

下一代高能对撞机：环形正负电子对撞机 CEPC

杨海军^{1,†} 王逗² 高杰²

(1 上海交通大学物理与天文学院 李政道研究所 上海 200240)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2025-03-15 收到

† email: haijun.yang@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250802

CSTR: 32040.14.wl20250802

A next generation collider: the Circular Electron Positron Collider (CEPC)

YANG Hai-Jun^{1,†} WANG Dou² GAO Jie²

(1 Tsung-Dao Lee Institute, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 文章简要介绍了高能对撞机的发展历史，希格斯玻色子的发现及其重大科学意义，未来希格斯工厂的发展态势与战略布局，以及中国高能物理发展的历史机遇等。国际高能物理界普遍认为希格斯玻色子是打开新物理世界的重要窗口，正负电子希格斯工厂是优先级最高的下一代高能对撞机项目，它将以前所未有的精度测量希格斯粒子及标准模型等参数，在探索物质最深层次结构、暗物质、新物理、宇宙早期演化及物质起源等奥秘上发挥巨大作用，并有望将人类对宇宙的演化、时间与空间的认知达到全新的高度。国际上提出了环形正负电子对撞机(CEPC)、未来环形对撞机(FCC)、国际直线对撞机(ILC)、紧凑型直线对撞机(CLIC)、新直线加速器(CCC)及缪子对撞机等多个方案，其中由中国科学家牵头提出的环形正负电子对撞机 CEPC 项目在国际竞争中处于一定的优势地位。CEPC 将有力推动中国在基础物理研究、加速器和探测器等关键核心技术方面实现跨越式发展，从跟跑者向并跑者转变。

关键词 粒子物理标准模型，希格斯玻色子，高能正负电子对撞机，希格斯工厂，暗物质

Abstract This paper briefly recounts the history of high-energy colliders, the discovery of the Higgs boson and its significant scientific implications, the development and strategic layouts of future Higgs factories, as well as the historical opportunities for the development of high-energy physics in China. The international high-energy physics community widely acknowledges that the Higgs boson serves as a portal to new physics beyond the Standard Model. The world-wide consensus is that the electron-positron Higgs factory is the highest-priority next-generation collider, which will measure the properties of the Higgs boson and the Standard Model parameters with unprecedented precision. It will play a pivotal role in exploring the mysteries of the deepest structure of matter, dark matter, new physics, evolution of the early universe, the origin of matter, etc. It is expected to deepen our understanding of the universe, time, and space to a new level. Several next generation colliders have been proposed internationally, including the Circular Electron Positron Collider (CEPC), Future Circular Collider (FCC), International Linear Collider (ILC), Compact Linear Collider (CLIC), Cool

Cooper Collider(CCC), and muon colliders. Among them, CEPC, led by Chinese scientists, holds distinct competitive advantages, and should help China achieve leapfrog advances in fundamental physics, accelerators and detectors key technologies, transforming from a follower to a world leader in the field.

Keywords Standard Model of particle physics, Higgs boson, high-energy electron-positron collider, Higgs factory, dark matter

1 高能对撞机的发展历史

20 世纪初,随着人们对研究物质深层结构的兴趣,科学家们开始发展粒子加速器,利用高能粒子撞击原子核来研究原子核物理,早期的实验主要采用高能粒子轰击固定靶方式,即固定靶实验。随着微观结构研究进一步达到基本粒子物理层次,需要的能量也越来越高。为了克服固定靶实验时能量利用效率较低的缺点,20 世纪 50 年代,科学家提出了粒子对撞机的概念。国际上对撞机的建造时间和质心系能量之间的关系如图 1 和表 1 所示。

1960 年代至 1970 年代,随着加速器技术的成熟和粒子物理学研究的深入,特别是 B. Touschek 在意大利 Frascati 建成了 AdA 对撞机,在原理上验证了正负电子束对撞的可行性。第一代正负电

子对撞机,譬如美国斯坦福直线加速器中心 SLAC 的 SPEAR、俄罗斯的 VEP-1 等,以及质子—质子对撞机(如欧洲核子研究中心 CERN 的 ISR)等相继建成,这些设施为当时粒子物理学研究提供了强有力的工具,也为后续更高能量的对撞机建设积累了宝贵的经验。

1980 年代至 1990 年代,随着加速器技术的发展,特别是超导高频腔技术和超导磁体技术的发展,第二代环形对撞机如欧洲核子研究中心 CERN 的 SPS (900 GeV)、美国费米国家实验室的强子对撞机 Tevatron (1.96 TeV)和大型正负电子对撞机 LEP (91 GeV, 161—209 GeV)等相继建成。这些对撞机的能量大幅提升,为粒子物理学研究提供了更强大的工具,获得了多项重大的科学发现。譬如,1983 年在 SPS 对撞机上发现了 W 和 Z 玻色子;1995 年在 Tevatron 对撞机上发现了顶夸克。同一时期,1988 年,中国成功建造了国内首

台大科学装置——北京正负电子对撞机(BEPC)。2008 年完成重大升级改造后的 BEPCII,亮度提升了 2 个数量级,2013 年发现了 $Z_c(3900)$ 等一系列四夸克态粒子,目前在陶粲能区的对撞机中处于国际领先地位。

2008 年,欧洲核子研究中心 CERN 的大型强子对撞机(LHC,束流能量最高 7 TeV,图 2)正式启动运行,成为当今世界上规模最大、能量最高的强子对撞机。LHC 对撞机上主要有四个大型实验探测器,ATLAS、CMS、LHCb 和 ALICE,还有 TOTEM、LHCf、

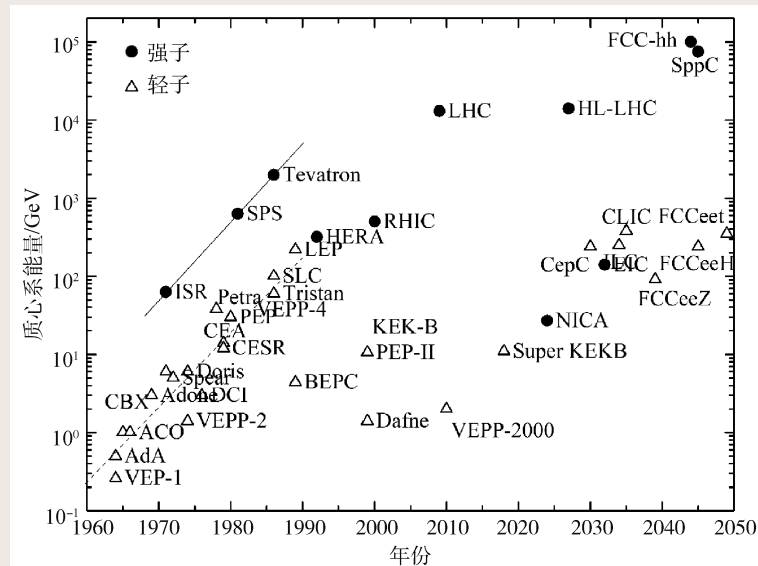


图1 对撞机建造时间与质心系能量之间的关系图

FASER、MoEDAL 等专门的实验装置。LHC 实验由全球 80 多个国家，500 多所大学和研究机构，由上万名科学家、研究人员和工程师紧密合作，历时近十年完成，它是国际大科学装置合作的成功典范。LHC 的成功运行极大地推动了粒子物理学的发展，2012 年，ATLAS 和 CMS 合作组共同宣布发现了希格斯玻色子^[1, 2]，揭示了基本粒子质量起源之谜，为标准模型补齐了最后一块拼图^[3-5]。希格斯玻色子的发现是高能物理发展的重要里程碑，美国《科学》杂志也将其评为 2012 年度最重大的科学突破。两位理论家 Francois Englert 和 Peter Higgs 因为在 1964 年独立提出了希格斯机制而荣获 2013 年度诺贝尔物理学奖。

2 高能量前沿的发展趋势

粒子物理学的标准模型在过去半个多世纪中取得了巨大的成功，极大地推动了人类对物质最深层结构的认知与理解。标准模型的基本粒子可分为两大类(图 3)：一类是组成物质的费米子(包括夸克和轻子)，另一类是传递粒子之间相互作用力的传播子(如 W 玻色子、Z 玻色子、光子和胶子)。标准模型理论涵盖了自然界的三种基本相互作用力，即电磁、弱和强相互作用。可以观察到，这些相互作用力的传播子都是自旋为整数的玻色子：电磁相互作用力的传播子是光子，弱相互作用力的传播子是 W 和 Z 玻色子，强相互作用力的传播子是胶子，它们的自旋均为 1。此外，传递引力的传播子——引力子，理论上自旋为 2。希格斯玻色子作为标准模型中唯一自旋为零的基本粒子，是一种全新的相互作用力传播子^[4]，关于它的性质我们了解甚少，这为探索未知物质世界提供了新的实验手段。

根据大量的天文观测数据表明，宇宙中可见

表 1 国际上建成的正负电子对撞机和强子对撞机

运行年份	对撞机名称	实验室和国家	长度/m	束流	最高束流 能量/GeV	亮度/ (10 ³⁰ cm ⁻² ·s ⁻¹)
1961—1964	AdA	Frascati, 意大利	3	e ⁺ e ⁻	0.25	不详
1962—1967	VEP-I	BINP, 俄罗斯	2.7	e ⁺ e ⁻	0.13	0.003
1963—1967	CBX	Stanford, 美国	12	e ⁺ e ⁻	0.5	0.0017
1967—1970	VEPP-2	BINP, 俄罗斯	11.5	e ⁺ e ⁻	0.13	0.02
1967—1972	ACO	Orsay, 法国	22	e ⁺ e ⁻	0.5	0.1
1969—1993	ADONE	Frascati, 意大利	105	e ⁺ e ⁻	1.5	0.6
1971—1974	CEA	Cambridge, 美国	225	e ⁺ e ⁻	3.0	10
1972—1988	SPEAR	SLAC, 美国	234	e ⁺ e ⁻	2.5	12
1973—1993	DORIS	DESY, 德国	288	e ⁺ e ⁻	6.0	33
1974—2000	VEPP-3	BINP, 俄罗斯	17.8	e ⁺ e ⁻	0.7	100
1977—1984	DCI	Orsay, 法国	95	e ⁺ e ⁻	1.8	1.4
1978—1986	PETRA	DESY, 德国	2304	e ⁺ e ⁻	19	23
1979—2008	CESR	Cornell, 美国	768	e ⁺ e ⁻	6.0	1100
1979—至今	VEPP-4	BINP, 俄罗斯	366	e ⁺ e ⁻	7.0	50
1980—1988	PEP	SLAC, 美国	2200	e ⁺ e ⁻	15	59
1986—1995	Tristan	KEK, 日本	3016	e ⁺ e ⁻	32	140
1988—2004	BEPC	IHEP, 中国	240	e ⁺ e ⁻	2.5	8
1989—1998	SLC	SLAC, 美国	4000	e ⁺ e ⁻	49	2.8
1989—2000	LEP	CERN, 瑞士	26659	e ⁺ e ⁻	104.5	100
1998—至今	DAFNE	Frascati, 意大利	98	e ⁺ e ⁻	0.7	453
1998—2008	PEP-II	SLAC, 美国	2200	e ⁺ e ⁻	3.1×9.0	12069
1999—2009	KEKB	KEK, 日本	3106	e ⁺ e ⁻	3.5×8.0	21083
2006—至今	VEPP-2000	BINP, 俄罗斯	24.4	e ⁺ e ⁻	1.0	100
2008—至今	BEPC-II	IHEP, 中国	240	e ⁺ e ⁻	2.5	293
2016—至今	SuperKEKB	KEK, 日本	3106	e ⁺ e ⁻	4.0×7.0	8×10 ⁵ (设计)
1971—1981	ISR	CERN, 瑞士	2666	pp	31	不详
1976—1985	SPS	CERN, 瑞士	6900	p $\bar{p}$	450	25
1983—2011	Tevatron	Fermilab, 美国	6300	p $\bar{p}$	980	460
1992—2007	HERA	DESY, 德国	6300	e ⁻ p	27.5×920	130
2000—至今	RICH	BNL, 美国	3800	AuAu	200	200
2008—至今	LHC	CERN, 瑞士	26659	pp	7000	7×10 ⁴

的物质仅占宇宙组分的 5% 左右，另外还有大约 27% 的暗物质和 68% 的暗能量(图 4)。暗物质主要通过天文观测中的引力相互作用推断其存在，国际上有大量的各类实验对暗物质进行探索。经过数十年的努力，除了引力作用，人们依然没有直接探测到暗物质与普通物质相互作用的实验证据。一方面需要持续不断地提高暗物质探测的灵敏度，另一方面要积极寻找探索暗物质的新突破口。希格斯玻色子作为基本粒子质量的来源，它可能与暗物质相互作用并赋予其质量；人们期待通过希格斯玻色子这座桥梁或探针来寻找暗物质。同时，希格斯玻色子场的势能分布跟宇宙早期演化过程中的电弱相变、宇宙中的正反物质不对称之谜，

及超出标准模型的新物理现象等重大前沿科学问题紧密相关。因此，国际高能物理学界普遍认为希格斯玻色子是打开新物理世界的重要窗口。

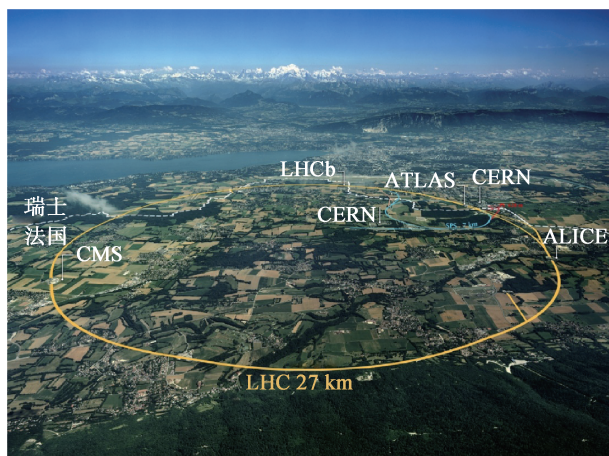


图2 欧洲核子研究中心CERN的大型强子对撞机(LHC)

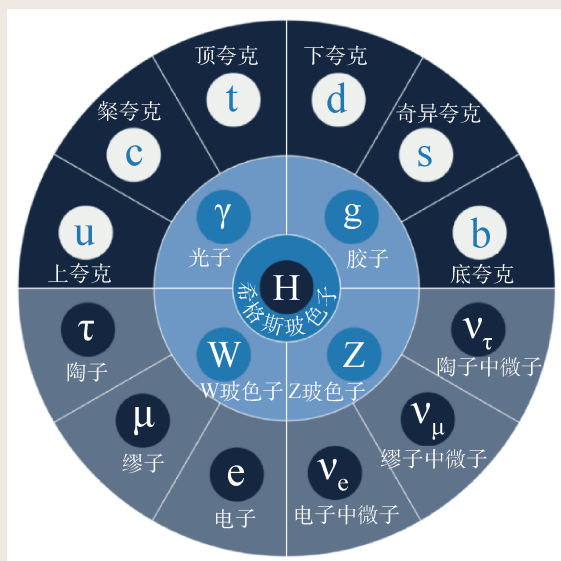


图3 标准模型中的基本粒子

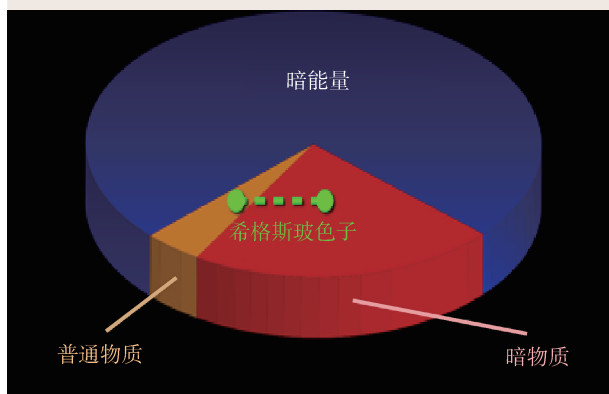


图4 宇宙中普通物质、暗物质和暗能量之间的大致组分

考虑到大型强子对撞机LHC利用两个高能质子的对撞产生希格斯玻色子，质子内部有夸克和胶子等部分子，对撞时会产生大量的强子过程本底，难以精确测量希格斯玻色子的性质，特别是对占主导的希格斯强子衰变末态的测量变得非常困难。为了大幅提高希格斯玻色子性质的测量精度和探索新物理的灵敏度，必须在相对“干净”的对撞环境下产生大量的希格斯玻色子。如果未来高能对撞机对希格斯玻色子的测量精度好于百分之一，甚至达到千分之一的水平，对应可探测的新物理能标就能达到10 TeV或以上，其新物理的发现能力将超越目前正在运行的LHC升级版——高亮度LHC (HL-LHC)一个量级。

根据当前的加速器技术水平，利用高能正负电子对撞机是最自然，也是最优的选择。近年来，国际上提出了一系列大型正负电子对撞机，以及缪子对撞机等方案作为未来的“希格斯工厂”，如图5所示。欧洲核子研究中心CERN提出了未来环形对撞机方案(FCC，周长约91 km，图5(b))^[6]，兼具正负电子对撞、强子对撞或者电子—质子对撞等模式。日本牵头的国际直线对撞机(ILC，长度约15—20 km，图5(c))计划^[7]，把原先设计的高对撞质心系能量降低到250 GeV，使之可以成为希格斯工厂。欧洲CERN还牵头提出了具有更高对撞能量的紧凑型直线对撞机(CLIC，长度11—50 km，图5(e))^[8]。2021年，美国提出了可作为希格斯工厂的新直线加速器概念(CCC，长度约8—10 km，图5(d))，它比ILC具有更高的加速梯度，可以大幅缩减直线加速器的长度。

此外，国际上也提出了缪子对撞机的概念。一方面相比于传统的电子对撞机，缪子对撞机在能量效率和本底方面具有显著优势，另一方面，由于缪子的寿命很短(约2.2 μs)，具有很快衰变的缺点。无法长期储存的特点使得缪子对撞机面临诸多关键技术难题和挑战，包括如何高效产生和冷却缪子、在极短的时间内完成缪子的加速和聚焦、储存和传输，直到对撞等一系列复杂过程。目前缪子对撞机处于早期研发阶段，核心技术还不成熟。因此，下一代的“希格斯工厂”方案主

要集中在环形或直线正负电子对撞机上。

在未来高能前沿对撞机方案的角逐中，中国科学家高瞻远瞩，积极主动把握历史机遇，在2012年9月率先提出了环形正负电子对撞机(CEPC，周长约100公里，图5(a))作为希格斯粒子工厂的概念。更长远的规划还考虑在同一隧道中建造超级质子—质子对撞机(SPPC)，质心能量高达100—125 TeV，远超当今世界能量最高的对撞机LHC。下面对中国牵头的CEPC项目做简要介绍。

3 CEPC项目简介

3.1 CEPC科学目标与意义

CEPC的科学目标是以希格斯，Z、W玻色子和顶夸克等基本粒子为突破口寻找新物理。作为下一代超大型对撞机，CEPC的新物理发现能力将超越高亮度HL-LHC一个量级。基于四百万干净的希格斯事例样本，CEPC将希格斯玻色子的主要衰变分支比测量到1—0.1%的相对精度，探索10 TeV甚至更高能标下的新物理。根据自然性原理，当今有多个新理论如额外希格斯理论、复合希格斯理论、超对称理论等预言的新物理有可能在这个能标之内，有望被CEPC发现。CEPC将对一些在LHC上难以测量的强子衰变过程，譬如希格斯衰变到粲夸克对、奇异夸克对和胶子对等做精确测量。CEPC还可利用希格斯门户等机制发现暗物质。通过研究希格斯场的势能曲线，CEPC可探索

早期宇宙相变，进而理解宇宙中物质与反物质的不对称性和物质起源等。CEPC还可通过希格斯玻色子的稀有及不可见衰变直接搜索新物理，灵敏度可达万分之一水平，远超HL-LHC实验。

除了在希格斯能区(240 GeV)的实验以外，CEPC还将在W玻色子能区(160 GeV)和Z玻色子能区(91 GeV)开展实验。基于上亿W玻色子和万亿的Z玻色子事例样本，CEPC可展开电弱精确测量，包括W和Z玻色子的质量、宽度、弱混合角等，相对于目前实验精度可提升1—2个量级。通过阈值扫描，CEPC可将W玻色子质量测量精度提升1个量级，好于1 MeV，不仅能确认CDF实验观测到的W玻色子超重现象，并可结合希格斯粒子性质测量，挖掘出其背后的新物理，开展味物理和QCD研究。CEPC在含中性末态、不可见末态等测量上具有独特优势，可以确认味物理反常、缪子反常磁矩等，与其他味物理实验互补，

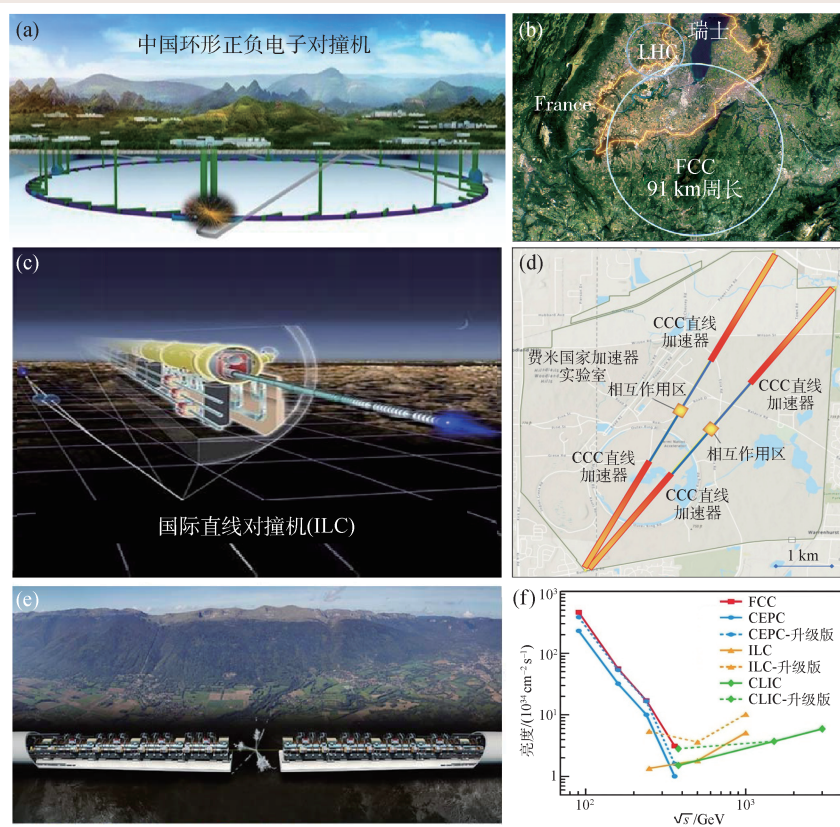


图5 正负电子对撞机CEPC(a)，FCC(b)，ILC(c)，CCC(d)，CLIC(e)，及其对撞亮度与质心系能量的关系(f)

探测极高能标下的新物理。CEPC 实验以前所未有的测量精度，直接对高精度理论计算提出空前的挑战和需求，精确测量结果也会引发量子场论高阶计算方法和理论本身的突破。上述问题都是全球高能物理学界普遍关心的热点和难题，具有重要的科学意义。因此，高精度测量是实现上述科学目标的关键。

CEPC 团队在 2015 年完成初步概念设计报告，进一步完善后在 2018 年 11 月发布了 CEPC 概念设计报告^[9]。2023 年 12 月，CEPC 团队完成并发布了加速器技术设计报告^[10]，吸引了全球 38 个国家 278 个研究机构的 1100 余名研究人员参与，其中中国有 159 个研究单位参与研发和署名。CEPC 加速器技术设计报告通过了国际加速器领域专家组的评审，并获得高度认可。

3.2 CEPC 加速器总体设计

CEPC 周长约为 100 公里，有两个对撞点(IP)，设计了四种运行能量模式(Higgs, Z, W 和 $t\bar{t}$)。初步设想是“10-2-1-5”运行计划：首先将 CEPC 作为希格斯工厂(约 240 GeV)运行 10 年，正负电子对撞产生约四百万个希格斯玻色子；然后运行 2 年作为超级 Z 工厂(约 91 GeV)，产生四万亿个 Z

玻色子；接着运行 1 年作为 W 工厂(约 161 GeV)，产生大约一亿个 W 玻色子；最后，CEPC 将升级到 $t\bar{t}$ 能量运行(约 360 GeV)，产生约 60 万个顶夸克对。在同一个隧道里，预留了未来建造 SPPC 的空间。

图 6(a)显示了 CEPC 加速器的整体结构示意图，其中包括两个对撞点，图 6(b)为 6 m 宽的隧道横截面示意图，在隧道内 SPPC 与 CEPC 可以并排放置，增强器和对撞环在内侧，SPPC 在外侧。为了提升希格斯工厂的高亮度和性价比，2015 年，团队提出了采用部分双环布局 and 蟹腰方案，其中希格斯和 $t\bar{t}$ 能量模式的电子和正电子束共享一个超导高频系统。在 Z 和 W 能量运行期间，通过旁路束线，对撞环被转换为完全的双环布局，电子和正电子束各自拥有自己的超导高频系统。CEPC 在希格斯与 W, Z, $t\bar{t}$ 兼容运行方面有独特的设计，可在不改变硬件的情况下灵活切换对撞能量，为物理研究及高精确测量提供了强有力的支持。

CEPC 的亮度主要受同步辐射功率限制，基线设计方案中单束的同步辐射功率为 30 MW，可升级至 50 MW。在基线设计中，希格斯运行模式下的亮度为 $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，储存 268 个束团，而在 WW 模式下，亮度为 $1.6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，储存 1297 个束团，两者均使用磁场强度为 3 T

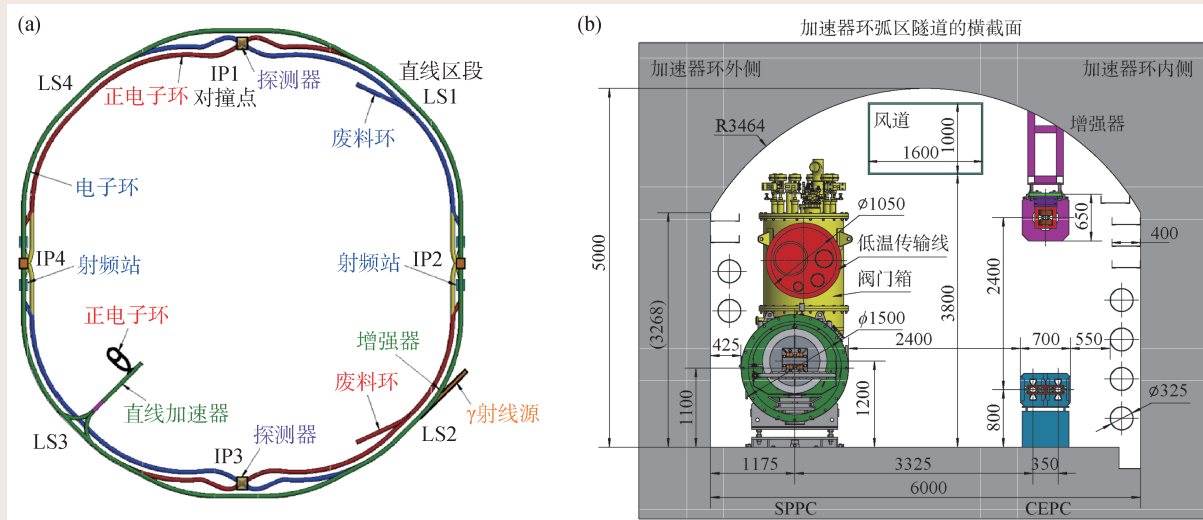


图6 CEPC 加速器整体结构示意图(a)和隧道横截面示意图(b)。在图(a)中，CEPC 加速器设计包含两个对撞点，同时为将来的超级质子对撞机 SPPC 预留了两个对撞点。图(b)中数字的单位为毫米

的探测器螺线管磁铁。在Z模式下，亮度为 $1.1 \times 10^{36} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，有11934个束团，探测器螺线管采用2 T运行模式。受加速器注入引出时序及探测器电子学响应时间的限制，束团在Z能量模式下的时间间隔最小，为23 ns，其他三种能量运行模式下的束团间隔设计为23 ns的整数倍。

对撞机周长是CEPC的重要参数之一。基于相关的模型，团队计算了对撞机瞬时亮度、建设成本及运行成本与周长之间的关系。考虑到目标粒子的产额，可以得到CEPC总成本及每个粒子的成本。如果只考虑希格斯和Z运行，最佳周长为80公里；如果还要兼顾高能区顶夸克对的研究，以及未来超级质子对撞机SPPC的能量潜力问题，100公里周长是最佳选择^[11]。

CEPC加速器总体结构包括一个30 GeV的直线加速器注入器、一个周长为100公里的增强器和两个周长为100公里的对撞环^[10]，增强器和对撞环位于同一地下约100 m的隧道中。直线加速器建造在接近地面的隧道中，它将电子和正电子束的能量加速至30 GeV，然后注入到增强器中，后者将束流能量提升至对撞环注入所需要的能量后，再分别注入到两个对撞环中。直线加速器中包含一个能量为1.1 GeV的小型环形加速器(150 m周长)，即正电子阻尼环，用于降低正电子的束流发射度。

在对撞环中有两个直线段区域，用于放置两个探测器，称之为对撞区。为了尽可能提高亮度，CEPC采用了精心设计的大Piwinski角碰撞的蟹腰方案。在这个区域以及整个环形加速器中，加速器磁聚焦元件如偏转铁、四极铁和六极铁等参数都经过精心优化。加速器—探测器接口(MDI)问题是CEPC和其他未来高能对撞机中最复杂和具有挑战性的问题之一。MDI区域位于交互区内，长度约为14 m (距离对撞点 $\text{IP} \pm 7 \text{ m}$)，需要安装来自探测器系统和加速器组件的许多关键设备，包括探测器、反抵螺线管、亮度检测器、交互区束流管、超导四极铁、低温模组、束流位置监测器和波纹管等。

CEPC团队对加速器关键部件及核心技术进行了十余年的攻关，取得了一系列重要成果和突

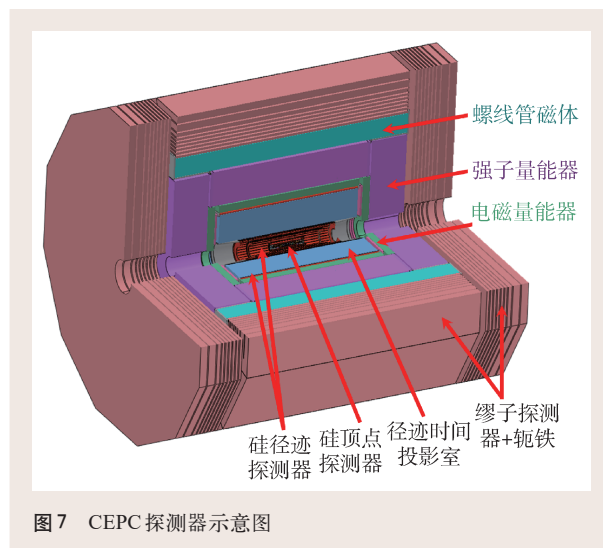


图7 CEPC探测器示意图

破。根据加速器部件的造价占比，其中90%加速器关键部件样机的性能已经达到或超过CEPC设计指标，另外10%关键部件的样机正在研制中。部分加速器关键技术研制已达到了国际先进水平，并与国际顶尖实验室取得的性能进行比较。例如，1.3 GHz (9腔)和650 MHz (2腔和1腔)多种类型超导高频加速腔的研制取得了重要突破，加速梯度和 Q 值等关键性能参数均达到国际领先水平。团队在国际上率先开始高效速调管的研制，2024年的测试效率为77%，已达到当前国际上最高效率，同时正在研制多注速调管，设计效率达80.5%。团队完成了大尺寸、高精度、极弱场二极管磁铁以及高精度双孔径磁铁等关键磁铁的预研；真空盒镀膜技术突破瓶颈，并在第四代同步辐射装置高能光源上应用；电源和快脉冲磁铁技术也达到国际先进水平。

3.3 CEPC探测器总体设计

CEPC关键物理目标的高精度测量对探测器的设计提出了极高要求和重大挑战，需要采用最先进的粒子探测技术设计各子探测器系统，并对探测器整体性能进行优化。CEPC探测器从对撞点开始从内往外分别为：硅顶点探测器、硅探测器与气体探测器相结合的径迹系统、飞行时间探测器、电磁量能器、强子量能器、缪子探测器及磁铁系统(图7)。

硅像素顶点探测器主要用于带电粒子径迹的精确测量,采用CMOS图像传感器技术的新型硅像素芯片可同时满足高空间分辨率(约 $5\text{ }\mu\text{m}$)、超低物质量、低功耗与高计数率的物理要求,可准确识别底(粲)夸克的次级衰变顶点。硅径迹探测器和时间投影气体探测器(TPC)的组合可以显著提升带电粒子径迹和动量的测量精度,并有助于多种粒子的鉴别。利用新型半导体探测技术——低增益雪崩探测器(LGAD)作为高时间分辨率的TOF探测器(时间分辨率约 30 ps)能够提高粒子识别能力,改善粒子动量和顶点分辨率,提高信噪比。

考虑到希格斯、Z和W玻色子的主要衰变末态为强子,提高强子喷注的能量分辨率对实现高精度测量和新物理探索目标至关重要。CEPC采用支持粒子流算法(PFA)的全吸收晶体电磁量能器和基于高密度闪烁玻璃的强子量能器以追求尽可能好的光子能量分辨、强子能量分辨、喷注能量重建等,设计要求喷注能量分辨率要达到 $30\%/\sqrt{E}$,该指标是在当前LHC实验量能器性能的基础上提升约一倍,极具挑战性。最外层的缪子探测器基于塑料闪烁体,可以精确探测缪子的动量和位置。

CEPC在先进探测器的研发上取得了重要进展。高空间分辨的像素探测器、时间投影室、高颗粒度成像型量能器等均研制出技术样机,并在CERN和德国DESY等实验室开展了一系列束流实验进行性能验证。通过激光和束流测试,硅像素芯片实现了 $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ 的空间分辨率,达到国际先进水平。团队成功研制出目前时间投影室的最低功耗读出芯片之一。为了追求更好的末态粒子分辨和喷注能量分辨,团队设计与粒子流算法匹配的高粒度晶体电磁量能器和均闪烁玻璃强子量能器,为国际首创。团队在抗辐照集成电路芯片、软件工具及框架、重建算法等方面的研究能力也达到世界先进水平。

4 国际竞争态势

2013和2016年,中国物理学会高能物理分会召开了两次香山会议,专家组一致认为“环形正负电子对撞机CEPC项目是我国基于加速器高能

物理发展的最佳途径和重大历史机遇”。2020年,欧洲粒子物理战略规划更新(ESPPU)明确提出“正负电子希格斯工厂是优先级最高的下一代对撞机”。2022年,国际未来加速器委员会(ICFA)重申了“希格斯工厂是实现粒子物理重大科学目标的最优先任务”。2023年,美国粒子物理战略规划P5报告把揭示希格斯玻色子的奥秘作为六大基础科学驱动力之一^[12]。经过十余年的深入研讨,国际高能物理学界达成共识,正负电子希格斯工厂是最高优先级的下一代高能对撞机项目,对实现粒子物理重大科学目标至关重要。

与直线对撞机相比(ILC和CLIC),环形正负电子对撞机CEPC和FCC-ee在希格斯、W和Z能区对撞时具有显著优势,其亮度和有效事例产额将超过直线对撞机2—3个量级,在标准模型参数超高精度测量及新物理探索方面拥有巨大的优势。相对于直线对撞机,环形对撞机具有多个对撞点,可同时进行多个实验,显著提升实验的灵敏度和可靠性。而直线对撞机的优势则在于能够达到更高的质心能量范围,甚至达到TeV量级。因此,环形正负电子对撞机与直线对撞机可以互为补充。

与FCC-ee相比,CEPC拥有造价、时间以及设计灵活性等方面的优势。FCC-ee加速器的基本设计参数及性能和CEPC相仿,但CEPC加速器集中优化在希格斯和Z、WW能区(CEPC在WW玻色子对产生阈值下运行),单个对撞点的设计亮度比FCC-ee更高;而FCC-ee则优化在希格斯及更高的能区,顶夸克对产生亮度比CEPC要更胜一筹。2023年12月,CEPC正式发布加速器技术设计报告(TDR)^[11],研究进度早于FCC-ee。CEPC加速器的创新设计使得运行期间可以在希格斯、Z、WW和 $t\bar{t}$ 等不同能区灵活切换,无需改变加速器硬件设施。根据当前的估算,CEPC在造价上比FCC-ee具有明显优势。为了减少未来大型对撞机的碳排放,CEPC正在研究各种节能减碳对策,并将朝着实现绿色加速器的方向实施,例如,高效率速调管、高Q值超导高频腔、永磁铁、废热回收、可再生能源、分布式储能系统和直流电源系统等。据估算,CEPC单个希格斯玻色子的碳排放量在国际主流对撞机方案中是最低的^[13]。

由于CEPC和FCC-ee在设计参数、性能和规模上相似,使得两个项目构成了直接的竞争关系。在欧洲粒子物理战略规划形成的共识下,CERN积极向FCC的可行性研究和关键技术研究投入了数亿瑞士法郎的研发经费,以期在HL-LHC升级和运行之后建设FCC-ee。2024年,美国与CERN签署合作协议共同大力推动FCC可行性研究。欧美国家的应对举措不断挤压CEPC项目的竞争优势。因此,当前CEPC需要大力加强核心关键技术研发,攻坚克难,尽早进入工程建设的就绪状态,在国际竞争中保持一定的领先优势。如果CEPC能在2035年前后建成,预计比FCC-ee项目提前10年左右开始运行和物理取数,取得先发优势,将使我国在高能物理领域跻身国际领先的行列。

5 结语与展望

在高能物理领域,粒子对撞机的发展历史是一部科技进步和科学探索的历史,涉及多个阶段

的重要科学突破。从最初的理论构想到现代的大型强子对撞机(LHC),每一步都标志着人类对物质最深层次结构探索的不断深入和取得的重大成就。

希格斯玻色子发现后,国际高能物理学界已达成共识,正负电子希格斯工厂是最高优先级的下一代对撞机项目,对实现粒子物理重大科学目标至关重要。这对于我国来说是一次重大的历史机遇。建造CEPC希格斯工厂承载了我国高能物理学家的期盼和梦想,这也是实现中华民族伟大复兴“中国梦”的重要组成部分。建设一个以CEPC超级大科学装置为核心的国际科学城,以前所未有的精度测量希格斯粒子及标准模型等参数,在探索物质最深层次结构、暗物质、宇宙早期演化及物质起源等奥秘上发挥巨大作用。CEPC将有力推动我国在基础物理研究、加速器和探测器等关键核心技术方面实现跨越式发展,从跟跑者向并跑者转变,乃至最终成为世界的引领者,并有望将人类对宇宙的演化、时间与空间的认识提到全新的高度。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 1
- [2] CMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 30
- [3] Englert F, Brout R. Phys. Rev. Lett., 1964, 13(9): 321
- [4] Higgs P. Phys. Rev. Lett., 1964, 13(16): 508
- [5] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Phys. Rev. Lett., 1964, 13(20): 585
- [6] FCC CDR. <https://fcc-cdr.web.cern.ch/>
- [7] ILC TDR. <https://linearcollider.org/technical-design-report/>
- [8] CLIC CDR. <https://clicdp.web.cern.ch/>
- [9] CEPC Study Group. 2018, arXiv: 1809.00285; 2018, arXiv: 1811.10545
- [10] The CEPC Study Group. Radiation Detection Technology and Methods, 2024, 8(1), DOI: 10.1007/s41605-024-00463-y
- [11] Wang D *et al.* JINST, 2022, 17: P10018
- [12] US P5 Report. <https://www.usparticlephysics.org/2023-p5-report/>
- [13] Wang D *et al.* Radiation Detection Technology and Methods, 2025, <https://doi.org/10.1007/s41605-025-00535-7>

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用,均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649029。

《物理》编辑部

作者服务



由基于意得辑的APS提供

我们致力于为您提供一系列的出版前和出版后的作者服务,以确保您的作品能够以最佳质量呈现给合适的受众群体,并产生预期的影响。



英语语言编辑

提升您的论文的语言表达、结构及清晰度,使其可以满足顶级期刊的发表要求。



翻译服务

我们可以将汉语、日语、韩语、葡萄牙语和西班牙语翻译为高质量的英语。



化繁为简、精辟总结

让复杂的物理学知识变得简单且具备吸引力。



扫描二维码到我们的网站
一睹为快吧!