能量前沿正负电子对撞机的研究进展

高杰, 靳松*

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

* 联系人, E-mail: jinsong@ihep.ac.cn

2014-08-06 收稿, 2014-09-26 接受, 2015-02-13 网络版发表

国家自然科学基金(11175192)资助

摘要 欧洲核子研究中心在2012年发现了希格斯玻色子, 成为物理学史上一个新里程碑. 目前, 全球高能物理界正在积极推动下一代高能正负电子对撞机的预研工作, 以便对新发现的希格斯玻色子进行精确测量并探索标准模型之外的新物理. 本文简要回顾了历史上能量前沿正负电子对撞机的发展历程及其作用, 包括历史上第一台正负电子对撞机AdA的诞生, 在AdA基础上诞生的ACO, VEPP-II, ADONE, 以及后来的SPEAR, DORIS, CESR, TRISTAN, 再到至今为止最大的环形正负电子对撞机LEP等能量前沿正负电子对撞机; 并进一步介绍了目前国际高能物理界正在预研的未来正负电子对撞机的几种设计方案, 如ILC, CLIC, TLEP等, 其中包括我国自主提出的下一代环型正负电子对撞机CEPC.

关键词

加速器
正负电子对撞机
希格斯玻色子

粒子物理是研究物质微观结构以及其相互作用规律的最前沿基础学科, 在宇宙物质起源演化及宇宙物质构成等研究中起着重要的作用. 然而, 随着粒子物理的发展, 人们对物质结构探索的不断深入, 根据量子力学的观点, 所需要的探针粒子的波长也越小, 这意味着所需要的能量也越高. 因此, 粒子物理的发展与加速器的能量增长密不可分.

1897年, 约瑟夫·约翰·汤姆逊发现电子时, 他并没有把他所用的设备称为加速器, 但是这个设备确实是加速器, 他通过两电极加速带电粒子来确定荷质比. 尽管汤姆逊用的只是束流自身的性质, 但自此, 加速器在研究微观粒子特性的过程中, 开始变得不可或缺.

这段时间里, 亚原子微粒的实验仍然主要基于天然放射元素以及宇宙射线, 例如卢瑟福和他的同事们利用放射源发现了质子和中子; 在宇宙射线中发现了正电子、 μ 子、 π^+ 介子、 π^- 介子、 k 介子等. 值

得一提的是, 在此期间, 基于加速器的应用, 中性 π 介子被发现. 该粒子虽然已经在基于宇宙射线的实验中被猜测可能存在, 但一直没能得到确定, 正是基于加速器的粒子实验, 才确实地证实了它的存在^[1]. 此后20多年中, 越来越多的基本粒子在基于加速器的实验中被发现, 比如著名的反质子、矢量介子等, 基于加速器的粒子物理研究变得尤为重要, 必不可少.

然而, 人们发现利用加速器加速粒子束打固定靶, 物理反应“有效能量”正比于粒子束能量的平方根, 约为

$$E_{\text{cm}} \approx \sqrt{2E_0E},$$

即大部分能量浪费在对撞粒子及其产物的动能上. 式中, E_0 为粒子的静止能量. 而对撞则可以将物理反应“有效能量”提高到2倍粒子束的能量^[2]. 因此, 在20世纪50年代, 用于两束粒子对撞的机器——对撞机开始出现. 此后大多数粒子物理的新发现源自于这些不同种类对撞机^[1,3].

引用格式: 高杰, 靳松. 能量前沿正负电子对撞机的研究进展. 科学通报, 2015, 60: 1251–1260

Gao J, Jin S. Review of electron-positron colliders at the high-energy frontier (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1251–1260, doi: 10.1360/N972014-00820

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972014-00820>

2012年7月,欧洲核子研究中心(Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire, CERN)发现的希格斯玻色子(Higgs, 通称“上帝粒子”),受到全球高能物理学界的广泛关注. 然而,由于大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)为质子-质子对撞机,而质子不是基本粒子,它包含夸克、胶子等多种基本粒子,对撞反应的初始条件及生成结果异常复杂,因此,对于希格斯粒子的一些重要性质,例如质量、耦合、衰变等,在LHC上无法得到精确的测量. 此外,在标准模型之外,还可能存在着新的物理. 因此,对于粒子物理学来说,又一次迎来了新的机遇. 本文简介了历史上的能量前沿正负电子对撞机和目前国际上提出的未来正负电子对撞机的几种方案,其中包括我国自主提出的环型正负电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, CEPC).

1 正负电子对撞机加速器的发展

提起正负电子对撞机,首先,不得不从AdA (Anello Di Accumulazione)开始谈起. AdA是国际上第一台正负电子对撞机,它于1960年在意大利Frascati实验室开始建造,1962年在法国奥赛(Orsay)的直线加速器研究所(Laboratoire de l'Accélérateur Lineaire, LAL)开始运行^[4]. 其外形如图1所示,具有较小的尺寸,周长3 m,可以看作桌面级设备^[5]. 其结构采用了单环设计,质心最高碰撞能量在500 MeV^[4,6]. 在此之前,对于正负电子对撞机储存环中的束流几乎没有任何实验室上的测试,它的建造和运行,使得许多以前从未遇到的加速器基本问题得以暴露,包括束团尺度的实际测量、束流寿命的核

图1 在1964年拍摄的AdA照片^[5]
Figure 1 Photo of AdA in 1964^[5]

对、如何确认正负电子束相互碰撞等,这些非常重要问题的研究在AdA上得到开展. 在AdA上,正负电子对撞首次被观测到,Touschek效应^[7]于1963年被发现. 可以说AdA是以后正负电子储存环的最初原型,尤其对以后ACO和ADONE的建造,起到了非常重要的作用.

AdA的成功建造是对正负电子对撞机概念的首次实物化,也使那些对正负电子对撞机持有怀疑态度的科学家认识到一些相关的问题并非是不能克服的^[4]. 而这种新工具的重要性首先被西欧和前苏联人认识到. 因此,随后Novosibirsk的VEPP-II, Orsay的ACO以及Frascati的ADONE,均以更为合理的设计很快先后获得批准并被建造. 事实上,ACO和ADONE的建造正是围绕着AdA所呈现出的问题和限制而建设的^[8].

VEPP-II是AdA之后最先建造的正负电子对撞机,其布局图如图2(a)所示^[9]. 它于1963年开始建造,采用单环设计,全长11.3 m,质心最高对撞能量为1.4 GeV,并于1966年开始收集数据^[10],1967年正式

图2 VEPP-II (a)^[9]及 ACO 布局图(b)^[11]
Figure 2 Layout of VEPP-II (a)^[9] and ACO (b)^[11]

用于正负电子实验,直到1970年^[3,6,9]。期间,VEPP-II的亮度达到了 $2 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,主要用于测量 ρ^- , ω^- , ϕ^- 介子的参数以及衰败模式的研究。在VEPP-II的实验中,首次发现了正负电子对产生的双光子现象,成为双光子物理的开始^[9]。

ACO是与VEPP-II同期但建造稍晚的另一台正负电子对撞机,由法国Orsay的LAL建造。它主要基于AdA的不足而建造。从1965年开始作为对撞机一直服役到1980年,现在ACO作为博物馆陈列在法国。仍然采用了单环的设计,质心最高能量为1.0 GeV^[6],周长约为22 m^[11],束流亮度约为 $6.11 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[12]。在ACO上,螺线管型探测器首次得到应用^[13], ω 介子和 ϕ 介子首次被观测到。布局图如图2(b)所示^[11]。

作为第一代正负电子对撞机的应用,科学家在AdA, VEPP-II和ACO上取得了丰硕的成果,同时也积累了大量的经验。正是由于AdA的成功,意大利的Frascati实验室决定建造与AdA同样类型但尺寸更大且具有更高能量的正负电子对撞机,这就是ADONE(<http://www.lnf.infn.it/acceleratori/adone/>),其目的是寻找更高能量段的物理,质心最高对撞能量可以达到3.0 GeV^[6],设计束流亮度为 $3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。图3为ADONE的形貌照片^[4],周长达到了105 m,其中,可以用于物理实验的直线空间约为2.5 m。它从1963年开始建造,1969年开始运行直到1993年4月26日,一共运行了24年,期间提供了约22000 h的碰撞试验,5300 h的单束运行。关闭后,被改造成为能量更低、亮度更高的对撞机DAFNE。

图3 ADONE 照片^[4]

Figure 3 Photo of ADONE^[4]

SPEAR是继ADONE之后,又一台能量前沿正负电子对撞机,由美国SLAC于1970年9月开始建造,并于1972年首次运行^[14](<http://today.slac.stanford.edu/feature/2010/spear-20-years.asp>)。采用单环设计^[15],周长234 m,质心最高对撞能量为5.2 GeV,亮度为 $6 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[14]。

1974~1975年期间,SPEAR升级为SPEAR-II。升级后SPEAR-II的质心最高对撞能量达到8.0 GeV^[15],并于1975年开始运行,直到1987年^[16]。之后作为同步辐射光源运行了15年,并于2003年进行了进一步的升级:SPEAR-III。作为对撞机期间,SPEAR取得了重要的成果,其中1976年 ψ/J 粒子的发现,以及1975年 τ 粒子的发现,分别成就了1976和1995年的诺贝尔物理学奖^[15]。图4为SPEAR的俯视照片(http://fas.org/irp/imint/doe_slac_spear_01.htm)。

与SPEAR同时期还有德国DESY实验室的DORIS。它于1969年开始建造,并于1974年首次运行,直到1981年。DORIS采用了双环设计,其周长为289 m^[17],最初质心最高能量为7 GeV^[18](<http://www.sciencephoto.com/media/502/view>)。1982年升级为DORIS-II后,质心最高对撞能力可达到11 GeV,其亮度为 $3 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[19](http://doris.desy.de/reports/index_eng.html),如图5(a)所示^[20]。DORIS的突出贡献之一是B介子振荡^[21]。

这一时期还有新西伯利亚的VEPP-III,由INP实验室于1967~1971年建造,1973年开始正式运行。其周长为74 m,质心最高对撞能量为4 GeV(<http://v4.inp.nsk.su/vepp3/index.en.html>)。在1986~1987年进行

图4 SPEAR 照片

Figure 4 Photo of SPEAR

图5 (网络版彩色)DORIS (a)^[20]和 VEPP-IV (b)^[27]布局图
Figure 5 (Color online) Layout of DORIS (a)^[20] and VEPP-IV (b)^[27]

作为VEPP-IV accelerating-storage complex的前级增殖装置, 仍在运行。

VEPP-IV是BINP^{[22]1)}实验室在VEPP-III之后建造的又一台正负电子对撞机, 于1970年开始建造, 1978年完成^[23]。采用了单环设计, 其周长为366 m, 质心最高碰撞能量为11 GeV^[24,25]。1979年开始运行^[26](<http://v4.inp.nsk.su/vepp4/index.en.html>), 直到1985年。期间, 亮度可达到 $5 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[23,24]。随后, 被升级为VEPP-4M。

与VEPP-IV^[27]能量类似的是美国的CESR, 如图5(b)所示。由康奈尔大学于1977~1979年建造, 采用单环设计, 建于原有同步辐射的隧道中^[28]。周长为768 m, 质心最高碰撞能量为12 GeV^[29,30](<http://www.lepp.cornell.edu/Research/CESR/WebHome.html>)。从1979年开始运行, 直到2002年^[31,32], 其亮度可达到 $1.28 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[30]。

PETRA是CESR同期的由德国DESY实验室建造的正负电子对撞机, 于1975~1978年建造(http://en.wikipedia.org/wiki/German_Electron_Synchrotron)。采用单环设计, 周长为2 km, 质心最高对撞能量为46 GeV, 作为对撞机于1978~1986年运行, 亮度可达到 $2.4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[33]。其最显著的贡献之一是首次发现了胶子存在的证据^[34](<http://cerncourier.com/cws/article/cern/29201>)。图6为PETRA实验大厅的照片(http://photon-science.desy.de/sites/site_photon-science/content/e58/e176720/e176739/e196575/e176741/PETRAIII_Halle_eng.jpg)。

PEP是这个时期另外一个正负电子对撞机, 由美国SLAC于1974~1980年建造^[35~37]。采用了单环设计, 周长为2 km, 质心最高对撞能量为32 GeV, 运行时间为1980~1990年, 最高亮度可达到 $6 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[33]。

TRISTAN是日本KEK于1981~1986年建造的正负电子对撞机^[38,39]。采用单环设计, 周长为3 km, 质心最高能量可达63 GeV, 为当时世界最高能量^[40], 于1987~1995年运行, 最高亮度为 $4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[33]。图7(a)为TRISTAN的平面图^[40]。

SLC是美国SLAC的又一个正负电子对撞机, 于1983年开始建造, 并于1987年完成^[41]。与以前加速器不同, SLC采用了直线设计, 为世界上第一台直线对撞机, 如图7(b)所示, 全长3.2 km, 最高能量可以达到100 GeV, 运行时间为1988~1998年^[42], 最高亮度可达到 $0.8 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[33]。

图6 (网络版彩色)PETRA 实验大厅的俯视照片
Figure 6 (Color online) Overlooked photo of PETRA laboratory

1) 由 Gersh Itskovich Budker 于 1959 年建立, 在 1977 年为了纪念 Academician Budker, 改名为 BINP (Budker Institute of Nuclear Physics)

图7 TRISTAN (a)^[40]和 SLAC Linear Collider (b)^[41]的布局图
Figure 7 Layout of TRISTAN (a)^[40] and SLAC linear collider (b)^[41]

与SLC同期的还有欧洲CERN建造的LEP，后升级为LEP-II，是迄今为止世界上具有最高能量的正负电子对撞机。LEP一期于1983~1989年建造^[43]，采用单环设计，周长为27 km^[44,45]，其质心最高对撞能量为91 GeV，于1989~1998年运行，最高亮度可达到 $8.7 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[33]。后于1990~1999年进行了陆续升级^[43]，升级为LEP-II，质心最高对撞能量达到209 GeV，亮度可达 $1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[30,44]，一直运行到2000年^[30](<http://delphiwww.cern.ch/offline/physics/pubdet2.html>)。除了达到当时正负电子对撞机的最高能量，LEP还精确测量出标准模型中W和Z玻色子(<http://cerncourier.com/cws/article/cern/29076>)。图8为LEP的平面布局图^[46]。

20世纪下半个世纪，正负电子对撞机得到了飞速的发展，从1960年AdA开始建造，到1990年LEP-II的升级，经过20多年，质心最高碰撞能量从最初的0.5 GeV迅速提高到209 GeV。粒子物理也得到了飞速的发展，除Higgs外，标准模型预言的其他所有粒子都被发现。但另一方面，对撞机的大小和成本也随之迅速增加，从AdA周长仅有3 m，发展到LEP的周长为27000 m，这也成为1990年后对撞机发展速度减缓的一个原因^[47]。其发展过程如图9所示^[1]，具体参数见表S1。

图8 LEP 布局图^[46]
Figure 8 Layout of LEP^[46]

2 几种未来能量前沿正负电子对撞机

经过近40年的高速发展，从20世纪90年代开始，能量前沿正负电子加速器进入一个发展相对缓慢的时间。取而代之的是，CERN在LEP隧道的基础上，建造了目前世界上最大的质子对撞机LHC，并于2012年发现了标准模型中最后一个、也是最为重要粒子之一的“上帝粒子”，Higgs，成为物理学史上的一个里程碑，也成就了粒子物理学中的第20个诺贝尔物理学奖。但如前所述，由于LHC为质子加速器，存在着局限性，对于Higgs粒子的一些重要性质无法精确测量，需要更精准

图9 (网络版彩色)世界对撞机的发展^[1]Figure 9 (Color online) Development of colliders in the world^[1]

的探测手段进行补充. 因此, 国际上多种方案被提出.

2.1 国际直线对撞机ILC

国际直线对撞机ILC(International Linear Collider)是由国际未来加速器委员会发起的一项大规模的国际合作计划项目.

ILC将建造在总长约30 km的地下隧道里, 由2个11.3 km长的直线加速器分别将正负电子加速到250或500 GeV的能量实行碰撞, 质心系能量达到500 GeV或者到1 TeV. ILC基于1.3 GHz射频超导加速技术, 整体示意图如图10(a)所示.

经过全世界300多个研究机构, 1600多名科研人员的努力, ILC已于2013年6月正式发布了技术设计报告^[48]. 目前, 日本正在积极争取作为ILC的承建国, 并已进行了ILC候选地点的地址勘探等工作.

2.2 紧凑型直线对撞机CLIC

CLIC(Compact Linear Collider)是由CERN主导设计的紧凑型加速器, 其能量范围在0.5~5 TeV, 机器优化主要集中在3 TeV, 由来自于22个国家40多个研究机构参与设计. 采用双束加速方法, 如图10(b)所示, 由主束系统和驱动束系统2个部分组成^[49]. 其中驱动束系统产生12 GHz的尾场, 转换成高频功率, 供主束系统对粒子进行加速. 该加速器设计总长

图10 (网络版彩色)ILC (a)^[48]和 CLIC (b)^[49]的总体示意图Figure 10 (Color online) Layout of ILC (a)^[48] and CLIC (b)^[49]

48.4 km. 目前已完成了概念设计报告^[50,47].

2.3 正负电子对撞机LEP3

在讨论LHC升级方案时, 所提出的在现有隧道中与LHC并排架设新的加速器, 用来进行正负电子束的碰撞试验. 为了与先前LEP, LEP-II加以区别, 被提议命名为LEP3^[51](<http://physicsworld.com/cws/article/news/2012/aug/06/physicists-unveil-plans-for-lep3-collider-at-cern>). LEP3将由2个独立的加速环构成, 采用常温加速结构, 拟用每束120 GeV的能量产生希格斯玻色子, 质心能量为240 GeV. LEP3的建造将利用现有LHC的隧道及现有设施, 因此将大大节约成本, 这也是LEP3相对于ILC, CLIC等项目的优势之一. 此外, LEP3还将进一步推动当前高亮度技术的进步.

2.4 极高能大型正负电子对撞机TLEP

对环形加速器而言, 增加半径是提高能量的重要方法之一. 如果想要超越LEP3的能量, 就需一条新的隧道. 因此, 有人提出在日内瓦湖的下方开挖更大的, 周长为80~100 km的新隧道, 安装1个极高能量的正负电子对撞机, 称为极高能大型强子对撞机TLEP^[52]. 这台机器对撞质心能量可高达350 GeV. 图11(a)为TLEP选址及尺度示意图.

3 我国自主提出的正负电子对撞机CEPC

3.1 CEPC简介

2012年9月,在“第二届中国高能物理加速器物理战略发展研讨会”上,中国科学家提出了建造周长在50~70 km环形加速器的建议.并在初步预研工作后,对该项目给出了较为全面的介绍^{[53,54]2}.该项目一期工程为质心能量为240 GeV的高能正负电子对撞机CEPC(Circular Electron Positron Collider),作为Higgs工厂,对Higgs的物理性质进行精细的研究.将来,可在同一隧道建造质心能量为50~100 TeV的强子对撞机SPPC(Super Proton-Proton Collider).按目前方案考虑,CEPC周长约为50 km,根据其预研情况,最后可能达到100 km.其规模要比LHC(LEP)大将近1倍,如图11(b)所示.

除了地下隧道工程,地上也将建成包括一个面积约为5000亩的现代化实验园区,以及若干个百亩量级的实验分部.地下实验大厅和地表部分将通过若干直径为20 m左右的大型垂直孔道相连,以运送对撞机和探测器部件在隧道里安装. CEPC地表部分除实验区、工作区外,还将建立伺服区,给CEPC项目的供电、冷却以及通风提供重要保障. CEPC实验园区将可容纳数千或上万名科学家和工作人员,因此,园区将包括相应工作、生活和服务设施(办公、会议场所、食堂、招待所、医疗急救、消防抢险设施等).

CEPC建成后将作为加速器技术、探测技术和粒子物理的国际研究中心,形成一批多学科交叉研究的创新平台,成为培养高水平研究生与博士后教育的基地,也将聚集一批国内外高新技术企业. CEPC研究中心采用国际一流科研机构的运作模式,与世界各国在科技合作、人才培养、科技交流、联合建立科研机构等方面展开实质性合作,最终成为一个国际科学城,促使我国科技水平进一步提高,使高能领域走在世界的前列.

目前,CEPC前期预研工作已初步开展,如:50 km加速器物理参数的初步优化^[55],最终聚焦系统束流光学的研究等^[49,50].

3.2 对CEPC的评价

CEPC的提出引起了国内外的巨大反响^[51]. 2013

图11 (网络版彩色)TLEP建造示意图(a)^[52]及CEPC隧道长度及孔径大小比较示意图(b). CEPC背景为北京环路地图,仅用于尺寸参考并不代表实际位置

Figure 11 (Color online) A possible implementation of TLEP (a)^[52] and CEPC (b)². The background of CEPC is the road map of Beijing. It is just for the comparison of size of CEPC, but not for the real address

年6月12~14日,主题为“下一代高能正负电子对撞机:现状与对策”的香山科学会议第464次学术讨论会在北京香山饭店召开.来自全国11个单位的35位高能物理和加速器领域的专家学者应邀参加了会议,与会专家围绕“下一代高能正负电子对撞机粒子物理理论”、“直线对撞机及Higgs工厂加速器”、“直线对撞机及Higgs工厂粒子物理实验和探测器”、“我国的下一代高能正负电子对撞机对策”等中心议题进行了深入交流与讨论.与会专家达成共识:“环形正负电子对撞机Higgs工厂(CEPC)+超级质子对撞机(SPPC)”是我国高能物理发展的重要选项和机遇,应立即组织队伍,开展方案设计,研究关键问题,探讨实现路径,尽快完成可行性研究报告.

2013年12月16~17日,“未来高能物理环形对撞机国际研讨会(International Workshop on Future High Energy Circular Colliders)”在中国科学院高能物理研究所召开.2004年诺贝尔物理学奖得主David Gross教

2) 承载梦想、引领未来的 CEPC. 中国科学院高能物理研究所内部报告

授做了大会特邀报告,他高度评价了中国的CEPC,认为这将毫无疑问地把中国高能物理研究推动到世界的领袖位置.未来高能环形对撞机将在21世纪的物理中起到至关重要的作用.

2013年12月*Nature*杂志2013年度回顾专刊发表了以“粒子物理:共同走向下一个前沿(Particle physics: Together to the next frontier)”为题的评论文章.文中指出:“中国角色的改变增加悬念.中国在粒子物理学历史上是个小角色,它2012年在反应堆中微子物理学方面以令人印象深刻的成果走上了世界舞台……”.令人鼓舞的是,中国可能通过承建100 TeV的机器超越世界吗?机器建设在中国是便宜的,尽管中国需要世界其他国家帮助设计和建造.如果中国真跑到了前头,随着新兴经济瞄准竞争,这将会改变世界科学的格局.

David Gross教授说:“我把这个梦想叫做‘中国的伟大加速器(The Great Accelerator)’,这会和万里长城(The Great Wall)一样引人瞩目.它会比万里长城的作用更大,会在科学技术各领域有突破和发现.”

4 总结

从20世纪60~90年代,粒子物理在近半个世纪的时间得到了飞速的发展.期间,正负电子对撞机从最初的0.5 GeV迅速提高到209 GeV,规模也从桌面级的3 m周长增加到27000 m.2012年7月Higgs粒子的发现给粒子物理的研究与发展带来了又一次历史新契机.目前,国际对ILC, CLIC, LEP3, TLEP等多个未来正负电子对撞机方案进行深入研究,其中以ILC的项目立项成熟度为最高,建造时间表为最前.

为了抓住这次难得的历史发展机遇,我国科学家也提出了自己的未来环形正负电子对撞机方案CEPC,并可在CEPC隧道(50~100 km)的基础上升级为质心能量为50~100 TeV的超级质子-质子对撞机(SppC).21世纪的中国应该是世界上举足轻重的重要国家,建设一个以CEPC+SppC为龙头的国际科学城,使中国的基础物理学乃至科学走在世界前列,这是国家全面发展的一个难得的历史机遇和重要抓手,具有重大科学意义、技术意义和社会意义.

致谢 本文在撰写过程中,得到了中国科学院高能物理研究所的王毅伟、王逗、白莎、翟纪元、刘振超等人的支持和帮助,在此表示由衷的感谢!

参考文献

- 1 Panofsky W K H. Evolution of particle accelerators. SLAC Beam Line, 1997, 27: 36–44
- 2 Zhao J J, Yin Z J. Particle Accelerator Technology (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2006 [赵籍九, 尹兆久. 粒子加速器技术. 北京: 高等教育出版社, 2006. 6]
- 3 Sessler A M. The development of colliders. LBNL-40116/CBP Note-208/UC-414, 1997
- 4 Bernardini C. AdA: The first electron-positron collider. Phys Persp, 2004, 6: 156–183
- 5 Haissinski J. From ADA to ACO: Reminiscences of Bruno Touschek, LAL98-103, December 1998
- 6 Chao W A, Maury T. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing Co Pre Ltd, 1999. 12
- 7 Bernardini C, Corazza G F, Guigno G D, et al. Lifetime and beam size in a storage ring. Phys Rev Lett, 1963, 10: 407–409
- 8 Amman F. Electron positron storage rings: Status and present limitations. Nucl Sci, 1969, 16: 1073–1081
- 9 Skrinsky A. Accelerator field development at Novosibirsk (history, status, prospects). In: Proceedings of the IEEE/APS PAC, 1995, 1: 14–26
- 10 Auslander V L, Budker G I, Naumov A A, et al. Beginning of experiments at positron-electron Storage ring VEPP-2. Atomn Energy, 1966, 22: 173–175
- 11 Guyon P M, Depautex C, Morel G. Design of a synchrotron radiation facility for Orsay's ACO storage ring: LURE. Rev Sci Instrum, 1976, 47: 1347–1356
- 12 The Orsay Storage Ring Group. Status report on ACO. In: Proceedings of the 8th International Conference on High-Energy Accelerators, 1971, 1. 127–131

- 13 Amman F. Electron and positron storage rings: Present situation and future prospects. In: The 8th International Conference on High Energy Accelerators, CERN, 1971, 1. 63–71
- 14 Feldman G J. Photon-photon collision experiments at SPEAR. SLAC-PUB-1303(E/I), September 1973
- 15 Stanford Synchrotron Radiation Laboratory. SPEAR 3 Design Report. SLAC-R-609, November 2002
- 16 Hettel P, Akre R, Allison S, et al. SPEAR 3 upgrade project: The final year. SLAC-PUB-9842, 2003
- 17 Voss G A. Report on DORIS. In: Proceedings of the 6th IEEE Particle Accelerator Conference, 12–14 Mar 1975, Washington D C. IEEE Trans Nucl Sci, 1975, 22: 1363–1365
- 18 DORIS Storage Ring Group. DORIS at 2×5 GeV. Nucl Sci, 1979, NS-26: 3135–3137
- 19 Salvini G. Physics with matter-antimatter colliders. Phys Rep, 1988, 171: 231–424
- 20 Criegee L, Knies G. e^+e^- physics with the PLUTO detector. Phys Rep, 1982, 83: 151–280
- 21 Browder T E, Honscheid K. B mesons. Prog Part Nucl Phys, 1995, 35: 81–219
- 22 Skrinskii A N. Accelerator and detector prospects of elementary particle physic. Sov Phys Usp, 1982, 25: 640–661
- 23 Bokov M, Burenkov D, Polyansky A, et al. Results of long-term observations of deformations of the VEPP-4 storage ring constructions, BINP. In: 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 2004
- 24 Skrinsky A. The Novosibirsk electron-positron colliders: Status and prospects. Nucl Instr Methods Phys Res A, 1996, 379: 345–348
- 25 Skrinsky A N. Accelerator activities at Budker Institute of Nuclear Physics. In: 17th International Conference on High-energy Accelerators, Dubna, Russian Federation, 7–12 September 1998, 1. 65–71
- 26 Skrinsky A. The new Novosibirsk colliders. In: 30th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on High Luminosity e^+e^- Collisions, Stanford, 13–16 Oct 2003
- 27 Goman E, Karnaev S, Plotnikova O, et al. The database of the VEPP-4 accelerating facility parameters. In: Proceedings of PCaPAC08, Ljubljana, Slovenia, MOW04, 2008
- 28 McDaniel B D. Report on CESR, the Cornell electron storage ring. In: Proceedings of the 1979 International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies, 23–29 August, 1979
- 29 Tigner M. CESR—An electron positron colliding beam facility at Cornell. IEEE Trans Nucl Sci, 1977, 24: 1849–1853
- 30 Olive K A, Agashe K, Amsler C, et al. Review of particle physics: 30 high-energy collider parameters. Chin Phys C, 2014, 38: 392–397
- 31 Rubin D L. CESR status and plans. In: Proceeding of Particle Accelerators Conference, 1995, 1. 481–485
- 32 Rice D. CESR-c: A wiggler-dominated collider. In: The Particle Accelerator Conference, 2007 PAC IEEE, June 2007. 48–52
- 33 Barnett R M, Carone C D, Groom D E, et al. Review of particle physics. Phys Rev D, 1996, 54: 1–708
- 34 Soding P. On the discovery of the gluon. Eur Phys J, 2010, 35: 3–28
- 35 Lawrence Berkeley Laboratory University of California. Accelerator Division Annual Reports, 1 July 1972–31 December 1974. LBL-3835, 1974
- 36 Lawrence Berkeley National Laboratory. PEP Conceptual Design Report. LBL-4288, 1976
- 37 Rees J R. The positron-electron project-PEP. SLAC-PUB-1911/PEP-243, March 1977
- 38 Nishikawa T, Horikoshi G. Status of KEK TRISTAN project. IEEE Trans Nucl Sci, 1983, 30: 1983–1987
- 39 Horikoshi G, Kimura Y. Status of TRISTAN. Nucl Phys Sec A, 1988, 478: 265–282
- 40 Kimura Y. From TRISTAN to B-Factory. IPAC10 Special Lectures to Commemorate the 120th Anniversary of the Birth of Yoshio Nishina, October 2010
- 41 Seeman J T. The Stanford linear collider. SLAC-PUB-5607, July 1991
- 42 Assmann R, Barklow T, Breidenbach M, et al. SLC — The end game. SLAC-PUB-9724, April 2003
- 43 Hübner K. Designing and building LEP. Phys Rep, 2004, 403-404: 177–188
- 44 Aßmann R. A brief history of the LEP collider. Nucl Phys B Proc Suppl, 2002, 109: 17–31
- 45 European Organization for Nuclear Research. LEP design report: Vol II the LEP main ring. CERN-LEP/84-01, June 1984
- 46 Bailey R, Benvenuti C, Myers S, et al. Advance in particle physics: The LEP contribution. Comptes Rendus Physique, 2002, 3: 1107–1120
- 47 Shiltsev V. Colliders —“Quo Vadis?": Tomorrow and “After Tomorrow”, Analysis, Prediction and Plan. Future Colliders, Fermi National Accelerator Laboratory, April 26, 2012
- 48 Behnke T, Vrau J E, Foster B, et al. The International Linear Collider Technical Design Report, 2013
- 49 Wang Y W. Study on the beam dynamics of the CLIC main linac and the beam optics of the ILC/CEPC final focus system (in Chinese). PhD Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 [王毅伟. CLIC主直线加速器束流动力学及ILC/CEPC最终聚焦系统束流光学研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2013]

- 50 Aicheler M, Burrows P, Draper M, et al. A multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC Conceptual Design Report. CERN-2012-007, 2012
- 51 Blondel A P, Geneva U, Zimmermann F, et al. LEP3: A high luminosity e^+e^- collider in the LHC tunnel to study the Higgs boson. Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, TUPPR078
- 52 Koratzinos M, Blondel A P, Aleksan R, et al. TLEP, first step in a long-term vision for HEP. arXiv:1306.5981, 2013
- 53 Wang Y F. Build large accelerator, to achieve scientific dream (in Chinese). Modern Phys, 2014, 26: 29–31[王贻芳. 建设大型加速器实现科学梦. 现代物理知识, 2014, 26: 29–31]
- 54 Holden K. Chinese physicists set to unveil conceptual design for the globe's most advanced circular collider. Sci Bull, 2015, 60: 146–148
- 55 Wang D, Gao J, Xiao M, et al. Optimization parameter design of a circular e^+e^- Higgs factory. Chin Phys C, 2013, 37: 097003

Review of electron-positron colliders at the high-energy frontier

GAO Jie & JIN Song

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

In 2012, the discovery of a particle matching the Higgs boson at CERN's Large Hadron Collider became a very important milestone in high energy physics history. Research and development towards future high-energy electron-positron colliders is actively explored around the world with the purpose of measuring precisely the properties of this unconfirmed Higgs boson and to discover new physics beyond the Standard Model of particle physics. In this paper, we briefly review the history from the past half century of electron-positron colliders at the high-energy frontier, including the first electron-positron collider AdA, as well as the colliders based AdA, such as ACO, VEPP-II, ADONE, and the later colliders SPEAR, DORIS, CESR, TRISTAN etc., and the last and largest electron-positron collider in the world up to now, LEP. Then, the paper reports several proposals for future electron-positron colliders from around the world such as ILC, CLIC TLEP and so on, in particular China's entry, the Circular Electron-Positron Collider.

accelerator, electron-positron collider, Higgs boson

doi: 10.1360/N972014-00820

补充材料

表 S1 能量前沿正负电子对撞机列表

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.