

高效率生产粲粒子的工厂

——BEPCH 加速器巡礼

张 闯

1974年11月,丁肇中和里克特几乎同时宣布,他们的实验组各自在美国布鲁克海文实验室的质子同步加速器 AGS 和斯坦福直线加速器中心的正负电子对撞机 SPEAR 上,发现了一个能量约为 31 亿电子伏特的新粒子,并分别命名为 J 粒子和 ψ 粒子,后来统一称为 J/ψ 粒子。这一被誉为“十一月革命”的发现,使高能物理的研究迈进了一个新的境界。此前被公认的上、下、奇 3 种夸克的模型已经装不下这个新粒子了,应当有第 4 种夸克,也就是粲夸克。 J/ψ 粒子就是正反粲夸克组成的一个粲粒子。进一步的实验研究发现, J/ψ 粒子只是粲粒子家族中的一个小兄弟,是基态的粲粒子。能量更高的还有 $\Psi(3680)$ 和 $\Psi(3770)$ (也称 Ψ' 和 Ψ'') 等激发态的粲粒子,括号里的数字是该粒子以兆电子伏 (MeV) 为单位的能量。此后的 20 年间,粒子物理的发现接踵而至:1977 年发现 τ 轻子和底夸克,1994 年发现顶夸克。这样,标准模型中就有了三代轻子和三代夸克这样美满的大家族。

一、粒子工厂

在前驱的加速器上发现新粒子、新现象,并不是故事的结束,而只是精彩篇章的开头。高能物理是基于大量事例的统计研究,必须尽可能多地获取这些粒子,方能对它们的性质、结构及其相互转化进行深入细致的研究。这就需要在这些已有所知而又知之不多的能区建造更高性能的加速器。粒子工厂,就是能够大量生产所研究粒子的加速器,如图 1 所示。



图 1 粒子工厂示意图

图 1 中的英文写的是“正负电子工厂”,目前世界上的粒子工厂都采用正负电子对撞的方式进行“生产”。图中有 3 个烟囱,左面最矮的一个烟囱冒出来的是 Φ 、 ρ 和 ω 粒子,相应于 Φ 粒子工厂,质心系能量为 1.02 GeV (1 GeV=1000 MeV=10 亿电子伏);右面最高的烟囱里出来的是 ξ 、 ξ' 和 ξ'' 粒子,相应于 B 介子工厂,质心系能量为 11.2 GeV;而中间的烟囱筒里产生的则是 Ψ 和 Ψ' 等粲粒子和 τ 轻子,对应于粲- τ 粒子工厂,质心系能量为 3~5 GeV。

图 1 直观地描述了粒子工厂的概念,但也有人批评说,烟囱里冒出来的是废气,而这些粒子都是工厂生产的宝贵产品,似有不妥。虽然言之有理,我们还是不再苛求了吧!只是要记住,粒子工厂的目标是高效率地生产粒子。

图 1 中的工厂同时产生三类粒子,但由于粒子工厂的性能与工作能量密切相关,因此,要按能量进行优化工厂的设计,现实的粒子工厂都工作在某一个特定的能区。图 2 给出了世界上现有的正负电子对撞机的亮度,包括工作在 Φ 粒子、粲- τ 粒子和 B 粒子能区以及更高能区的对撞机、粒子工厂和拟建的超级工厂。

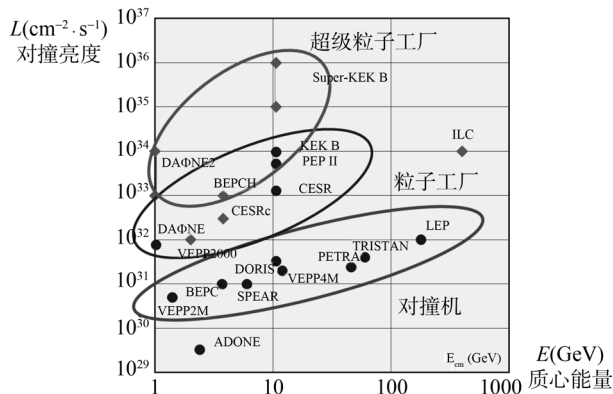


图 2 世界上现有的正负电子对撞机的亮度

图 2 中的横坐标是质心系能量,纵坐标是对撞亮度,每一个圆点都代表一台曾有、现有或将有的正负电子对撞机及其工作的能量和达到的最高亮度。对于这些机器,这里不一一介绍,而是分类加以描述。

在图 2 中有三个椭圆，每个里都包含了若干台对撞机。这三个椭圆之所以是倾斜的，是因为高能量的对撞机相对容易达到高亮度。图中，最下面的椭圆里的一组是一般的对撞机，亮度在 $10^{30} \sim 10^{32} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围；中间一组是粒子工厂，亮度为 $10^{32} \sim 10^{34} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ；最高的一组是超级粒子工厂，亮度达 $10^{33} \sim 10^{36} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。一般的对撞机由于亮度低，现多数已终止运行或改建成同步辐射光源；粒子工厂是近 10 年内建造的新型对撞机，大多数正在进行高能物理实验；而超级粒子工厂则还在计划和研究之中。由此可见，粒子工厂就是一种能大量生产某种微观粒子的高能对撞机。

那么，为什么人们要按亮度把对撞机分成这么几等呢？在下面一节里，我们接着谈表征工厂最重要的一项指标：生产效率。

二、生产效率

粒子工厂的生产效率与对撞亮度成正比：

$$\frac{dN}{dt} = L \cdot \sigma。$$

这里， dN/dt 是单位时间里束流对撞产生的某种粒子的数目，也就是粒子的生产效率； L 是对撞亮度，而 σ 就是产生这种粒子的反应截面。例如，1.55GeV 的正负电子对撞产生 J/ψ 粒子的反应截面大约是 3000nb。这里的 nb 也就是毫微巴，是粒子物理里采用的一个微小面积单位：1b= 10^{-24}cm^2 ，1nb= 10^{-33}cm^2 。如果对撞亮度为 $1 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，由上面的公式计算，每秒钟就可以产生 30 个 J/ψ 粒子；如果亮度达到 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，那么每秒钟就可以产生 3000 个 J/ψ 粒子，生产效率就提高 100 倍。

从图 2 中可以看出，1988 年建成的北京正负电子对撞机 (BEPC)，曾经是粲- τ 能区世界上亮度最高的对撞机，BEPC 的成功也使我国在国际高能物理领域占据了一席之地。但是，从 2004 年开始，这一领先优势已让位于美国康奈尔大学的正负电子对撞机 CESRc。为了争夺在粲- τ 能区的物理成果，CESR 从 2000 年起就着手从 B 介子能区转入粲- τ 能区的研究，提出了 CESRc 的计划，把束流能量从原来的 5.6GeV 降低到 1.55~2.5GeV，在 1.89GeV 时的亮度达到 $6 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，超过了 BEPC。面对 CESRc 的挑战，中国科学家提出了对 BEPC 进行重大改造的计划，也就是 BEPCII，理论设计的亮度为 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，为 CESRc 的 10 倍以上。那么，怎样才能达到这么高

的对撞亮度呢？

正负电子对撞机的亮度可以从下面公式描述：

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

这里， R 是对撞束团截面高度与宽度的比值， E 为束流能量， ξ_y 是垂直方向束束作用参量， β_y^* 是对撞点处垂直包络函数值， k_b 为每一束流中束团的数目，而 I_b 则是每一束团的流强。

束流能量已经确定在粲- τ 能区，优化在 1.89GeV，而束束作用参量通常是一个设计常量，我们取为 0.04，而 R 远小于 1，可以先不考虑。这样，提高亮度的途径就归结为：增加束团的数目 k_b ，同时使束团的流强 I_b 尽可能高和减小束团的垂直包络。表 1 列出了 BEPCII 提高对撞亮度的技术措施：

表 1 BEPCII 提高对撞亮度的技术措施

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

从表 1 中可以看出，对撞亮度提高的最大因子是把正负电子对撞束团的数目从原来的 1 对增加到 93 对。这就要在原来的 BEPC 隧道里安装两个储存环，让 93 个正负电子束团在各自的环里运动，只在对撞区交叉对撞。另外，为了对撞点处垂直方向的包络函数值从原来的 5.5cm 减小到 1.5cm，就需要把聚焦磁场非常强的超导磁体插入到对撞点非常近是北京谱仪的内部，并且要采用能提供高加速电压和高微波功率的超导高频腔，把束团的长度缩短到与包络函数值相当的 1.5cm 左右。BEPCII 储存环的布局图见前面陈和生文章中的图 2。

双环、大流强和微小束团对撞，给 BEPCII 工程带来了巨大的挑战。为了克服储存环隧道狭窄、对撞区短困难，实现正负电子束团在横向（微米级）、纵向（皮秒级）六维精确对撞，工程采用和发展了一系列的高新技术，例如：创造性地提出了超导插入磁体、对撞区特种磁铁和真空盒的设计方案；为准确控制各个束团的流强、截面及其间距，研制国内首台逐束团横向反馈系统、首套数字型逐束团流强测量和注入控制系统；安培级流强的超高真空和低阻抗真空盒；自主研发的正电子源获得高产额

正电子束流、10 A 栅控电子枪达到国际先进水平。在调试过程中采取多种有效措施成功地应对了双环高亮度对撞和高流强运行带来的一系列挑战，亮度达到 $3.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，是 BEPC 的 33 倍、CESRc 的 5 倍，达到粲- τ 能区对撞机的国际领先水平，并以国际一流的速度实现了同步辐射高质量开放运行和高能物理高亮度取数，在短短的几个月中，获取了高质量的 2 亿个 J/ψ 事例和 1.12 亿个 ψ' 事例，是此前世界上最大数据样本的 3~4 倍。下一节中，我们就来谈谈 BEPCII 生产粲粒子的流程。

三、工作流程

如上所述，BEPCII 是一台工作在 τ -粲能区的高性能对撞机。BEPCII 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（参见陈和生文章中的图 1）。

图中，BEPCII 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 202 米的行波正负电子直线加速器。电子枪安放在直线加速器的头部，这是 BEPCII 中束流的源头。图 3 是安装在隧道里的电子枪的照片。图 3 中圆筒形的设备就是电子枪，右上角是高压电源，它能产生 20 万伏的脉冲高电压。这么高的电压加在电子枪的阴栅组就把电子从灯丝里拉出来，就像枪一样的发射出 10 安培的脉冲电子流。它的脉冲宽度只有 1 毫微秒，每秒钟可以发射 50 次，满足储存环注入的需求。透过窗户可以看到电子枪后面长长的直线加速器。

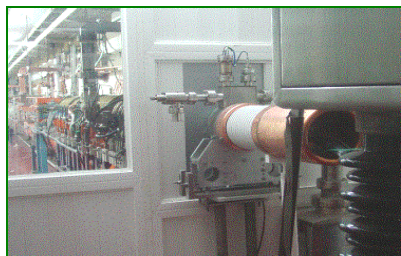


图 3 电子枪：电子从这里出发

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，轰击一个约 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，就得到高能的正电子束（直线加速器照片可参见封二）。

直线加速器的微波功率来源于速调管和调制器（速调管长廊的照片见封二）。在这个长廊里，一共有

16 套微波功率源。每一功率源实质上是一台加速器，或者更准确地说是减速器。封二速调管长廊照片中的机柜就是调制器，它能产生高达 110 兆瓦的脉冲功率并送给速调管，在速调管中产生的高功率电子束把能量传递给管中谐波腔，再通过波导管把微波功率传输到隧道里的加速管去加速正负电子。每一台速调管可以供 4 根加速管，16 套功率源足以为直线加速器的 56 根提供功率。

束流输运线是连接“球拍”的“把”和“框”的部分（参见陈和生文章中的图 1）。直线加速器产生的高能正负电子束流通过输运线传送到储存环。BEPCII 束流输运线的照片见封二。正负电子在共用段的真空盒里跑了约 30 米，进入了一块偏转磁铁（照片右下角）。由于正负电子带的电荷相反，在磁场的作用下各奔西东，各经过大约 100 米的旅行，就到了“球拍”的“框”——储存环的入口。

在输运线和储存环交界的地方，有一块切割磁铁，它可以把储运线送过来的束流从水平方向朝储存环里偏转，又不会扰动储存环里已经积累的束流。在切割磁铁的上下游，各有一块冲击磁铁，它们的磁场在几百个毫微秒的极短时间内就能上升和下降，这样就能把直线加速器来的束流一下子“踢”进了储存环的真空盒（冲击磁铁及其脉冲电源的照片见封二）。

为了保证正负电子能够在储存环的真空盒里连续储存、运行和对撞几个小时，要求的真空度为 10^{-10} 托量级，也就是大约要稀薄到大气压的十万亿分之一。所以，每个真空盒在安装到储存环里以前，都要经过许多道工序的清洗、检漏、烘烤，并预抽极限真空，安装后还要靠束流产生的同步辐射光继续解析真空盒壁吸附的残余气体。在正电子环的真空盒的内壁还要镀一层氮化钛，以减少二次电子发射，防止产生的光电子聚集在正电子的轨道附近扰动束流的运动。图 4 是在实验室里进行预抽真空的照片。



图 4 真空盒在实验室进行预抽

在真空盒周围安装有各种高精度电磁铁：二极磁铁将束流的轨道偏转，四极磁铁将束流截面聚焦得很小，还有六极磁铁、二极校正磁铁和斜四极磁铁等，对束流的各种参量进行校正和优化。在陈和生文章中图 2 右下角是 C 储存环隧道的照片，可以看到二极偏转磁铁和四极聚焦磁铁。BEPCII 储存环里，一共有 357 块各种类型的电磁铁。这些磁铁由高精密的稳流电源励磁，精度和稳定都要优于万分之一，保证束流在长时间储存和对撞时的稳定性（电源厅的照片见封二）。

与在直线加速器中不同，束流并不是“骑”在微波场上随时得到加速，而只在经过高频腔的加速间隙的驻波电场时才得到加速。在 BEPCII 中（参见陈和生文章中的图 2），正负电子环上各安装了一台超导高频腔，每个腔可以产生 15 兆伏的加速电压，提供 150 千瓦的高频功率。高频腔不断把发射机提供的微波功率传递给束流使之补充由于同步辐射和其他原因损失的能量并得到加速。图 5 是高频发射机的照片。



图 5 储存环的高频发射机

超导高频腔工作在 4.5K 的低温，也就是摄氏零下 269°的低温，这时腔壁的电阻接近于零，腔本身几乎不损耗功率。在 BEPCII 中，除了超导高频腔以外，还有探测器的超导螺线管和对撞区插入超导磁体，也要求在“零”电阻态工作。这都需要有一个大型的低温系统。图 6 给出了 BEPCII 低温系统的布局。

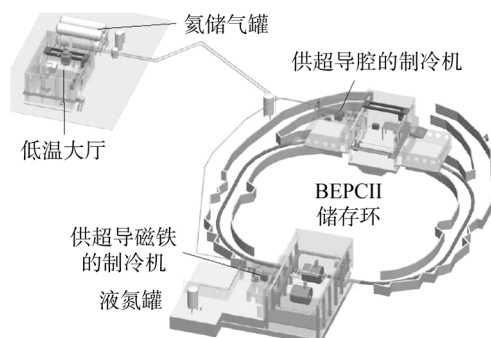


图 6 BEPCII 低温系统布局

在储存环里，安装了各种探头来检测束流的位置、平均流强、束团分布与流强和束团形状等性能。这样调束和运行人员就能准确地了解束流的状况，并进行校正、调整和反馈控制。图 7 是在高流强情况下，横向反馈系统工作前后同步光探头测量束流截面的情况。从图 7 中可以看见，如果水平和垂直方向的反馈都不加，束流的截面又高又宽，加了一个方向的反馈，这个方向的束团尺寸就变小，两个方向都加上，束团就正常了。这样，能使束流更加稳定，对撞的亮度就能大大提高。

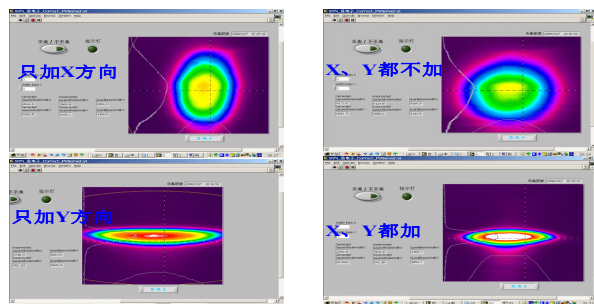


图 7 加横向反馈系统前后同步光探头的测量结果

正负电子在对撞区交叉、对撞。为了使正负电子在很短的距离里从两个环交叉到一起，在对撞点聚焦到微米量级的截面，对撞后又要很快分开，对撞区安装了多种特殊的设备，如：双孔径的聚焦磁铁、切割型的偏转磁铁、插入节超导磁铁和各种形状特异的真空盒，上面装配了各种束流测量探头和真空泵与真空计等。对撞区又是加速器与探测器交汇的地方，空间非常拥挤，设备的研制和安装极具挑战性（对撞区的照片参见封二）。

BEPCII 的数千台设备都在计算机的控制下协调工作。中央控制室随时掌握加速器的各种运行信息，操作员通过人机接口装置操纵系统设备，按要求进行实时控制和信息存储，实现正负电子束流的产生、运输、注入、积累、加速并使其对撞。（BEPCII 中央控制室的照片见封二）。

当束流积累到足够高的流强后，就要适当调整束流的轨道使正负电子进行对撞。这时，安放在对撞点附近的北京谱仪（BESIII）开始工作，获取对撞产生的粒子事例。BEPCII 储存环大约每隔 3 小时补充注入正负电子束流，周而复始上述注入、积累和对撞实验的过程。每天 24 小时、一周 7 天，科研人员在对撞机上辛勤工作、昼夜不息，孜孜不倦地采集美妙的粲粒子，探索微观世界的奥秘。

四、综合利用

BEPCII 作为高效率生产聚粒子的工厂，还有一个显著的特色就是一机两用。它能够“综合利用”对撞机的产物，又是一台高性能的同步辐射光源。

大家知道，相对论性的粒子在偏转时会在轨道的切线方向发出一种光，由于它是首先在同步加速器上发现并加以研究的，所以被称为同步辐射。这就好比在快速转动雨伞时，沿伞边缘的切线方向会飞出一簇簇水珠，当束流在环形加速器中以接近于光速作回旋运动，在切线方向会有电磁波发射出来。图 8 是同步辐射产生原理的示意图。

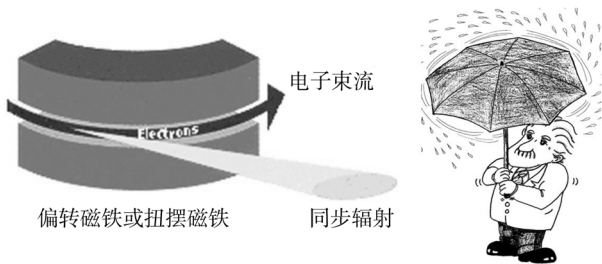


图 8 同步辐射产生原理示意图

同步辐射最初是作为电子同步加速器的有害产品而加以研究的。特别是对撞机需要把粒子加速到很高的能量，而同步辐射的功率偏偏与能量的四次方成正比。特别是对于电子，容易加速到相对论性，同步辐射就成了限制环形电子对撞机能量提高的主要因素。例如 BEPCII 在 1.89GeV 时，正负电子束流每走一圈就因同步辐射而损失 110 千瓦的功率，这给高频系统带来很大的负担。

聪明的读者会想到：在同步辐射有这么大的功率，要是能把它用起来该有多好呀！的确，同步辐射具有高通量、高亮度、连续谱、偏振光、准直性、相干束以及洁净的真空环境和时间结构可调节等优点，现在已经成为一种有着广泛应用的高性能光，在物理学、化学、生物学、医学、地质学、材料科学、微电子和微加工等等领域有着广泛应用。

可是，在 BEPCII 中要实现高能物理和同步辐射一机两用可不是一件容易的事情。首先，同步辐射的光束线都安排在环外的切线方向，而电子束在 BEPCII 的东半外环和西半内环顺时针运动，也就是说，电子束在西半环发出的同步光被外环挡住而引不出来。此外，对撞机与同步辐射光源对束流的要求不同，如果在对撞的时候加上扭摆磁铁，又可能会影响对撞亮度。

针对第一个问题，科研人员创造性地采用“内外

桥”联接两个正负电子外半环形成同步辐射环的方案，也就是在北面的正负电子交叉区用一段真空盒作为“外桥”把两个外半环联接起来（见图 9），而在南交叉区，也就是对撞区，没法加这样的“外桥”，就在超导插入磁铁里，专门加了一对偏转线圈，电子束从东外环进来时，东面的超导线圈把它向内偏一个角度，到达西面的超导线圈时又把它向外偏一个角度，从而实现了电子束在外环的同步辐射专用运行，并保持原来的光束线位置基本不变。

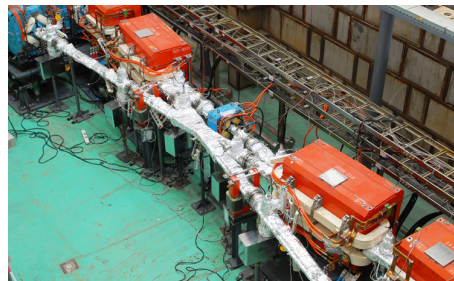


图 9 北交叉区的“外桥”联接两个外半环

针对第二个问题，我们采用扭摆磁铁附近的聚焦磁铁对其边缘场效应进行局部补偿，并对束流轨道作仔细的校正，经过反复调试，实现了偏转磁铁和多台扭摆磁铁的兼用运行，在高能物理实验取数的同时，北京同步辐射装置的实验站上也可以开展各种研究。

现在 BEPCII 上已经装备了 4 台插入元件、14 条光线和相应的实验站（见图 10），开展生物大分子蛋白质晶体学、漫散射、XAFS、小角散射、LIGA、光刻、软 X 射线、X 射线成像与形貌、荧光分析、高压衍射、真空紫外、衍射和光电子能谱等方面的研究，涉及凝聚态物理、生命科学、化学化工、材料科学、医学、资源和环境、国防建设等诸多领域，取得一批高水平的研究成果。

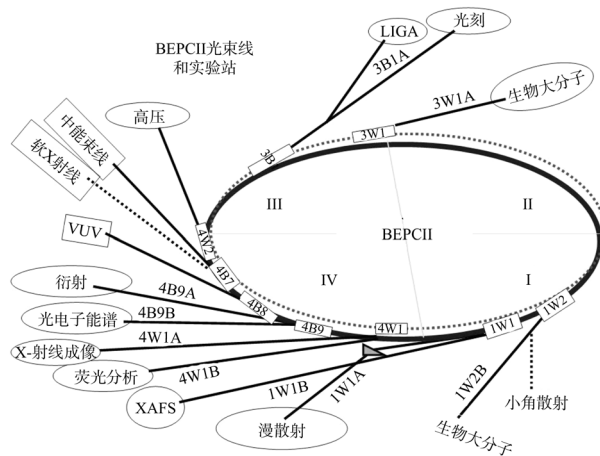


图 10 BEPCII 的光束线和实验站

北京谱仪 (BESIII) 的建造和调试

李卫国

北京谱仪 (BESIII) 探测器是 BEPCII 重大改造的重要部分, 是全新设计建造的高性能探测器, 用来记录和分析对撞的物理事例。至 2008 年 7 月 19 日观察到第一个对撞事例, BESIII 按照初步设计, 完成了建设任务, 其总体结构如图 1。

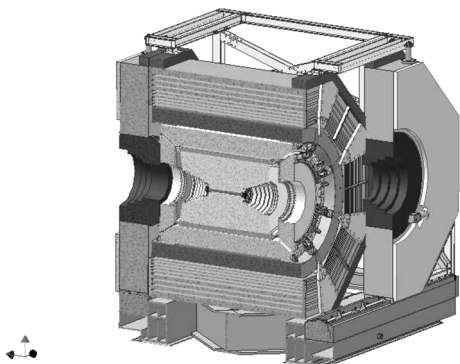


图 1 北京谱仪 III 总体结构图

由内到外, 主要的探测器有: 1. 单丝分辨率好于 $130\mu\text{m}$ 的 He 基气体漂移室; 2. 能量分辨率好于 $2.5\% @ 1\text{GeV}$ 的 CsI 量能器; 3. 时间分辨率好于 100ps 的飞行时间系统; 4. 场强为 1.0Tesla 的超导螺线管磁铁; 5. 基于 RPC 的 μ 子室系统。

在建设中, 完成了谱仪总体的机械系统, 包括了谱仪的支撑和轭铁、铍束流管等; 主漂移室 (MDC) 和电子学读出系统; 飞行时间计数器 (TOF) 和电子学读出系统; CsI 晶体电磁量能器 (EMC) 和电子学读出系统; 超导磁铁系统; 基于 RPC 的 μ 子室和电子学读出系统; 事例触发判选系统; 在线数据获取系统; 谱仪慢控制系统; 离线数据分析系统等。

在完成了初步设计后, 谱仪总体和各系统在研制和生产过程中进一步完善了设计并完成了工程设

计。主要的机械结构和部件通过招投标确定了制造单位; 各主要探测器和 MDC、EMC 电子学读出、事例触发判选、在线数据获取、谱仪慢控制、离线数据分析等系统由高能所承担研制、测试和安装任务; 中国科学技术大学完成了 TOF 和 μ 子室的电子学读出系统的研制、测试和安装; 超导磁铁系统通过高能所和美国 WANG NMR 公司合作完成工程设计, 在高能所绕制超导线圈、完成组装和调试。

在研制过程中, 各探测器和电子学系统经过了样机研制、小系统的宇宙线和束流实验, 通过了技术鉴定再进入批量生产, 保证了质量。事例触发判选、在线数据获取和各主要探测器分别进行了联合调试, 解决了存在的问题, 使探测器的总体调试能够顺利完成。谱仪总装完成后进行了宇宙线调试, 然后和加速器进行了近一年的联合调试和数据获取, 北京谱仪性能达到了设计的要求。

下面介绍各子系统的设计、研制、调试和测试结果。

一、漂移室系统

漂移室是最内层的子探测器, 用来测量末态带电粒子的径迹、动量, 同时还通过测量能量损失 (dE/dx) 鉴别带电粒子。漂移室要有大的立体覆盖角, 好的空间分辨, 高的动量分辨, 较好的 dE/dx 分辨, 要对低动量径迹有高的重建效率。要能适应高亮度高计数率的工作环境。

BESIII 漂移室采用具有台阶结构的端面设计, 使用 He/C₃H₈(60/40) 作为工作气体以减小多次散射提高动量分辨, 同时采用小单元结构设计 (内室部分采用半宽约 6mm 的类正方单元, 台阶及外室部分采用半宽约 8.1mm 的类正方单元)。漂移室共有 6796 根信号丝及信号读出道。

此外, 在为储存环提供注入束流的间隔里, 直线加速器还为中能物理实验厅和慢正电子提供电子束流, 进行多项科学实验研究。

BEPC II 投入运行后, 将加紧开展高能物理和同步

辐射实验研究, 不断提高对撞亮度等性能, 发挥对社会开放的大科学装置平台作用, 成为国际领先的高效率生产粲粒子的工厂, 国际一流水平的科研成果。

(中科院高能物理研究所 100049)