 Tevatron 的质子-反质子对撞中, 科学家在 1994 年发现了期待已久的 t 夸克。近年来, 科学家又对 Tevatron 做了改进, 进一步提高了亮度, 争取在 LHC 建成前在粒子物理上有新的发现。

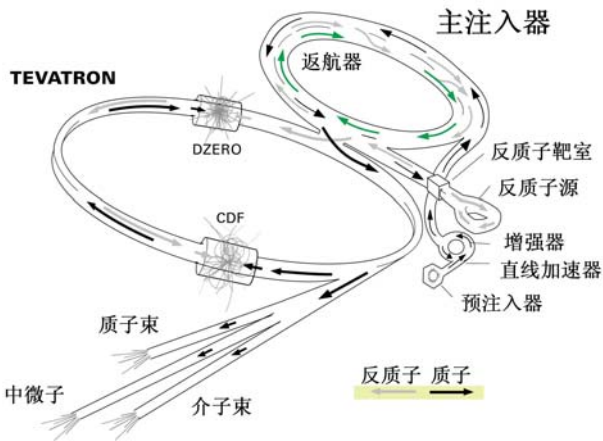


图5 Tevatron 的布局示意图

美国 BNL 的相对论性重离子对撞机 RHIC 于 1999 建成，是目前世界上唯一的一台重离子对撞机，它可以加速从质子 (250 GeV) 直到金离子 (100 GeV/核子) 的各种离子并使之对撞，图 6 是 RHIC 的鸟瞰。重离子从串列静电加速器 (Tandem) 出发，经过重离子传输线 HITL 送到直线加速器注入增强器，再送到交变梯度同步加速器 AGS 加速，最后通过 AGS 到 RHIC 的束流传输线 ATR 注入到 RHIC。在 RHIC 中，相互对撞的是同一种重离子，分别在两个独立的超导储存环中积累、加速、储存，并在六个对撞点交叉对撞。RHIC 旨在重现宇宙大爆炸后早期的现象，研究重离子对撞产生夸克-胶子等离子体等复杂的现象。

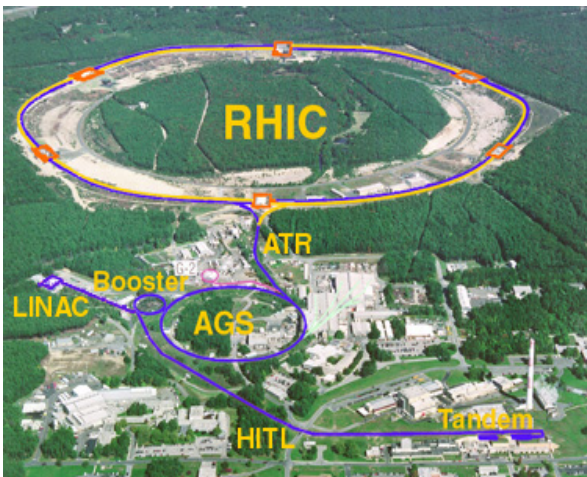


图6 RHIC 鸟瞰

德国同步加速器实验室 (DESY) 的 HERA 是世界上唯一的质子-电子对撞机，820GeV 的质子束和 30 GeV 的电子束在其中对撞，被称为探测质子结构的超级电子显微镜。图 7 是 HERA 隧道，照片上方是质子储存环，下方是电子储存环，电子束和质子束在四

个对撞区交叉对撞。HERA 于 1992 建成后即投入运行，取得了一系列物理成果。

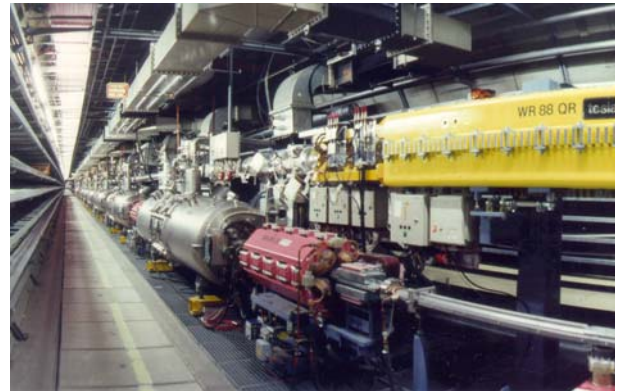


图7 HERA 加速器隧道

自从 1995 年美国的超级超导对撞机 SSC 计划被否决后，人们就把希望寄托在欧洲核子研究中心 CERN 的大型强子对撞机 LHC 上。图 8 是安装中的 LHC。



图8 安装中的 LHC

LHC 安装在周长为 27 公里的 LEP 的隧道中，从图中我们可以看到 LHC 弧区的超导磁铁，在全环共有 1232 块超导偏转磁铁，392 块超导四极磁铁，和许多其他磁铁和设备。LHC 可以把质子束加速到 7TeV，质心系能量大大超过了费米在 1954 年的梦想。LHC 是迄今为止人类建造的最大的加速器装置，它将在 2007 年底建成。建成后科学家将能用以洞察物质结构的更深层次，寻找他们梦寐以求的希格斯粒子，重现和观察大爆炸后早期宇宙的现象。

(4) 中国的对撞机

北京正负电子对撞机 (BEPC) 是一台工作在 τ -粲能区的高性能对撞机。BEPC 由四大部分构成：注入器与束流传输线、储存环，北京谱仪和同步辐射装置，

总体布局见图 9。

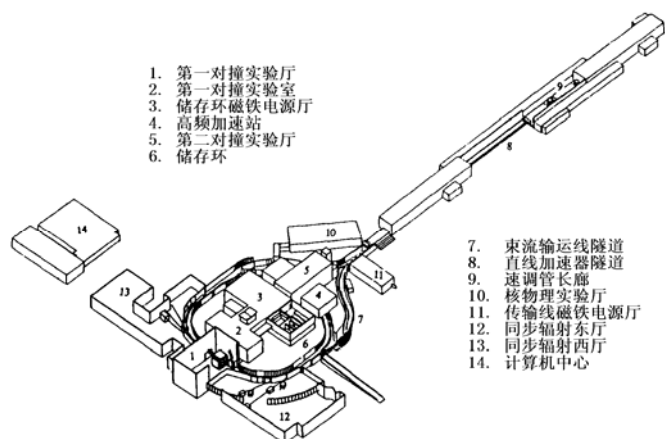


图 9 BEPC 总体布局

BEPC 象一支硕大的羽毛球拍，由北向南而卧。球拍的“把”——注入器是一台长 202m 的行波正负电子直线加速器。电子枪产生的电子束在盘荷波导加速管中，就象冲浪一样骑在微波场上不断得到加速。在电子束被加速到 150MeV 时，轰击一个约 1cm 厚的钨靶，由于级联簇效应产生正负电子对，将正电子聚焦、收集起来加速，就得到高能的正电子束。正负电子束流通过输运线注入到球拍的“框”——储存环中，积累、储存、加速、对撞。正负电子束流在储存环 240m 长的真空盒里做回旋运动，安放在真空盒周围的各种高精度电磁铁将束流偏转、聚焦、控制在环形真空盒的中心附近；高频腔不断把微波功率传递给束流使之补充能量并得到加速；上百个探头检测束流的强度、位置等性能；计算机通过各种接口设备，控制对撞机的上千台设备的工作。当正负电子束流被加速到所需要的能量时，对撞点两侧的一对静电分离器被关断，正负电子束流就开始对撞，安放在对撞点附近的北京谱仪（BES）开始工作，获取对撞产生的信息，北京同步辐射装置（BSRF）的光束线和实验站也可以开展各种实验。BEPC 储存环每隔 4-6 小时重新注入正负电子束流，重复以上过程。

BEPC 于 1988 年建成后在 τ -粲能区一直是性能在国际上领先的对撞机，在 1.89GeV 时的亮度为 $1.2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，取得了诸如 τ 轻子质量精确测量、R 值测量和新粒子 X (1835) 的发现等举世瞩目的物理成果。但从 2004 年开始，这一领先优势已让位于美国康奈尔大学的正负电子对撞机 CESRc。为了争夺在 τ -粲能区的物理成果，CESR 从 2000 年起就着手转入 τ -粲能区的研究，提出了 CESRc/CLEOc 的计划，把束流能量从原来的 5.6GeV 降低到 1.55-2.5GeV，在 1.89GeV

时的亮度已达到 $6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，超过了 BEPC。

面对 CESRc/CLEOc 的挑战，中国科学院调整了 BEPC 重大改造项目 (BEPCII) 的方案。科学家决定采用双环方案，即在 BEPC 隧道里安装两个储存环，正负电子在各自的环里运动，只在对撞区交叉对撞，其设计亮度比现有的 BEPC 高两个数量级，达到 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，为 CESRc 的 3-7 倍。为了将束团的数目从 BEPC 的 1 对增加到 BEPCII 的约 100 对，就必须让正负电子在各自独立的储存环里运动，而在对撞点相撞；为了减小将对撞点处的包络，需要在探测器内部安放磁场梯度很高的超导聚焦磁铁，还要采用能提供高加速电压和高微波功率的超导高频腔。内环与外环在南北两个对撞点相互交叉，正负电子各走半个内环和半个外环，在南对撞点水平交叉对撞。图 10 是 BEPCII 储存环的照片。



图 10 BEPCII 储存环

目前 BEPCII 设备的制造和安装已基本完成，正在进行束流调试，整个工程计划在 2008 年完成。BEPCII 建成后，有望在相当长的时间里保持在 τ -粲能区的国际领先地位，做出一批原创性的物理成果。

(5) 未来的对撞机

环型电子对撞机向更高能区发展遇到了同步辐射能量损失随束流能量的四次方增长的困难，为了向更高的能量和更深的层次进军，直线对撞机作为未来的高能对撞机而得到世界各国的重视。世界上第一台直线对撞机是美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的 SLC，它利用 SLAC 的 50GeV 的直线加速器。在 SLC 中，正负电子束流分别经过两个弧形传输线进入对撞区，实现了 $2 \times 50 \text{GeV}$ 的对撞，验证了直线对撞的原理。在这以后，世界上提出了多个直线对撞机的方案，形成了低温超导和常温常规两种加速结构之争。

鉴于直线对撞机造价昂贵，国际高能物理界逐渐达成了合作建造国际直线对撞机（ILC）的共识，成立了由世界各国高能物理学家组成的直线对撞机国际协调委员会（ILCSC）和 12 位专家组成的国际技术推荐委员会（ITRC）。在深入研究、反复比较的基础上，国际未来加速器委员会(ICFA)批准了 ITRC 和 ILCSC 的报告，并在北京召开的第 27 届国际高能物理大会期间，于 2004 年 8 月 19 日做出了一个决定，即下一代大型直线对撞机将采用低温超导加速技术。

在此后的两年多的时间里，各国科学家通力合作，按计划完成了 ILC 的参考设计报告。今年 2 月 8 日，ICFA 在中科院高能物理所向全世界正式公布了这个报告。根据参考设计，ILC 将建造在总长约 40 公里的地下隧道里，由两台大型超导直线加速器组成，分别将正负电子加速到 250GeV 的能量并进行对撞，质心系能量达到 500GeV，以后还可扩展到 1TeV；基本建设和加速器设备的造价估算为 67 亿美元，需要 2000 名科研和工程技术人员持续工作 5 年以上。图 11 是 ILC 的总体布局。

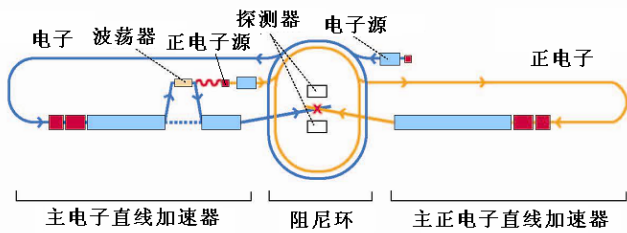


图 11 ILC 的总体布局

电子枪产生的电子束经过预加速到 5GeV，注入进周长约 6.7km 的电子阻尼环里。电子束在阻尼环里大约要回旋 1 万圈，使束团的尺寸变得更小、更致密，再送到主电子直线加速器。主加速器是一台由 8000 多个超导加速腔组成的总长为 12km 的庞大机器，加速梯度高达 31.5 MV/m，可以把电子束加速到 250GeV 的超高能量。在加速到大约 150GeV 时，电子束被送进一个波荡器后再回到主加速器，继续加速到 250GeV 并经过最终聚焦后与正电子束对撞。正电子的产生要更麻烦一些。上面谈到的 150GeV 的电子束在波荡器里辐射出的高能、高通量的光子，轰击到一个钨靶上产生正负电子对，把正电子束流收集起来，加速到 5GeV，注入与电子阻尼环安放在同一个隧道的电子阻尼环里。类似地，正电子束在阻尼环束团的尺寸变得更小后，送到主正电子直线加速器，一直加速到最终能量 250GeV 与电子束对撞。按照参考设计，每个束团里的约 200 亿个粒子的正负电子束被聚焦在

6.4 $\mu\text{m}\times 5.7\text{nm}$ 的微小截面里，以每秒钟 14000 次的频率在对撞点相撞，质心系能量达到 500GeV，对撞亮度 $2\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。在对撞区有两台巨大的探测器。这两台探测器将采用有所不同但互相补充的先进技术，从而能够记录下每一次对撞产生的每一个粒子，并能对难以确认的物理发现进行必要的交互性校验，确保万无一失。

在完成 ILC 的参考设计后，科学家将转入工程设计，并希望尽快得到各国政府的支持，计划在 2009 年开工建设，2015 年 ILC 建成并进行调束。图 12 是 ILC 的构想图。

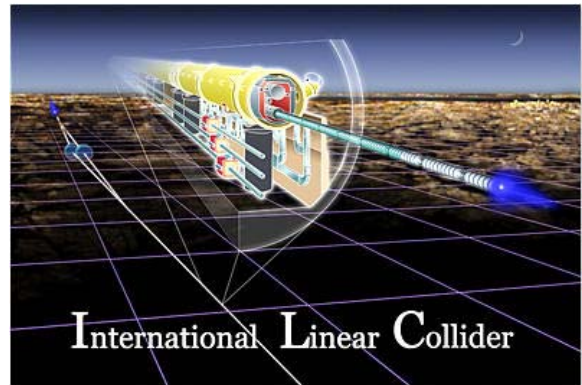


图 12 ILC 的构想

虽然，目前这还只是一张艺术性的畅想图，离开实际还有漫长的距离。但人们有理由相信，经过全世界科学家的不懈努力，ILC 终将能建成，用以开展对质量起源、暗物质、暗能量以及空间和时间的性质等基本问题的深入研究，揭示自然界的奥秘。

在直线对撞机中，用激光与高能正负电子作康普顿散射，再让所产生的高能 γ 光子对撞，这就是研讨中的光子对撞机。图 13 为 $\gamma\text{-}\gamma$ 对撞的示意图。两束入射极化激光分别与极化正、负电子束作康普顿背散射产生两束高能 γ 光子，此后正、负电子束被磁场偏走，而 γ 光子束在对撞点相互作用。

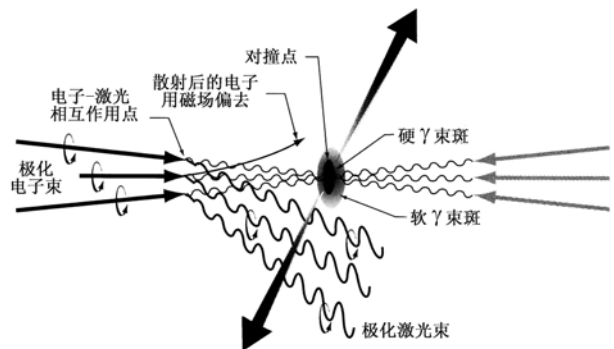


图 13 $\gamma\text{-}\gamma$ 对撞示意图

γ - γ 对撞机中的一个关键问题是光子的聚焦。大家知道，任何光学元件都无法将如此高能量又不带电荷的 γ 光子束聚焦。在 γ 光子对撞机里，这个“聚焦”是“自动”发生的。由于电子的能量（250GeV）远远高于入射光子的能量（ $\sim 1\text{eV}$ ），使背散射 γ 光子沿着几乎与电子完全相同的方向飞向对撞点。因此， γ 光子对撞机所需要的，是在对撞区正负电子的聚焦，而这正是直线对撞机设计的要求。

两束高能 γ 光子对撞最令人激动的物理工作是直接测量希格斯波色子衰变为两个 γ 的宽度。这是一种在不产生更高能量粒子的情况下精确检验标准模型、超弦模型、人工色模型以及其他模型的有效方法。采用 γ 光子对撞机还可以研究希格斯粒子衰变为 $b\bar{b}$ 或 ZZ 的反应等等。

另一种正在研究中的高能轻子加速器是 μ^+ - μ^- 对撞机。 μ 子和电子一样，也是一种轻子。由于 μ 子的质量约比电子大200倍，同步辐射损失小，容易在环形加速器中被加速到更高能量。大家知道， μ 子是一种不稳定粒子，其静止寿命只有大约 $2\mu\text{s}$ 。由于相对论效应，在被加速到高能时粒子寿命将以其相对论能量 γ （即总能量与静止能量的比值）倍因子提高，因而仍有可能得到足够的对撞时间。在 μ 子对撞机中 μ 子衰变时会产生大量中微子，可用于研究中微子物理。因此， μ^+ - μ^- 对撞机同时又是中微子工厂。图14是一台 $E_{cm}=4\text{TeV}$ 的 μ^+ - μ^- 对撞机布局示意图。

应（ $\gamma=20000$ ），这时 μ^+ - μ^- 的寿命增加到40ms，对撞次数约为 $N=\tau_{\mu}/T_{rev}\approx 1500$ ，可以进行高能物理实验。 μ^+ - μ^- 对撞机可以是 e^+ - e^- 直线对撞机的竞争对手，更可能是它以后的高能加速器，两者具有互补性。

研究正未有穷期。路漫漫其修远兮，科学家将上下而求索。

原文载于2007年第2期《现代物理知识》。

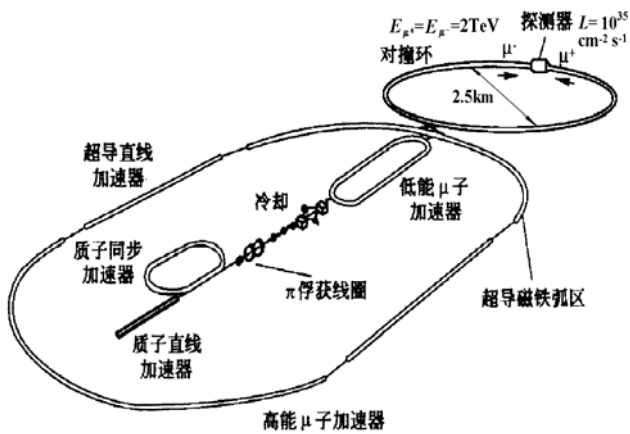


图14 μ^+ - μ^- 对撞机布局示意图

直线加速器产生的强流质子打靶产生高通量的 π 介子束，衰变后得到发射度很大的 μ^+ - μ^- 子束流，经螺线管磁场俘获、压缩后，由离子冷却装置减小其发射度，传输到常规和超导直线加速器串级快速加速到2TeV后，注入到周长约8km的 μ^+ - μ^- 储存环中积累、对撞。它的设计亮度为 $1\times 10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。由于相对论效