

从北京谱仪到未来CEPC 上的高能实验

李刚 阮曼奇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1989年4月,北京谱仪探测器(BEijing Spectrometer, BES)忠实地记录了北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider, BEPC)的历史性的第一个物理事例,宣告中国高能加速器物理实验的肇端。转眼之间已经整整30年。这30年,中国的经济发展实现了腾飞,同时是科学技术飞速发展的30年,尤其是基础科学取得了长足进步,一些领域已经跻身国际先进行列,一些领域与国际先进水平的差距已大大缩小。以北京谱仪的建设为起点,高能物理实验领域这30多年走过的道路,正是我国科学技术发展历程的一个缩影。

在中国政府的支持下,中国本土的高能物理实验研究实现了飞跃发展,从无到有,在国际高能物理界从占有一席之地发展为 τ -粲物理的领跑者,不仅占据该能区的国际领先地位,还开拓了中微子研究领域并取得举世瞩目的成果,同时在宇宙线实验、暗物质探测、X射线天体物理研究等方面取得长足进步,相应发展起来的加速器、探测器技术及人才队伍大力推动了同步辐射光源、散裂中子源等大型多学科交叉研究平台建设的迅速发展,并成为国家科技创新体系的重要单元。

2012年位于欧洲核子中心(CERN)的ATLAS和CMS同时宣布发现了希格斯玻色子,中国高能物理学家在第一时间提出了建造一个质心系能量达到240 GeV的高能环形正负电子对撞机(CEPC)作为希格斯工厂对这一新发现的充满神秘的粒子进行系统、精确的研究,检验粒子物理标准模型和

寻找新的物理规律和物理现象。

今天,回顾历史,展望未来,对于中国高能加速器物理研究的发展战略,有着弥足珍贵的借鉴意义。本文的第一部分回顾了北京谱仪实验的历史,主要介绍BESIII探测器的设计、建造和物理研究;第二部分则主要介绍CEPC上高能实验的特点和探测器设计、预研究的考虑和进展。

一、BESIII探测器的设计、建造、运行和物理研究

北京谱仪实验的研究范围覆盖了2.0~4.6 GeV能区范围内丰富物理内容,主要有轻子的产生和衰变,轻强子谱研究,粲偶素的跃迁和衰变研究,粲介子的弱衰变研究,量子色动力学(QCD)研究和4 GeV以上伴随大量能量阈而来的丰富物理结构的研究。

大型加速器上的探测器就好像人的眼睛,是用各种粒子探测器的组合,来观察和测量粒子对撞后产生的次级粒子的能量、动量、质量、位置、出射角等各种参数,以重建反应过程,研究基本的物理规律。针对上述的物理研究目标和该能区的末态粒子数比较少的特征,正在运行的BESIII的探测器的设计和建造进行了专门的优化和设计,主要包括带电粒子动量测量、电子和光子的能量测量以及粒子种类鉴别。综合以上,BESIII探测器的设计包含以下部分:

1. 动量测量。BESIII采用单丝分辨好于130微

米的小单元氨基气体漂移室作为径迹探测器。这一选择既考虑到低动量情况下物质量少从而减少多次散射对测量的影响,可以照顾到可以有比较好的位置和能损(dE/dx)分辨率。至于其他选项,比如半导体探测器价格高、物质量多,多次散射会降低低动量径迹的分辨率,时间投影室的分辨比较差,时间扩展室和稻草管探测器则多次散射过高,都不是合适的选择。

2. 能量测量。基于掺铊碘化铯晶体($CsI(Tl)$)的量能器可以实现光子能量分辨率在 1 GeV 时好于 2.5%,考虑到 BESIII 能区的事例率和能区、性能、价格等因素,这是最佳选择。

3. 飞行时间和 dE/dx 测量。BESIII 选择由塑料闪烁探测器构成的飞行时间系统测到的粒子飞行时间和漂移室提供的 dE/dx 测量联合起来作为粒子鉴别系统,成功实现了动量小于 1.1 GeV 的 π 介子和 K 介子之间的鉴别。从性能上来说,切伦科夫探测器更加理想,但环形切伦科夫探测器造价过高,阈值型切伦科夫探测器对于晶体量能器的影响过大,其他类型的也有各种缺点,不一而足。多层阻性板探测器(MRPC)作为飞行时间计数器当时尚不够成熟,需要更多的时间来预研;后来 BESIII 运行数年之后,于 2015 年,端盖的 TOF 被升级为 MRPC,时间分辨从 110 ps 提高到了 70 ps。

4. 阻性板探测器(RPC)。 μ 子的鉴别对于 τ -粲物理研究非常重要, BESIII 采用了阻性板探测器技术,与其他技术相比,其具有明显的性价比优势,且应用范围广,具有良好的发展前景。为了证明 RPC

的可靠性, BESIII 预研团队做了大量的预研工作,解除了大家对 RPC 寿命等方面的担心。

5. 场强为 1.0 Tesla 的超导螺线管磁铁。BESI 和 BESII 都采用了常规磁铁技术,其磁场只有 0.4 Tesla。BESIII 为了实现更高的动量测量精度,采用了磁场更强的超导磁铁。并自行攻关和研制了我国第一台大型超导磁铁线圈,掌握了其中的关键技术,并大大降低了成本。

6. 基于流水线技术的前端电子学系统以适应多束团模式和高数据率的获取系统。由于每次碰撞时间间隔只有 8 ns,目前没有任何技术可以在这么短的时间内完成触发判选任务,因此 BESIII 采用了流水线的办法,将对撞事例的信息缓存在缓冲器(buffer)中,以便随后处理。

前两代探测器谱仪、BESI 和 BESII 是我国高能物理学家借鉴国外经验从无到有的建造自己的高能探测器并成功升级的历史过程, BESIII 探测器则是中国自己独立设计和建造的。一个高能实验探测器的完整的设计、建造和运行过程对于掌握核心技术、积累宝贵经验和培养核心人才对于起了关键作用。

整个 BESIII 探测器总重超过 700 吨,共有两万多个探测器单元,近四万路读出电子学。这是我国高能物理学界约两百多科研人员,以及部分国外的 BESIII 合作组成员,经历 8 年多的持续努力,在国内近百家企业与科研单位的协作帮助下共同完成的,在多个方面代表了我国科研和工业制造的最高水平。

表 1 BESIII 探测器设计指标和 BESII 以及同期国外实验 CLEO_c 的对比

子系统	BESIII	BESII	CLEO_c
主漂移室	$\sigma_{xy} = 130 \mu\text{m}$	$\sigma_{xy} = 250 \mu\text{m}$	$\sigma_{xy} = 100 \mu\text{m}$
	$dP/P = 0.5\% @ 1 \text{ GeV}$	$2.4\% @ 1 \text{ GeV}$	$0.5\% @ 1 \text{ GeV}$
	$\sigma_{dE/dx} = 6\%$	$\sigma_{dE/dx} = 8.5\%$	$\sigma_{dE/dx} = 6\%$
电磁量能器	$\sigma_E/E = 2.5\% @ 1 \text{ GeV}$	$20\% @ 1 \text{ GeV}$	$2.5\% @ 1 \text{ GeV}$
	$\sigma_{xy} = 0.6 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$	$3 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$	
飞行时间计数器	$\sigma_{\tau} = 100 \text{ ps}$ (桶部) $\sigma_{\tau} = 110 \text{ ps}$ (端盖)	$\sigma_{\tau} = 180 \text{ ps}$ (桶部) $\sigma_{\tau} = 350 \text{ ps}$ (端盖)	RICH
μ 子计数器	9层	3层	
磁铁	1.0T	0.4T	1.0T

BEPCCII于2008年实现对撞,全新的BESIII探测器放入BEPCCII南对撞点,在完成BEPCCII和BESIII联调后,并于次年正式开始物理取数。到目前已经积累了100亿 J/ψ 数据用于轻强子谱研究,4.5亿 $\psi(3686)$ 数据用于粲偶素衰变研究, $2.93\text{fb}^{-1}\psi(3773)$ 数据用于粲介子研究,以及在2.0~4.6 GeV能区范围超过 20fb^{-1} 扫描数据用于R&QCD研究、 τ 轻子质量测量和XYZ粒子研究。这些数据是当前世界上该能区统计量最高的优质数据,可以开展丰富的物理课题研究。BESIII实验国际合作组目前也成长为由67个国内外合作研究单位、超过500多科学家的研究团体。BESIII合作组也取得众多重大研究成果,比如 $Z_c(3900)$ 、 $Z_c(4025)$ 的发现和深入研究, Λ_c 粲重子的一系列研究成果, J/ψ 衰变中的 Λ 极化测量等等。每年BESIII发表的文章约30篇以上,同时每年还有约70个国际会议的特邀报告,并且随时间呈上升趋势。

二、CEPC基线探测器(CBD)设计

Higgs场是标准模型的核心,它和目前标准模型中一系列关键问题和未解之谜息息相关。这些问题包括了自然性问题(为何电弱能标远远小于Planck能标),CP破坏,中微子质量,暗物质和暗能量等等。Higgs粒子的发现为研究这些问题提供了全新、直接的手段,在这样的时代背景下,中国高能物理学界倡议建设一个高精度的Higgs工厂CEPC。

较于BEPCC,CEPC在实验条件方面:其对撞质心能量提高了约两个量级、对撞亮度在不同质心能量提高30到300倍不等;在物理研究方面,CEPC主要关注Higgs的精确测量和新物理寻找,同时可以兼顾标准模型的精确检验和BES实验的延续丰富的物理研究课题。对于探测器而言,这意味着物理事例重建和探测器性能需求也会发生显著变化。其中,除了事例率显著提高外,最关键、最明显的变化有两个:

1. 末态粒子数的增加及其能量的提高

BES上一个典型的物理事例往往包括了数条径迹和数个光子。在CEPC上,随着质心的提高,末态粒子数目及能量都有了显著提高。相对于BES实验,CEPC上一个典型事例的末态粒子数目提高了一个量级。与此同时,在CEPC上存在着大量的高能末态粒子,其最高能量趋近于束流能量。这意味着CEPC探测器的能量量程需要大幅提升。

2. 喷注的大量存在

由于自然界中存在色禁闭,夸克和胶子无法单独稳定存在。在对撞机实验中产生的高能夸克或者胶子会碎裂(强子化)成大量强子,这些强子及其可能的衰变末态的总体被称为喷注。在CEPC上,2-费米子末态有70%的事例会产生喷注,4-费米子末态则有约90%的事例中会产生喷注,而未态产生喷注的Higgs事例比例则高达97%。无疑,喷注的精确测量和重建对CEPC的物理测量至关重要,是CEPC探测器的核心要求之一。

CEPC上一个典型喷注大致包括了十几个带电粒子(绝大部分是带电 π 介子)、十几个光子,以及可能产生中性强子和中微子(体现为丢失能动量)。图1显示了CEPC上一个代表性的4-喷注Higgs事例。

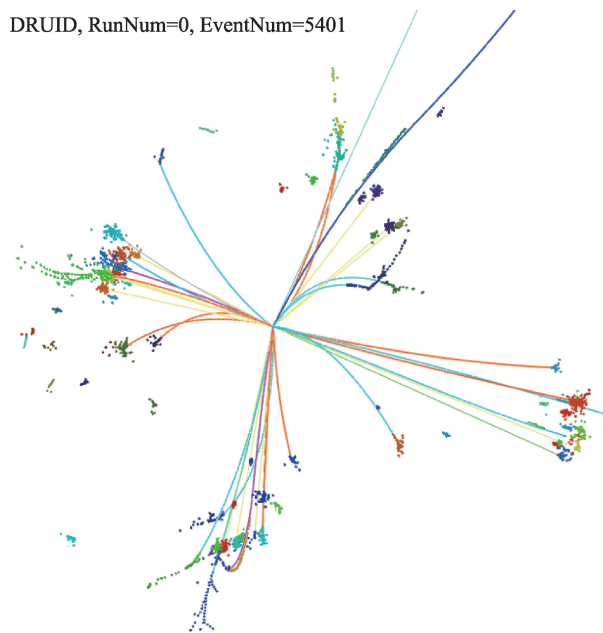


图1 $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow qqbb$ 事例

为了满足 CEPC 的物理需求,CEPC 工作组参考国际前沿研究进展、设计了 CEPC 基线探测器(CBD)。对比于 BESIII 探测器,CEPC 概念探测器要大得多:其总重量相当于 BESIII 探测器的 10 倍以上。与此同时,其子探测器精确度、接受度等关键指标,也得到了显著提升。

为了能准确测量高能带电粒子的四动量,CBD 装备了大体积、高精度、低质量的径迹系统。为了能准确测量高能粒子、特别是高能中性强子(如中子和 K_{long})的能量,CBD 的量能器系统的总厚度超过 1 米。同时,CEPC 概念探测器装备了大体积、高强度的主螺线管磁体。相对于 BESIII 探测器,CEPC 概念探测器磁体的有效体积提高了一个量级,磁场强度提高了 3 倍,储存的磁场能量提高了两个量级。

理想的物理事例重建需要准确识别、并重建出物理事例中所有的末态粒子。这一物理需求在 BESIII 和 CBD 中是高度一致的,但是由于末态粒子数目的不同,这一需求在两个实验上实现的方式是不一样的。在 BESIII 上,由于末态粒子数目一般小于 10 个,因此所有的末态粒子间的角度一般足够大,换言之,末态粒子基本上自然地分开了;而在 CBD 上,由于末态粒子数目的显著提升、以及大量喷注、特别是 π^0 衰变出的光子的存在,其末态粒子间的角度可以非常小。量化分析表明,为满足 CEPC 物理需求,CEPC 探测器需要能够分开角度在千分之五弧度的两个末态粒子。为了达到这一需求,在采用大尺度的径迹系统和较高的主螺线管磁场之外,CBD 采用了高颗粒度的量能器系统设计,这一设计依赖于先进的电子学芯片技术,其读出电子学道数相对于 BESIII 实验提高了 3 个量级。这一设计可以有效区分物理事例中的末态粒子。

CBD 拥有优异的物理性能,以轻子重建为例,CBD 的轻子重建效率可以趋近 99.5%,同时强子误判率被控制在 1% 水平,较之上代的 ALEPH 实验压低了三倍;在喷注能量重建方面,CBD 的喷注能

量重建精度相对于 LEP 和 LHC 实验提高了 3~5 倍。CBD 可以准确重建所有的物理标的物和标准模型 Higgs 粒子信号。CBD 的性能分析表明,CEPC 工作组有能力根据 CEPC 的对撞环境、设计出可满足 CEPC 物理需求的探测器。同时,CBD 的研究,为 CEPC 上物理潜力的具体分析提供了坚实的基础。

CBD 的技术挑战及其关键技术研究

围绕 CEPC 可能采用的探测器技术,CEPC 工作组进行了大量的关键技术预研,取得了一系列进展。

1. 硅像素顶点探测器。CEPC 上为了重建 τ 轻子和鉴别 b-喷注、c-喷注和其他类型的喷注,对顶点探测器的 impact parameter 测量精度提出了超高的要求——好于 5 微米;同时精确测量带电粒子则要求探测器带来的物质尽可能少,从而减少多次散射的影响。能满足如此高的精度的技术只有采用硅像素探测器技术,而物质的要求则要求探测器灵敏层、读出电路、冷却系统和机械支撑则尽可能的轻薄。目前中国还没有完全掌握相关技术,针对这一需求,科技部重点研发计划分别于 2016 和 2018 年支持多个研究所和高校联合起来进行攻关,有望在 2023 年前制作出第一个在精度、物质、功耗等各方面能满足 CEPC 实验需求的硅像素探测器样机。

2. 时间投影室。国内的探测器专家已经成功地建造了时间投影室样机,经过束流测试,掌握了关键技术。而 CEPC 对于时间投影室的特殊要求则来自于高事例率——在 Z 玻色子能区的物理事例率能达到数十千赫兹,考虑到本底的要求,则需要探测器能承受近一百千赫兹的事例率。在这种情况下,阳离子回流效应对于探测器电场的影响必须考虑。CEPC 已经针对这一可能在探测器设计和物理上做了针对性的考虑,就降低阳离子回流效应的压低提出了若干实验方法,预期可以有效控制其影响,满足实验的要求。

3. 量能器系统。作为CEPC精确测量喷注的需要,高粒度量能器系统作为一种重要选项被包含在CBD设计之中,其读出道数最高接近一亿。超高的像素给物理事例提供一种完全追踪式的测量(粒子流设计概念)提供了可能,但是也带来了探测器技术方面的挑战。

其他放面的技术设计预研仍在逐渐深入的开展当中,未来可能还会发现或者碰到技术问题,但还未发现不可克服的技术困难。上述进展表明,CEPC工作组已经掌握了CBD建造的一系列关键技术。在进一步的研发推动下,CEPC工作组可为CEPC实验建造关键的探测器系统,并取得物理结果。

三、总结

北京谱仪(BES, BESII, BESIII)这样的大型高能物理实验,不仅仅是单纯的研究项目。从实验探测器、电子学、在线取数系统的设计、建造,到顺利运行,在实验中实现乃至超过探测器系统的设计指标,再到数据分析和成果发表,再包含其中的硬件和软件升级,这些是一个复杂的系统的工程。也即是说,这样的大工程的成功,不仅仅体现在各种硬性成果上,而且还体现在成功管理和协调这样一个国际性大型科研团体的经验积累和这一合作过程中培养和成长起来的大量、多方面的人才。

据统计,仅BESIII实验方面每年毕业的博士约30人,其中约一半进入科研院所成为博士后或者教师,其中不乏在海外高校取得位置的。另一方面,BESIII还为中国的高能物理发展输送了人才:比如大亚湾实验、LHC上的实验、CEPC和Supper τ -Charm预研究、BELLE(BELLE-II)、锦屏深地实验和天体、宇宙线方面多个项目都有BESIII培养的人才。

我国成功地建造和运行三代BES实验,其中BESIII还是我们独立设计、建造的,它产生了一大批优秀的物理成果,培养了一大批高能物理优秀人才,这些也令中国高能物理的未来发展有了足够的底气,实现跨越式发展。近年来中国高能物理学家

提出了三个未来高能物理研究计划:其中CEPC的第一阶段就是一个能量和亮度更高的正负电子对撞机,其能量范围覆盖90~240 GeV,亮度是BEPChII的30倍以上;Z玻色子工厂则是一个亮度优化于91GeV的专用正负电子对撞机,超级 τ -粲工厂则是一个直接基于BESIII但是超越BESIII的计划。所有这些未来项目的提出,很大程度上都受益于BES-III实验积累的物理经验和全面、优秀的人才队伍。中国高能物理学界于2017年的中国物理学会高能分会第九届常务委员会第四次扩大会议上就未来发展战略达成一致意见。CEPC是我国未来高能加速器物理发展的首选项目。我国高能物理学界应该以CEPC作为发展战略目标,积极争取成为中国发起的国际大科学工程之一。高能物理学界将同心协力,分工合作,全力以赴,推动我国高能物理的持续发展。

过去30多年中国的高能物理和中国一样,都经历了翻天覆地的发展和变化。基于加速器高能物理实验经历了从无到有,从幼苗到发展壮大,并成为国际高能物理实验领域的一个重要参与国家,是值得自豪的。时代赋予我们这样的机会和能力,使中国高能物理界在BES系列实验的基础上有能力进一步去探索粒子物理的前沿核心,并为人类文明作出自己的贡献。BES、II、III系列实验的成功,包括核心技术、管理经验和人才队伍,尤其是人才队伍对其他高能领域,比如高能天体、地下暗物质探测实验、反应堆中微子实验产生了深远乃至决定性的积极影响。未来的CEPC实验,规模远大于BES实验,物理研究领域更深入、更宽广,其所必须的加速器、探测器和数据处理方面的关键技术比BES涉及范围更多、更广,可以想见随着CEPC的成功实现,不仅对中国的高能物理发展会产生巨大的推动作用,其技术迁移对工业界也将自然产生广泛、深远的影响。

本文作者在写作期间与娄辛丑及其他同事讨论,得到很多非常有益的启发和建议,在此一并表示感谢。