

秋日小记:我的ABC*

阮曼奇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2018年初秋,天气渐凉。

环形正负电子对撞机(CEPC)探测器概念设计报告基本成稿,并于9月初进行了国际评审。这是CEPC预研工作的重要里程碑。我们的工作、特别是其中原创性的Arbor算法以及探测器性能分析,得到了国际专家的高度评价。Arbor算法是CEPC物理事例重建的核心,它抓住粒子簇射的树状结构,统一、整体、高效地将探测器记录到的信息诠释成末态可见粒子。某种程度上,它决定了CEPC探测器的智能高低,是确保其物理性能的关键。

评审结束后,我踏上前往上海高粒度量能器(CALICE)工作会议的高铁。窗外风景变换,我的思绪渐渐飘远。

1999年,我考入清华大学生物医学工程专业。2年后,我发现自己的个性更适合做基础研究。借保研的机会,我转入粒子物理方向。导师高原宁教授为了让我对高能物理实验多一些感性认识(用他的话来说“免得将来后悔”),特意为我联系到了高能所的实习机会,参加2002年北京谱仪的夏季维修。我

的主要工作是对谱仪主漂移室的高压电源系统进行维护。

维护工作是枯燥的。我们需要把几十公斤重的电源系统从支架上拆下来、清洁之后、一道一道地进行高压扫描,确定每一道都能正常工作后,再将它安装回去。北京正负电子对撞机安静地俯卧在隔壁的环道中,仿佛沉眠着的猛兽。成千上万吨的金属和电缆,能点亮整个小镇的电能,以及数以百计的专业人才,被高效地组织起来,对物质世界的极微结构进行精确的探索。这种决心和张力令我惊叹、沉迷;粒子物理理论模型的简洁优美则让我震撼不已。也许在那个时候,我和对撞机、和高能所的连接,就已种下了种子。

从博士阶段开始,我的职业生涯围绕着希格斯粒子和正负电子希格斯工厂展开。希格斯粒子是目前粒子物理标准模型中最基本、最神秘的粒子,它和粒子物理世界中的种种未解之谜紧密相关。2012年,欧洲核子中心的大型强子对撞机发现了希格斯粒子,这一伟大发现不仅证实了标准模型的全部粒

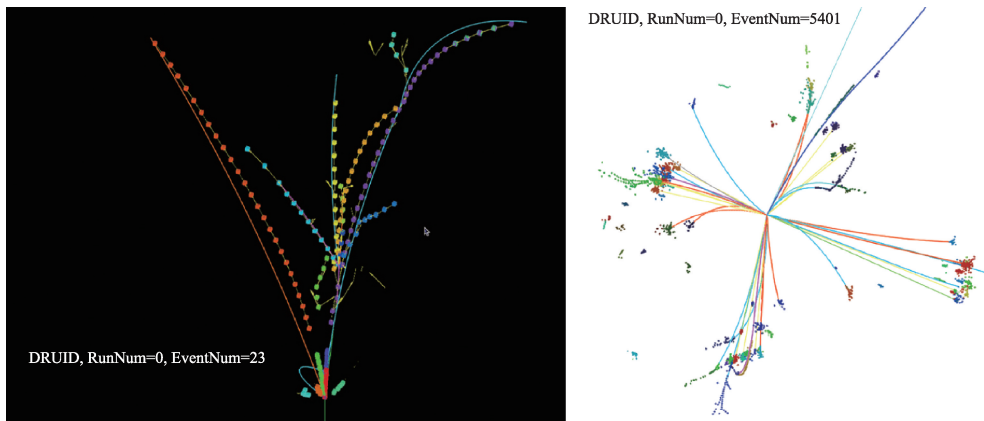


图1 左图,Arbor算法的重建事例。右图,以Arbor算法重建的、CEPC上的4喷注希格斯粒子事例

* ABC=Arbor、BES和CEPC

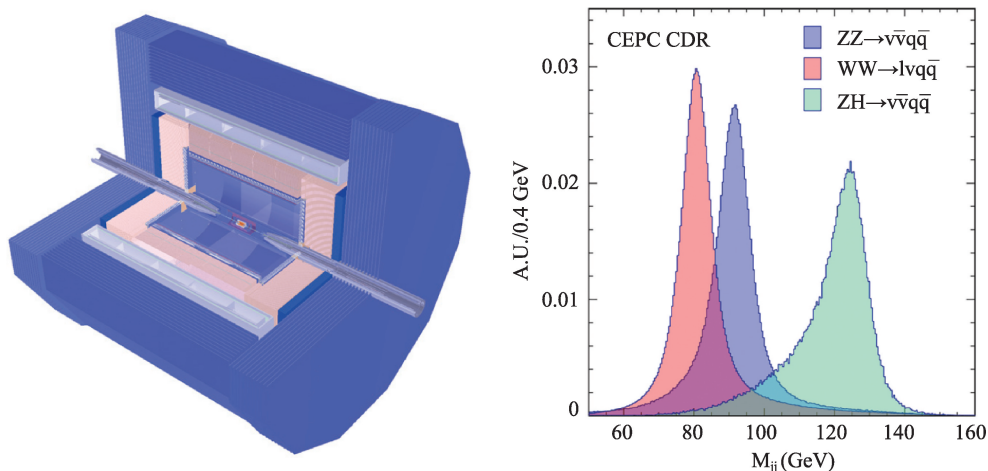


图2 CEPC概念探测器几何,及其关键性的喷注重建性能演示:W玻色子、Z玻色子以及希格斯粒子在喷注末态物理事例中的分离

子谱,也为粒子物理进一步的探索提供了全新的、强有力的探针。正负电子对撞机拥有极高的信噪比和精确可知的对撞初态,可在极高的精度下对希格斯粒子性质进行测量,其预期精度可大大超过高亮度强子对撞机(HL-LHC)的极限精度。因此,高能物理学界积极探索建设基于正负电子对撞机的希格斯粒子工厂,其中包括了直线对撞机和环形对撞机。直线对撞机有基于超导高频加速技术的国际直线对撞机(ILC)和基于双束流加速技术的紧致对撞机(CLIC);而环形对撞机则包括了我国高能物理学界倡议的环形正负电子对撞机(CEPC),以及欧洲核子中心倡议的未来环形对撞机(FCC)。

2008年,作为中法联合培养博士生,我在清华大学和巴黎十一大完成了我的博士论文。其后,我在巴黎综合理工学校进行了为期六年的博士后研究。2013年,我返回中科院高能物理研究所,负责进行CEPC探测器的模拟工作。2014年初,我接受欧洲核子中心的邀请,以Fellow形式,对粒子流算法进行合作深入研究,同时参与CEPC预备概念设计报告研究工作。2015年回国,全时进行CEPC探测器模拟工作。

在欧洲的生活是我科研和生活中非常重要的经历。法国生活压力较小,工作节奏较慢。这种环境有时会导致科研工作进展较慢。另一方面,慢节奏对科研的深入却是不无裨益的:人们可以长时间地调研、专心致志地思索科学问题,有利于对物理

图像整体性的、深入的理解;也有利于优雅深刻地解决问题。我曾经拿出数月的时间、进行分析的微调;在进行Arbor重建算法的架构构建之时,我干脆休了个假,回到家乡,在整整一个月的时间内,除了吃饭睡觉,就是跑步、构思程序、调试代码。法国科研队伍中年轻人相对较少;年长的学者们往往对物理问题有着深刻的了解,他们几乎无穷无尽的耐心也使得年轻人有机会得到很好的关心指导。我很快喜欢上了咖啡厅,享受这种放松的讨论的氛围。伴随着咖啡的香味和巧克力的甘甜,物理的模型和核心的机理一点点在头脑中拼接,构建出完整的物理图像;工作的重点和着力点,也随之一点点明确。

欧洲核子中心是另一种氛围。它是一个巨大的蜂巢,集结着高能物理前沿的精锐。这里有各方面的一流专家;有各式各样的学术活动;有蜂群般忙碌的人群;有配备齐全的、大小不等的实验室。CERN的节奏是非常快的,人们为了明确的科研目标,专业化地将大块的任务分解拆分,通过高效的管理和日常的交流例会,有力推动着各项研究。在这种环境下,较为成熟的科研人员可以做到如鱼得水:无论硬件、软件的支持还是合作对象,在这里总能找到合适的伙伴和一流的资源,有利于科研工作的深入展开;欧核中心内部也拥有一种积极的竞争氛围,有利于青年人才的脱颖而出。在这里,我结识了一大批年轻的充满朝气的科研人员,结识了一大批对正负电子希格斯工厂项目充满热

情的国内外专家。就我个人而言,我在法国较为完整地构建了自己在正负电子希格斯工厂的知识体系;在CERN的经历,则让我适应了大规模科研工作的组织,同时通过合作有效推动了科研工作。

由于希格斯粒子的质量仅有125 GeV,环形正负电子对撞机可以有效产生希格斯粒子。2013年初,我接到中科院高能物理研究所金山老师的电话,告诉我中国高能物理学界在积极探索建造CEPC的可能性,这让我兴奋不已。CEPC的建设,意味着中国能成为高能物理这一领域的世界领袖,将在接近半个世纪的时间长度内主导这一领域的发展。其科学产出,技术辐射,教科文活动,将产生极为积极、极为深远的影响。我在高能所加入了CEPC团队,具体工作包括了CEPC探测器的设计、优化,模拟软件工具的开发,物理潜力的模拟分析,以及团队建设。

整个中国的高能物理学界也在为了CEPC而兴奋。除了高能所,全国各大高校也积极投入了CEPC的预备研究工作,同时国际高能物理学界也对CEPC项目表现出极大的兴趣和高度支持。另一方面,中国高能物理学界在CEPC项目所需的技术和人才队伍方面,还非常薄弱。相对于北京正负电子对撞机(BEPC),CEPC的质心能量提高了两个量级,其几何尺寸提高了近三个量级,亮度将提高1-2个量级,其物理目标、对撞机设计、探测器需求都发生了巨大变化,处处都是挑战。从B到C,需要我们付出巨大的努力。

在CEPC模拟工作中,我在ILC上的经验派上了用场。针对正负电子希格斯工厂的探测器设计和软件工具,ILC合作组经过多年研究给出了一整套方案,并就其关键技术进行了大量的预研,进行了大量的原型机建造、验证以及测试。ILC的研究为CEPC相关研究提供了绝佳的出发点。另一方面,ILC和CEPC的对撞环境、束流结构、质心能量显著不同,其物理目标也并不完全一致。这意味着我们的设计不能原样照搬ILC的设计。我们需要重新审视所有子探测技术方案能否使用于CEPC环境;需要

根据CEPC物理需求,重新优化探测器设计和参数。

经过5年的努力,我们完成了CEPC的探测器基线探测器设计和基线软件工具,并就CEPC的物理潜力进行了深入分析。从ILC软件框架出发,我们使用原创性的Arbor算法完成了CEPC的粒子流重建工具,并在此基础上开发了大量的软件工具,完成了CEPC的基准软件工具,目前软件工具中自主开发的模块接近3/4。我们就CEPC探测器上时间投影室的适用性问题、量能器系统的优化及冷却问题、主线圈磁场选择、对撞机-探测器界面设计(MDI)等关键问题进行了深入研究,给出了结论;并在此基础上完成了CEPC的基线探测器。在希格斯粒子性质测量方面,CEPC的基线探测器同ILC探测器性能不相上下。考虑到CEPC上可进行的、丰富的味物理测量,我们加强了CEPC探测器在粒子甄别方面的性能。在造价、功耗方面,CEPC探测器较之ILC探测器显著下降。针对CEPC的基线设计,我们开展了国内外的大量合作,就其中关键技术进行了积极的预研,并开展了原型样机的研制和测试。

使用CEPC的基线探测器设计及基线软件,我们对CEPC的物理潜力进行了深入细致的研究。分析表明,CEPC可将希格斯粒子性质测到0.1%~1%的精度,超出HL-LHC达一个量级;CEPC上电弱物理的测量精度也将超过现有精度达至少一个量级。

在CEPC研究中,我认为最重要的是人才队伍的培养和核心技术的掌握。在过去5年的工作中,通过积极的合作和人才的自主培养,我们训练出一支掌握了大部分核心技术的人员队伍。这使得我们掌握了CEPC探测器的设计及优化的主动。

今天,CEPC探测器的概念设计已经完成。下一步需进行更为艰巨的技术设计。有大量的技术难关需要一一攻克,有大量关键技术需要细致预研和测试。作为复杂对撞环境中的、大型多功能探测器系统,CEPC探测器的整体整合、稳定性、其大统计量数据下的系统误差控制更是巨大挑战。我们需要对这些困难有充分地认识,积极主动地开展人才培养和合作研究,为CEPC项目的最终实现而努力。