

# 北京正负电子对撞机及其重大改造工程

Beijing Electron Positron Collider and Its Upgrade

从天安门广场沿长安街西行 15 公里，过玉泉路再走百余米，在石景山路北侧不远有一处灰色的建筑群，著名的北京正负电子对撞机就坐落在这里。大家一定很关心，什么是对撞机？北京正负电子对撞机是什么样子的？它有什么作用？它又是怎样工作的？



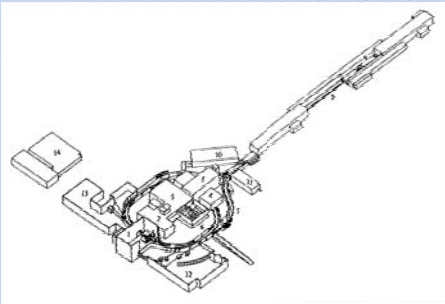
中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

» 什么是对撞机

■ 顾名思义，对撞机是让某种东西在其中对撞的机器。在研究高能物理用的对撞机里，对撞的是被加速到接近光速的微小粒子。因此，这里说的对撞机就是加速带电粒子并使其进行对撞的加速器。对撞机是探索物质微观世界的强有力的工具。

» 北京正负电子对撞机的布局

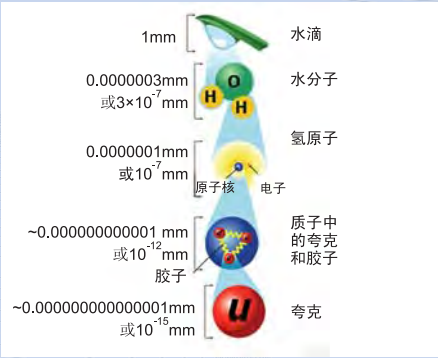
■ 北京正负电子对撞机像一支硕大的羽毛球球拍，由北向南而卧。球拍的“把”——注入器是一台长 202 米的行波正负电子直线加速器。电子枪产生的电子束在加速管中，就像冲浪一样骑在微波场上不断得到加速。在电子束被加速到 2.4 亿电子伏时，轰击一个钨靶，就能得到正电子束。正负电子束流通过输运线注入到周长为 240 米的球拍“框”——储存环中，积累、储存、加速、对撞。安放在对撞点附近的北京谱仪能够获取对撞产生的信息，进行高能物理实验，而沿储存环切线方向安放的同步辐射光束线和实验站也可以同时开展各种科学实验。



■ 北京正负电子对撞机的布局

» 构成物质的“基本”粒子

■ 我们每天接触的物质，是由分子和原子组成的；原子就像是原子核和核外电子的微小太阳系，原子核由质子和中子组成；而质子和中子也不是“基本粒子”，它们各包含三个夸克。现在我们已经知道，夸克有三代六种，分别是上夸克和下夸克，粲夸克、奇夸克，顶夸克和底夸克；轻子也有三代六种，它们是电子、μ子、τ子和各自对应的中微子；每一种粒子都有它们的反粒子。了解到自然界的相互作用力都是通过相应的传播子传递的：光子传递电磁相互作用，中间波色子  $W^+$  和  $Z^0$  传递弱相互作用，胶子传递强作用。



» 正负电子对撞机——研究“基本”粒子的探针

■ 北京正负对撞机既可以通过正负电子对撞来研究“基本”粒子，又能够利用电子在偏转时发出的同步辐射光，研究物质的分子和原子。那么，研究像分子、原子和原子核、夸克和轻子那样微小的粒子，为什么要用这么庞大的加速器呢？

■ 看清微小物质要用显微镜，对撞机就好比研究物质微观结构的“超级显微镜”，它的分辨尺度与作为“探针”的粒子束流的能量成反比。“探针”的束流能量愈高，研究的分辨率也就愈高。譬如，细胞的尺度是  $10^{-3}$ ~ $10^{-5}$  厘米，只需要能量 0.1~10 电子伏的“探针”，也就是可见光就够了。因此，我们用光学显微镜就能观看细胞的结构。分子和原子比细胞小得多，大约只有  $10^{-7}$ ~ $10^{-8}$  厘米，相应就需要能量 1~10 千电子伏的“探针”，就要用电子显微镜、X光机和同步辐射这样的装置来观测。原子核的尺度就更小了，大约只有  $10^{-12}$  厘米，需要粒子能量为 1 亿电子伏以上的加速器，来研究原子核的结构和产生新核素、新元素等。为了研究尺度为  $10^{-13}$  厘米的质子和中子的结构，束流的能量就必须高于 10 亿电子伏。现在，加速器已经能把电子加速到 1 千亿电子伏，把质子加速到 1 万亿电子伏的超高能量并进行对撞，相应的实验分辨率达到  $10^{-16}$  厘米，对夸克和轻子进行深入的研究。要使每个粒子获得这么高的能量，需要十分庞大的加速器。

微小对象的尺度和相应的观测方法

观测对象	尺度(cm)	探针能量	实验工具
细胞 / 细菌	$10^{-3}$ ~ $10^{-5}$	0.1~ 10eV	光学显微镜
分子	$\sim 10^{-7}$	$\sim 1$ keV	电子显微镜 同步辐射等
原子	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10$ keV	同步辐射等
原子核	$\sim 10^{-12}$	$>100$ MeV	低中能加速器
强子	$\sim 10^{-13}$	$>1$ GeV	高能加速器
夸克、轻子	$<10^{-16}$	$>1$ TeV	对撞机





■ 欧洲核子研究中心建造的大型强子对撞机LHC

■ 超高能加速器为什么都要用两束相向运动的粒子对撞呢？高能物理需要寻找新粒子，研究新反应，因而关心的是质心系能量或者有效作用能。如果用高能束流打静止靶，粒子的大部分能量都变成质心系的动能，有效作用能很小。有人算过，即使把加速器做到跟地球赤道那样大，采用 10 万高斯的超导磁铁，把质子加速到约 2 万亿电子伏来打静止靶，有效作用能也只有 6 万亿电子伏；而在对撞机里，只要用两束能量各为 3 万亿电子伏的质子对撞，就达到同样有效作用能。实际上，欧洲核子研究中心建造的周长 27 公里的大型强子对撞机 LHC，两束质子的能量为 7 万亿电子伏，有效作用能高达 14 万亿电子伏，远远超过上面提到的“地球加速器”。

■ 科学家为什么要花费数十亿美元来造 LHC 这样的庞大机器呢？古往今来，人类一直在孜孜不倦地探索物质的本原。要回答这样一些根本性的问题：为什么有这么多种“基本粒子”，它们是最基本的吗？是否有尚未发现的自然规律，如新的对称性和物理规律等？如何理解宇宙中神秘的暗物质和暗能量？是否存在四维以外的更高维空间？四种相互作用力是否可以统一？暗物质究竟是什么？中微子有什么性质？告诉我们什么？宇宙是怎么生成的？反物质在哪里？

## 》北京正负电子对撞机—— $\tau$ —粲能区性能国际领先的对撞机

■ 北京正负电子对撞机瞄准了粲夸克和  $\tau$  轻子的物理研究，自 1989 年投入运行以来，迅速成为  $\tau$ —粲能区世界上性能最好的对撞机，得到了如  $\tau$  轻子质量测量、Ds 物理的研究、 $\psi(2S)$  衰变及粲夸克偶素物理的实验研究、 $J/\psi$  衰变物理的研究、R 值精确测量和  $X(1835)$  新粒子的发现等一大批重大物理成果。北京正负电子对撞机出色的加速器性能和丰富的物理成果使其跻身世界八大高能物理加速器行列。

## 》北京正负电子对撞机一机两用

■ 北京正负电子对撞机一机两用，除了开展高能物理粒子实验研究，还为来自全国各地的用户提供高性能的同步辐射光，开展凝聚态物理，生命科学，环境科学，材料科学，地球科学，光学与探测技术，高压物理，分子、原子物理，化工、化学，微电子和微机械等研究领域课题的研究，取得一大批高水平的研究成果。

## 》为什么要研究高能物理

■ 高能物理的研究目标是探索物质结构最基本的单元及其相互作用的规律。我们暂时还不知道高能物理的研究成果有什么应用的前景，就象 100 多年前居里夫人研究原子核时并不知道她开创的原子核物理研究的成果会用来做核武器、发电、治病。我们认识了物质微观世界的这些规律，未来将可以转变为技术，形成巨大的生产力。“今天的科学，明天的技术”，是一个历史的规律。

■ 高能物理研究依托大型加速器和探测器等大科学装置，建设这些装置大量使用各种新技术，如超导、自动控制、微波、高频、精密机械、高性能技术和海量储存、先进网络等等，有力地促进了这些技术的发展。中国高能物理的发展引进了这些高技术，有力地促进了这高技术在中国的发展。

■ 高能物理研究使用的大型加速器还能提供先进同步辐射光源和散裂中子源等大型先进的研究平台，为生命科学、凝聚态物理、材料科学、化学化工、资源环境、工程技术等许多领域的交叉前沿研究提供强有力的研究工具。

## » 北京正负电子对撞机进行重大改造工程

■ BEPCII是我国“十一五”重大科学工程，总投资6.4亿，工期五年。工程于2004年初动工，按进度、按指标、按预算、高质量地完成了各项建设任务，2009年5月对撞机的主要性能参数亮度在束流能量1.89GeV能量下达 $3.21 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，达到设计指标，为改造前的30多倍，是此前该能区对撞机亮度世界纪录的4倍以上。2009年7月工程顺利通过国家验收。

■ BEPCII是一台聚物理能区国际领先的对撞机和高性能的兼用同步辐射装置，它的建成成为国际同类装置建设的一个范例，是中国高能物理发展的又一个里程碑。它的投入运行，为不断取得重大物理成果，进一步保持和加强我国在聚物理研究领域的国际领先地位，提供了有力支持。

■ 工程建设过程中，高能所坚持以自主创新为主，并与国际先进技术相结合，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。

## » BEPC II 加速器工程重要里程碑

- 2004年  
11月19日，直线加速器完成设备安装并调试出束，完成工程第一阶段任务。
- 2005年  
7月4日，BEPC结束最后一轮同步辐射运行。工程进入第二阶段储存环的拆旧安新。
- 2006年  
11月18日，成功实现电子束在储存环中的积累。  
12月25日，完成工程第二阶段任务，按计划向同步辐射用户开放。
- 2007年  
3月25日，成功实现双环正、负电子束流对撞。  
7月31日，同步辐射模式达到25GeV、250mA的设计指标。
- 2008年  
1月29日，成功实现530mA×530mA对撞，亮度超过 $1 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，达到改造前的10倍。  
7月19日，加速器与北京谱仪联合调试对撞成功，圆满完成建设任务。
- 2009年  
5月13日，在1.89 GeV能量下，对撞亮度达到 $3.01 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，达到亮度的验收指标。  
7月17日，工程通过国家验收，正式投入运行。
- 2011年  
4月8日，对撞亮度达到 $6.49 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，是竞争对手美国康奈尔大学的CESRc的8倍。



■ 改造后的电子直线加速器



■ 储存环双环



■ 超导高频腔



■ 双环北交叉点



■ 新建的低温系统设备大厅





## » BESIII探测器

■ 北京谱仪 (BESIII) 是北京正负电子对撞机 (BEPCII) 上的大型通用磁谱仪, 就像BEPCII的“眼睛”, 通过测量正负电子对撞反应产生的次级粒子来研究物质微观结构的基本组成单元及其相互作用性质。

■ BESIII大量采用国际先进探测技术, 由主漂移室、飞行时间计数器、电磁量能器、 $\mu$ 子计数器、超导磁铁和相应的电子学读出、触发、数据获取等系统组成, 双环对撞机中的正负电子束团在谱仪中心对撞, 产生的末态带电和中性粒子的空间位置、动量、能量等特性由谱仪记录, 经过数据处理后进行粲能区的物理研究。

■ 漂移室是一个直径 1.6 米、长 2.4 米的圆柱体, 沿轴向共布有 7000 根镀金钨丝作为信号丝, 约 22000 根铝丝作为场丝, 小单元结构, 采用氦基气体为工作气体, 单丝位置测量精度为 120 微米。在国际上首次采用了无隔墙的内外漂移室结合方案。

■ 电磁量能器采用了 6240 根 28 厘米长的掺铊碘化铯晶体, 晶体总重 24 吨多, 对 10 亿电子伏的电子和光子能量分辨率为 2.5%。晶体的机械支撑在国际上首次应用无隔墙的晶体量能器吊挂方案, 使晶体间的物质质量最小, 提高了能量分辨率。

■ 超导磁体长 3.91 米, 内直径 2.75 米, 外直径 3.4 米, 提供大口径、高强度的均匀磁场。主要包括超导线圈、低温容器及电磁力悬挂支撑结构和阀箱引线等, 采用国际主流的单层线圈内绕工艺。于 2006 年 9 月成功励磁到 1 万高斯, 储能达到 1000 万焦耳。它的研制成功标志着我国超导技术的巨大进步。

■  $\mu$ 子探测器采用自主发展的阻性板探测器, 采用阻值可设定的大面积阻性板, 表面覆盖密封胶膜, 方法简单, 造价低廉, 方便大规模生产。这种探测器在大亚湾中微子实验, 及国际直线对撞机、宇宙线实验等方面有广泛的应用。



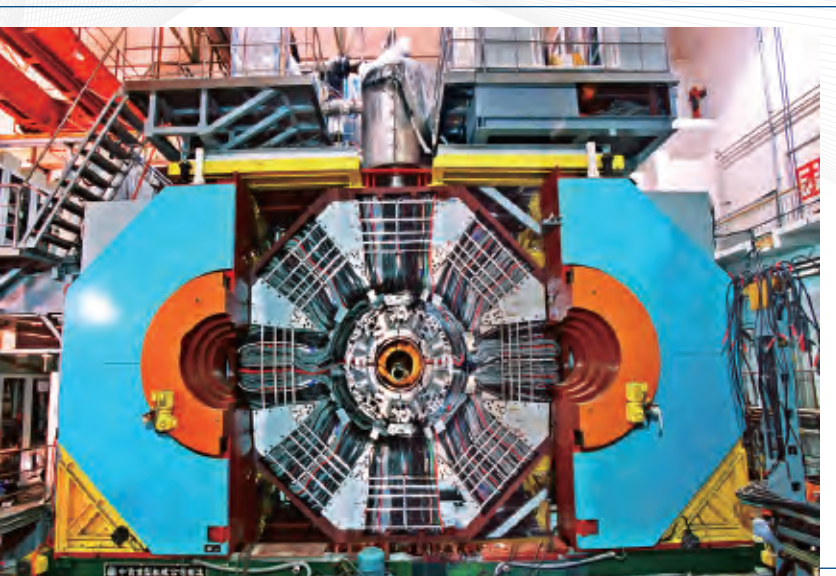
■ 漂移室在布丝中



■ 安装电磁量能器



■ BESIII推进第一对撞点



### BESIII工程重要里程碑

- 2005 年
  - 10 月, BESIII MUON 系统完成安装。
  - 12 月, 主体机械系统通过专家组鉴定验收。
- 2006 年
  - 1 月, 主漂移室完成布丝工作。
  - 9 月, 超导磁体励磁成功。
- 2007 年
  - 6 月, 量能器桶部晶体完成总装。
  - 10 月, TOF 探测器桶部闪烁体完成安装。
- 2008 年
  - 1 月, 新北京谱仪 BESIII 成功获取宇宙线事例。
  - 5 月, BESIII 探测器整体安装就位, 并在对撞点完成了精确调节。
  - 7 月, BEPCII 加速器与北京谱仪联合调试对撞成功。
- 2009 年
  - 4 月, BESIII 成功采集一亿  $\psi(2S)$  事例。

## » 北京同步辐射装置

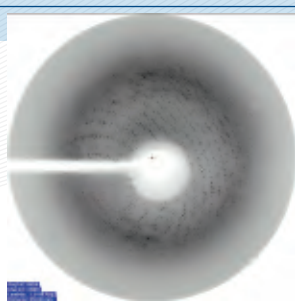
■ 同步辐射光源以其特有的高亮度、高准直性、良好的相干特性，以及从远红外到硬 X 射线范围的连续光谱等性质，被广泛用于生命科学、环境科学、凝聚态物理和材料科学等领域，成为当今世界上能同时用于基础科学研究、应用研究和高技术产品开发的一种先进的不可替代的光源。

■ 北京同步辐射装置（BSRF）是一个多学科的大型实验平台，它为我国众多科研领域的研究工作提供强有力的实验手段。BSRF 于 1991 年开始对外开放，成功运行了 15 年，为全国的科研工作者提供了大量的实验机时。经过配合 BEPCII 建设的改造工作，BSRF 的性能有了大幅度的提高。目前 BSRF 通过 9 个前端区（包括 5 个插入件）引出了 14 条光束线，建有光电子能谱、X 射线衍射、小角 X 射线散射、XAFS、软 X 射线、中能 X 射线、蛋白质晶体结构、X 射线成像和形貌、VUV 光谱、X 射线漫散射、高压 X 射线衍射、X 射线荧光分析、X 射线光刻和 LIGA 等 14 个实验站。BSRF 每年为用户提供同步辐射专用机时 2000 多小时，部分光束线和实验站在对撞运行时可以兼用运行，提供实验机时。

■ 经过多年的开放运行，BSRF 已经形成了一支稳定的、高水平的用户队伍，他们来自大学、中国科学院和各部委的研究所等单位。每年有近百个科研单位的 400 多个课题利用 BSRF 开展高水平的科学研究工作，研究内容涉及材料科学、凝聚态物理、化学、化工、生命科学、医学、地矿、资源、环境科学、微电子和微机械技术等不同的学科和领域，取得了一大批重要的科研成果。BSRF 已成为对外开放的大型公用科学设施和多学科研究的重要基地。



■ 同步辐射12号实验大厅



■ 新建生物大分子实验站采集的实验图谱



■ 新建的同步辐射15号实验大厅



中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

地址：北京市石景山区玉泉路19号乙  
邮编：100049  
电话：010-88235008  
传真：010-88233105  
网址：www.ihep.cas.cn