

从BESI到BESII的艰难历程

李 金

(中国科学院高能物理研究所 100049)

北京谱仪BES是我国正负电子对撞机BEPC上唯一的大型通用多粒子实验探测器,它不仅是高能物理所唯一的高能粒子物理实验装置,几十年来也是国际上唯一活跃在 τ -粲物理的大型实验装置。从1989年开始实验运行到今年成功运行了32年,获取了该领域最大的实验样本,获得了多项重要科学成果,并多次获得国家自然科学奖励,表明BES已经在国际高能物理占有重要的一席之地。在纪念高能所建所50年的时候,愿和大家共同回顾从BES升级到BESII的忙碌而又艰难的历程,也是我在高能所近四十多年中最难以忘怀的一段历程。

北京谱仪的发展历程大致可分为三大阶段。第一阶段为BES,从1989—1993年。第二阶段为BESII,从1993—2003年。第三阶段BESIII,从2004年~至今。

由BES升级到BESII是国家和科学院的重大项目,投入经费约1000万人民币。也是美方参加的重大国际合作项目,美国卡罗拉多等五所大学负责部分子项目升级改造工作,并投入40万美元(当时折合人民币350万)。中美双方共200多名科研人员参加。

北京谱仪由多个子探测器系统构成:分别为中心室CDC,主漂移室MDC,飞行时间计数器TOF,簇射计数器SC, μ 子探测器。亮度监视器及其相关的电子学和读出系统及辅助系统等。升级改造从1993年下半年开始,可分三个阶段:1993—1995年,制订总体升级目标和各项技术措施,各子系统和子探测器的物理和技术设计,加工制造和性能检验。这些工作都是在BES实验运行不停的前提下完成的,也是最忙碌的阶段;1996年完成各子探测器和

子系统的安装,整个谱仪的联调,解决联调中的问题;1997年开始工程试运行,虽然获取的物理事例表明谱仪性能良好,但发现主漂移MDCII定位子有漏电问题,谱仪的噪声有逐渐地增大的奇怪现象。最后采用混合高压的方案解决了这一技术难题。1997年下半年开始正式物理实验运行,实验表明谱仪性能达到了预期目标,BES升级工程圆满完成。经BES合作组全体成员认可,升级后的BES称为BESII。1998年通过了科学院的院级验收鉴定。叶铭汉院士任鉴定组的组长。

历时3年的升级改造工作和BESII实验约7年的成功运行,对高能所和我国的高能物理研究具有重要意义:1.延长了北京谱仪的实验运行寿命,能继续获取更多更新的物理事例,保证了我国能继续在 τ -粲物理领域占有一席之地;2.国际合作方面,BES升级工程吸引了美国方面的技术和经费,将中美合作提升到一个新的水平;3.实验技术方面,采用了许多新的探测技术和电子学技术,这些创新技术不仅确保了BESII良好的性能,也大大提升了我国辐射探测技术和实验水平。

一、升级工程的动机和三大目标

BES从1989年成功地运行到1993年,不仅在 τ -粲物理领域获取近900万 J/ψ 事例及其他物理事例,成功完成了 τ 轻子质量的精确测量等,取得了多个世界一流水平的物理成果。BES在短短的几年里就走上国际高能物理的大舞台,并取得了一席之地。然而和所有探测器谱仪一样,多年在辐射环境下的运行,BES的性能明显地下降,出现了辐照损伤和寿命问题。解决谱仪老化问题,适应BEPC亮

度的提升,同时实现探测器性能的提高等三大课题摆在我们面前。为获取更多更好的实验数据,为让我国的高能物理继续在这一领域保持领先水平,在高能所领导的领导下我们从1993年开始了BESI到BESII的升级工程。物理一室和电子学六室全体人员参加了该项工作。加速器中心室、计算中心,甚至理论室也参加了少量工作。我是高能所原物理一室主任,又被任命为全面负责该工程的总师,白景芝为副总师。

BES升级的总体目标设定为三个:1.提高BES谱仪的性能,特别是提高粒子的分辨和能量分辨;2.提高物理数据获取的速率,至少提高一倍,记录每个事例的时间从20毫秒降低到10毫秒;3.采取多项减少本底的措施,以适应BEPC亮度提高后的新环境。

二、BES升级的九项技术措施

为实现上述三大目标,特别是提高探测器性能,从新建、更新、扩建和改造四个方面采取不同的技术措施。主要包括:1.更新中心漂移室CDC。采用美国MARKIII退役的顶点室VC代替CDC。从而提高空间分辨,增强对宇宙线的排斥能力;2.为避免对磁铁和簇射探测器的影响,在总体结构保持不变的前提下设计建造全新的主漂移室MDCII;3.设计建造新的飞行时间探测器TOFII。采用新的闪烁体,耐磁场的光电倍增管和短的光导,在不改变原电子学的前提下提高时间分辨;4.由于MDCII结构由原来MDCI的上下对称改为四象限对称,中心室12层的VC代替了4层结构的CDC,为适应这些变化,设计改造了触发判选系统;5.由于BEPC亮度提升的需求,改变了谱仪两端四极Q铁的位置,为适应磁场强度和位置的变化,设计建造了新的小型亮度监测器;6.为匹配MDCII和VC探测器的读出,特别是为同时适应CAMAC,FASTBAS及VME三种性质不同系统,研发和改进了多种电子学插件。同时将原来的串行读出改为并行读出,加快了在线数据获取速度;7.改造簇射探测器正戊烷冷凝系统和

配气系统,修复了断丝等,簇射计数器的能量分辨率有了明显的改善;8.采用UNIX操作系统的快速HP工作站代替原来的VAX机,由小型盒式磁带代替原磁带机并采用光纤将数据直接传输到计算中心,从而加快数据读出和记录的速度;9.为适应探测器、电子学、读出系统的变化,更新了软件环境,编写了数据刻度程序,事例重建程序以及Monte Carlo程序等。建立了完全不同于BES的软件系统的BESII软件。

不难看出,BES升级改造(见图1)有两个特点。一是工作量非常大:新建4个主要探测器,改建电子学和整个触发系统,更新计算机和数据记录系统,重新编制相应系统的软件等,除了磁铁和 μ 子探测器外几乎是脱胎换骨的变化。另一个特点是非常紧张忙碌,因为这项工作都是在保证BES正常维护运行、数据分析和物理研究不停的情况下完成的。

三、升级中的三大难题

在各个子探测器的设计、制造与调试中,特别是谱仪总体工程试运行中都遇到不少难题。

首先是因升级与运行之间的工作冲突带来的难题。当时除总体设计外,各子探测器和子系统的升级改造任务都分配到各负责谱仪软硬件维护运行小组的每一个人的头上,大家都必须在保证谱仪正常运行的前提下完成升级任务,在没有周末,没有节假日,没有额外奖励的谱仪运行中,靠挤时间,靠加班加点和靠巧妙安排来解决工作中的矛盾。最后都得到了比较好的解决方案。各子系统的性能,工作进度等都达到了计划指标要求,有的还提前实现预期目标。此外,在完成运行和升级两大任务的同时,还参加了“ τ -粲工厂可行性研究”的探索工作,完成了其中的探测器概念设计和物理目标的预先研究。那几年里三大项工作并行推进,可以说,那是老物理一室最最忙碌又最最紧张的几年。我既负责谱仪运行又主持BES升级工程感受最深。那时,甚至找不出时间来准备我在“1995年国



图1 探测器安装中的BESII

际轻子光子大会”上要做的报告。记得大会报告做完,在从国际饭店回高能所的大巴车里我就累得晕倒了。

从1995年底安装后开始总体联调时,我最担心的是MDCII的断丝问题,当时想,只要不断丝就不应该有大问题了。可是,担心的问题没有发生,却又出现了没有想到的两大技术难题。

主漂移室MDCII从1995年11月开始安装,1996年4~5月安装完毕并进行一个月的束流测试。试验测量表明粒子的径迹正常,MDCII的性能很不错,但噪声水平比较高。实验时必须在高阈值下工作,需要由原来的625提高到1200以上。但是高阈值下的工作会降低MDCII对粒子的探测效率。为解决这一难题,专门成立了研究小组攻关,我任组长。从各个环节寻找噪声的来源和原因。经多方测试和研究分析,最终发现干扰来源是束流对撞的“还原(reset)”信号。这些信号是通过MDCII的2000多根电缆耦合到MDCII的室本体上。我们采取减少电缆长度和数量,改变高压机箱的位置等多项措施后,明显解决了reset的干扰。实验测量表明,reset的干扰已由原来的1200降到了350以下的低噪声水平。这时大家总算松了一口气。

1996年12月开始工程试运行(见图2),获取了

大约150万 J/ψ 事例,整个谱仪运行正常。开始时在低噪声水平下工作,触发计数率也不高;但一月以后发现主漂移室MDCII的噪声逐渐严重起来。这种噪声性质不同于reset干扰噪声,它与高压,温度有关,而与位置无关,也与BEPC状态无关。我和噪声研究小组以及相关人员在开始了日日夜夜的寻找、试验和分析,最终找到了噪声的来源。原来是美方负责制作的定位子有漏电问题,而且有逐渐严重的趋势,其漏电程度还与高压高低和温度有关。真没想到,经过了一周的高压考验没有任何问题的定位子竟然在一个月之后发生这种现象。于是将定位子送到美国对其做红外光谱分析和电性能测试,又做了电子显微分析,发现是定位子绝缘材料结晶不完全所致。美国杜邦(Dupone)公司的分析报告认为,产生滞后漏电效应的最根本原因是定位子材料注塑过程中的温度太低,结晶不完善。这是过去从未被人们认识或经历过的问题。上万个已经固定在MDCII定位子是无法更换的,这可是大问题了,让我几天几夜都睡不好觉。MDCII不能工作,整个谱仪就不能工作,BEPC就得停机了。不过我们没有气馁,没有退缩,没有被难题吓到。经过大家共同研究,提出了“混合高压方案”(或称正负2000伏方案)解决这一技术难题。并为该方案做了



图2 调试中的北京谱仪 BESII

详尽的可行性试验研究。采取这一方案将加在定位子上的高压由 4000 伏降到 2000 伏。为此,我们又研究了 2000 伏下定位子的漏电流大小,漏电流与温度的关系,漏电流随时间的变化,2000 伏下信号的大小,耦合电容对信号的影响等五大关键课题。所有这些试验表明,混合高压的方案是可行的,其噪声水平与 MDCI 相近,能够满足物理的要求。最后采用了这一方案。这一个难关被我们闯过来了。

MDCII 于 1997 年冬季开始物理运行,在取得刻度数据后做了正式的 R 值测量。依据刻度的数据得到的探测器性能和物理结果表明,BESII 达到了原设计目标,满足物理实验的要求。

这段时间,我们是顶着各种压力过来的。除技术上压力外,在我们发现和寻找噪声来源的过程中,各种风言风语都有,有抱怨,有责怪,有说风凉话甚至有谩骂。那段时间,头一天发生的事情,第二天院领导就知道了……对我们采用“混合高压方案”也有人持怀疑态度,甚至认为是不正规的临时办法。为此,美方同意出资再建一新的 MDC 做备用。老物理一室和六室的同志们,一心想着解决问题,一心想着完成升级任务,和美方同事不分你我,不分昼夜共同努力,在短短的三个月里解决了从未遇到过的技术难题。

MDCII 多年的正常运行表明,噪声问题解决得很彻底,备用的新 MDC 至今没有使用。在我的

建议和帮助下,将全新的它搬到清华大学做了教学展品。

四、BESII 的四项重大科研成果

BESII 与升级前的 BES 相比性能有很大的提高,除粒子的动量分辨、位置分辨、能量分辨有不小改善外,谱仪的时间分辨提高更大,从 375 ps 下降到 180 ps。特别是数据获取速度提高一倍,记录每个事例的时间由 20 毫秒减少到 10 毫秒。相当于对撞机 BEPC 的亮度提到一倍。

BESII 从 1997 年开始试验运行直到 2008 年正式物理实验运行结束,在大约十年的时间里获取了世界上最大的物理事例样本: 5.8×10^7 J/ψ 事例; 1.4×10^7 ψ(2S) 事例; 积分亮度为 33 pb^{-1} 的 ψ(3770) 的事例等。还开展了 2~5 GeV 能量区间 91 个能量点的 R 值测量。

基于 BESII 的这些大样本的数据,开展了 τ-粲物理领域中诸多重要课题的研究,获得了一系列创新物理成果。在 J/ψ 的衰变中深入研究了共振态粒子 $f(980)$, $f(1370)$, $f(1500)$, $f(1710)$ 和 $f(1790)$, 在 J/ψ 的衰变中首次发现了新共振态粒子 X(1860), X(1835); 最清晰地观察并确认了 σ, κ 粒子; 基于 J/ψ 和 ψ(3770) 衰变深入地研究了标量介子 χ_c 和 D 介子的衰变等,开辟了重子激发态的新领域。有大约

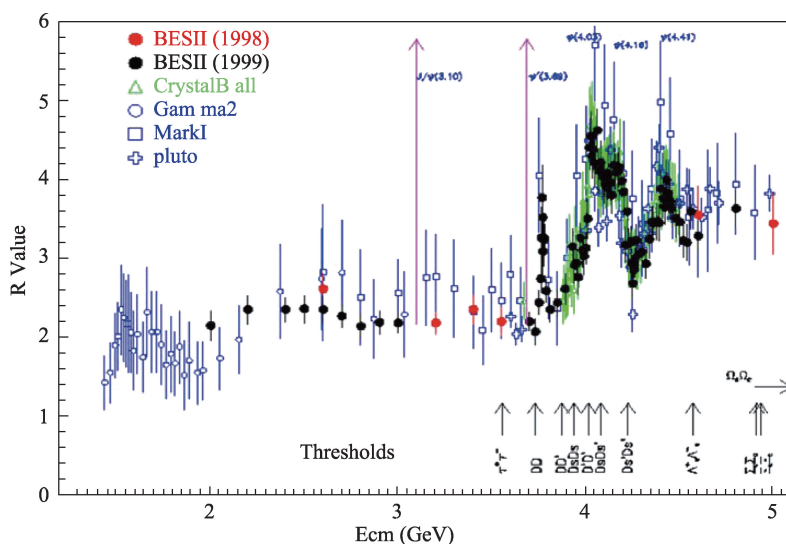


图3 BESII的R值测量结果

250项物理参数被国际物理界认可,并记录到“粒子物理手册”中。有一百三十多篇论文发表在国际一流的刊物上。

最值得讲一讲的成果是BESII上的R值测量(图3)。国际上一些著名实验组(如PLUTO, Mark-I, DASP, Mark-II, DELCO及Crystal-Ball)都曾在2~5GeV能区测量过R值,但只有三个实验组(PLUTO, Mark-I和DASP)正式发表了R值测量结果,其误差很大,约为15%~20%。这些低测量精度所带来的不确定性是对标准模型精确检验或发现新物理的严重障碍。因为标准模型理论计算的辐射修正中色散关系积分需要使用大范围R值作为输入量,所以2~5 GeV的R值高精度测量对精确检验标准模型和探索超出标准模型的“新物理”都具有重大意义,包括对“Higgs粒子质量”,电磁跑动耦合常数 $\alpha_{QED}(s)$ 和 μ 子反常磁矩的三大重要参数的预言和测量。例如,由于BESII的R值测量误差平均下降了6.6%,用BESII的R值对标准模型进行拟合,发现希格斯粒子预言的质量变为 98^{+58}_{-38} GeV,这为后来在大型强子对撞机上最终发现希格斯粒子(质量约为125 GeV)提供了重要指导。

BESII的四项物理成果:“BESII实验R值精确测量”,“BESII矢量-张量末态反常压低”,“ $\psi(3770)$ 态的non-DD衰变”,“质子-反质子阈值增强”分别获得2004年、2001年、2010年、2013年的国家自然

科学奖二等奖,足以说明BES升级的成功和对高能所发展的重要意义了。

五、由衷的感谢和祝福

从高能所1973年建立之日到2011年我70岁离开高能所,有幸在高能所参加了从北京谱仪建设、运行到物理实验的全过程,2004年退休后又又被返聘参加了大亚湾中微子实验探测器建设直到2011年。在高能所和大家共同战斗的38年里的桩桩事件记忆犹新历历在目,难以忘怀。

今天,在纪念高能物理所50周年的日子里,我最想说的话就是“感谢”和“祝福”。感谢高能所让我有机会进入国际高能粒子实验研究领域,参加了AMY, CMS, STAR, KIM, TEXONO等国际合作,感谢高能所让我参加了从BEPC/BES预制研究、工程建设、升级改造和物理实验的全过程,让我有机会为我国的高能物理事业做出应做出的贡献,并获得国家各种的奖励。完全没有想到的是在中华人民共和国成立70周年的时候,获得了由中共中央、国务院、中央军委颁发的纪念章,让我终生难忘。

过去的50年是高能物理所辉煌的50年,我衷心祝福高能物理所继续辉煌!为国家 and 世界高能物理做出更大贡献。