

ILC ILD 简述

威海高能物理学校结业报告

张余炼^{1,2,3}

1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049;
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
3. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

7月30日至8月7日, 第二届“威海高能物理学校(WHEPS)”在山东大学威海校区举办。“威海高能物理学校”由中国科学院“粒子物理前沿卓越创新中心”与教育部“粒子物理与相互作用协同创新中心(筹)”联合举办, 山东大学承办, 旨在促进高水平人才的成长, 为中国高能物理未来的长期发展培养后备人才。非常有幸参加了本次暑期学校, 借此结业报告感谢学校组委会各位老师的辛勤付出。

本次暑期学校以高能量前沿物理研究为主要内容, 从大型强子对撞机 LHC 实验出发, 拓展至下一代大型对撞机。具有针对性地开设了内容丰富的高能物理课程。全部课程以高原宁老师题为“中国的粒子物理”开篇, 为我们描述了中国的粒子物理从无到有再到举世瞩目的一段荡气回肠的历史。中国的粒子物理始于北京正负电子对撞机(BEPC)以及北京谱仪(BES)。时至今日, BEPC 和 BES 分别经历了两次和三次的重大升级改造, 成为现在的 BEPC II 和 BES III。BEPC/BES 自 1990 年运行以来, 取得了一批在国际高能物理界有影响的重要研究成果, 如: τ 轻子质量的精确测量、2-5 GeV 能区正负电子对撞强子反应截面(R 值)的精确测量、发现“质子-反质子”质量阈值处新共振态、发现 X(1835) 新粒子等, 引起了国内外高能物理界的广泛关注。大亚湾中微子实验以及江门中微子实验是中国在中微子暗物质物理研究领域取得重要成果的大型试验项目。大亚湾中微子实验对 θ_{13} 的精确测量揭示了超越、可能远远超越标准模型的新前沿。江门中微子实验将设计、研制并运行一个国际领先的中微子实验站, 以测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数, 并进行其它多项科学前沿研究。锦屏地下实验对暗物质的寻找实验也在紧张的进行着。在未来, 我们建议在我国建设一个以超高能环形加速器(CEPC)为核心的世界级大型加速器基地, 研究希格斯粒子及相关的科学问题, 寻找超出“标准模型”的新物理, 寻找未来发展的突破口。这一基地将采用国际化的方式运作、管理, 吸引国内外上万名科学家与工程师参与, 聚集一批高新技术企业, 形成一个大型科学研究中心和国际科学城, 最终发展为世界科学的中心之一。中国高能物理在过去所取得的成就令人振奋, 高能物理在中国未来的发展让我们充满信心。

在随后的课程中,中国科学院理论物理研究所的杨金民教授从理论出发给我们重点介绍了标准模型以及 Higgs 机制。Albert 和 Eilam 教授为我们详细介绍了 CMS 实验和 ATLAS 实验,让我们对当今高能量粒子物理的前沿研究有了全新的认识。Henri 教授为我们介绍了未来的直线是对撞机 ILC 计划,为我们开拓了高能物理未来发展的视野。Tommaso 教授以高能物理中的统计学为题为我们介绍了物理分析的方法和技巧。要成为一名物理学家,必须理解统计学,因为高能物理的结果经常是不确定的,所以必须要使用到统计学的知识。

暑期学校所有课程内容丰富,涉猎面广泛,又不乏深度,让我们受益匪浅。本人主要从事粒子物理探测器研究工作,重点为气体径迹探测器。本结业报告,结合暑期学校所授内容,以对 ILC 上 ILD 探测器的调研做总结报告。参考内容为 Henri 教授本次暑期学校的报告以及 ILC 技术设计报告 (volume 4: detectors)。

ILD 概述

ILD (International Large Detector) 是 ILC(International Linear Collider) 的探测器概念。CLIC 直线对撞机所采用的探测器与 ILD 十分类似。

ILD 探测器概念经历了细致的优化,尤其是基于近年来粒子流算法所表现出的全局事例重建的强大能力。粒子流意味着事例中所有带电以及不带电的粒子都需要单独地进行重建。这一需求不仅对探测器的设计有重要影响,并且在系统的优化上也至关重要。卓越的寻迹能力以及对次级顶点的杰出探测能力同样是重要的要求。无论从立体角覆盖方面,还是从避免缺陷和非均匀相应方面,设计一个密封的探测器都要十分小心谨慎。基于广泛的模拟研究,整体探测器系统经过了充分的优化过程。这些模拟研究不仅包括对子系统性能的研究,而且涉及到探测器的物理实现。伴随模拟研究,还有大量的测试研究,包括对组件和原型的实验室以及束流测试实验。

1. ILD 理念和挑战

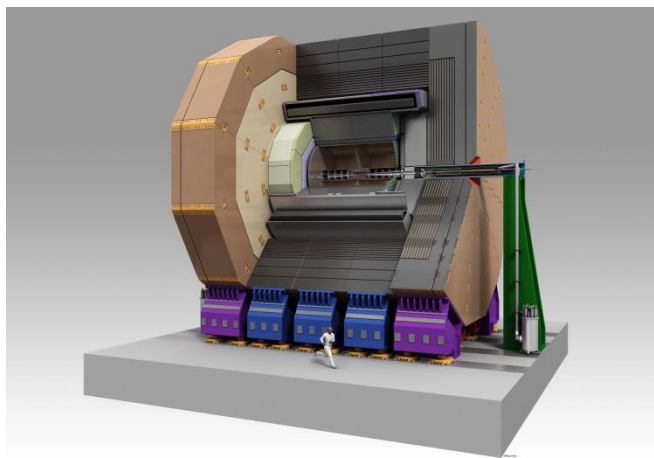


图 1.1 ILD 探测器概念图。

粒子流思想体现在探测器设计上就是要着重对事例的拓扑重建。这导致的一个直接后果就是需要一个能够有效地区分带电以及中性的粒子，甚至是内部喷注探测器系统。这就要求所有探测器系统具有高的空间分辨率。ILD 采用了高粒度的量能器系统结合中心径迹探测器。整个系统置于 3.5T 的磁场中。此外，次级顶点高的重建效率以及带电粒子好的动量分辨对于 ILC 探测器是至关重要的。

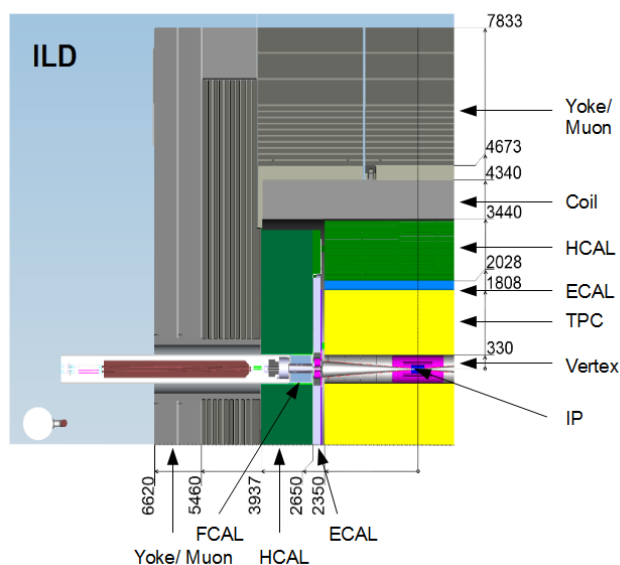


图 1.2 ILD 探测器象限视图，对撞点位于图片的右下位置，尺寸为 mm。

ILC 的对撞区设计为放置两个探测器，通过“推-拉”方案可以将他们移入或者移出束流所在的位置。ILD 的机械设计以及子探测器的总体整合也考虑到了这样的操作限制。

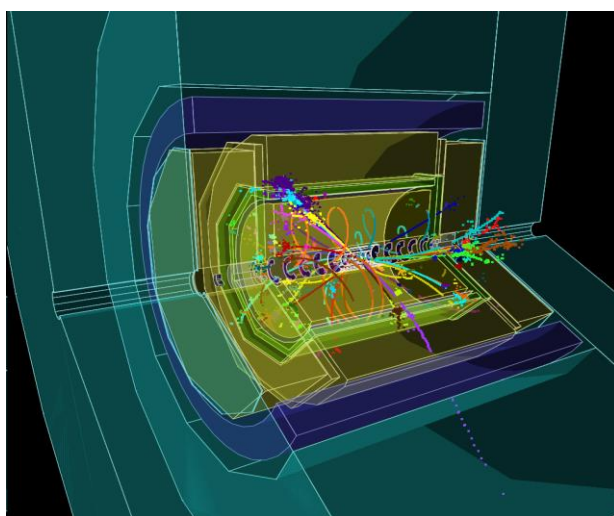


图 1.3 ILC 典型多喷注末态的三维视图（500GeV 多强子末态的 $\tau\bar{\tau}$ 事例。图片来自于对 ILD 探测器的详细模拟。

ILC 的目的是研究电弱对称破缺机制，同时可研究最新找到的 126GeV 的类 Higgs 粒子，并且可以在高达 1TeV 能标寻找和探索新物理。另外，ILC 将会为标准模型物理提供丰富的信息，例如顶夸克物理、重味物理以及 Z W 玻色子物理等。图 1.1.3 展示了一个典型事例 ($\tau\bar{\tau}$ ，质心系能量 500GeV)。所以就要求探测器能够精确地重建出通常在多物理道下出现的多喷注末态。喷注能量分辨必须足够好，从而可以把 W 和 Z 的强子衰变区分开来。对喷注能量分辨率的量化要求为， $\sigma_E/E \sim 3 - 4\%$ (相当于在 100GeV 下 $30\%/\sqrt{E}$)。次级顶点与包括重味物理在内的许多研究相关，次级顶点需要高效率并且高精度的重建。同时还需要有大立体角覆盖的高效寻迹系统。

2. ILD 设计和性能

ILD 设计为一个多用途的探测。高精度的顶点探测器外围是符合的寻迹探测器布局，包括硅径迹探测器、时间投影室以及量能器系统。整个系统位于一个大的螺线管内。线圈的外部是由轭铁构成的 muon 系统。

顶点探测器是一个多层的像素-顶点探测器(VTX)，包含三个超层，每一超层包含两层或者五层结构，均为探测器为桶状结构。为了减小本底击中，第一超层的长度仅为外围两超层长度的一半。虽然还没有确定最终的探测器技术，VTX 已经在点空间分辨以及最小物质量厚度方面做了优化。

VTX 探测器的外围是硅微条和像素探测器。在桶部放置了两层硅微条探测器(SIT)作为 VTX 和 TPC 之间的过渡。在前向区域为由两层硅像素板和五层硅微条板(FTD) 组成的探测器系统，可以实现对小角度径迹的探测。

ILD 的独特之处在于包含一个大体积的时间投影室(TPC)，TPC 内单径迹采样点多达 224 个。对 TPC 在三维点空间分辨以及场笼和端盖材料物质量的减小方面做了优化。同时，TPC 可以实现基于能损 dE/dx 的粒子鉴别。

TPC 的外围是硅微条系统，由两部分组成。一个位于 TPC 的端板后面(ETD)，另一个位于 TPC 和 ECAL 之间(AET)。它们可以提供额外的高精度空间点信息，进而提高寻迹能力并且从主径迹探测系统和量能器系统之间区域获得更多有效信息。

电磁量能器(ECAL)分为桶部和端盖系统，ECAL 是高粒度的，其在纵向可以提供多达 30 个样本点，在横向上有小的单元尺寸。钨为吸收体，在灵敏区，硅二极管或者闪烁体条都是可选方案。

ECAL 的外部是同样高粒度的强子量能器(HCAL)，其在纵向可以提供多达 48 个样本点，在横向上有小的单元尺寸。HCAL 的设计目前有两种可选方案，均基于钢吸收体结构。一种方案是使用 $3 \times 3\text{cm}^2$ 的闪烁体片，读出单元采用模拟读出。第二种方案是采用 $1 \times 1\text{cm}^2$ 的气体读出单元，每一单元采用数字或者半数字读出。

在大的前向角方向上，也就是 ECAL 和 HCAL 不能覆盖的部分，是具有高精度和耐辐照性能的量能器(LumiCAL, BeamCAL, LHCAL)。这些探测器系统的存在，使得量

量能器几乎能够覆盖到 4π 立体角，同时测量亮度以及检测对撞束流的质量。

量能器的外围绕着一个大体积的超导线圈，可以提供 3.5T 的轴向磁场。

采用闪烁体条或者阻性板室(RPC)的轭铁返回螺线管的磁通量，同时充当 muon filter, muon 探测器以及 tail catcher 量能器。

为了最大限度提高探测器对 ILC 上物理事件的灵敏度，探测器为连续读出模式，没有传统的基于硬件触发。

ILC 上精确的物理要求束流参数必须是高精度的已知量。束流能量和极化采用小的专用系统进行测量，且这些系统由对撞区的两个探测器共享。

ILD 探测器的主要参数总结在表 2.1 和表 2.2。

表 2.1 ILD 探测器桶部系统的主要参数列表

Barrel system						
System	R(in)	R(out)	z	comments		
			[mm]			
VTX	16	60	125	3 double layers layer 1: $\sigma < 3\mu m$	Silicon pixel sensors, layer 2: $\sigma < 6\mu m$	layer 3-6 $\sigma < 4\mu m$
Silicon						
- SIT	153	300	644	2 silicon strip layers	$\sigma = 7\mu m$	
- SET	1811		2300	2 silicon strip layers	$\sigma = 7\mu m$	
- TPC	330	1808	2350	MPGD readout	$1 \times 6mm^2$ pads	$\sigma = 60\mu m$ at zero drift
ECAL	1843	2028	2350	W absorber	SiECAL	30 Silicon sensor layers, $5 \times 5 mm^2$ cells
					ScECAL	30 Scintillator layers, $5 \times 45 mm^2$ strips
HCAL	2058	3410	2350	Fe absorber	AHCAL	48 Scintillator layers, $3 \times 3cm^2$ cells, analogue
					SDHCAL	48 Gas RPC layers, $1 \times 1 cm^2$ cells, semi-digital
Coil	3440	4400	3950	3.5 T field	2λ	
Muon	4450	7755	2800	14 scintillator layers		

表 2.1 ILD 探测器端盖系统的主要参数列表

End cap system						
System	z(min)	z(max)	r(min),	comments		
			r(max)			
			[mm]			
FTD	220	371		2 pixel disks 5 strip disks	$\sigma = 2 - 6\mu m$ $\sigma = 7\mu m$	
ETD	2420	2445	419-1822	2 silicon strip layers	$\sigma = 7\mu m$	
ECAL	2450	2635		W-absorber	SiECAL	Si readout layers
					ScECAL	Scintillator layers
HCAL	2650	3937	335-3190	Fe absorber	AHCAL	48 Scintillator layers $3 \times 3cm^2$ cells, analogue
					SDHCAL	48 gas RPC layers $1 \times 1cm^2$ cells, semi-digital
BeamCal	3595	3715	20-150	W absorber	30 GaAs readout layers	
Lumical	2500	2634	76-280	W absorber	30 Silicon layers	
LHCAL	2680	3205	93-331	W absorber		
Muon	2560		300-7755	12 scintillator layers		

利用基于 GEANT4 的详细模型模拟和专用的重建工具，对 ILD 探测器的性能进行了广泛的研究并且考虑了现在能认识的所有本底。材料的物质质量是探测器的一个关键特性。粒子流要求薄的径迹探测器材料，减少粒子到达量能器之前与物质的相互作用；同时要求厚的量能器材料完全吸收簇射。图 2.1（左）给出了到达量能器之前，以辐射长度为单位的探测器材料。右图给出了包括量能器系统在内的总的相互作用长度。

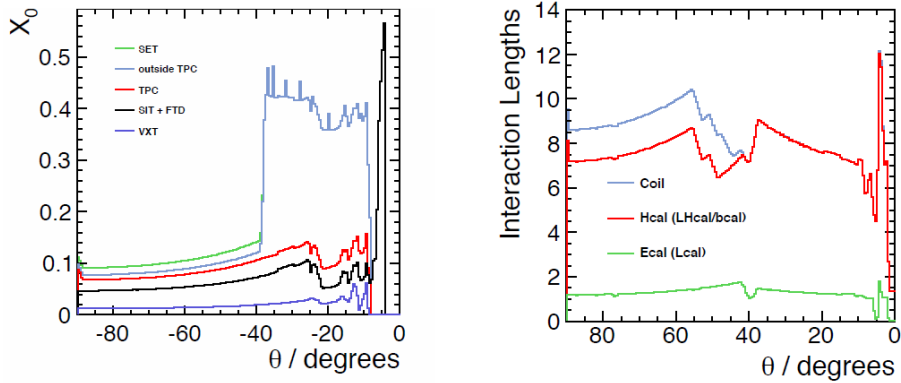


图 2.1 左：径迹探测器中材料平均总的辐射长度随极角的关系；右：探测器内总的相互作用长度，止于量能器系统包含探测器的线圈。

寻迹探测系统的性能可以用它们的联合动量分辨率来表征，如图 2.2（左）所示。高动量下的动量分辨可达到 $\sigma_{1/p_T} = 2 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$ 。对长寿命粒子的标记对许多物理研究都至关重要。利用靠近对撞点的几层像素探测器可以实现对移位顶点的重建，如图 2.2（右）所示。

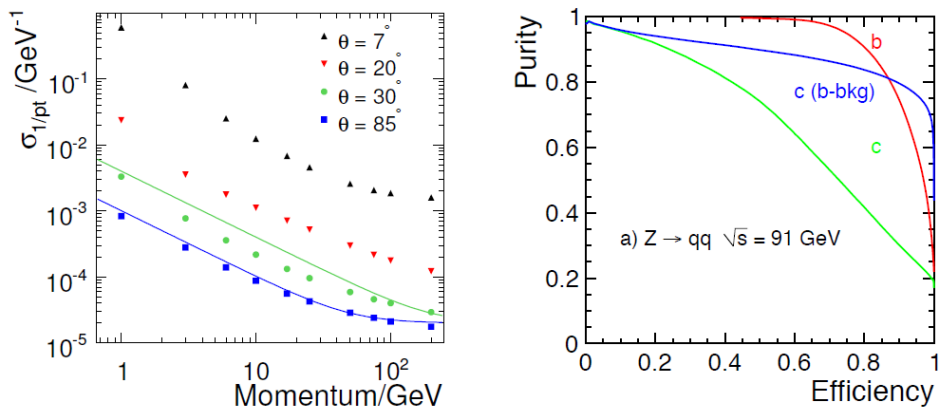


图 2.2 左：不同极角的径迹，具有不同横动量粒子的动量分辨，同时给出了理论预期；右：不同质心系能量下， $Z \rightarrow q\bar{q}$ 事例的味标记性能（ps：感觉图上图例有问题）。

量能器系统和径迹探测系统共同决定了粒子流性能。ILD 探测器在不同能量，不同极角

的性能如图 2.3 所示。

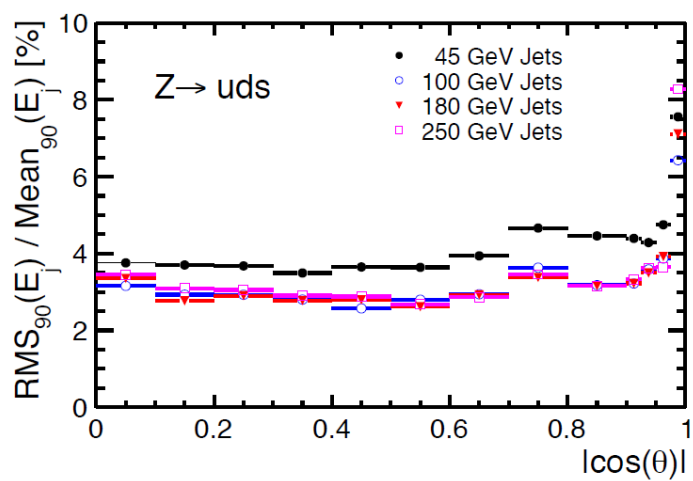


图 2.3 Fractional jet energy resolution plotted against $|\cos\theta|$ where theta is the polar angle of the thrust axis of the event.