

从 BEPC 到 BEPCII

陈和生 李卫国 张 闯

(中国科学院高能物理研究所 100049)

北京正负电子对撞机(BEPC)是我国改革开放中建设的第一台重大科学装置。1988年10月24日,邓小平同志亲临BEPC的落成典礼,发表了“中国必须在世界高科技领域占有一席之地”的著名讲话,指出:“过去也好,今天也好,将来也好,中国必须发展自己的高科技,在世界高科技领域占有一席之地”。对撞机的建设者们没有辜负小平同志的殷切期望,BEPC在建成后立即投入运行,性能在国际上 τ -粲能区的对撞机中居于领先地位,在BEPC的北京谱仪(BES)上取得了 τ 轻子精确测量、 R 值测量和新粒子 $X(1835)$ 的发现等重要成果。BEPC的丰硕成果,得到国内外高能物理界的高度评价,也引发了在粲物理领域研究的国际竞争。在国家的大力支持下,我们制订了中国高能物理发展战略,依靠全所同事的齐心努力,实现了从BEPC到BEPCII的发展,继续保持我国在世界高能物理领域的一席之地和在粲物理领域的领先地位。

一、从单环方案到双环方案

BEPC是一台单个储存环的对撞机,在它的储存环里只有一对正负电子束团进行对撞,因此限制了对撞亮度的提高。为了提高国际竞争力,我们提出了BEPC亮度提高的计划。开始时,我们的方案是利用两组静电分离器,在储存环里形成麻花状的轨道,这样就可以在一个环里储存7~9对正负电子束团,在相互作用点进行对撞。这个麻花轨道的改造方案,在理论上可以把对撞机的亮度提高7~9倍,达到 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2001年1月,我们带着BEPC改进的方案访问美国。在康奈尔大学,我们得知那里的一台原先在束流能量为5.6 GeV的正负电子对撞机CESR,要降低到1.5~2.5 GeV的粲物理能区工



图1 BEPC鸟瞰

作,称为CESR-c,并把CESR上的大型探测器CLEO改造为CLEO-c,同BEPC争夺粲能区丰富的物理“矿藏”。CESRc的设计亮度也是 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而且是一个“短平快”的方案,使我们感受到很大的压力。李政道先生得知这个情况后说:“Life is interesting”,鼓励我们接受挑战,敢于同国际对手竞争。

回国以后,我们召开了BEPC全体人员大会,报告了访问康奈尔大学的情况和CESR-c的计划,提出要迎难而上,提高BEPC改进方案的指标,在竞争中取得主动权。经过讨论,领导班子的意志成为了全体科研工程人员的决心。为了继续保持我国在粲物理领域的优势,我们提出了新的改造方案,采用国际先进的双储存环、大交叉角对撞,同时要新建一台与BEPCII的高亮度相匹配的新北京谱仪(BESIII)。这就是北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)。BEPCII的设计亮度为 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 比BEPC提高100倍,是CESR-c的3~7倍,从而大大提高了竞争力。随后,我们又召开了BEPCII可行性研究的国际评审会和所学术委员会扩大会议,对方案进行了深入的评审和讨论,形成了共识。

BEPCII建设的主要任务是在BEPC已有隧道内,建造国际上先进的双环对撞机,在质心系能量3.77 GeV时达到 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;与BEPCII高计数率运行的要求相配合,建造新北京谱仪BESIII,大幅度提高测量精度,减少系统误差;同时,要对直线加速器和通用系统等进行改造。BEPCII要在 τ -粲能区进行精确测量,同时探索新的物理现象,为我国在今后相当长的时期内保持粲物理研究的国际领先地位,取得原始创新性物理成果奠定基础。BEPCII投入运行后,能获取比BEPC已有的 J/ψ 、 $\psi(3686)$ 和 $\psi(3770)$ 等事例高两个量级的数据,在 τ -粲物理前沿课题取得一系列具有世界领先水平的重大物理成果。与BEPC相同,BEPCII仍保持一机两用,其高流强的优势有助于在兼用和专用模式下为用户提供高通量和高亮度的同步辐射光。

二、从设计方案到实际对撞机

BEPCII于2004年初开工建设,就此拉开了一场高能物理领域的激烈竞赛的序幕。表1记载了BEPCII建设的里程碑,其中凝聚着全体科研工程人员和全所同志的汗水与心血。

与BEPC相比,BEPCII的指标更高、难度更大。双环方案对于提高对撞亮度提供了有利的条件,同时更对加速器物理和技术提出一系列的严峻挑战:

- BEPC隧道是按单个储存环的方案设计的,对

于安装双环空间偏小,周长短,对加速器布局、隧道设备安装和对撞区设计与建造带来挑战;

- 储存环的高流强要求高性能的注入器,它的正电子流强约为BEPC的10倍以上。

- BEPCII采用双环多束团对撞,设计流强接近1安培,比BEPC提高约一个数量级,对于各个系统提出了苛刻的要求。

- BEPCII的高性能要求采用超导高频和超导磁铁以及低温等先进技术,在这方面我们缺少技术储备。

- BEPCII的高亮度,要求新建的北京谱仪BESIII须满足多束团对撞和高计数率取数的要求,并大幅度减小探测器的系统误差。

- 为了满足日益增长的同步辐射用户的需求,BEPCII继续采用“一机两用”的设计原则,这给对撞机的设计和运行带来更大的难度。

面对这些挑战,BEPCII在总体和各个系统中采用了一系列的创新性设计和技术,在较短的周长、拥挤的对撞区和窄小的隧道里实现了双环方案,并采用“内外桥”联接两个正负电子外半环形成同步辐射环和大交叉角正负电子双环的“三环方案”,兼顾了高能物理与同步辐射应用,满足了“一机两用”的要求。科研工程人员发扬了BEPC建设中形成的团结拼搏、协力创新、敢为人先、勇攀高峰的精神,依靠改革开放带来的工业发展和科技进步,圆满完成了各项重大改造工程的建设工程。

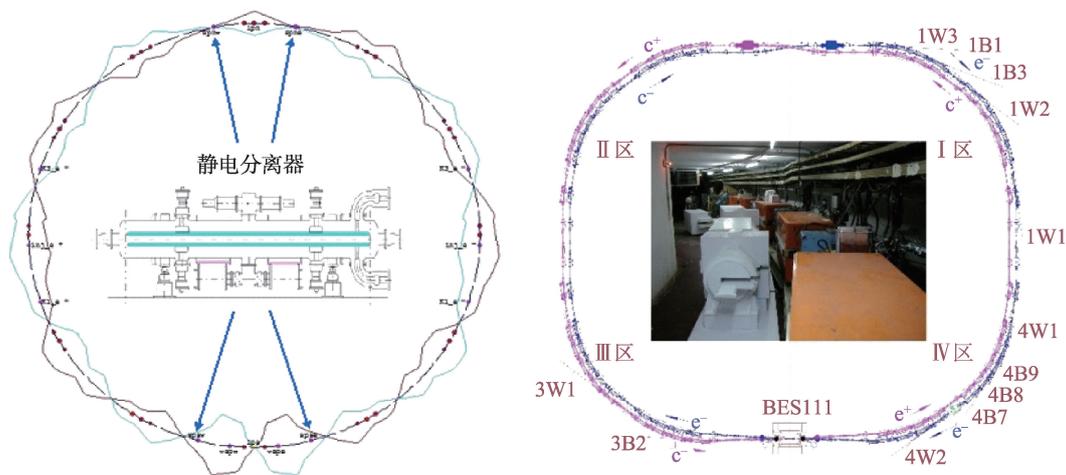


图2 BEPCII的单环方案(左)和双环方案(右)示意图

表1 BEPCII建设的里程碑

2004.1	BEPCII 开工建设
2004.5	高能物理实验结束, 直线加速器开始改造
2004.12	直线加速器出束, 提供同步辐射实验
2005.7	同步辐射实验结束, 开始储存环拆除
2006.9	储存环隧道主体设备安装完毕
2007.11	BEPCII 实现正负电子对撞
2008.7	加速器与探测器联合调试对撞成功
2009.5	对撞亮度达到验收指标 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
2009.7	BEPCII 通过国家验收, 投入实验运行
2013.3	BESIII 宣布发现新的共振结构 $Z_c(3900)$
2016.4	对撞亮度达到设计指标 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

北京正负电子对撞机的注入器——直线加速器的改造, 是 BEPCII 工程的第一仗。2004 年 4 月 30 日, BEPC 上的高能物理实验圆满完成, 直线加速器就开始改造, 更换了 8 节加速管, 安装了新研制的强流电子枪和高产额正电子源, 完善了各个子系统。经过 7 个月的努力, 高质量完成直线加速器的改造, 于当年 12 月投入运行, 开始为 BEPC 的最后一轮同步辐射实验提供束流。



图3 BEPCII 直线加速器

2005 年 6 月底结束, 最后一轮同步辐射实验结束, BEPC 圆满完成了历史使命。7 月 4 日, 工程团队开始储存环设备的拆除工作, 并在 2006 年 3 月初开始 BEPCII 设备的安装, 只用了 6 个月的时间, 当年 9 月就完成了两个储存环的主体设备安装。由于我们在低温超导方面的技术储备不足、缺乏经验, 协作单位承担的低温系统的漏热量太大, 致使对撞区最终聚焦的超导磁铁不能工作。工程指挥部决定, 采用 BEPC 的常规聚焦磁铁代替对撞区超导磁铁的方案, 抓紧时间开始束流调试工作, 并于 2007

年 3 月实现了正负电子对撞。与此同时, 低温系统的改造与超导磁铁的测试和安装也在隧道外紧张地进行, 终于攻克难关, 完成了加速器和谱仪超导磁铁的联合调试, 并将设备安装到对撞区。2007 年 10 月 BEPCII 储存环开始对撞区超导磁铁调束, 2008 年 6 月开始加速器和谱仪的联合调试, 2008 年 7 月 19 日, 加速器与北京谱仪联合调试对撞成功, 观察到了正负电子对撞产生的物理事例, 2009 年 5 月对撞亮度达到验收指标 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, BEPCII 建设胜利完成。2009 年 7 月 BEPCII 通过了国家验收。

在 BEPCII 工程建设期间, 北京同步辐射装置 (BSRF) 也进行了改进调试, 把 13 号同步辐射实验大厅的部分光束线和实验站转移到电子束处于外环的 12 号实验大厅, 还新建了两台插入件扭摆磁铁、相应的实验站和 15 号同步辐射实验大厅, 加上 BEPCII 性能的提高, BSRF 向用户提供同步辐射光的通量提高了约一个量级。当时, 上海光源也仍在建造中, 国内同步辐射用户面临无光可用的困



图4 BEPCII 储存环



图5 安装在对撞区的北京谱仪 BESIII

境。高能所以满足诸多学科广大用户的需求为己任,克服了重重困难,巧妙地安排工程计划,将设备拆装和调束运行交替进行,在 BEPCII 工程建设阶段, BEPC 和 BEPCII 一共为国内外用户提供了四轮共五个月的同步辐射专用光实验,完成约 700 个课题,取得了丰硕的成果。

2009 年 7 月 BEPCII 通过了国家竣工验收。李政道先生发来贺信说:“这是中国高能物理实验研究的又一次重大飞跃,为中国在粲物理研究和 τ 轻子高能研究方面,继续在国际上居于领先地位打下了坚实的基础”。我们的竞争对手,美国康奈尔大学 CESR-c 的负责人赖斯教授也发来邮件表示祝贺,说:“由于 CLEO-c 将终止运行,我们期待来自 BESIII 的一系列重要的物理发现”。

三、从高性能装置到高水平成果

BEPCII 建成后,立即投入了运行,既是一台在粲能区国际领先的高能物理实验装置,又是一台高性能的同步辐射装置。

在高能物理实验方面, BEPC II 自 2008 年开始运行以来,发挥高亮度对撞机和高性能探测器的优势,日均获取的数据量较改造前提高 2 个数量级。 BESIII 实验共获取了 4.5 亿 $\psi(3686)$ 事例、60 亿 J/ψ 事例、 $2.9 \text{ fb}^{-1}\psi(3770)$ 事例以及 12 fb^{-1} 质心系能量 4 GeV 以上的事例和 120 多个能量点的 R 值数据,是 2~5 GeV 能区世界上最大的数据样本。由 14 个国家的 66 所大学和研究机构(其中中国 38 个单位)的 400 余名科学家组成的 BES III 国际合作组是以我为主的重大国际合作,在奇特强子态和粲偶素物理、轻强子谱、粲介子和粲重子的衰变等方面取得多项重要的物理成果,其中“首次发现带电类粲偶素 $Z_c(3900)$ ”得到国际高能物理界的高度评价,被美国《物理》杂志评选为 2013 年国际物理领域重要成果,列 11 项成果之首。

在同步辐射应用方面,为国内外 130 多个研究机构的用户提供了 20 轮专用光,总供束时间约 2 万小时,完成近 5000 个用户课题。自 2010 年 3 月起, BEPCII 在开展高能物理实验同时,向包括扭摆磁铁

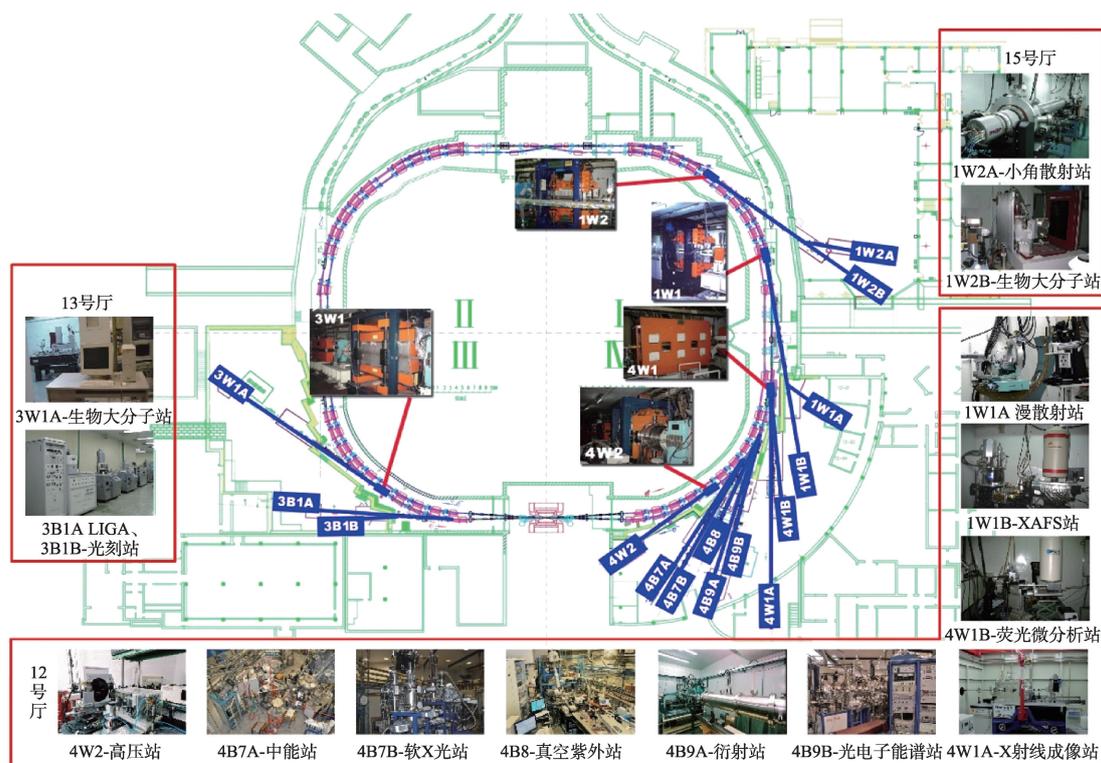


图 6 北京谱仪同步辐射装置

在内的 9 条束线以兼用模式供光。清华大学课题组依托 BSRF 开展与糖尿病和肥胖症相关的蛋白质激酶研究,揭示了其工作原理。上海交通大学血液研究所在 BSRF 上开展研究,成功揭示了 As_2O_3 (砒霜) 治疗急性早幼粒细胞性白血病的分子机理。

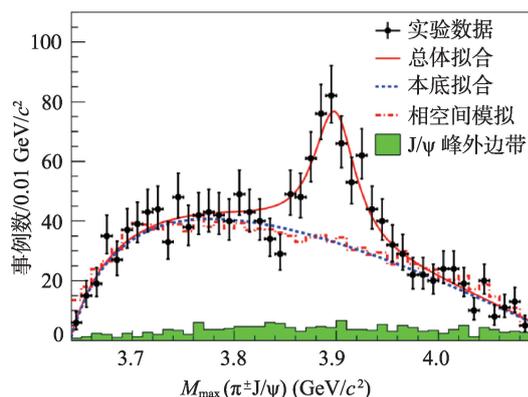


图 7 BESIII 发现的带电类粲偶素 $Z_c(3900)$

BEPCII 在高性能开展高能物理取数和同步辐射用户实验的同时,不断完善和改进整体性能,对撞亮度逐步提高,2016 年 4 月在 1.89 GeV 的能量下峰值亮度达到设计指标 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,为改造前 BEPC 在该能量下的 100 倍,是 CESRc 的 14 倍,是粲能区(质心系能量 $E_{\text{cm}}=3\sim 5 \text{ GeV}$)世界上亮度最高的正负电子对撞机。

BEPCII/BESIII 将在今后 8~10 年间取得更多物理成果,实现并扩展其科学目标。BESIII 计划获取 100 亿 J/ψ 事例、30 亿 $\psi(3680)$ 事例、 20 fb^{-1} 的 $\psi(3770)$ 事例和 $(20\sim 30) \text{ fb}^{-1}$ 的高能区粲偶素事例,约分别为 BESIII 之前国际上拥有的相应数据总量的 170 倍、100 倍、20 倍和 30~50 倍,并将进行 τ 质量和 R 值的精确测量。这就要求加速器继续提高峰值亮度和积分亮度,探测器不断改进性能、提高测量精度,共同提高取数效率。BEPCII/BESIII 作为世界上唯一运行在粲能区的强子工厂,将寻找新的类粲偶素并系统研究类粲偶素的性质,寻找和研究含粲夸克的多夸克态、分子态、混杂态等奇特强子态;系统开展轻强子谱的深入研究,预期在胶球和含轻夸克的奇特强子态的研究上有所突破,寻找和研究新的重子激发态;精确测量 CKM 矩阵元,寻找和测量 $\psi(3770)$ 到非 $D\bar{D}$ 的衰变模式;提高此能区 R 值的测量精度

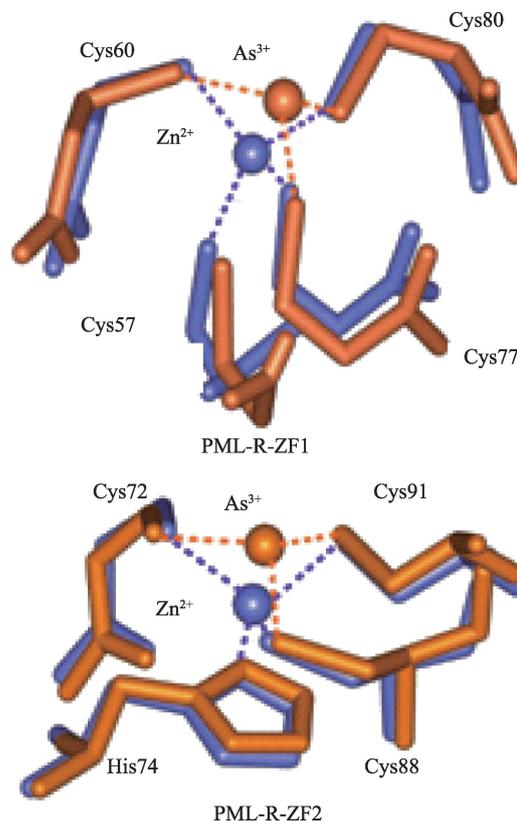


图 8 砒霜治疗急性早幼粒细胞性白血病的分子机理

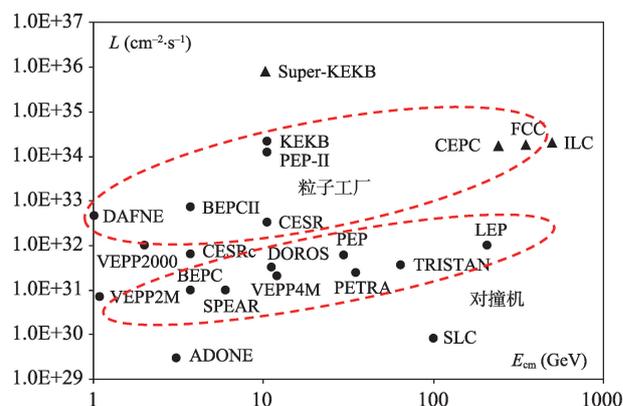


图 9 世界上工作在不同能区正负电子对撞机的亮度

到 1%~2%,探索新的物理现象和新规律等。发挥 BEPCII/BESIII 在粲能区具有的独特优势,有望在以上这些前沿有所突破,并对 BESII 和其他实验已发现的一些新的共振态进行系统的研究,取得具有世界领先水平的重大物理成果,并为粲能区非微扰量子色动力学和弱电相互作用的研究以及新物理的寻找提供重大的发展机遇。在未来的 5~10 年里,高能所将基于 BEPCII/BESIII,继续加强国内外合作,建设一个国际领先的粲能区物理实验研究中心。