

# 我们为什么提出建造环形正负电子对撞机

姜辛丑

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学院大学)

## 一、粒子物理和标准模型

自从20世纪30年代物理学家建立了原子模型之后,人类对亚原子和更深层次物质结构、相互作用和自然规律的实验、理论的探索和研究揭示了自然界基本粒子的存在和他们的特性,以及由这些基本粒子组成的各类介子,重子,原子,分子和它们形成的丰富和多样的自然物质世界。粒子物理硕果累累,标准模型在过去50多年得到发展和实验验证,成为一套能够全面解释已知粒子物理实验现象的理论。2012年在欧洲大型强子对撞机上发现的希格斯玻色子是标准模型预言、实验学家寻找了近半个世纪的“上帝粒子”。希格斯粒子通过自发破缺机制解释了费米子质量不对称的事实。它的发现完善了标准模型中粒子集,也给科学家带来了很大的希望:期待通过深入研究人类所知甚少的希格斯玻色子,并以它为门户去发现微观世界的新奥妙和秘密。

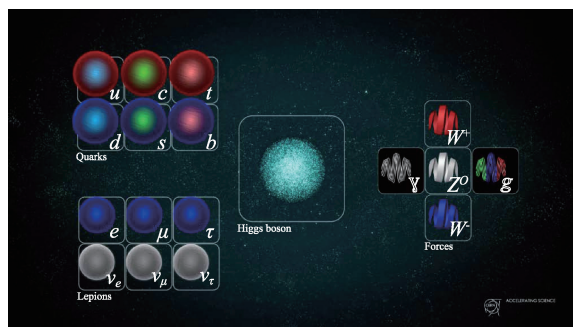


图1 标准模型基本粒子以及希格斯的中心地位  
(来源:欧洲粒子物理中心)

## 二、从环形正负电子对撞机的提出到概念设计报告

2012年希格斯粒子被发现后,中国科学家提出了质心系能量为240 GeV的高能环形正负电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, 简称CEPC)方案,其亮度超过上一代的、欧洲的大型正负电子对撞机(LEP)达2~4个量级。CEPC具有以下关键设计指标:周长100千米,每束流的同步辐射功率30 MW,在91/240 GeV的质心能量下,达到 $30/3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的峰值亮度。CEPC将是世界前沿加速器,能产生百万个干净的希格斯事例,用于在最微观尺度深入研究标准模型并寻找新物理和新现象,使中国进入世界粒子物理研究的引领地位。在2013年第464次、2016年572次香山科学会议及2016年8月中国物理学会高能物理分会常委会会议决议中,与会专家一致认为CEPC是中国未来高能加速器物理发展的首选项目。

经过了6年的不懈努力,CEPC团队于2018年正式发布了概念设计报告(CDR, <http://cepc.ihep.ac.cn/>),它包括物理目标、加速器、探测器及有关辅助设施的指标及实施方案,在国际评审中得到了高度评价。上千位作者来自全球26个国家和地区,221个大学和研究所,其中国际参与者约占1/3。在国际合作方面,CEPC成立了国际顾问委员会;开始在各合作国轮流举办国际工作会议,如意大利罗马、英国牛津、法国马赛等。CEPC团队正在深化设计,进行各项技术和工程准备工作,开展加速器的技术

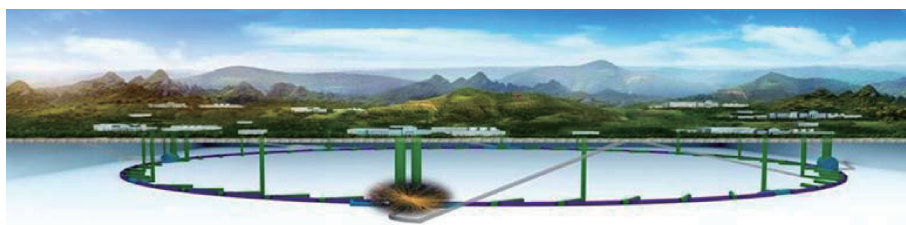


图2 环形正负电子对撞机示意图(来源:黄河设计院)



图3 环形正负电子对撞机概念设计报告于2018年11月在北京发布。本文作者作为项目经理(前排右)提交CEPC加速器、探测器及物理概念设计报告给CEPC执委会主席王贻芳(前排左),CEPC机构委员会主席高原宁(前排中)(照片来源:高能物理研究所)

设计(TDR)报告,推动国际合作框架和运作机制的设立,为CEPC的开建奠定基础。

### 三、丰富的物理

希格斯粒子发现以后,粒子物理面临着重大转折:一方面标准模型得到完全的验证,展示出超乎寻常的优美和精确;另一方面理论和实验的研究都表明这不是终点,必然存在比标准模型更为基础的物理原理。在粒子物理与宇宙学的结合与交叉上,标准模型可以很好地解释大爆炸后的许多物理过程和现象,但标准模型里没有暗物质粒子,无法解释物质-反物质不对称性、早期宇宙暴涨和暗能量。同时,在标准模型里,基本粒子轻子和夸克具有无法解释的味对称性;希格斯粒子的质量起源及其自然性问题仍让人无法理解,而真空居然是不稳定性的;基本粒子的质量有一个巨大的差别;中微子质量的来源及中微子的性质还不能在标准模型得到描述,等等。这些均要求存在一个标准模型之外的新体系。

希格斯场是标准模型的核心,它和上述种种关键问题息息相关。对希格斯粒子性质的精确测量,

被公认为寻找超出标准模型的新物理的最好突破口(欧洲粒子物理战略规划物理简报书 <https://arxiv.org/abs/1910.11775>)。在粒子物理实验测量中,精度越高、意味着能探索的新物理的能标越高。理论研究表明,如果我们将希格斯粒子的性质测量到1%的相对精度,就可以对10 TeV能标下的新物理进行全面的扫描;这一能标超出目前大型强子对撞机能达到的能标一个数量级。CEPC产生能产生数以百万计干净的希格斯事例,可将希格斯粒子性质测量至1%的精度,有望在10 TeV的能标下探索新物理。

CEPC极有可能发现超出标准模型的新物理。如果没有发现新物理,则表明我们目前对标准模型自然性原理(即新物理能标相对于电弱能标的差距;这一差距越大,说明理论越不自然)的认识出现了重大偏差,意味着我们对标准模型的认识、甚至对时空的认识存在巨大问题,需要作出深刻的改变。这也是有重大意义的成果,甚至是更大的成果。

CEPC还可以在90~240 GeV之间运行,将产生近万亿Z粒子和上亿W粒子,可在我国科学家传统上关注的标准模型、味物理、强子结构,量子色动力学(QCD)等方向展开精确测量,具有巨大的物理潜力。

综上所述,CEPC对希格斯粒子性质以及标准模型的精确测量将在探索新物理原理上发挥巨大作用,有可能发现新的微观结构,寻找暗物质,揭示宇宙演化的奥秘,甚至带来对时间与空间及其关系的全新认识。

由此可见,CEPC可提供的前沿物理研究课题十分丰富和独特。有人认为,建造CEPC是为了验证弦理论和寻找超对称粒子。实际上,篇幅长为400多页的探测器-物理概念设计报告阐述了主要的CEPC科学目标,值得指出的是CDR里面甚至都

没有触及这些课题,也就是说 CEPC 的建设主要不是为了研究弦理论或超对称粒子。

由于希格斯粒子这个门户打开,一系列重大科学问题、秘密等待我们去研究和发现。粒子物理是一门有活力、朝气和挑战性的科学学科,有着光明的前途。

#### 四、建设环形正负电子对撞机符合粒子物理发展的规律

在粒子物理发展过程中高能粒子(正负电子,质子,反质子等)加速器发挥了极其重要的作用。质量较重的基本粒子,例如粲夸克,底夸克,顶夸克以及传递相互作用力的重玻色子的发现和深度实验研究、理解都是通过大型粒子加速器实验获得的。在历史上,当人类启动新的高能粒子加速器,并由此进入新的、更高的能区时,都会有一些新的重要的新粒子或是新的物理规律发现。这些粒子和规律进而在高亮度、工厂级的对撞机上被充分的实验测量、被用来针对理论假设的实验进行检验。在最近的几十年里,质子-质子对撞机由于强相互作用巨大的反应截面,一系列的新粒子在强子对撞机上被发现。科学家在欧洲、美国和亚洲(中国和日本)建设了工厂级的正负电子对撞机,在对撞中产生大量干净、纯度很好并宜于深度研究的这些新粒子,实验上对它们进行最高精度的测量,形成了强子对撞机发现新物理或是新粒子,正负电子对撞机对它们开展精确测量,推动完善粒子物理理论的历史“套路”。例如:

(1)1977年,底夸克迹象在美国费米实验室的400 GeV 质子-核物质打靶实验中被观测到,当年位于德国和美国的正负电子对撞机就观测到了含底夸克的B介子(带电+中性)。美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)和日本 KEK 高能加速器实验室本21世纪初期分别建造了“B介子工厂”-能量在~10.6 GeV 的高亮度正负电子对撞机,通过B介子测量衰变机制以及和其他夸克、轻子的耦合,发现了B衰变中的CP宇称破坏。日本KEK近期升级了其B工厂 Super KEKB 加速器,进一步对B介子进行最高精度的测量。

(2)1983年科学家在欧洲核子中心的SPS质子-反质子对撞机上发现了标准模型中预言了的、负责传递弱相互作用的W,Z玻色子,该实验室很快就规划了一个周长为27千米长的环形正负电子对撞机LEP,于1989年启动,全面高精度的检验了标准模型的正确性,并预言了顶夸克的存在及其质量范围。实际上美国SLAC实验室建造了一个直线正负电子对撞机并早于欧洲的LEP加速器投入运行,首先排除了第四代中微子的存在。针对Z,W的实验研究人类投入了两台大型正负电子对撞机。

1995年位于美国费米国家实验室的CDF,D0两个实验在1 TeV 质子-反质子对撞机上发现了LEP预言了的最重的基本粒子,即173 GeV的顶夸克。18年后希格斯粒子在欧洲大型强子对撞机上被发现。按照过去已经成功的“质子对撞机发现+电子对撞机深入研究”的套路,人类应该建设新的高能电子加速器,对最微观世界进行实验探索和新物理的寻找。实际上除了我国科学家提出并发展和推动的环形正负电子对撞机(CEPC)以外,日本,欧洲也分别在积极推动高能直线正负电子对撞机(ILC, CLIC),欧洲还采纳了一个类似CEPC的环形电子加速器(FCC)。ILC的主要问题是希格斯能区其亮度性能不如CEPC,而欧洲的FCC则要等待欧洲大型强子对撞机2038年完成实验任务之后才能动手建设,它们的实验启动日期将落后CEPC近10年。所以CEPC不仅仅符合粒子物理发展的规律,也是一个使得中国的粒子物理实验研究率先进入高精度实验研究希格斯粒子、寻找微观世界秘密的难得的机遇。

#### 五、国际上有竞争优势

由于其重大的科学意义,全球高能物理学界普遍认为建设正负电子希格斯工厂是粒子物理发展的必由之路,欧洲粒子物理战略规划物理简报书特别强调了这一点。目前,全球有四个相对成熟的、正负电子希格斯工厂的设计。除CEPC以外,还有国际直线对撞机(ILC)和紧凑型直线对撞机(CLIC)两台正负电子直线对撞机,以及未来环形对撞机

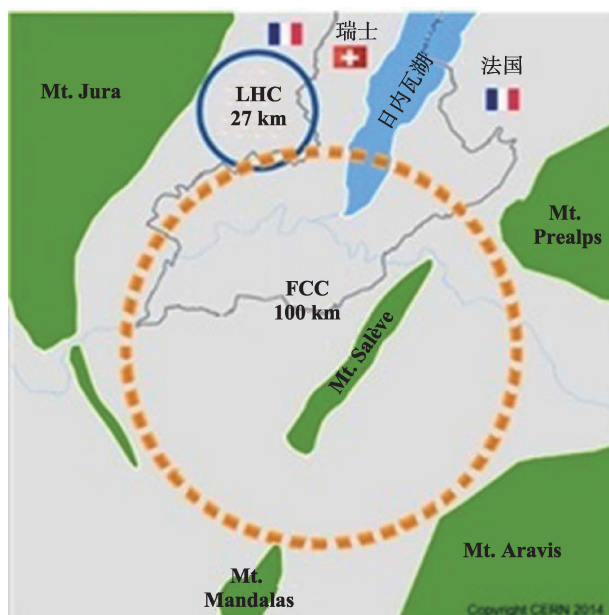


图4

(FCC)。事实上,CEPC和欧洲核子中心的未来发展计划中的未来环形对撞机(FCC)形成了直接的竞争。相对于直线对撞机,CEPC拥有在亮度、即希格斯粒子测量精度上的优势;而相对于FCC,CEPC则拥有时间和造价上的比较优势。如果CEPC能于2020年开始培育、于2035年之前建成,那么CEPC可比FCC项目计划提前5~10年。否则我们会失去这个高能物理发展的机遇,未来几十年很难有类似的在科学、技术、时机上都合适的项目。

## 六、推动技术创新和发展

CEPC关键技术的研究,不仅能用于CEPC本身,也将带来巨大的社会收益。例如,射频超导加速技术已成为国际加速器的主流核心技术,超导高频领域的突破,将为最先进的光源的建设奠定基础,提高中国加速器的国际地位以及国际合作交流的话语权。速调管负责向超导高频腔输出出大功率微波,在雷达、广播等方面有广泛应用。为了实现速调管国产化并达到国际领先水平,CEPC团队开展了高效率速调管的研制工作,其目标是寿命提高10倍,功率提高10倍,效率从60%提高到80%。大功率低温制冷机目前主要依赖进口,部分高指标的

制冷机由于可以用于航天发动机等敏感领域,目前对中国禁运。CEPC对18 KW@4 K大型制冷机的研制将打破国外对这一领域的垄断。高温超导和等离子体加速技术更是可能引领革命性的技术突破,为国民经济做出重大贡献。

此外,从2016年开始,在中科院先导项目的支持下,CEPC研究团队开始进行高温超导磁体研究。高温超导磁体、特别是铁基高温超导磁体是SppC阶段的核心技术,同时拥有巨大的应用前景。CEPC研究团队预期本技术将在2040年左右成熟,可以被应用到SppC项目中,能够以低廉的成本大量生产20 Tesla的铁基高温超导二级铁,继而应用到SppC项目建设中。

## 七、环形正负电子对撞机技术、建造和运行在我国有坚实的基础

1976年物理诺贝尔奖获得者丁肇中先生近来在中科院前沿科学国际战略研讨会上作讲演中提到“中国有很多世界一流的实验物理科学家。他们有想象力,有发展新技术及领导国际合作的经验和能力。他们可以主持最前沿的实验物理,继续为人类知识做出重要贡献”。

作为北京正负电子对撞机(BEPCII)后的实验设施,CEPC是基于国内高能物理三十多年来的发展和积累而提出的。通过北京正负电子对撞机和北京谱仪国际合作实验组30年的不懈努力,我们目前已拥有完整的正负电子对撞机设计、建设和运行队伍,并在多个大科学装置的设计、研制、建设、运行及国际合作、工程管理方面积累了丰富的经验,为CEPC打下了基础。CEPC团队目前包括中国高能物理实验(北京谱仪,大亚湾和江门中微子)、加速器(北京正负电子对撞机、散裂中子源、ADS和高能光源等)和国际合作实验(LHC、ILC等)方面的主要队伍,特别是一大批中青年骨干和多位在欧美工作多年并具有国际管理经验的千人计划和国际著名的加速器、探测器和实验专家等。同时,CEPC已形成了由国际顾问委员会(IAC),机构委员会(IB),指

导委员会(SC),项目经理及各专业工作组组成的框架,研究队伍达到600多人。

在相关地方政府的大力支持下,以及相关企业的参与下,CEPC团队先后在河北省秦皇岛,广东省深汕特别合作区,陕西延安,浙江湖州,吉林长春,湖南长沙等地进行了选址及勘探工作,相关省委省政府均表达了承建CEPC的强烈意愿,表示将对建设经费提供重大实际支持。到目前为止,他们在地质勘探等方面提供了经费和信息支持,为CEPC建设打下了良好的基础。

## 八、巨大回报

CEPC的造价估算为360亿元,分10年建设期间投入,即每年36亿。这的确是笔很大的经费。但是相比之下美国每年高能物理经费为81亿元(11.5亿美元),主要集中在费米实验室的长基线中微子项目和参加欧洲大型强子对撞机。中国在加速器造价费用方面上占有优势,投入不到一半美国年经费就可以建成CEPC,引领中国高能物理实验进入最前沿领先地位。科学上要在世界领先就要有适当的投入。从这个角度上讲CEPC并不算贵。

实际上对CEPC的资金投入将有不小的经济回报。人们对国际上大型科学研究设施经济产出做过研究。大型加速器上投入1美元,由于技术和工艺创新、伴随技术的应用而带来的经济效益为1~3美元。为积极有效开展CEPC工程及产业化的准备工作,2017年11月成立的由高新技术企业组成的CEPC产业促进会(CIPC)已经发展到了70多家企业,他们对CEPC设计报告的准备、土建、选址、关键技术及样机研究等方面都做出了突出的成绩,发挥了独特的工作。CEPC项目将推动科技的进步,通过关键技术的突破和工艺的改进,方能满足建设CEPC的要求。通过CEPC中国的一大批企业将大大提高创新高度、国际竞争力,创造出相应的经济效益,促进国民经济的发展。

CEPC将激励广泛的创新文化,推动经济社会

的发展。以欧洲核子中心(CERN)在LEP和LHC期间的科技发展为例,CERN计算和网络中心发明了WWW万维网并无偿贡献给人类、探测器专家开发的高精度硅径迹探测器和电子学被广泛使用在医学,各种科学实验和空间项目中、粒子加速器技术的进步推动了工业和医学治癌的加速器的普及,他们为全人类带来了巨大的价值和生活质量的提高。CEPC团队非常注重创新和人才,目的就是为在进行科学实验的同时注意对社会的回报。

综合以上考虑,CEPC的投入实际上是个好的投资,它将有前沿科学成果产出甚至发现,推动工业、产业发展,建立强烈的创新文化。

## 九、结束语

卓越的高能物理实验家丁肇中先生续1976年发现J粒子并由此获得诺奖之后,继续领军实验团队建设并运行了大型探测器Mark-J(德国汉堡)和L3(瑞士日内瓦),以及AMS空间站实验(瑞士日内瓦),分别发现了胶子,高精度验证标准模型和观测到反常高能电子谱等一系列重大的科学成果,并培养出一大批出类拔萃的科技人才。他在中国科学院的讲演中还指出“我的大多数实验,受到很多人反对,理由有两方面,一是实验没有物理意义,二是实验极困难,不可能成功”。对曾经遭受过的质疑,丁肇中意味深长地说:“要坚持自己的实验,不能因为名人的反对而放弃,即便他是诺奖获得者。”

攀登科学高峰不会是一帆风顺的,丁先生的鼓励和引导使我们这些从事高能粒子物理研究的科学家、工程技术人员和学生们受到极大的鼓舞。中华民族处在一个伟大复兴的时代,科学的进步和高能物理领域跨入世界前列是我们的中国梦。我们提出建造环形正负电子对撞机,瞄准国际最高目标开展高水平的设计,关键技术和突破,工程准备,国际合作以及人才培育,努力实现中国梦。

### 致谢

本文作者致谢CEPC研究团队的不懈努力,中国科学院“创新国际团队”、“对外合作重点项目”,中国科学院粒子物理前沿卓越创新中心等项目的经费支持。