

从 BEPC 到 CEPC

王贻芳

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1988年10月16日,北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider, BEPC)首次实现了正负电子对撞,宣告建成。至今,已经整整30年。这30年,是我国科学技术飞速发展的30年,特别是基础科学有了长足进步,一些领域已经跻身国际先进行列,一些领域与国际先进水平的差距已大大缩小。以BEPC建设为起点,高能加速器、高能物理领域这30年走过的道路,正是我国科学技术30年发展历程的一个缩影。

在国家的支持下,中国的高能物理研究实现了飞跃发展,从零起步,在国际高能物理界从“占有一席之地”发展为走在前列,不仅占据 τ -粲物理国际领先地位,还开拓了中微子研究领域并取得重大成果,并在宇宙线实验、暗物质探测、X射线天体物理研究等方面取得长足进步;同步辐射光源、散裂中子源等大型多学科交叉研究平台的建设迅速发展,成为国家科技创新体系的重要单元。同时,在技术创新和成果转化、人才培养方面也取得了一系列骄人成绩。时至今日,回顾BEPC工程建设、科学研究、技术发展的成就,对于我们未来的工作,有着宝贵的借鉴意义。

一、BEPC 奠定了我国高能物理发展的根基

BEPC是在邓小平同志的直接关怀下建设的我国第一台大科学装置,1984年10月7日开工建设,1988年10月16日建造成功,成为国际上 τ -粲物理能区性能最好的对撞机,2004~2009年BEPC进行了重大升级改造。成为国际先进的双环对撞机(图1)。它的建造成功和升级,分别获得国家科技进步

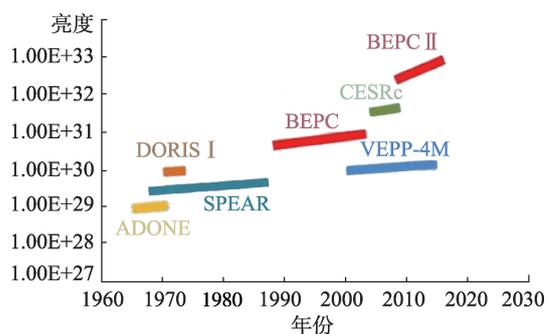


图1 国际上 τ -粲能区正负电子对撞机的亮度发展的历史

奖特等奖(1990年)和一等奖(2016年),不仅是中国高能物理发展史上的重要里程碑,也是中国高科技发展的重要象征。

依托BEPC,30年来我国高能物理研究蓬勃发展,结出了丰硕的成果,确立并发展了在粲物理研究领域国际领先地位,以我为主的北京谱仪(Beijing Spectrometer, BES)实验取得一系列国际领先的研究成果,包括 τ 轻子质量的精确测量、2~5 GeV能区强子反应截面(R 值)测量、发现新强子态、发现带电类粲偶素 $Z_c(3900)$ 、 J/ψ 共振参数的精确测量、 D_s 物理研究、 $\psi(2S)$ 粒子及粲夸克偶素物理的实验研究、 J/ψ 衰变物理的实验研究等,在国际著名期刊上发表文章400多篇,被国际权威《粒子物理手册(PDG)》引用的成果500多项,获得省部级以上奖励40多项,其中国家自然科学奖二等奖5项。在本土高能物理实验取得成功的基础上,我国科学家还参与了国际高能物理前沿研究最重要的实验并作出重要的贡献,如欧洲大型强子对撞机LHC上的CMS、ATLAS等实验,AMS实验等,提升了中国在国际高能物理领域的显示度。

BEPC“一机两用”,北京同步辐射装置是我国第一个正式投入运行的同步辐射光源,每年可向用

户提供约2000小时的专用实验机时,为凝聚态物理、材料科学、生物医学、资源环境、微电子及微机械技术等多学科应用研究提供了先进的实验平台,支撑用户获得了解析SARS病毒主蛋白酶及其抑制剂结构、测定高等植物捕光膜蛋白复合物结构、发现砷剂治疗白血病的机制等一批重要成果。

BEPC的建设使我国的磁铁、真空、微波、电源、精密机械、准直测量、束测、控制、低温和超导等加速器关键技术获得飞速发展。20世纪90年代后期,高能所又开展了新光源的设计与预研,这后来发展成为上海光源。21世纪初,散裂中子源等加速器开始规划,经过十多年的努力,2018年成功完成建设任务。近年来,高能所还完成了用于驱动核反应堆的强流质子加速器的注入器,已达到10 mA@10 MeV的世界最好水平。新设计的高能同步辐射光源(High Energy Photon Source, HEPS)即将开始建设,其发射度指标是世界最好的,表明我国加速器技术已经走上国际前列。

2018年6月,中国科学院高能物理研究所进行了国际评估,包括两位诺贝尔物理学奖获得者在内的18位国际顶尖专家组成的评委会认为:“高能物理所已经成为国际重要的粒子物理实验室之一。除了欧洲核子中心外,我们认为高能物理所可以与世界其他主要高能物理实验室相媲美,包括美国斯坦福直线加速器中心、美国费米国家加速器实验室、日本高能加速器研究机构等。”中国的高能物理发展到今天,获得如此评价,追本溯源,与BEPC的建设和30年来的成功运行是分不开的。

二、BEPC建造及发展的成功经验带来的启示

我国的高能物理发展道路是艰辛曲折的,30年来BEPC走过的也绝非坦途,回顾它的成功建造、运行以及所取得的令世界瞩目的重大成果,可以得到以下启示。

1. 要综合考虑前沿科学目标、国家实力与需求、学科自身发展目标来选择装置建造方案。高能

加速器建造方案经历了“七上七下”,直到2×22亿电子伏特的BEPC建造方案被提出,得到科学界的共识和国家的支持,成功上马。这一方案的对撞机规模虽然不太大,但所选择的能区是 τ -粲物理的一个“富矿区”,可为我国的高能物理研究后来居上提供机遇和支撑;涵盖的技术很全面,建造投资仅为2.4亿元,既可以建设国内的高能物理实验基地,又可以培养锻炼我国相关高技术的骨干力量,也是当时我国财力和工业技术能力可以承担的;同时,同步辐射光源也有广阔的应用价值,可谓兼顾国情、前沿科学目标和我国高能物理学科发展的最佳方案。在BEPC这30年运行期间,BES实验积累了 τ -粲能区世界最大的数据样本,藉此取得若干重大物理成果,确立了我国在 τ -粲物理领域的国际领先地位。

2. 要敢于接受国际上的挑战和竞争。在决策建设BEPC前,针对质子打固定靶和电子对撞方案是有争论的,国际上更有科学家指出,想要跳过建设固定靶加速器的经验积累,直接建设电子对撞机就“好比站在月台上,想跳上一列飞驰而来的特快列车。如果跳上了,从此走在世界前列,否则将粉身碎骨”,而事实证明我们不仅成功建造了BEPC,还使之成为国际 τ -粲能区最好的对撞机。在决策BEPC重大改造方案前,面对美国康奈尔大学加速器CESR的正面竞争,我们经过反复计算、研讨和评估风险,克服了隧道截面小、对撞区短的难点,把改造方案从麻花轨道单环方案修改为双环方案,从把BEPC性能提高7倍左右,到可以提高100倍左右。事实是康奈尔大学的加速器CESRc改造后的亮度只达到了预期性能的四分之一,而我们的BEPCII性能比它高了一个量级。BEPCII投入运行后,CESRc就关闭了,在其上工作的美国6所大学的物理学家参加了BESIII实验的合作。

3. 对于高能物理学科发展来说,国内的实验基地始终是巩固和发展国际地位的坚实基础。在BEPC建成前,我国科学家除了高山宇宙线实验外,只能参与别的国家主导的高能物理实验。1988年BEPC和BES建成并投入运行,成为粲物理能区性

能最好的实验装置,我们终于有条件作为东道国组织多国科学家参与的、大规模的物理实验,开展以中方为主的国际合作。1992年,参与科学研究的中美科学家组成了一个合作组,称作BES合作组,在不长的时间内就发展为来自中国、美国的20多所大学和研究机构参加的大型国际合作组。之后,随着装置的改造,BES II、BES III合作组延续至今。目前,BES III合作组有来自14个国家和地区的60多个研究单位的450多位科学家参加。合作组成员在物理课题选取、运行计划安排、数据分析、文章评审、参与国际会议、机制和规章建立和未来发展等多方面通力合作,按国际规则办事,在轻强子谱、粲偶素物理、粲物理、量子色动力学和 τ 物理等方面取得了一系列丰硕的实验成果。

4. 装置建设方案尽可能兼顾其他学科的需求。由于高能物理实验装置造价十分高昂,因而在满足高能物理实验需求的同时,应尽可能兼顾到其他学科的需求,成为多科学的公共实验平台。BEPC是按照“一机两用”原则进行设计的,既是高能物理实验装置,又是同步辐射光源,这一模式取得了成功。在其上建设的北京同步辐射装置(BSRF)1991年投入运行,研究领域涵盖了物理、纳米科学、材料科学、信息科学、化学化工、生命科学、资源环境、医学等,每年可支撑来自国内外的近百个研究机构和大学的千余名用户进行200多个课题实验。另外,还在直线加速器的末端建立了中能核物理实验装置,在储存环进行高能物理或同步辐射实验期间,将电子束偏转到核物理试验站,开展束流实验和辐照实验;或将正电子束偏转到实验站,开展纳米材料、先进半导体、核材料和高分子材料领域的研究。

5. 大科学装置研制一定会是高科技发展的沃土。BEPC工程以及BEPCII工程的作用决不仅限于为基础研究提供更先进的科研手段和条件,由于对撞机的建造涉及的学科综合、技术精尖,实际上促进、推动了我国高科技领域多方面的发展,带动了大功率速调管、加速管、超导射频、高性能磁铁、精密机械、高稳定电源、超高真空、超导磁铁、大规

模低温系统、束流测量、计算机自动控制、核探测器、快电子学、高速数据获取和数据密集型计算等高新技术的发展。在工程建设的联合攻关中,项目的需求转化为企业的动力,企业从科研单位得到大量信息、资料和科研方法的训练,成为企业继续发展的无形资产;通过联合研发,企业改进了生产工艺和质量保证体系,提高了产品质量和指标。企业由此得到的不仅是直接的经济效益,而且也得到了锻炼,掌握了方法,有了进一步发展的动力和机会。比如,BES建设期间的速调管研制,极大地推动了我国广播通讯事业的发展;BES III的高精度机械加工需求极大地推动了成都飞机工业(集团)有限责任公司的技术能力,为我国的航空事业发展做出了重要贡献。由于BEPC的建设,高能所建设了国内当时最先进的计算机网络系统,引进了互联网、万维网和网络计算,是国内首个国际邮件(email)和WWW网页的发源地。

6. 要坚持自主创新与国际合作相结合。国际合作是高能物理实验研究的基本方式。北京正负电子对撞机的建造、中国高能物理实验研究也是在与世界各国高能物理界的密切合作中进行和发展起来的。通过国际合作,我们得以加快人才培养、先进技术引进的速度。但即使在20世纪80年代,我们几乎从零开始BEPC工程的研制,也始终坚持自力更生的方针,坚持在吸收、消化、改进的基础上引进先进技术,进行自行设计、研制、安装和调试。凡能在国内生产的,绝不到国外去买,工程设备部件的国产率达到90%。这一做法使人才队伍在工程实践中得到坚实的锻炼,迅速成长为我国加速器、探测器技术的骨干力量,夯实了之后进行自主技术发展的基础。

三、CEPC——中国高能物理面临的重大机遇

过去30年,我们以BEPC为起点,取得了长足进步。未来30年,将是我国科技发展的关键期,要从“追赶”成为“领跑”,至少在部分领域需要发起一

批标志性的科学工程,取得一系列重大科学成果。而2012年7月欧洲核子中心(CERN)发现希格斯粒子,基础物理学走到了一个关键的拐点,正好给我国的高能物理发展提供了一个赶超、领先的绝佳机遇。中国科学家提出建造质心能量为91~240 GeV的高能环形正负电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, CEPC)设想,作为北京正负电子对撞机以后的下一代中国高能加速器(图2)。

继希格斯粒子被发现以后,国际高能物理界普遍认为对它的深入研究极为重要和迫切,是探索超出标准模型新物理的最好窗口。为此,日本科学家在积极推进建造他们主导的国际直线加速器(International Linear Collider, ILC),欧洲在计划建造未来环形对撞机(Future Circular Collider, FCC)。希格斯粒子解释了基本粒子质量起源这一深刻问题,但也具有一些我们前所未见的特性。比如它是唯一的自旋为0的基本粒子;参与非规范的相互作用(其他基本粒子只有规范相互作用);是其他基本粒子质量的起源,但其自身的质量来源我们不知道等。同时,希格斯粒子和其自身的相互作用对宇宙早期的演化具有重要影响,可以为我们解释宇宙中的反物质丢失之谜提供极其有用的线索。我们也知道标准模型不是终极理论,目前已有的一些实验结果和问题不能在标准模型内得到解释。但这些问题,如真空的亚稳态,基本粒子质量相差太大,希格斯粒子质量的自然性等,均和希格斯粒子有关。研究希格斯粒子,是通向更深层次物理的钥匙,是粒子物理研究不可跨越的一步。

CEPC瞄准高能物理的前沿——希格斯粒子,通过对其精确测量,深入研究标准模型并寻找新物

理。一旦建成,中国将成为全球高能物理研究的中心,将吸引全世界最优秀的一批科学家和工程师来华工作,建设一个世界级的科学中心,同时作为龙头带动一系列核心技术的发展。

CEPC也将是世界唯一的超高能同步辐射光源,光子能量可达20 MeV,通量极高,在核物理、国防、材料、微加工、大型部件检测等许多方面可以有大量应用。

国际领先的科学装置必然需要国际领先的技术,CEPC所需的很多关键技术也反映了未来加速器技术发展的必然趋势。如大功率超导高频加速技术、高效率微波功率源和大型制冷机等应可以取代进口,破解国外禁运;还有超导磁体及超导线、低温、精密机械、真空、电子、抗辐照芯片、自动控制、计算机等具有战略意义的前沿技术可以实现国际领先。这些技术研发与成果转化,可以推动相关领域的“跨越式”进步,打造一批国际领军科技企业,极大地提升国家的科技创新能力和国际竞争实力,提高中国在国际社会中的领导地位。

我们已有30多年正负电子对撞机的经验,关键技术有很好的基础。虽然还需要努力,但以我们的能力及人员队伍,我们有十分的把握能完成任务。在人才方面,我国高能物理学界目前拥有约1000名研究人员,其中有相当数量的青年人才。这个规模略低于欧、美、日,处于世界第四的位置。这支队伍获得过一系列国际领先的重要成果,并在大型强子对撞机(LHC)的国际合作中发挥着显著作用。与此同时,CEPC项目的预研已经吸引了大批顶级的国际专家进行合作。可以预见,一旦CEPC项目正式立项,我们将通过自主培养和国际合作方式,吸引

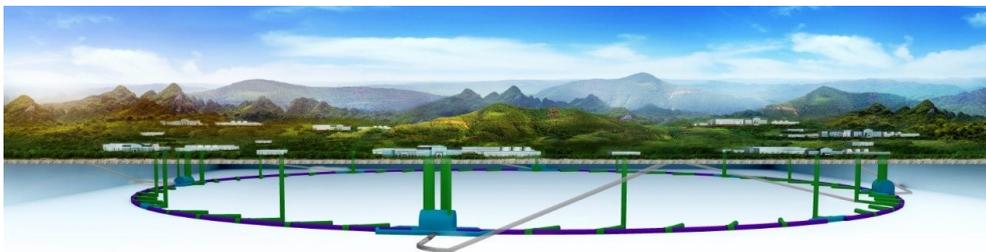


图2 CEPC 布局设计图

大批优秀人才。

参与CEPC项目的一批科学家、工程师百折不挠,在质疑与争议声中,坚持推进项目的设计和预研工作,在加速器物理、超导加速腔、高效速调管、束流测量、直线加速器关键技术、探测器关键技术等方面均取得了卓有成效的进展。2018年6月CEPC加速器概念设计报告通过国际评审,评审委员会肯定了CEPC设计工作令人瞩目的进展,认为概念设计工作已经证明项目的基本可行性,下一步可以进入技术设计报告阶段。

国际未来加速器委员会曾于2014年两次发表声明:“支持能量前沿环形对撞机研究并鼓励全球的协调”,“继续鼓励国际环形对撞机的研究”。亚洲未来加速器委员会和亚洲高能物理委员会也曾于2016年明确表示:“我们鼓励中国领导的这个方

向”。目前,高能所已与20多个国家的科研机构或大学签署了合作意向书,并采取了多项措施深化国际合作。CEPC正在日益成为一个国际化的大科学项目,为国际学术界所瞩目。

人类文明的发展在很大程度上是科技的发展,而科技发展史无数次证明,许多重大科学成果的产出,有赖于大科学装置的建造。2018年3月,国务院正式印发《积极牵头组织国际大科学计划和大科学工程方案》,明确了我国牵头组织国际大科学计划和大科学工程“三步走”发展目标。这意味着我国牵头组织国际大科学计划和大科学工程迈入“快车道”,将为解决世界性重大科学难题贡献中国智慧。相信在未来的30年中,我国高能物理和先进加速器发展会再上一个台阶,我国的基础科学研究将迎来又一个辉煌时期。



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的Word文档发送至本刊电子信箱mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科

技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2018年《现代物理知识》每期定价10元,全年6期60元,欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号:2-824。

编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

银行账号信息

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

需要过去杂志的读者,请按下列价格转账。

2010~2017年单行本每期10元;2010~2015年合订本每本60元。