

北京正负电子对撞机及其重大改造工程

张 闯
(中国科学院高能物理研究所,研究员、博士生导师 北京 100049)

[摘要] 北京正负电子对撞机(BEPC)自 1988 年建成投入运行以来,在高能物理实验和同步辐射研究领域做出了许多重要成果,成为在其工作能区性能国际领先的高能加速器。为了在激烈的国际竞争中继续保持我国在 τ -粲物理领域的领先地位,我国科学家提出了北京正负电子对撞机重大改造计划(BEPCII),于 2003 年底得到国家批准。和 BEPC 一样,BEPCII“一机两用”用于高能物理和同步辐射研究,作为对撞机的主要指标的亮度将比 BEPC 高 100 倍,同步辐射的性能也将大幅度提高。简要报告了 BEPC 上的研究成果、BEPCII 工程建设的进展及其发展前景。
[关键词] 对撞机 亮度 高能物理 同步辐射 [中图分类号] 0572.21
[文献标识码] A [文章编号] 1000-7857(2004)11-0023-05

THE BEIJING ELECTRON-POSITRON COLLIDER AND ITS
SECOND PHASE CONSTRUCTION

ZHANG Chuang

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

Abstract: The Beijing Electron-Positron Collider (BEPC) has been well operated for 15 years with many exciting high energy physics and synchrotron radiation research results since it was put into operation in 1989. Aiming at t and Charm physics, the BEPC has become a leading machine in the world in its energy region. In order to keep China's leading position in the t and Charm physics, Chinese scientists proposed the BEPCII project as the second phase construction of the BEPC. The project was approved by Chinese government at the end of 2003. Like the BEPC, the BEPCII will serve two purposes, i.e. high energy physics and synchrotron radiation. The luminosity of the BEPCII will be two orders of magnitude higher than the present BEPC and its performance of synchrotron radiation operation will also be significantly improved. The performance of the BEPC and progress of the BEPCII as well as their prospect are reported in this paper.

Key Words: collider, luminosity, high energy physics, synchrotron radiation

CLC Number: 0572.21

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)11-0023-05

1 北京正负电子对撞机

北京正负电子对撞机(BEPC)工程于 1984 年 10 月破土动工,1988 年 10 月建成、对撞成功,亮度迅速达到设计指标^[1]。表 1 列出了 BEPC 的里程碑和大事记。

表 1 BEPC 的里程碑和大事记

1984.10	BEPC 工程奠基
1987.6	注入器——电子直线加速器安装完毕
1987.11	储存环安装完毕
1988.10	在 BEPC 中实现正负电子对撞
1988.12	在 1.55 GeV 时亮度达到设计值 $2\times10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1989.5	开始高能物理和同步辐射实验
1996.6	1.55 GeV 时亮度达到 $4.4\times10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1999.2	改进项目通过验收,亮度提高约 2 倍因子
2001.3	获取 5 800 万 J/ψ 事例
2002.3	获取 1 400 万 ψ' 事例
2003.2	1.89 GeV 时亮度达到 $1.2\times10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2003.5	获取 35.5pb $^{-1}\psi'$ 事例
2004.5	高能物理实验圆满结束,BEPCII 建设开始

BEPC 由四大部分构成:注入器与束流输运线、储存环、

北京谱仪和同步辐射装置,图 1 是 BEPC 的鸟瞰图,它像一支硕大的羽毛球拍,由北向南而卧。球拍的“把”——注入器,是一台长 202m 的行波正负电子直线加速器。电子枪产生的电子束在盘荷波导加速管中,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 150MeV 时,轰击 1 个约 1cm 厚的钨靶,由于级联簇效应产生正负电子对,将正电子聚焦、收集起来加速,就得到高能量的正电子束。正负电子束流通过输运线注入到球拍的“框”——储存环中积累、储存、加速、对撞。正负电子束流在储存环 240m 长的真空盒里做回旋运动,安放在真空盒周围的各种高精电磁铁将束流偏转、聚焦、控制在环形真空盒的中心附近;高频腔不断把微波功率传递给束流使之补充能量并得到加速;上百个探头密切检测束流的强度、位等性能;计算机通过各种接口设备,控制对撞机的上千台设备的工作。当正负电子束流被加速到所需要的能量时,对撞点两侧的一对静电分离器被关断,正负电子束流就开始对撞,安放在对撞点附近的北京谱仪(BES)开始工作,获取正负电子对撞产生的信息。北京同步辐射装置(BSRF)的光束线和实验站也可以开展

收稿日期:2004-10-10。

作者简介:张闯,男,1944~,北京市中国科学院高能物理研究所(100049),主要从事粒子加速器研究,E-mail: zhangc@mail.ihep.ac.cn。



图1 BEPC 的鸟瞰图

各种实验。BEPC 储存环每隔 4~6 小时重新注入正负电子束流,重复以上过程。

BEPC 自 1989 年投入高能物理实验和同步辐射研究以来,经过多年的改进,对撞亮度、束流强度和寿命不断提高,成为 τ /粲能区性能居国际领先地位的对撞机^[2]。表 2 列出了 BEPC 的主要参量。

表 2 BEPC 的主要参量

参量	单位	设计值	运行值
工作能量	GeV	1.0~2.8	1.0~2.5
注入能量	GeV	1.1~1.4	1.3
环周长	m	240.4	240.4
高频频率	MHz	199.526	199.533
对撞点包络函数	cm	130/10	120/5
流强	mA	$66 \times (E/2.8)^3$	45@1.89 GeV
寿命	hrs.	5~7	8~10
亮度	$10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	$1.7 \times (E/2.8)^4$	1.2@1.89 GeV

北京正负电子对撞机自 1989 年投入高能物理实验和同步辐射研究以来,运行水平不断提高。近年来,每年约运行 6 000 小时,其中高能物理约占 40%,同步辐射占 20%~30%,故障率为 5%左右,低于国际上高能加速器的平均故障率。图 2 是 BEPC 在 2003~2004 年度运行时间的分配情况。

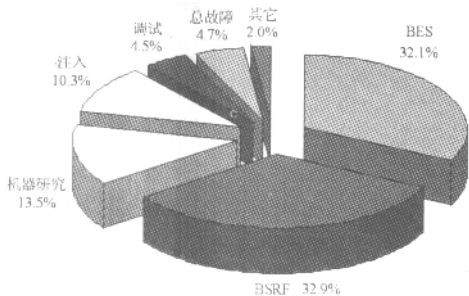


图2 BEPC 在 2003~2004 年度运行时间分配情况

图 3 是 BEPC 在 ψ' 取数运行时 1 周的流强-时间曲线。从图中可以看出,正负电子对撞的峰值流强约为 90mA,束流寿命约 8 小时,每天注入对撞 6~7 次。

BEPC/BES 的高效运行使 BES 拥有世界上最大的、直接从正负电子对撞获取的 J/ψ 和 ψ' 事例的样本,这些数据不仅数量大,而且质量也很好,有希望取得高水平的物理成果。图 4 和图 5 分别给出了 BEPC/BES 获取的 J/ψ 和 ψ' 事例总数与世界上其它实验组的比较。在 BEPC 上取得了 τ 轻子精确测量 ψ' 衰变的系统研究、胶子球候选粒子 $\xi(2230)$ 的研究、D 和 D_s 衰变的研究、2~5 GeV 能区的强子 R 值测量等国际水平的物理成果。

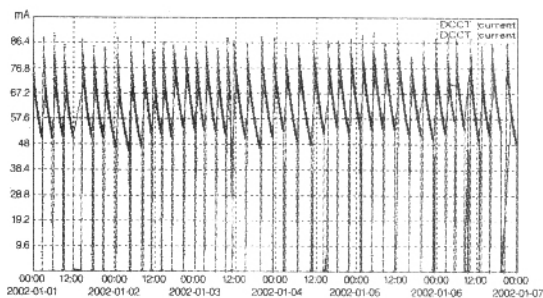


图3 BEPC 在 ψ' 取数运行 1 周的流强-时间曲线

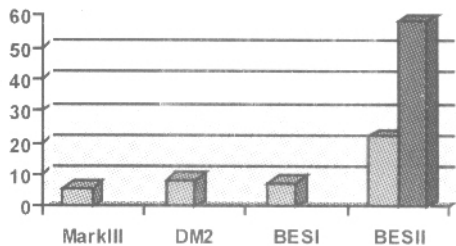


图4 BES 获取 J/ψ 事例数与其它实验组的比较

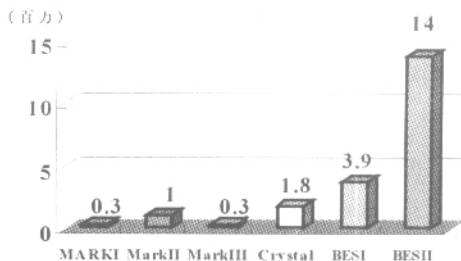


图5 BES 获取 ψ' 事例数与其它实验组的比较

最近,BES 合作组在这 5 800 万 J/ψ 事例中找到 1 个新衰变道,在 2 倍的质子质量附近发现了 1 个新的共振态粒子。BES 合作组对这个共振态进行了仔细核实和反复讨论,排除所有已知粒子的可能性;测得新粒子的质量小于 2 倍质子质量,宽度非常窄,它可能是人们寻找已久的正反核子束缚态-重子偶素。这个结果在《物理学快报》发表后,得到国际高能物理界的重视。图 6 是这个新共振态的峰位曲线^[3]。

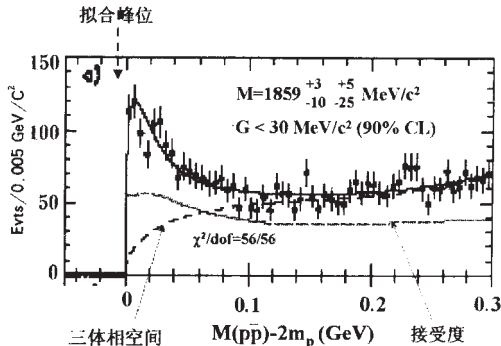


图6 BES 合作组发现的新共振态

作为利用 BEPC 同步辐射光源进行科学研究的装置,BSRF 现已装备了 4 台插件、7 个前端区、14 个光束线和实验站,成为对社会开放的大型公用科学设施。BSRF 有两种运行模式:兼用模式用于高能物理对撞实验,同时也提供

同步辐射光;专用模式专门用于同步辐射研究。每年都有来自全国各大科研单位和高等院校的 300 多个用户,在 BSRF 上开展凝聚态物理、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、分子与原子物理、化工、化学、微电子和微机械等领域研究课题,取得一大批高水平的成果,特别是在生物大分子研究方面的成果,引起了国际上的关注。图 7 是清华大学实验组在 BSRF 测得的“非典”病毒蛋白质结构。

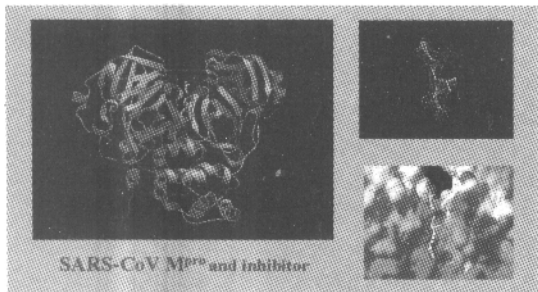


图 7 在 BSRF 上测得的“非典”病毒蛋白质结构

2 北京正负电子对撞机重大改造工程

BEPC 上的科学成果,激励我们攀登新的高峰。北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)正是 BEPC 的自然延伸。

在 BEPC 运行的早期,对撞亮度还比较低,BESI 在大约两年的时间里获取了 900 万个 J/ψ 事例。1999 年 BEPC 的改进完成,亮度提高约 2 倍因子,加上实验干扰问题的解决和运行效率的提高,在 1999~2000 和 2000~2001 的两个运行年度里,BEPC/BESII 获取了 5 800 万 J/ψ 事例。在 ψ' 实验中,BEPC/BESI 大约在 1 年的运行时间里获取了 390 万 ψ' 事例,而 BEPC/BESII 在 2001~2002 运行年度里,成功地获取了 1 400 万个 ψ' 事例。为了在包括胶子球寻找和粲夸克偶素谱研究等 τ -粲物理前沿课题,取得具有世界领先水平的重大物理成果,需要获取 5×10^9 个 J/ψ 事例和 2×10^9 个 ψ' 事例。如果按 BEPC/BESII 的运行亮度来推算,大约分别需要 172 年和 143 年,这显然是不现实的。这就需要对撞机的亮度有数量级的提高,同时要相应提高探测器的精度以减小系统误差,使之与高亮度带来的低统计误差相匹配。这就是 BEPCII 和 BESIII(新北京谱仪)^[4]。

想到这一点的不仅是中国科学家。美国康乃尔大学的

正负电子对撞机 CESR 原先在质心系 11.6GeV 的 B 物理能区工作,为了争夺 τ -粲能区的物理成果,他们正在对撞机中安装数十米长的超导扭摆磁铁,以便在低能量下得到高亮度,其在 1.89GeV 时的设计目标是 $3 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$,称为 CESRc。这个指标同采用单环“麻花”轨道多束团对撞技术提高亮度的 BEPCII 方案相当,但比我们早两年实现。为了继续保持我国在 τ -粲物理前沿的领先地位,经过反复论证,我们决定采用双环方案,在 1.89GeV 时的设计亮度为 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$,在 J/ψ ($E=1.55 \text{GeV}$) 到 ψ' ($E=1.89 \text{GeV}$) 时为 CESRc 的 3~5 倍,加上能散度的因素,BEPCII 在 τ -粲能区将具有明显的优势。图 8 给出了世界上从 ϕ 到 Z 粒子能区工作的正负电子对撞机的亮度。

图 8 中,圆点代表现有对撞机的亮度,菱形点是正在研制中的对撞机。下部椭圆内的属于通常的对撞机,BEPC 属于这一类。中间椭圆内的对撞机亮度在 $10^{32} \sim 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间,正负电子在对撞时可以产生更大量粒子,故称为“粒子工厂”。上部椭圆内的是研讨中的“超级粒子工厂”,亮度达 $10^{35} \sim 10^{36} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。从图中可以看出,现在世界上有 3 个粒子工厂,即意大利的 ϕ 粒子工厂 DAΦNE 和美国与日本的 B 介子工厂 PEP-II 与 KEKB。在 τ -粲能区,BEPC 仍然是目前亮度最高的对撞机。但是,这个领先地位将在 2005 年 CESRc 投入运行后被打破。因此,BEPCII 肩负着夺回 τ -粲能区亮度制高点的重任。

正负电子束流对撞的亮度可表示为:

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

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 是每一束团的流强。在能量确定和每一束团的流强受限于束-束作用参量 ξ_y 的情况下,提高亮度最有效的方法是增加束团数目和减小对撞点处的包络函数值。这正是 BEPCII 提高亮度的技术路线,见表 3。

表 3 从 BEPC 到 BEPCII 亮度提高的途径 ($E=1.89 \text{GeV}$)

参量	单位	BEPC	BEPCII	亮度提高因子
β_y^*	cm	5.5	1.5	3.67
k_b		1	93	93
ξ_y		0.04	0.04	1
I_b	mA	35	9.8	0.28
L	$10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	1.0	100	~100

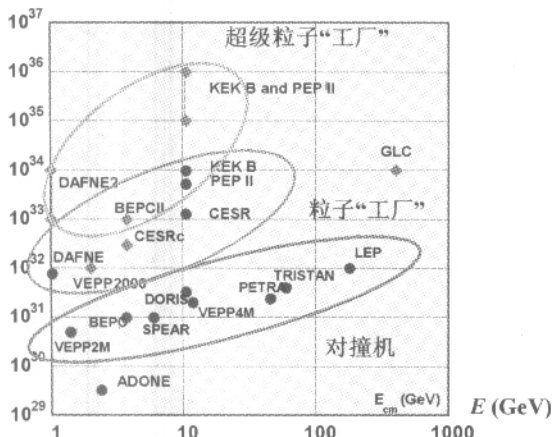


图 8 正负电子对撞机的亮度

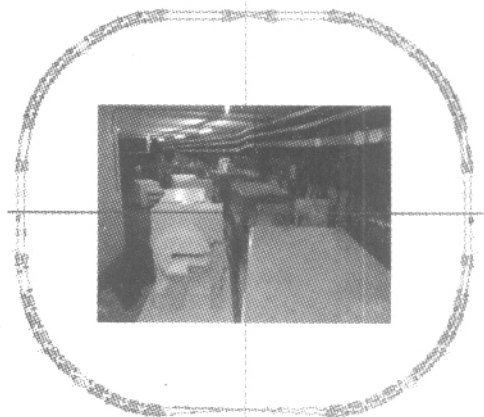


图 9 BEPCII 储存环的布局示意图

为了将束团的数目从 BEPC 的 1 对增加到 BEPCII 的 93 对,就必须让正负电子在各自独立的储存环里运动,而在对撞点相遇;为了将对撞点处的包络函数值 β_y^* 减小为 1.5cm,需要采用安放在探测器内部的超导聚焦磁铁,还要采用能提供高加速电压和高微波功率的超导高频腔。图 9 是 BEPCII 储存环的布局示意图。

双环的 BEPCII 将安装在 BEPC 现有的隧道里。图中桔红色的是 BEPC 储存环的偏转磁铁,白色的是内环磁铁的木制模型。经过反复多次的隧道测量、CAD 模拟和仔细研究讨论,确认了 BEPCII 双环方案的可行性。表 4 给出了 BEPCII 的主要参量。

BEPCII 将继续在 τ -粲能区工作,其束流能量范围为 1~2 GeV。由于 BEPCII 的主要物理窗口是 J/ψ (3097)、 ψ' (3686) 和 ψ'' (3770),其优化束流能量范围取为 1.89 GeV。BEPCII 同时也是 1 台高性能的同步辐射光源,其工作能量为 2.5 GeV,相应的流强指标为 250 mA。为了确保 BEPCII 的高平均亮度,注入时间必须尽可能短,这就要求全能量注入(即注入能量和对撞能量相同),以便实现随时补充束流运行;同时,占主要部分的正电子注入时间也要尽量缩短,要求注入器提供更高的正电子流强,使其注入速率不低于 50 mA/min。注入器的改造包括采用高功率速调管,改进微波功率源,重复频率从 12.5 Hz 提高到 50 Hz;更换 8 节加速管;将电子枪流强从 5A 提高到 10A;正电子打靶能量从 150 MeV 提高到 240 MeV;研制高性能正电子源,提高效率;改进聚焦和轨道校正系统;脉冲宽度从 2.5ns 减小为 1ns;研究双束团注入的可能性等。图 10 是 BEPCII 改进后的注入器照片。

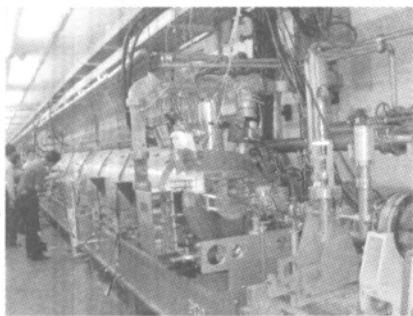


图 10 改进后的注入器照片

表 4 BEPCII 的主要参量

参量	单位	BEPC	BEPCII
工作能量	GeV	1.0~2.5	1.0~2.1
注入能量	GeV	1.3	1.89
环周长	m	240.4	237.53
高频频率	MHz	199.53	499.8
对撞点包络函数	cm	120/5	100/1.5
每束流束团数目		1	93
流 对撞	mA	45	930
强 同步		150	250
寿 对撞	hrs.	8~10	250
命 同步		20~30	2.7
亮度	$10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	1.2	100

高亮度需要高流强,BEPCII 储存环中每束流强达 0.91A。高流强又带来各种束流集体效应,包括束团拉长效应、耦合束团不稳定性、阻抗壁不稳定性、离子俘获、快离子

不稳定性、电子云不稳定性和束-束相互作用等。在 BEPCII 的设计中仔细研究了这些效应,尽可能减小真空盒部件的耦合阻抗,提高不稳定性的阈值流强,还设计了束流反馈系统来阻尼这些不稳定性^[5]。

高亮度对加速器技术提出了一系列挑战。BEPCII 中的关键技术有:500MHz 超导高频系统、低阻抗冲击磁铁、大功率高精度开关电源、快速束流反馈装置、基于 EPICS 环境的控制系统、大束流负载下的超高真空系统、对撞区和超导磁铁等等。经过精心设计、精心研究,BEPCII 关键设备的样机已全部完成,现已进入批量生产阶段。图 11 是储存环弧区一个单元的磁铁、真空盒等设备在实验室预组装的照片。BEPCII 储存环弧区共有 80 个这样的单元,都要在实验室安装、准直好,再整体运输到隧道安装,以避免在狭窄的隧道里做单件安装,节省时间。

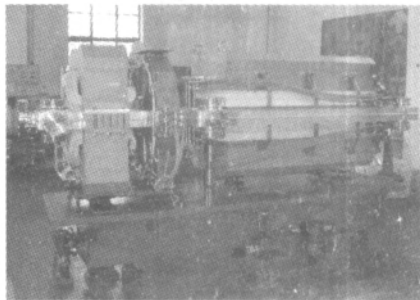


图 11 储存环弧区单元的预组装

对撞区是 BEPCII 中空间最紧迫的部位。对撞区的超导磁铁 SCQ、低温设备、真空盒、束测装置、切割磁铁 SPB 和双孔径聚焦磁铁 Q1A 与 Q1B 等部件都要安放在一个移动支架上,安装妥当后再移向对撞机点,与另一侧的真空盒连接,如图 12 所示。

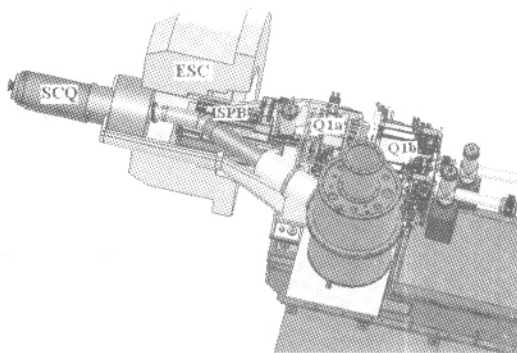


图 12 移动支架上的对撞区设备

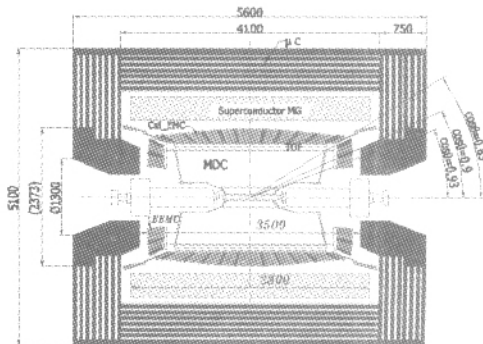


图 13 BESIII 的结构示意图

