

北京正负电子对撞机重大改造工程

陈和生

北京正负电子对撞机重大改造工程（BEPCH）的建设目标是对北京正负电子对撞机（BEPC）和北京谱仪（BES）进行重大改造。BEPCH 要在 BEPC 已有隧道内建设国际先进的双环对撞机，采用多束团、水平大交叉角对撞方式，大幅度提高对撞亮度，并建造新的北京谱仪 BESIII，适应 BEPCH 高计数率运行的要求，并大幅度提高测量精度和粒子识别能力，以满足在粲能区进行精确测量，探索新的物理现象的要求，为我国在今后相当长的时期内继续保持粒子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。

BEPCH 于 2003 年得到国家批准立项，2004 年 1 月正式开工建设，2008 年 7 月全部建成，观察到第一批正负电子湮灭到强子的事例，并投入试运行。2009 年 5 月 13 日 BEPCH 的主要性能亮度达到 $3.2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，达到了设计指标的要求。新建的北京谱仪（BESIII）在 BEPCH 的高亮度下，运行稳定可靠，获得了高质量的高统计数据。国家发展和改革委员会于 2009 年 7 月 17 日组织国家验收委员会对 BEPCH 进行了竣工验收。国家验收委员会认为，“BEPC II 工程按指标、按计划、按预算、高质量地完成了各项建设任务，是我国大科学工程建设的一个成功范例。该工程的建成，将我国对撞机和谱仪技术推进到国际前沿，得到了国际高能物理界的高度评价，是中国高能物理发展的又一个重大的里程碑。国家验收委员会一致同意该工程通过国家验收，并正式投入运行。”

高能物理研究的国际前沿

高能物理是研究物质结构的最小单元构成及其相互作用规律的前沿学科，并在宇宙的起源和进化、天体的形成和演化等许多领域的研究中起着十分重要的作用。20 世纪 50 年代以来，粒子物理实验一直是国际上基础科学研究的最前沿和知识创新的热点之一。粒子物理的基本理论是 Glashow, Weinberg 和 Salam 提出的“标准模型”（ $SU_3 \times SU_2 \times U_1$ ）。标准模型成功地描述了粒子物理实验迄今为止的各种结果。标准模型对已知粒子进行了正确的分类，认为构成物质的最基本的粒子是三代轻子和三代夸克以及传播相互作用的中间玻色子：光子（电磁相互作用），胶子（强相互作用）， W^+ 和 Z （弱相互作用）。

所有这些粒子都已经在实验上观察到。然而，标准模型中最关键的 Higgs 粒子还没找到，它是标准模型中所有粒子质量产生机制的关键。即使找了 Higgs 粒子，标准模型也不是粒子物理理论的终结。它包括了许多无法解释的参数。中微子物理最新的实验结果，表明中微子有质量，并能相互转化。近年来，有关暗物质和暗能量的观测结果表明，标准模型只能解释宇宙中物质的 4% 左右。寻找暗物质粒子，研究暗能量的物理性质，是粒子物理面临的严峻挑战。粒子物理正处于新的重大历史性突破的前夜。

寻找 Higgs 粒子，精确检验标准模型，并探索突破标准模型的新物理现象，是当前国际粒子物理实验研究的焦点。世界各发达国家都投入了巨大的人力和物力开展粒子物理实验。高能物理实验研究包括基于加速器的物理实验和非基于加速器的物理实验。BEPCH 进行的物理研究属于基于加速器的物理实验研究。加速器物理实验研究的国际前沿有两大趋势：高能量研究前沿和高精度研究前沿。

高能量研究前沿使用规模巨大、能量最高的加速器，寻找 Higgs 粒子和新的物理现象，探索新的突破。在瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）即将投入运行的大型强子对撞机 LHC，耗资 40 亿美元以上，将在今年 12 月恢复对撞。它的主要科学目标是寻找 Higgs 粒子，探索新的物理现象。中国高能物理学家积极参与了 LHC 实验的国际合作，对探测器的建造作出了重要贡献，现在正在积极准备数据分析和物理研究工作。

高精度前沿是建造与高能量前沿相比能量较低，但流强高的加速器（被称为大量产生某种粒子的“工厂”）和精密的探测器，精确检验标准模型，并探索新的物理现象。这种设施造价相对前者较低，但同样具有十分重要的科学意义，因此是目前国际粒子物理实验研究的热点之一。在三个有重要物理意义且适于建造这种“工厂”的能区中，美国和日本分别建造了质心系能量约 10 GeV 的 B 介子工厂，意大利建造了质心系能量为 1 GeV 的 Φ 介子工厂，均已投入运行，主要的物理目标都是研究 CP 破坏。

第三个窗口是粲能区，质心系能量为 3~5GeV，BEPCII 正是工作在这个能区的“工厂型”对撞机，正是适合我国国情的高能物理大型实验装置。

工厂型对撞机进行高精度测量前沿实验研究，要求两个关键设备：高性能的对撞机和高性能的探测器。这是微观世界的基本规律所决定的。

微观世界的物理规律的基本特点是具有统计涨落性。可以这样来理解统计涨落性：在微观世界测量到的任何事例数的绝对误差等于事例数的平方根，这样测量结果的相对误差就与事例数的平方根成反比。事例数越高，测量精度就越高。例如，观察到某种现象的 100 个事例，绝对误差是 10 个事例，相对误差是 10%。如果得到的数据量增加 100 倍，观察到 10000 个这样的事例，绝对误差是 100 个事例，相对误差是 1%。因此精确测量的基本要求就是必须将观测到的事例数成数量级的提高。这就要求成数量级的提高加速器的主要性能——对撞亮度，并要求探测器能够在这样高的计数率下工作。

任何测量的误差都包括两部分组成：统计误差和系统误差。微观物理现象研究过程的系统误差有若干来源。其中最主要的来源之一是探测器各部分测量粒子的能量、动量和位置的分辨率，以及识别粒子种类的效率。

因此，为了实现精确测量的物理目标，BEPCII 要求建造高亮度的双环对撞机和高精度的北京谱仪 BESIII。

北京正负电子对撞机及其物理成果

北京正负电子对撞机 (BEPC) 的能区覆盖了 J/ψ 家族 (一对正反粲夸克的束缚态，包括基态 J/ψ 、激发态 $\psi(2S)$ 和 $\psi(3770)$ 等) 和 τ 轻子产生的阈值，产生截面高，本底小，最适于粲夸克和 τ 轻子的研究。 J/ψ 家族作为一对正反粲夸克的束缚态，其基本物理特征和衰变过程是研究强相互作用的理想过程。由于强相互作用的特殊性和复杂性，量子色动力学 (QCD) 还不成熟，特别在低能区的非微扰量子色

动力学，仍有大量问题要解决。此外量子色动力学预言在 τ -粲能区存在新的物质形态：胶子球和夸克-胶子混杂态尚未发现。 J/ψ 家族的衰变是寻找这些未知粒子最佳的物理过程。BEPC 的能区包括了 J/ψ 家族粒子产生的阈值，最适于 τ -粲物理的研究，对微扰量子色动力学和非微扰量子色动力学及其过渡区域许多重大问题的研究、发展量子色动力学具有重大的意义。 J/ψ 家族的衰变是探索粲夸克的 CP 破坏现象最佳的物理过程。

北京正负电子对撞机 (BEPC) 由五大部分构成：注入器、束流输运线、储存环，北京谱仪和同步辐射装置 (BSRF)。图 1 是 BEPC 的示意图。注入器是一台长 202 m 的正负电子直线加速器，正负电子束分别经由长为 120 m 的两条束流输运线注入到储存环。储存环是一台周长为 240.4 m 的环形加速器，束流在这里积累、加速、储存、对撞，提供高能物理和同步辐射实验。储存环上有两个对撞区，北京谱仪安装在南对撞区。北京同步辐射装置分布在储存环南半环东西两侧的实验厅里。

BEPC 于 1984 年 10 月破土动工，1988 年 10 月按计划全面建成。BEPC 投入运行后，迅速达到设计指标，成为了世界八大高能加速器中心之一，取得许多重大物理成果，在粲物理研究处于国际领先，在世界高能物理领域占有一席之地。BEPC 一机两用，其上的北京同步辐射装置 (BSRF) 成为是我国主要的广谱同步光源，为多学科交叉前沿研究提供了大型平台。BEPC 每年 5 个月进行对撞物理

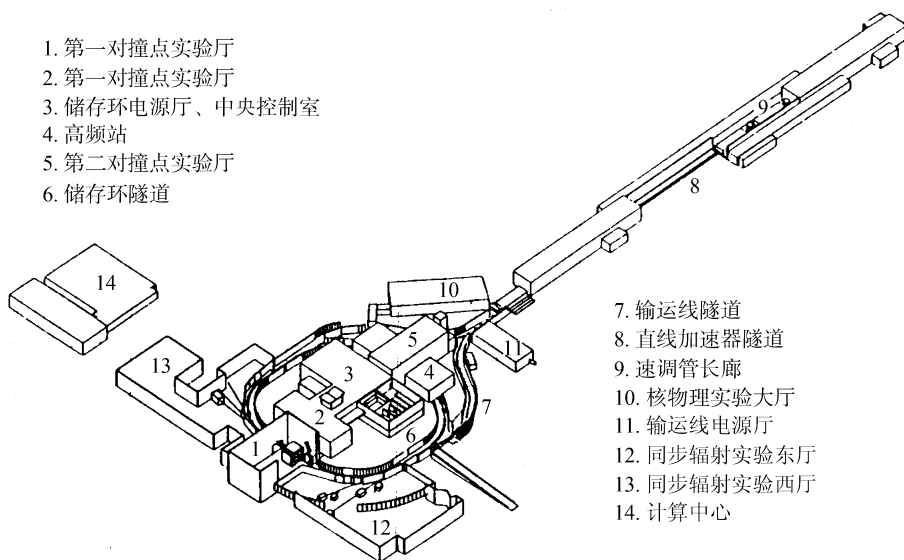


图 1 北京正负电子对撞机的总体布局

研究, 3 个月为同步辐射专用运行, 2 个月用于机器研究及加速器启动, 在世界上同类加速器中运行时间最长。

北京正负电子对撞机是目前世界上唯一工作在 τ -粲能区的正负电子对撞机。BEPC/BES 自 1990 年运行以来, 性能良好, 已积累了 6600 万 J/ψ 事例、1800 万 $\psi(2S)$ 事例, 8 pb^{-1} 的 $\psi(3S)$ 数据, 25 pb^{-1} 的 τ 数据和 20 pb^{-1} 的 D_s 数据, 成为国际上在 3~5 GeV 能区数据量最大的加速器和探测器, 其中 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 的数据量均比此前国际上类似实验的数据量高一个数量级。北京谱仪取得了许多重要的物理成果。1996~1998 年加速器和探测器均进行了升级, 使性能有了一定的改进。此后, 对撞机仍称为 BEPC, 而谱仪则称为 BESII。

北京谱仪 (BES) 是一个以我为主的国际合作组, 包括国内的 18 所大学和研究所, 4 所美国大学和研究所, 以及日、韩、英等国的科学家。BES 迄今为止共发表重要物理成果文章 167 篇, 其中《物理评论快报 (PRL)》18 篇,《物理快报 (PLB)》41 篇,《物理评论 (PRD)》47 篇。BES 的一系列重大成果使粲物理研究成为国际粒子物理研究热点之一。北京谱仪国际合作组主要的成果包括:

- 轻子质量精确测量: 使 τ 轻子质量世界平均值改变了 3 倍标准差, 精度提高了 10 倍, 证明了轻子普适性, 获 1995 年国家自然科学二等奖;

- 2~5 GeV 能区强子产生截面 R 值精确测量: 平均测量精度提高了 2~3 倍, 使精细结构常数 $\alpha(M_z^2)$ 的误差减少了两倍, 大大提高了标准模型对 Higgs 粒子质量的预测精度, 解决了标准模型预言与实验结果不一致的矛盾, 被大量引用。获国家自然科学二等奖和中科院杰出科技成就奖;

- 发现可能的物质新形态——6 夸克态, 2003 年发现正反质子不变质量在阈值处有奇异增长, 可能源于一个新共振态, 2005 年, 发现 $\eta'\pi^+\pi^-$ 的不变质量在同一数值有一共振态, 可能是同一个粒子, 因而支持了质子-反质子束缚态, 引起国际高能物理界高度重视。

国际权威的《粒子物理手册 (PDG)》在粲物理和 τ 轻子物理采用了 400 多项来自北京谱仪的数据。北京正负电子对撞机的成功建设和丰硕成果使中国科学院高能物理研究所在 τ -粲物理的实验研究领域处于国际领先地位, 在世界高能物理实验研究领域

占领了一席之地。

BEPC 对发展我国科学技术的战略意义

BEPC 的建造和国际合作引进了大批高技术, 有力地促进了我国相关高技术领域的发展, 包括微波、高频、磁铁、自动控制、精密机械、计算机、核探测、快电子学等多种先进技术, 特别是对发展我国的互联网和网页起了重要作用。1986 年夏, 高能物理研究所实现了到瑞士日内瓦欧洲核子研究中心计算机的远程登录, 1988 年夏, 高能物理研究所的计算机通过到瑞士日内瓦欧洲核子研究中心的国际卫星线路, 进入了国际因特网, 成为了中国在因特网的第一个节点。1991 年, 又率先引进了 WWW 网页, 并在国内大力推广。

BEPC 的建设、运行和改造为我国培养了专业齐全、力量雄厚的加速器和探测器队伍, 并具备了大科学装置的建设、运行和开放的经验。

在 BEPC 成功建设的基础上, 我们逐步建设和发展了多个依托加速器的大科学研究平台, 包括北京同步辐射装置, 上海同步辐射光源, 即将开始建设的中国散裂中子源, 以及拟议中的硬 X 射线自由电子激光装置。这些面向多学科交叉前沿研究的大型综合性研究平台已经成为国家科技创新体系的重要组成部分, 对高技术发展具有重大的战略意义。

BEPCII 的科学目标

为了进一步深入开展粲物理的研究, 取得更多原创性的科研成果, 保持和发展我国在粲物理实验研究的国际领先地位, 必须对 BEPC 进行重大改造, 即 BEPCII。BEPCII 的科学目标是在粲物理能区进行精确测量, 探索新的物理现象。预期 BEPCII 投入运行后, 将能获取比 BEPC 现有的 J/ψ 和 ψ' 事例高两个数量级的数据, 在粲物理前沿课题取得多项具有世界领先水平的重大物理成果:

- 寻找胶子球、夸克-胶子混杂态和多夸克态: 胶子球和夸克-胶子混杂态是量子色动力学预言的新物质形态, 对检验量子色动力学具有重大意义;

- 精确测量 Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 矩阵元: 直接测量 V_{cs} 和 V_{cd} , 精度分别提高到 1.6% 和 1.8% 左右。对 D 衰变绝对分支比测量, 结合 B 工厂测量, 可将 V_{cb} 的测量精度提高到 3% 左右。同时还将检验 CKM 矩阵的幺正性以及归一化;

- 研究粲夸克偶素谱及其衰变性质, 研究轻强子谱;

• 精确测量 2~4.2 GeV 能区强子的 R 值, 将精度进一步提高到 3% 左右, 这对标准模型的电弱统一理论的研究, 包括 Higgs 质量预言, 精细结构常数的计算, g-2 实验等, 具有重大物理意义;

• 粲物理: 包括 D 和 \bar{D} 的衰变性质及衰变常数 f_D 和 f_{D_s} 的测定;

• 利用粲夸克偶素衰变研究重子激发态;

• τ 轻子物理: 包括大幅度提高 τ 轻子质量的测量精度和降低 τ 中微子质量的上限, 研究 τ 轻子的衰变性质及其带电流的洛伦兹结构;

• 寻找 τ 轻子和粲夸克偶素衰变中的 CP 破坏;

• 寻找 $D^0 - \bar{D}^0$ 混合和 CP 破坏等。

BEPCII 的单环方案和双环方案

经过深入广泛的讨论, 我们确定了中国高能物理发展战略, 特别是关于 BEPC 的未来发展方案 BEPCII。BEPC 未来发展的物理目标定位在粲物理精确测量的国际前沿, 应当采用国际通常的重大改造方式, 对加速器和探测器进行重大改造, 大幅度提高加速器和探测器性能, 实现粲物理能区的精确测量。1997 年 7 月高能所提出了 BEPCII 的单环方案。这个方案采用“麻花轨道”, 实现多数团对撞, 将束流能量 1.89 GeV 下的加速器亮度从 BEPC 的 $10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时对探测器进行相应的重大改造。

国家科教领导小组 2000 年 7 月 27 日第七次会议, 原则批准了中国科学院关于我国高能物理和先进加速器发展目标的报告, “同意在北京正负电子对撞机取得成功的基础上, 投入 4 亿元对该装置进行重大改造, 用较少的投入, 继续取得高水平的研究成果。” “同时, 中科院要继续听取国内外专家的意见, 加强和争取更多的国际合作。” BEPC 的这个改进方案是单环的方案, 计算亮度为 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。单环方案的投资较低, 但束团的数目受到横向振荡周期数的限制, 限制了亮度的进一步提高, 而且设计、建造和调试的难度都很高。

BEPC/BES 在 τ -粲物理实验研究中取得的重大成就及其对国际高能物理发展的巨大影响, 引起了国际高能物理界对 τ -粲物理的极大兴趣, 十分重视这一能区的丰富物理“矿藏”。特别是 BEPCII 的计划受到国际高能物理界的高度关注, 在粲物理实验研究引发了新的激烈竞争。2001 年初, 国际粲物理实验研究的形势出现了很大的变化。美国康奈尔大

学决定将其正负电子对撞机从质心能量 10 GeV 左右下调到 3~5 GeV (称作 CESRc), 到粲物理研究领域与 BEPC 竞争。该对撞机在此能区的亮度设计指标是 $1.5 \times 10^{32} \sim 3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与当时 BEPCII 单环方案的设计亮度相当, 预计在 2003 年底开始运行, 远早于 BEPCII。因此, 单环方案不能确保在与 CESRc 的竞争中的优势。我们将难以做出国际领先的创新性研究工作, 我国高能物理将可能失去在世界上的一席之地。

为了保持我国在粲物理领域实验研究的国际领先地位, 高能所的专家考虑到近年来日本 B 工厂在大交叉角水平对撞成功实现高亮度的经验, 经过详细分析和研究, 发现有可能在现有的储存环隧道内新建一个环, 同原有的储存环组成一个双环对撞机。在双环方案中, 正负电子束流在两个彼此独立的储存环中积累, 在南对撞点处、对撞, 因而每个环中束流的束团数目可以更多, 从而使理论计算的亮度大幅度提高, 为单环方案的 3 倍以上, 达到 $10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而且双环方案能灵活地进行参量的调整和优化, 不仅可以达到更高的亮度, 而且也避免了单环方案“麻花”轨道引起的一系列问题, 技术风险相对较小, 有利于建成后在比较短的时间内达到设计亮度, 在与 CESRc 的竞争中取得领先。同时双环方案相应地提高了探测器设计的性能指标, 使用 CsI 晶体电磁量能器和超导磁体, 总体上与 CESRc 的水平相当。这样将能确保我们在与美国康奈尔大学竞争中处于领先地位。高能所遵照国家科教领导小组的要求, 认真听取国内外高能物理专家的意见, 召开了多次国际评审会, 对 BEPCII 的单环方案和双环方案进行了深入的讨论和比较。国内外高能物理界对 BEPCII 的双环方案给予了高度评价, 一致强烈推荐双环方案。经过广泛征求国内外高能物理学家的意见, 高能所决定 BEPCII 选择双环方案, 在 1.89 GeV 下的设计亮度为 $(3 \sim 10) \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与 CESRc 相比具有明显的优势。中国科学院认真听取了国内外专家的意见, 同意 BEPCII 采用双环设计方案, 改造工程的投资由原 4 亿元调整为 6.4 亿元, 其中 1 亿元由高能所自行筹措。

2003 年 3 月 12 日, 国家计划委员会批准了 BEPCII 的项目建议书。高能所科研、工程人员精心设计, 不断完善 BEPCII 的可行性研究和初步设计方案。国家发展和改革委员会于 2003 年 9 月批准了

BEPCII 的可行性研究报告，并委托中国科学院对 BEPCII 的初步设计报告进行仔细评审。2003 年 11 月中国科学院组织专家组对 BEPCII 初步设计进行了评审，于 12 月 16 日批准了 BEPCII 的初步设计并于 2003 年 12 月 30 日批准 BEPCII 动工。

北京正负电子对撞机重大改造工程的建设目标是对 BEPC 进行全面升级改造，提高注入器的性能，建造双储存环，将亮度提高两个数量级，建造新北京谱仪，大幅度提升 BSRF 的水平，做出具有国际影响的科研成果。

BEPCII 的束流能量范围为 1~2.1 GeV，优化在 1.89 GeV，在 1.89 GeV 下的设计亮度为 $(3\sim 10)\times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，比改造前提高 30 倍到 100 倍。达到这个目标的关键是双环。改造前的 BEPC 在一个储存环内只能实现一团正电子和一团负电子对撞，每秒钟对撞 800 万次。在 BEPCII 的双环里能实现 93 团正电子和 93 团负电子对撞，每秒钟对撞一亿多次。BEPCII 还采用了 500MHz 的超导高频系统和超导插入磁铁等一系列技术措施，进一步压缩束团长度，这样最终能够将亮度提高 100 倍左右。亮度设计值的下限为工程竣工验收的设计指标，上限为经过若干年调试和改进后最终达到物理设计目标。国际上大型高能加速器大都经历 3~4 年的调试和改进才能逐步达到其最终物理设计指标。

为了确保 BEPCII 的高积分亮度，束流注入时间必须尽可能短，特别是要尽量提高占大部分注入时间的正电子注入效率。设计要求正电子注入速率高于 50 mA/min，这比改造前的正电子注入速率要提高一个数量级以上。提高运行效率的另一种技术手段是实现束流的全能量注入。这样在每次注入束流时，就不需要打掉剩余的束流，直接增加束流（称之为 top-off），大大缩短注入时间。全能量注入最大的优点是将来能够实现在对撞时连续补充束流（称之为 top-up）。这样不仅节省了注入时间，更重要的是保持了加速器和探测器运行的稳定，性能大大提高。这是目前国际上高性能的加速器普遍的运行模式。

BEPCII 仍然是一机两用，BEPCII 将在两个半外环为同步辐射运行建立专用直通束流管道，使同步辐射运行继续使用已有的外环及所有的光束线。由于在 BEPCII 同步辐射运行模式中，束流通过两套超导高频系统，高频功率大幅度增加，将使同步

辐射的流强和能量大幅度提高，预期在 2.5 GeV 可达到 250 mA 以上。同时北京同步辐射装置还将增加两个插入件、三条光束线，并改进现有实验站，使现有装置的总体性能水平大幅度提高。作为一台高性能的兼用同步辐射光源，它的束流能量为 2.5 GeV，流强为 250 mA，寿命大于 10 小时。这样用户急需的硬 X 光的流强将比改造前提高一个数量级左右。

BEPCII 工程建设内容

BEPCII 的工程建设包括四大部分：直线加速器改造、储存环改造、建造新的探测器 BESIII 和公用设施的改造。此外，北京同步辐射装置配合 BEPCII 的建设，也进行了大量的改造，适应 BEPCII 同步辐射光强度的大幅度提高，大大提高了兼用光运行的水平，并增加了用户急需的光束线站。

直线加速器改造 BEPCII 对直线加速器改造提出了两方面的要求：要求正电子注入能量 $E_{inj}=1.89 \text{ GeV}$ ；正电子注入速率要达到 50mA/min，即为 BEPC 运行值的 10 倍以上。

为了实现 $E_{inj}=1.89 \text{ GeV}$ 的正电子全能量注入，需要用 45~50 MW 的高功率速调管取代现有的 30 MW 速调管，同时对其调制器进行改造。为了将正电子从 BEPC 目前的流强提高 10 倍以上，需要研制新的电子枪，提高打靶电子束流强：将重复频率从 12.5 Hz 提高到 50 Hz，将打靶电子能量从 140 MeV 提高 240 MeV，研制新的正电子源等。

储存环改造 BEPCII 储存环设计的主要目标是提高对撞亮度。亮度是对撞机最主要的指标之一，它与高能物理实验事例率成正比。正负电子对撞机的亮度计算公式为：

$$L(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}) = 2.17 \times 10^{34} (1+r) \xi_y \frac{E(\text{GeV}) k_b I_b (\text{A})}{\beta_y^* (\text{cm})}$$

式中 $r = \sigma_y^* / \sigma_x^*$ 为对撞点处束团截面的形状因子，即垂直与水平方向尺寸的比值； E 为束流能量， ξ_y 为垂直方向束束作用参量， β_y^* 是对撞点处垂直方向的包络函数值， k_b 为每一束流中束团的数目，而 I_b 是每一束流的流强。BEPCII 提高对撞亮度的主要技术路线是：增加束团的数目 k_b 和减小对撞点包络函数 β_y^* 。

储存环改造要在 BEPC 现有的储存环内建造一个新的储存环，如图 2 所示。新建的内环与现有的外环在南北两个对撞点连接交叉，正负电子各走半个内环和半个外环，在南对撞点以 $\pm 11 \text{ mrad}$ 的水平

交叉角对撞。为使 BEPCII 在同步辐射专用模式运行时能向联接在外环的束线供光，在北对撞区有一个旁路束流线将东西两半外环联接起来，而在南对撞区的超导插入磁体上有一组偏转线圈，在同步辐射专用模式运行时励磁，使束流通过对撞区的真空盒从东外环进入西外环，实现电子束流在整个外环的储存。

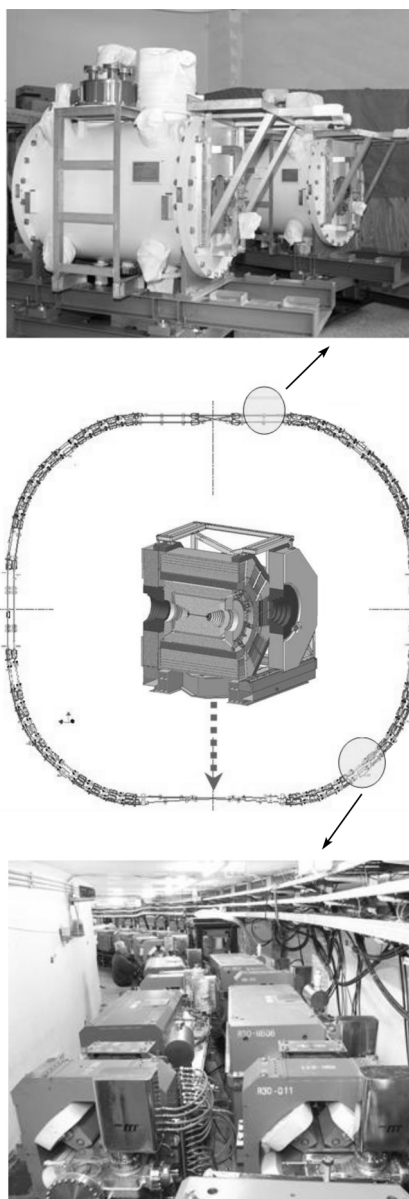


图 2 BEPCII 示意图

BEPCII 采用对撞区超导插入磁体，500 MHz 超导高频系统和低阻抗真空管道等技术，实现对撞点微包络和短束长，每个环内可注入更多束团，每环的总流强可达 910 mA，在能量为 1.89 GeV 时

21 卷第 5 期 (总 125 期)

的设计对撞亮度为 $(3\sim 10) \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

北京谱仪改造 为了实现聚物理精确测量的科学目标，减少系统误差，与 BEPCII 的高统计精度相匹配，并适应 BEPCII 高亮度下运行和数据获取的要求，北京谱仪建设全新的 BESIII 探测器，大幅度提高各子探测器的分辨率和粒子识别能力，增加几何接收度，并给超导插入四极磁铁提供空间。建设重点是

- 磁场为 1 Tesla 的大型超导磁体；
- CsI 晶体电磁量能器，将测量电磁簇射的能量分辨率从 BES II 的 23%(1GeV) 提高到 2.5%~3%，将位置分辨率 σ_{ϕ} 提高到 $(0.5\text{cm}\sim 0.7\text{cm})/\sqrt{E}$ ；
- 小单元氦基气体主漂移室：适应 BEPC II 高计数率的要求，单丝分辨率 σ_{XY} 达到 120~150 μm ，动量分辨率 $\Delta P/P$ 达到 0.5%~0.7% (1GeV) 识别粒子的 dE/dX 分辨率达到 6%~8%；
- 飞行时间计数器采用两层塑料闪烁计数器，桶分辨率达到 100~120ps；端部达到 110~130ps；
- μ 子探测器采用放在探测器的轭铁夹层中的 9 层阻性板计数器，分辨率 $\sigma_{R\phi}$ 为 1.4~1.7cm。

此外要建设高速电子学读出系统、触发判选系统和数据获取系统。BESIII 探测器的设计可以保证 BEPC II 运行在 J/ψ 共振峰处高达 3K 计数率时正常工作。

公用设施改造 BEPCII 项目建设充分利用 BEPC 已有的公用基础设施，对其中部分配套水、电、压缩空气、空调等系统进行增容、改造和升级，改进辐射防护设施，满足 BEPCII 加速器和探测器的改造升级后对公用设施的要求，同时新建大型氦低温系统，为 BEPCII 的三种超导设备 (BESIII 超导螺线管磁体、一对超导插入磁体及一对超导高频腔) 使用。低温系统总的制冷能力约为 1 kW/4.5 K，配电容量约 700 kW。BEPCII 低温系统选用两台具有相同制冷能力的 500 W/4.5 K 制冷机分别为超导磁体和超导高频腔提供制冷量。

BEPCII 工程建设的实施

BEPCII 的计划建设周期为 5 年，即 2004 年 1 月开工，2008 年底完成，开始试运行，开展物理实验。工程概算 6.4 亿元。

尽管工程建设和调束的时间十分紧张，高能所仍坚持以国家需求为己任，考虑到上海同步辐射光源尚未建成，为了保证国内广大同步辐射用户研究

工作的需要, BEPCII 建设过程中, 边改造, 边运行, 克服重重困难, 在每个阶段都插入同步辐射运行, 最大限度地减少工程对同步辐射用户造成的影响, 创造了在大型加速器的建设过程中提供同步辐射专用光服务的国际先例。在储存环改造前安排了 6 个多月的同步辐射专用光运行, 在储存环开始改造后, 先后安排了 4 次同步辐射专用光实验, 累积约 5 个月时间。

BEPCII 于 2004 年 1 月正式动工。4 月 30 日, 中国科学院常务副院长、BEPCII 项目管理委员会主任白春礼主持了 BEPCII 设备安装仪式。直线加速器首先开始改造, 并于当年 11 月 19 日成功调试出束, 12 月 30 日开始向 BEPC 储存环提供束流, 供用户进行同步辐射专用光实验。

2005 年 7 月 4 日 BEPC 储存环圆满完成历史使命, 开始拆除。2006 年 9 月 18 日 BEPCII 储存环隧道主体设备全部安装完毕。11 月 13 日开始输运线和储存环的第一阶段调束, 5 天后储存环成功积累电子束。12 月 25 日开始第一轮同步辐射专用光实验。

2007 年 2 月 2 日, 结束同步辐射运行, 开始对撞模式调束。3 月 20 日 BEPCII 储存环首次实现正、负电子束流同时积累, 5 天后实现正负电子对撞。10 月 24 日 BEPCII 储存环使用超导插入磁体, 开始第二阶段调束, 11 月 18 日成功实现正负电子对撞。储存环调试进展顺利, 亮度不断提高。

2008 年 1 月 6 日 BESIII 探测器完成离线组装, 并成功获取宇宙线事例。5 月 6 日 BESIII 探测器整体移入对撞区, 安装就位。6 月 22 日 BEPCII 开始第三阶段调束, 即加速器和探测器联合调试运行。7 月 19 日 BEPCII 加速器与探测器联合调试对撞成功, 观察到了正负电子对撞产生的第一批物理事例, 标志着 BEPCII 高质量、按计划、不超预算地圆满完成了建设任务。

2008 年 11 月 4 日温家宝总理、刘延东国务委员等领导来到高能所, 考察北京正负电子对撞机重大改造工程, 参观了储存环隧道。温家宝总理作了重要讲话, 对 20 年来北京正负电子对撞机工程建设

取得的成绩给予了充分肯定。他说, 对撞机的建设, 奠定了我国在粒子物理领域的国际地位, 为从能量和高精度研究物质结构的最基本单元及其相互作用规律提供了重要的研究手段。对撞机的建设, 培养了我国第一批大科学工程建设、运行和管理人才队伍, 为我国的大科学工程建设提供了有力的人才支持。

2009 年 5 月 13 日 BEPCII 在束流能量 1.89 GeV 的对撞亮度达到 $3.01 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到亮度的设计指标, 是竞争对手 CESRc 达到的最高亮度的 4 倍以上。7 月 17 日国家发展和改革委员会组织国家验收委员会对 BEPCII 进行了竣工验收。

BEPCII 工程建设过程中, 高能物理研究所坚持以自主创新为主, 并与国际先进技术相结合, 采用和发展了一系列的高新技术, 实现了高水平的集成创新, 自主研发的设备超过 85%, 有力地推动了国内相关高技术领域的发展。

结束语

BEPCII 是目前我国重大科学工程中最具挑战性和创新性的项目之一。它采用最先进的双环交叉对撞技术, 创造性地克服了储存环隧道狭窄、对撞区短困难, 最大限度地利用原有设施, 设计对撞亮度较原来提高 30 至 100 倍, 并实现了“一机两用”。经过近 5 年的努力, 2008 年 7 月, BEPCII/BESIII 完成各项建设任务, 观测到正负电子对撞产生的第一批物理事例。2009 年 5 月, 对撞机的主要性能参数亮度在 1.89 GeV 能量下为 $3.01 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到设计指标。目前, BEPCII 在 1.89 GeV 能量下, 亮度超过 $3.3 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 是改造前的 33 倍以上, 是康奈尔大学 CESRc 的 4 倍以上, 在粲能区居国际领先水平。BEPCII 在世界同类型装置中将继续保持领先地位, 成为国际上最先进的双环对撞机之一。BEPCII 即将投入正式运行, 将获得高质量高统计性数据, 预期将在粲物理实验研究获得重大物理成果。同时 BEPCII 还将不断提高亮度, 争取尽快达到理论设计目标 $10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(中国科学院高能物理研究所 100049)