

环形正负电子对撞机：物理、技术以及现状

靳松 娄辛丑 阮曼奇[†] 徐庆金 朱宏博

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2019-01-31 收到

[†] email: manqi.ruan@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190302

The Circular Electron Positron Collider: its physics, technology, and status

JIN Song LOU Xin-Chou RUAN Man-Qi[†] XU Qing-Jin ZHU Hong-Bo

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

摘要 环形正负电子对撞机(CEPC)是中国高能物理学界提议建造的、下一代大型正负电子对撞机。CEPC 不仅可作为 Higgs 粒子工厂而运行, 也可产生海量的 Z 玻色子以及 W 玻色子, 进而从 Higgs 物理、电弱精密测量、味物理和 QCD 等各个方面对粒子物理标准模型进行全面、细致的验证, 并以此来揭示标准模型背后的物理规律。自倡议以来, 我国高能物理学界对 CEPC 项目的物理潜力及其各项关键技术进行了积极的研究, 并于 2018 年 11 月正式发布了 CEPC 的概念设计报告。这意味着 CEPC 项目的初步设计蓝图已经完成。文章在 CEPC 《概念设计报告》的基础上简介了其物理潜力及相关技术的研究进展。

关键词 环形正负电子对撞机, 希格斯玻色子, 精确测量, 标准模型, 新物理

Abstract The circular electron positron collider (CEPC) is a future large collider facility proposed by the high energy physics community in China. It will serve as a Higgs boson factory, and produce large quantities of Z and W bosons, so it will be able to perform precise measurements of the Higgs boson properties, weak electromagnetic force physics, flavor physics, and quantum chromodynamics. Through these high-precision tests, the CEPC could explore new fundamental principles underlying the Standard Model particle physics. Dedicated studies on the potential of CEPC and the critical technologies involved have already been performed. In November 2018, the Conceptual Design Report, a preliminary blueprint of CEPC was published; its successful completion means that the project has now entered the phase of engineering design. The physics potential and progress of the R&D of CEPC will be reviewed in this paper.

Keywords CEPC, Higgs boson, precision measurement, Standard Model, new physics

1 粒子物理和标准模型

粒子物理负责回答人类最古老、最深刻的两个问题, 即世界是由什么组成的, 以及它们的运行规则是什么。借助不断进步的技术手段, 人类对这两个问题的理解也在不断加深。人们不断发现原有理论的缺陷, 在修正和革新中一步步完善

对自然的认识。

时至今日, 我们对自然界的认识被总结为粒子物理的标准模型(Standard Model)。标准模型预言了三种粒子: 自旋为 1/2 的费米子, 自旋为 1 的规范玻色子, 以及自旋为 0 的 Higgs 粒子(图 1)。在标准模型看来, 我们的物质世界由费米子(自旋为 1/2)组成, 而运行规律则通过玻色子(自旋为 0

或1)的交换来实现。这种交换不仅发生在费米子之间,同样也发生在玻色子之间(自相互作用)。费米子和规范玻色子中的W、Z粒子都通过和Higgs场的相互作用获得质量,因此Higgs场也被人们称为质量之源。

标准模型是一个极为成功的理论,它精确地描述、预言以及诠释了粒子物理加速器实验中观测到的几乎所有实验现象。标准模型通过优美的数学结构(规范场)统一描述了自然界中三大基本相互作用力:电磁力、弱力和强力。直至今日,标准模型的发展和验证获得了近三分之一的诺贝尔物理学奖。它不仅是粒子物理学发展的主旋律,也是人类智慧的一首壮丽史诗。

虽然标准模型取得了巨大成功,它本身却很难被认为是一个终极理论。在对撞机实验之外,标准模型无法解释一系列极为重要、极为基本的自然之谜,比如暗物质、暗能量、真空能、宇宙暴涨及演化、宇宙中物质的正反不对称性等一系列和宇宙演化相关的基本问题。另一方面,标准模型导致了一系列的理论疑难。比如,标准模型中的顶夸克和电子在质量上相差30多万倍,而在标准模型看来,这两者的质量起源是完全一致的——这是很难让人信服的。在标准模型的面纱下,必然隐藏着大自然更深邃、更优美的奥秘^[1, 2]。

Higgs粒子是我们进一步理解自然的关键。它同标准模型中的绝大部分理论疑难直接相关。Higgs粒子是标准模型中唯一的、自旋为0的标量粒子(图1)。Higgs场决定了所有粒子的质量。质量是物质最基本的属性之一,因此,Higgs场极大地决定了宇宙的面貌。比如,Higgs场决定了电子的质量,因此确定了原子的尺度;它决定了W、Z粒子的质量,进而决定了弱相互作用的力程和强度。Higgs粒子同其他粒子的相互作用对宇宙形貌的影响是极为深刻的,它们的微小改动,都可能导致宇宙中无法演化出和我们类似的生命;甚至会导致宇宙本身的不稳定性,乃至决定宇宙最终的宿命。正因如此,Higgs粒子是标准模型中最奇妙、最令人着迷的粒子之一,它被认为是通向标准模型背后更深刻的物理原理的理

想探针。所以,当Higgs粒子被发现后,对其性质的精密测量立刻被提上日程。恰如美国普林斯顿高等研究院的著名理论家Nima Akhmedzadeh教授所言,“Higgs粒子……是深刻的新原理的预兆,粒子物理学界无疑要和Higgs粒子研究死磕到底”^[2]。

2 Higgs粒子工厂:强子Vs正负电子,直线Vs环形

为了探索亚原子级乃至更小的结构,我们需要借助粒子加速器。加速器把微观粒子加速到越来越高的能量,以此来探索越来越小的结构。为了记录加速器所产生的关键信息,人们通过粒子探测器来测量并记录末态粒子的能量、动量、种类信息。有些粒子物理实验是不需要加速器的,比如宇宙线实验(地面、高空、太空)、部分中微子实验等等,但所有的实验都需要探测器。

为精确测量Higgs粒子性质,我们需要Higgs粒子工厂。发现了Higgs粒子的大型强子对撞机(LHC,图2)本身就是强有力的Higgs粒子工厂。

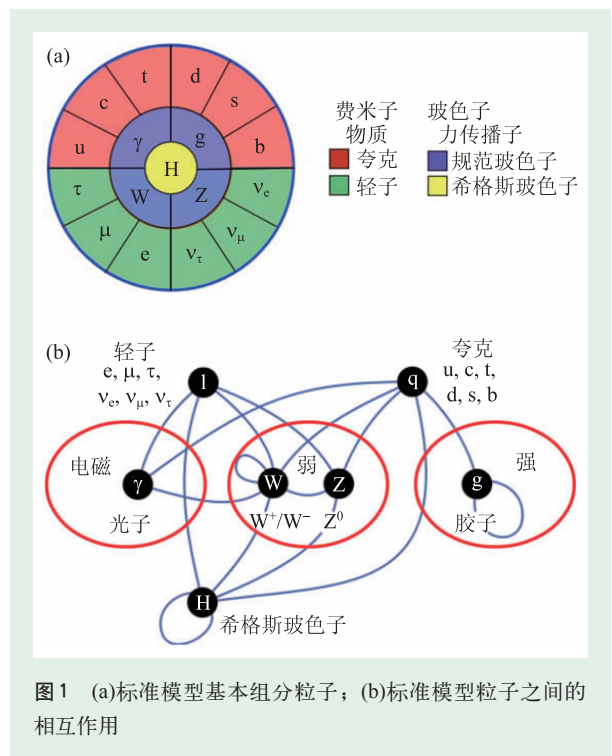


图1 (a)标准模型基本组分粒子;(b)标准模型粒子之间的相互作用

时至今日，LHC已生产了数以千万计的Higgs粒子，而其高亮度升级计划(HL-LHC)则将带来数以亿计的Higgs粒子。另一方面，由于LHC的对撞粒子——质子参与强相互作用，质子—质子的反应截面非常大，这意味着LHC上的本底噪声水平非常高。事实上，在100亿个质子—质子的对撞事例中只能产生一个Higgs粒子。极高的本底水平导致LHC上产生的99%以上的Higgs粒子事例无法被甄别记录。同时，在标准模型看来，质子并不是基本粒子，而是由夸克—胶子等成分组成的复杂系统，这意味着对撞的初态难以准确确定，也意味着难以控制的理论误差。这些不利因素，使得LHC难以进行Higgs粒子性质的精确测量。模拟研究表明，在高亮度升级的情况下，LHC可将Higgs粒子性质测量测到5%—10%的极限相对精度。通过LHC上已经产生的Higgs粒子

事例，人们初步确定Higgs粒子的性质基本同标准模型预言相吻合。这也意味着，我们需要在更高的精确度下对Higgs粒子性质进行测量。

相比于强子对撞机，基于正负电子对撞机的Higgs粒子工厂具有巨大的优势。正负电子是标准模型下的基本粒子，这意味着正负电子对撞机的初态是精确可知且可调的。在合适的对撞能量下，每100—1000次正负电子对撞中就会产生一个Higgs粒子事例，其信噪比比强子对撞机提高了一亿倍。在先进的探测器系统的支持下，几乎所有的正负电子Higgs工厂上的信号事例都可以被甄别、记录。除此之外，正负电子Higgs工厂还可以对Higgs粒子性质进行模型无关的精确测量。正负电子Higgs工厂可将Higgs粒子性质测量到0.1%—1%的相对精度，超出LHC的极限精度达一个量级。

正负电子对撞机是极有吸引力的、高精度的Higgs粒子工厂。国际高能物理学界普遍认为，建造正负电子Higgs工厂是未来高能物理对撞机实验发展的必由之路，并倡议了多个正负电子Higgs工厂技术方案。这些方案中包括了欧洲核子中心倡议的未来环形对撞机(FCC)^[3]和紧致直线对撞机(CLIC)^[4]，可能被建设于日本的国际直线对撞机(ILC)^[5]，以及由我国高能物理学界提议的环形正负电子对撞机(CEPC)^[6-8]。这些被倡议的正负电子Higgs工厂可以被分为两大类：直线对撞机和环形对撞机。前者包括CLIC和ILC，后者包括FCC和CEPC(图3)。

为了理解直线对撞机和环形对撞机的优缺点，我们需简单了解同步辐射这一物理现象。牛顿定律告诉我们，物体总是倾向于保持匀速直线运动状态；微观带电粒子运动状态的改变将导致同步辐射光子的发射。同步辐射功率同带电粒子的能量/静质量之比(γ)的四次方成正比，并反比于其轨道偏转的曲率半径的平方。由于电子是标准模型中最轻的带电粒子，这意味着环形轨道上的正负电子可产生功率巨大的同步辐射(在正



图2 大型强子对撞机及其上的4个大型实验

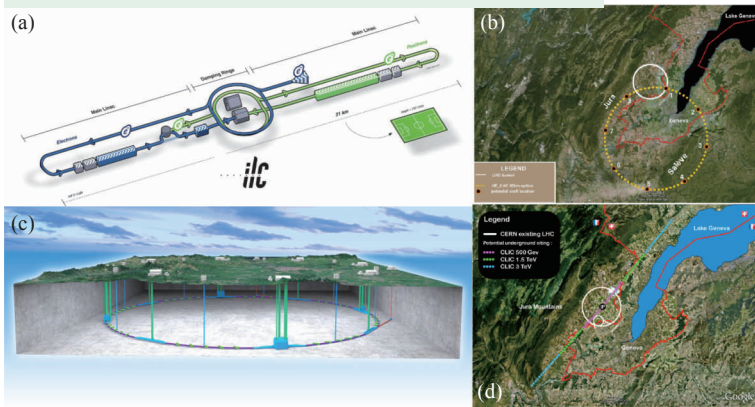


图3 可能的正负电子Higgs粒子工厂：ILC(a)，FCC(b)，CEPC(c)以及CLIC(d)。其中FCC和CLIC示意图中，白色小圈代表LHC

负电子Higgs工厂中的 γ 因子可达近百万)。这一方面限制了环形正负电子对撞机的质心能量，另一方面，也使得各种基于正负电子加速器的同步辐射光源成为可能。为了控制同步辐射功率，我们可以建造大型环形对撞机(通过巨大的曲率半径来限制同步辐射功率)，或者可以建造轨道曲率半径无穷大的直线对撞机，对应着上文提到的两大类正负电子Higgs工厂。

对撞机上物理事例的产率是其反应截面和对撞机亮度的乘积。换言之，亮度体现了Higgs工厂的生产率和总产量。对环形正负电子对撞机而言，在限制了同步辐射总功率的情况下，其亮度随质心能量的3次方压低；而直线对撞机原则上不受同步辐射总功率的限制，其亮度随质心能量缓慢增加。因此，就亮度而言，环形正负电子对撞机在较低的质心能量上占优；而直线对撞机则在高能区占优，如图4所示。同时，直线对撞机上仅有一个对撞点，而环形对撞机上则可同时拥有多个对撞点，意味着环形对撞机上可同时运行多个探测器、进行实验取数。由于Higgs粒子的质量是125 GeV，质心能量为240—250 GeV的正负电子对撞即可有效产生Higgs粒子。在这个能区，环形正负电子对撞机相对于直线对撞机有亮度上的优势。

相对于环形对撞机，直线对撞机有两个突出的优点。第一，直线对撞机的质心能量基本同对撞机长度成正比，相对于环形对撞机，可以相对简单地提高其质心能量，在现有技术下质心能量原则上可以比环形正负电子对撞机提高近一个量级；第二，直线对撞机上原则上可以实现对撞粒子的纵向极化，这对很多物理测量是有优势的。在这个意义上，环形对撞机和直线对撞机拥有相当的互补性。

了解了质子对撞机和正负电子对撞机，以及直线对撞机和环形对撞机作为Higgs工厂的比较优势，下面重点介绍我国高能物理学界倡导的

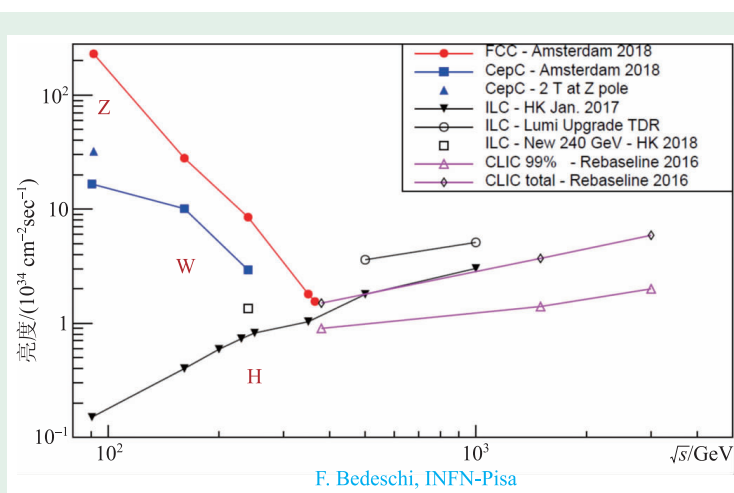


图4 正负电子Higgs工厂上亮度与质心能量的关系^[9]。其中CEPC的总功耗被限制在较低水平，导致其亮度比FCC略低

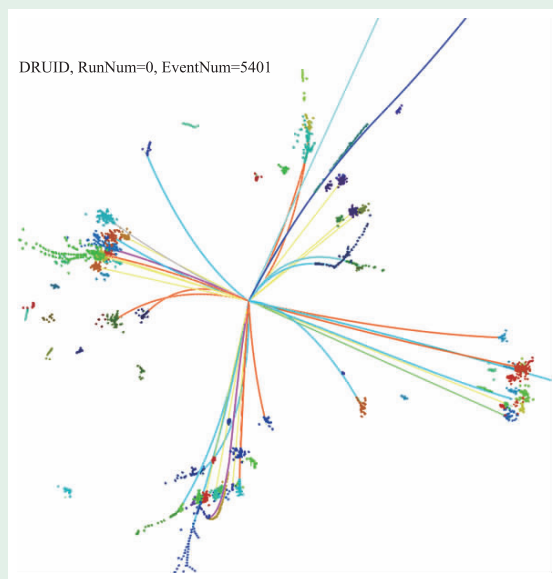


图5 模拟产生的CEPC上的Higgs事例

CEPC项目。CEPC的主环周长长达100 km，是LHC的近4倍大。其总造价约为360亿人民币，相当于北京5号线地铁造价。在240 GeV的质心能量下，CEPC上预期将产生一百万Higgs粒子，其产额比直线对撞机的代表ILC大近6倍，这意味着精确度上的巨大优势。图5演示了CEPC上一个特征的Higgs事例。同时，在相对较低的质心能量下，CEPC可进行丰富的物理测量：它可在91.2 GeV的质心能量附近作为Z粒子工厂运行，并在161 GeV附近的质心能量下进行W粒子阈值扫描。CEPC上预期可以在极低的本底噪声

下产生上亿W粒子,以及数以千亿计的Z粒子。它不仅可以对Higgs粒子进行精确测量,同时可以以超过现有水平达一个量级的精确度对电弱可观测量进行测量,同时,CEPC可进行丰富的味物理、QCD测量。一言以蔽之,CEPC可在各个方面,对标准模型进行精确的测量/验证,进而进行新物理规律的探索。同时,CEPC项目还可以作为能量极高的同步辐射光源运行,继而为包括核物理、凝聚态、生物、医药研究在内的其他学科发展提供技术支持。

环形正负电子对撞机还可以被升级为质子对撞机。由于质子的静质量比正负电子大近2000倍,质子对撞机质心能量受同步辐射功率的限制要远小于正负电子对撞机,这意味着质子对撞机的质心能量可以远超正负电子对撞机。CEPC可以被升级为超级质子对撞机(SPPC),其质心能量将高达100 TeV,超过目前的LHC达一个量级。除质子对撞外,SPPC上还可运行重离子对撞,对宇宙极早期行为进行探索。CEPC项目及其后续SPPC项目的生命周期长达数十年,一旦建成,将不断为粒子物理探索提供重要的前沿数据。

除了正负电子对撞机和质子对撞机之外,粒子物理学界也在积极探索其他类型的Higgs粒子工厂,包括光子对撞机、Muon子对撞机、等离子体加速技术等等^[10]。综合考虑物理潜力、可行性、造价以及项目时间线,正负电子对撞机,特

别是我国倡导的CEPC项目,在诸多选择中拥有巨大优势。这一点得到了国内外高能物理学界的一致共识。2013年的香山会议指出,“CEPC—SPPC项目是我国高能物理发展的重要机遇”。2014年,ICFA就CEPC项目和未来高能物理发展表态:“ICFA支持能量前沿环形对撞机研究并鼓励全球协调”,“ICFA鼓励国际环形对撞机研究,其最终目的是能量远超LHC的质子—质子对撞”。2016年3月的亚洲未来加速器委员会(ACFA)和亚洲高能物理委员会就ILC,CEPC与高能物理未来发展发表声明:“过去几年,对大型环形对撞机的兴趣一直在增长。这首先是一个希格斯工厂,最终成为一台高能质子—质子对撞机。我们鼓励中国领导的这个方向,并期望尽快看到技术设计完成”^[1]。2016年8月,中国物理学会高能物理分会年会明确表示,“CEPC是我国未来高能加速器物理发展的首选项目”。

3 概念设计报告:CEPC离我们有多远?

2012年,国内高能物理学界开始进行CEPC项目的讨论。2013年9月,CEPC工作组正式成立(图6)。2015年初,CEPC工作组发布了CEPC的《预备概念设计报告》^[6],这一报告明确了CEPC项目的可行性。报告认为CEPC项目不存在原理性的困难,同时,报告甄别出大量需要仔细研究的关键技术。根据CEPC预备设计报告,CEPC工作组进行了大量的科研攻关,完成了对撞机、探测器上一系列关键技术的预研。2018年11月,CEPC研究工作组在北京正式发布CEPC的两卷《概念设计报告》(CDR)^[7, 8],这意味着CEPC项目的初步设计蓝图完成。

CEPC的概念设计报告包括《加速器卷》和《探测器和物理卷》两部分。《概念设计



图6 2013年CEPC—SPPC项目启动会合影

报告》给出了对撞机和探测器的基线设计(图7, 8), 意味着我们得到了“在纸面上可以运行的对撞机—探测器设计”。其中《加速器卷》介绍了加速器整体设计, 包括直线加速器、阻尼环、增强器和对撞机。另外, 还介绍了低温系统、土木工程、辐射防护等一系列重要支撑设施, 并讨论了CEPC升级的可能选项。《探测器和物理卷》展示了CEPC的物理潜力, 介绍

了探测器的设计概念及其关键技术选项, 重点对CEPC的探测器和物理研究做了深入评估, 并讨论了未来探测器研发和物理研究的初步计划。根据该设计报告, CEPC的主环周长长达100 km, 是目前世界上最大的高能物理对撞机——LHC主环周长的4倍。CEPC上将至少会有两台探测器同时进行科学实验。

CEPC项目拥有巨大的物理潜力和比较优势, 不仅获得了国内物理学界的全力支持, 也得到了国际高能物理学界的积极参与。来自近140个国际研究机构的近300名外国物理学家积极参与了CEPC《概念设计报告》的研究。

CEPC《概念设计报告》的完成受到了广泛的赞誉和支持。国际未来加速器委员会和亚洲未来加速器委员会主席、墨尔本大学教授Geoffery Taylor评价:“这是CEPC这样一个用于基础研究的大型科学装置的重要发展里程碑”, “毫无疑问, 国际高能物理界非常希望参加CEPC的研发和将来的科学实验, 这将会大大促进对物质最基本组成单元的进一步理解。”2017年诺贝尔物理学奖获得者、加州理工大学教授Barry Barish(领导LIGO实验发现引力波)祝贺说:“加速器的发展历史是实现越来越高的能量, 并在过去几十年中一直都是

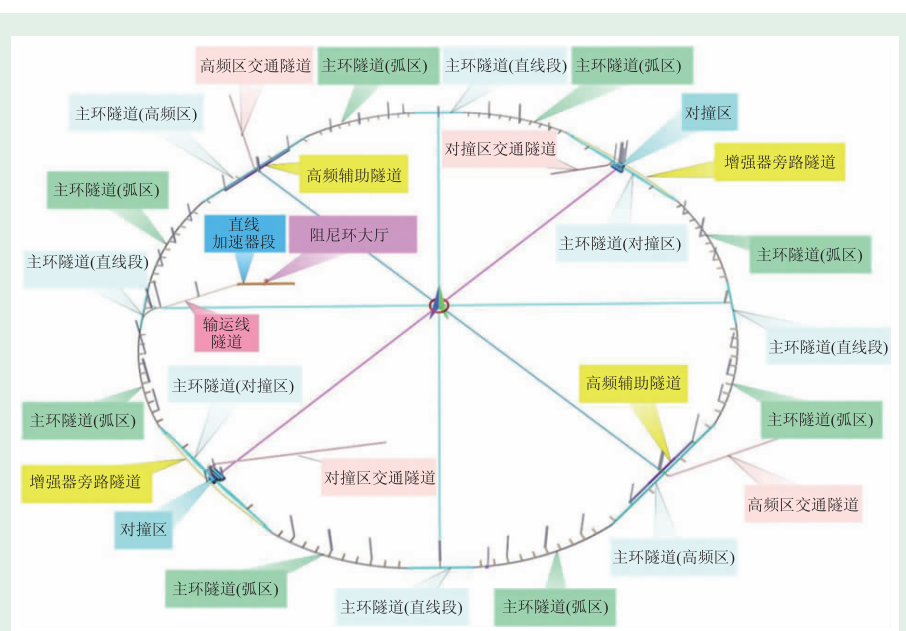


图7 CEPC对撞机系统主要结构^[7]

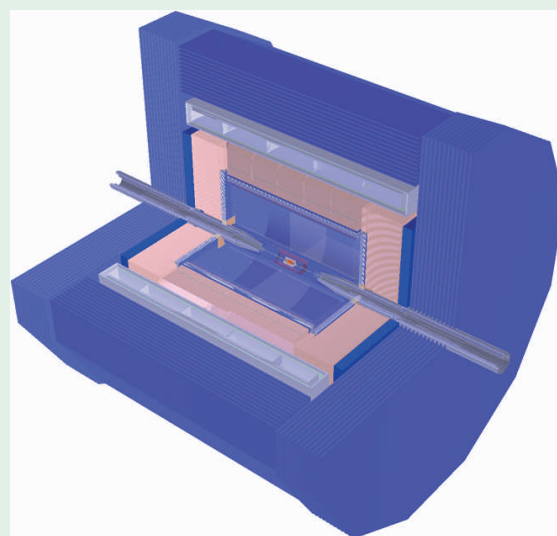


图8 CEPC上的基线探测器剖面图^[8]

众多粒子物理重大发现所依赖的核心工具。而CEPC将延续这一伟大传统! 我衷心祝贺CEPC《概念设计报告》团队做了如此出色的工作。”

CEPC项目团队计划以《概念设计报告》为基础完成关键技术预研, 计划于2018年至2022年间建成一系列关键部件原型机, 验证技术和大规模工业加工的可行性。按照目前的进度安排, CEPC将在5年左右的时间内完成《技术设计报告》, 这将是CEPC项目的最终蓝图, 《技术设计

报告》的完成意味着CEPC项目的建设即可启动。一旦获批,项目的建设需要7—10年左右的时间,因此,在乐观的情况下,我们将在2030年左右获得来自CEPC的第一批实验数据^[1]。

4 CEPC对高精尖技术的依赖和推动

在人类目前已经建立的正负电子对撞机中,大型正负电子对撞机(LEP)是在质心能量和对撞



图9 CEPC主环上的、650 MHz超导高频腔样机及其垂直测试^[12]

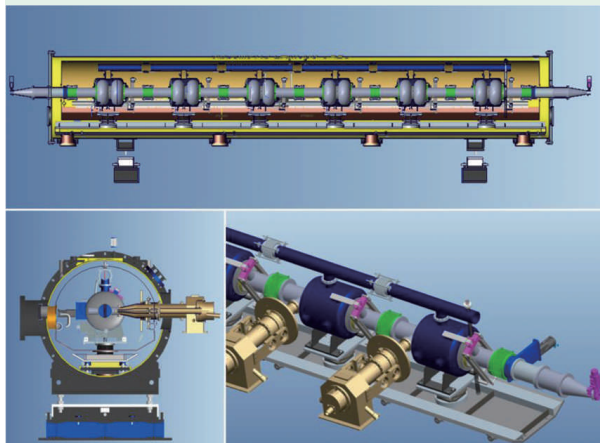


图10 CEPC主环上的低温单元设计图。整个系统利用液氮冷却稳定在2 K的低温,以保持650 MHz超导高频腔正常工作^[7]

机尺度上最接近CEPC的。LEP是LHC的前身,它于1989年至2000年运行在位于日内瓦的欧洲核子中心。LEP上产生了数以千万计的Z粒子和大量W粒子,对标准模型中的电弱可观测量进行了非常精确的测量。2001年,LEP开始进行到LHC的升级,后者于2009年开始对撞,并在2012年宣布了Higgs粒子的发现。

CEPC的主环周长比LEP提高了近4倍。运行于Higgs工厂时,CEPC的质心能量比LEP最高质心能量提高了15%,而其亮度则比LEP提高了近3个数量级。运行于Z工厂模式下时,CEPC的亮度则比LEP提高了4个数量级以上。更高的亮度意味着更大的物理事例产额,意味着需要对撞机技术上的重大突破;同时,更高的亮度也意味着CEPC需要更加精良的探测器系统,意味着需要探测器设计、制造上的重大突破。

大型对撞机和探测器是需多种尖端技术支持的综合系统,是工业皇后皇冠上的明珠。CEPC的加速器系统包括有电子/正电子源、直线加速器、超导高频、高效率速调管、大功率电源、磁铁、低温、冷却、真空、准直、束流测量、辐射防护、控制、机械、对撞区等数十个核心子系统。而CEPC的探测器则由高精度顶点—径迹系统、量能器、磁铁—轆铁子系统等组成,同时包括有配套的机械、准直、冷却、电子学、数据存储和处理系统。同时,CEPC工作组对对撞机和探测器的设计、优化、关键技术攻关、物理及工程样机的制备均进行了大量的工作,在子系统研究方面取得了大量进展。

举例而言,高频系统是对撞机的核心组件,其作用是为粒子提供加速电场,加速到所需的能量。对于高频系统,CEPC预期将采用世界上先进的低温超导加速器技术。CEPC主环和增强器将分别采用650 MHz和1.3 GHz的超导电腔实现(图9)。超导电腔除了选用传统超导高频技术中所用的高纯铌外,还将使用目前世界上前沿的掺氮技术,进一步减小超导电腔本身的能量损耗。此外,还将完善一些列的超导电腔处理工艺和设施,如超导电腔电抛光装置,使我国的超导高频技术步入世

界领先水平。为了维持超导状态，高频腔被安装在工作温度为4 K、长度为11 m的低温单元中，CEPC的主环上将安装40个低温单元，如图9，10所示。

高效速调管是CEPC所需的另一个关键技术。速调管产生大功率微波，并以其在高频系统中建立起强电场，以加速粒子束团。目前，百千瓦量级的连续波速调管功率仅在60%，也就是说有近一半的能量将在速调管部分损失。因此，CEPC项目开展了高效速调管的研究，可使速调管的输出功率和工作效率提高到800 kW及80%以上。为达到这一目标，研制中，不仅在关键技术上有着新的突破，还将提出新的理论和方法。速调管作为最重要的微波电真空器件之一，不仅用于加速器领域的大科学工程，在国防科技和工业领域也有非常广泛的应用，如雷达、通讯广播等。

磁铁对CEPC对撞机和探测器都极端重要。在对撞机上，磁铁系统负责将束流粒子约束在预期轨道内，调控束流束团的几何，并最终实现高亮度的对撞。在探测器上，磁铁系统包括有大体积的螺线管磁铁和前端安装的反螺线管系统。前者保证了物理事例中径迹动量的准确测量，而后者则保证了对撞机的高亮度运行。CEPC项目研究涉及多种磁铁系统，其技术要求和技术难点各不相同，其中包括增强器磁铁、主环磁铁、对撞区磁铁，以及质子对撞机高场磁铁等等。图11显示了目前CEPC主环上的几种主要磁铁的设计截面图。目前，增强器磁铁重点开展了最低工作磁场为30 G的高精度低场二极磁铁的研制。这一工作在国内外均属于首次，研制过程中一些全新方案、工艺、乃至磁场测量将被采用，这将为同类磁铁的研制奠定基础。主环磁铁研制的一个重要方向为高精度永磁二极铁的研制。目前，世界上大型加速器工程所采用的均为电磁铁，其优点在于控制的便捷，然而从另一方面，则需要电源及电功率为其配套。因此，永磁铁研究的开展不仅可以降低磁铁系统的造价，也将大幅节省对撞机的运行费用。本课题的开展中将需要对一系列难

点攻关，如对永磁材料抗辐射性能进行系统的研究，实现在较大范围内对永磁磁铁场强的调节，对永磁材料的温度系数进行精细的补偿等。此外，该磁铁的研究将以双孔径磁铁为基准开展，即一块磁铁可以同时满足两个束线的使用，其孔径间距仅为几十厘米，这不仅降低了磁铁的造价，也将使对撞机本身的结构更加紧凑，从而降低隧道的尺度。

高场磁铁是高能质子对撞机的核心组件，其磁场强度直接决定了质心能量。高场高温超导磁体在能源、运输、军事等方面均具有不可估量的作用。通过高温超导磁体的研究，人们希望能够将其性能提升10倍、造价压缩10倍，达到大规模量产和应用的程度。CEPC—SPPC加速器周长100 km，其建设需要成千上万个超导磁体，因此未来高能粒子加速器的建设，对超导材料的性能及造价都提出了挑战。

为了这个目标，2016年CEPC工作组联合国内的18家单位，包括科研机构和企业，成立了实用化高温超导材料产学研合作组。经讨论论证，认为铁基超导材料的高场性能和规模化线材制作成本等方面具有显著优势，合作组明确了基于铁基超导体的基本技术方案。在各成员单位的高效协作下，该合作组若干研究工作已经取得了若干突破性进展：

(1)铁基超导材料的短样电流密度已经突破了 1450 A/mm^2 ，处于国际领先水平；

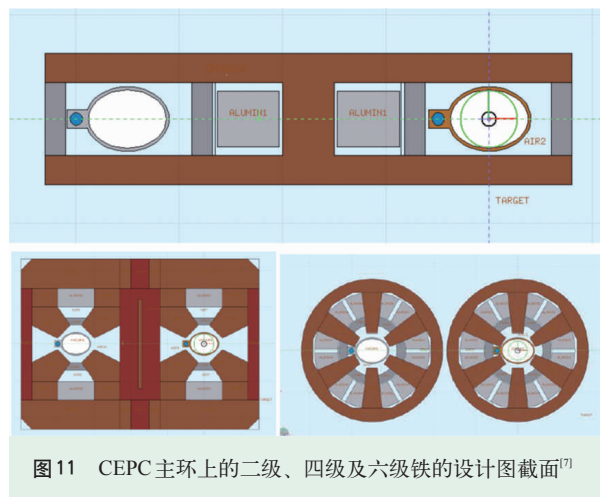


图11 CEPC主环上的二级、四级及六级铁的设计图截面^[7]

(2)研制的国内第一个高场超导二极磁体,在4.2 K、两个孔径内最高磁场达到了10.2 T(图12);

(3)国际上首次完成了铁基超导线圈高场性能测试,实验验证了铁基超导高场应用的可行性。

这些研究确立了我国在高场加速器磁体技术领域的国际先进地位^[13, 14]。

CEPC探测器设计中将使用先进的半导体探测器技术以及读出电子学技术。在过去的几十年中,得益于LHC等实验应用需求以及半导体工艺的快速发展,半导体探测器和电子学的性能得到不断提升。性能的提升也进一步拓展其在其他辐射探测和辐射成像领域的广泛应用。研发中所积累的器件抗辐照设计、辐照加固等技术也能够为其他领域的应用、设计提供直接或间接的参考。针对未来高能物理及其他相关领域若干重要应用,硅径迹探测器技术发展将主要体现在传感器工艺和设计、前端电子学工艺及设计、集成硅探测器、先进连接技术等重要方面,持续提升硅径迹探测器性能。

国际上硅径迹探测器技术快速发展,而国内由于起步较晚且由于存在抗辐照工艺禁运等问题,在技术水平方面与国外前沿存在明显差距。以笔者所在的中国科学院高能物理研究所为例,近年来针对先进光源同步辐射探测、成像的需求,利用国内厂商提供的CMOS工艺,成功研制前端读出电子学ASIC芯片,主要性能已接近国外同类产品。与国内研究所设计、制作的硅像素传感器集成,逐渐开发出符合设计指标的整机系统。此外,还积极参与LHC实验探测器升级,通

过国际合作的方式,努力打破技术禁运的同时通过参与实际研发项目提高硅径迹探测器设计水平。所参加的ATLAS实验硅径迹探测器升级课题所需经费部分已经得到国家重点研发计划支持。与此同时,基于已有设计经验,我们也在自主研制高性能的集成式硅探测器,满足未来对撞机实验的需求,并积极拓展应用范围。伴随着国家对于半导体工艺的持续投入,将有机会更多尝试国内工艺厂商提供的工艺,研制高性能的硅径迹探测器,走向国际前沿。

除上述硬件研究外,CEPC上的数据处理也将涉及大量的算法、软件、计算方面的先进技术。以目前CEPC项目的基线重建算法——Arbor粒子流算法为例,该算法能够准确重建CEPC上Higgs粒子事例中产生的所有关键物理标的物,进而对探测器信号进行全面准确的物理诠释,见图13。为充分发掘CEPC的物理潜力,追求CEPC上物理可观测量的极限测量精度提供了工具和保障。与此同时,CEPC工作组也在积极进行机器学习、并行计算等技术的测试和研究。为高效处理海量的物理事例进行前期准备。

CEPC的对撞机和探测器系统均为涉及多种高精技术的复杂系统。CEPC项目研究的核心之一就是多种关键技术的开发、验证、以及大规模工业量产。为了推动上述研究和工业化,在2017年11月,CEPC产业促进会(CIPC)于北京成立,目前已吸引了50多家在业内领先的工业企业参加,其技术范围包括超导、微波、低温、精密仪器、控制、电子、芯片、真空、计算、土建等方面。CIPC为CEPC的技术预研、关键部件和装备制造、产业化、建设以及推广应用提供了重要的支撑平台^[15]。同时,随着CEPC项目研究的进一步深入,各子系统技术指标的进一步深化细化,CEPC产业促进会的规模和影响力还将进一步提升。

CEPC的建造也将对我国经济、社会、文化、教育乃至外交等方面产生深远影响。在此不再详述。

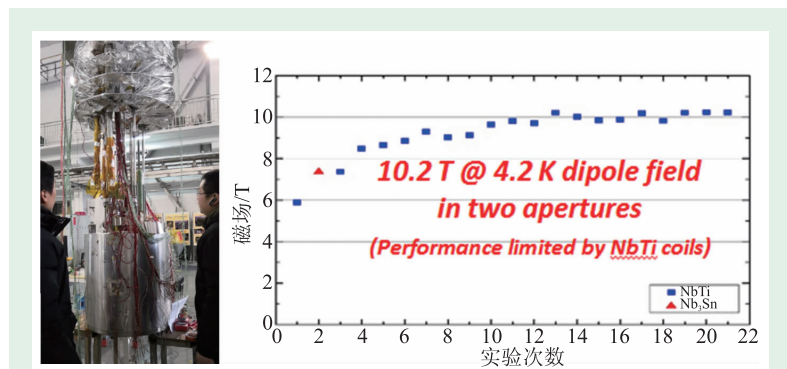


图12 高场超导二极磁体样机及其性能测试结果^[12]

5 小结

经过半个多世纪的发展，人类对粒子物理世界的认识被总结为粒子物理的标准模型。作为最后一个被发现的标准模型粒子，Higgs 粒子为粒子物理的进一步探索，为寻找标准模型背后的、更为基础的物理规律，提供了极佳的探针。

由我国高能物理学界倡导的 CEPC 项目拥有巨大的物理潜力。它是高精度的 Higgs 粒子工厂，其预期精度超过高亮度 LHC 的极限精度达一个量级；在电弱精密测量方面，CEPC 的预期精度将超过现有水平一个量级以上。同时，CEPC 可通过味物理和 QCD 精确测量对标准模型进行全面、细致的验证。CEPC 的后续升级——超级质子对撞机，可以在比 LHC 高一个量级的质心能量下，对超出标准模型的新物理现象进行直接探索。因其在科学上的巨大意义，CEPC 项目得到了国内外高能物理学家的高度赞赏、积极参与和大力支持。

针对 CEPC 项目的物理潜力及其所需的各项关键技术，CEPC 工作组进行了积极的预备研究，并于 2018 年 11 月份发布了《概念设计报告》。该设计报告是 CEPC 项目的初步设计蓝图，它不仅全面验证了 CEPC 项目的可行性，同时明晰了未来重点研究的方向。CEPC 工作组将继续深入进行相关预备研究，预期将在 5 年内完成《技术设计报告》，一经完成，CEPC 项目即可进

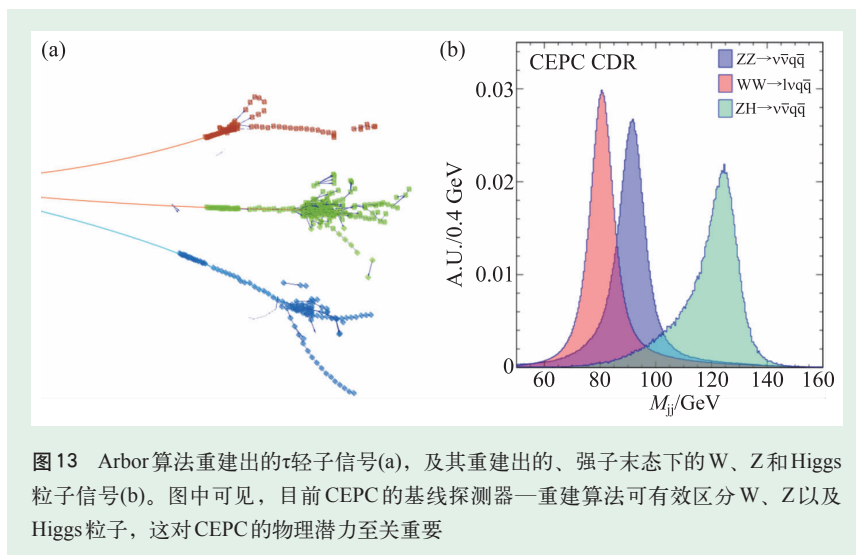


图 13 Arbor 算法重建出的 τ 轻子信号(a)，及其重建出的、强子末态下的 W、Z 和 Higgs 粒子信号(b)。图中可见，目前 CEPC 的基线探测器—重建算法可有效区分 W、Z 以及 Higgs 粒子，这对 CEPC 的物理潜力至关重要

行建设。在最乐观的情况下，CEPC 将于 2030 年左右建设完毕，并开始取数。

CEPC 需要高精尖的工业技术支持。针对 CEPC 项目所需的各项关键技术，在 2017 年 11 月，CEPC 产业促进会(CIPC)于北京成立，目前已吸引了 50 多家在业内领先的工业企业参加，其业务范围涵盖了 CEPC 所需的多种先进技术。相辅相成，CEPC 的建设也将带动一大批高新技术的成熟成长，将在我国技术创新、技术积累和产业升级方面发挥龙头作用。事实上，粒子物理实验一直在挑战现有工业技术的极限，也一直是新技术的源头。

知识和技术是互为表里的，每次认知的巨大进步，都蕴含当时无法想象的技术突破；对自然真理海洋的不断探索，总是给人类带来巨大的惊喜和力量。我们期待着对 CEPC 的探索将带给我们全新的知识，也期待着这些知识背后蕴藏的无限可能。

参考文献

- [1] Wang Y F. Seminar at Shanghai JiaoTong University, May 2016, Shanghai. 报告题目：环形正负电子对撞机(CEPC)：未来我国科学与技术发展的一个重大机遇
- [2] Akani-Hamed N. Presentation at the CEPC workshop, Nov 2018, IHEP, Beijing. 报告题目：Why is the Higgs special? [\[co.ihep.ac.cn/event/7389/session/0/contribution/18/material/slides/0.pdf\]\(https://indico.ihep.ac.cn/event/7389/session/0/contribution/18/material/slides/0.pdf\)](https://indi-</div><div data-bbox=)

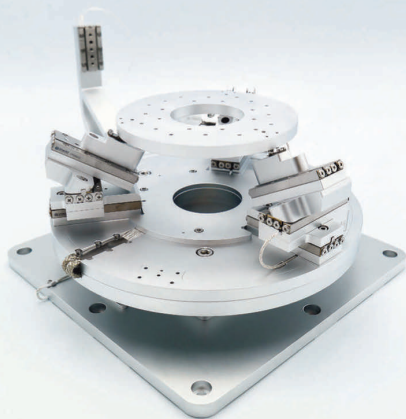
- [3] FCC study group. Future Circular Collider Conceptual design report. <https://fcc-cdr.web.cern.ch/>
- [4] The CLIC Collaboration. CLIC Conceptual design report,

CERN- 2012-007

- [5] Behnke T *et al.* The International linear collider technical design report, 2013. <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [6] CEPC Preliminary Design Report, 2015. <http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/volume.html>
- [7] The CEPC Conceptual Design Report, Vol I: Accelerator. http://cepc.ihep.ac.cn/CEPC_CDR_VolI_Accelerator.pdf, 2018. arXiv: 1811.10545
- [8] The CEPC Conceptual Design Report, Vol II: Physics and Detector. http://cepc.ihep.ac.cn/CEPC_CDR_Vol2_Physics-Detector.pdf, 2018, arXiv: 1809.00285
- [9] Lou X C. Presentation at ICHEP 2018, July 2018, Seoul. 报告题目: The Circular Electron Positron Collider, An Informal Report. <https://indico.ihep.ac.cn/event/8299/session/0/contribution/0/material/slides/0.pdf>
- [10] Brewster S. A bouquet of options: Higgs factory ideas blooms. *Symmetry magazine*, 2012. <https://www.symmetrymagazine.org/article/november-2012/a-bouquet-of-options-Higgs-factory-ideas-bloom>
- [11] The CEPC Study group. The CEPC input for the European Strategy for Particle Physics, 2019. arXiv: 1901.03169, 1901.02170
- [12] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8528536>
- [13] Wang D L, Zhang Z, Zhang X P *et al.* First performance test of 30 mm iron-based superconductor single pancake coil under 24 T background field. *Superconductor Science and Technology*, 2019, in press. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab09a4>
- [14] Wang C T, Cheng D, Zhang K *et al.* Electromagnetic Design, Fabrication and Test of LPF1: a 10.2 T Common-Coil Dipole Magnet with Graded Coil Configuration. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, in press
- [15] Gao J. Presentation at ICHEP 2018, July 2018, Seoul. 报告题目: Overview of the Completion of CEPC Accelerator. <https://indico.ihep.ac.cn/event/8299/session/2/contribution/2/material/slides/0.pdf>

SMARPOD

高精度并联运动系统，用于从所有六个自由度对物体进行操纵。

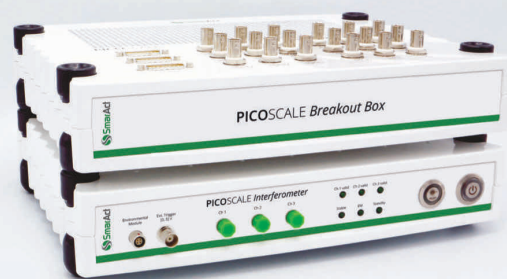


For high precision matters.

Your Partner for High Precision
in Positioning and Metrology.

PICOSCALE Interferometer

迈克尔孙干涉仪用于光学位移或振动测量。



www.smaract.com

认识我们 @ 慕尼黑上海光博会
2019年3月20日至22日
展位号 1732