

国家重点研发计划 “大科学装置前沿研究”

高能量加速器关键技术研究 中期进展报告

项目负责人：王建春

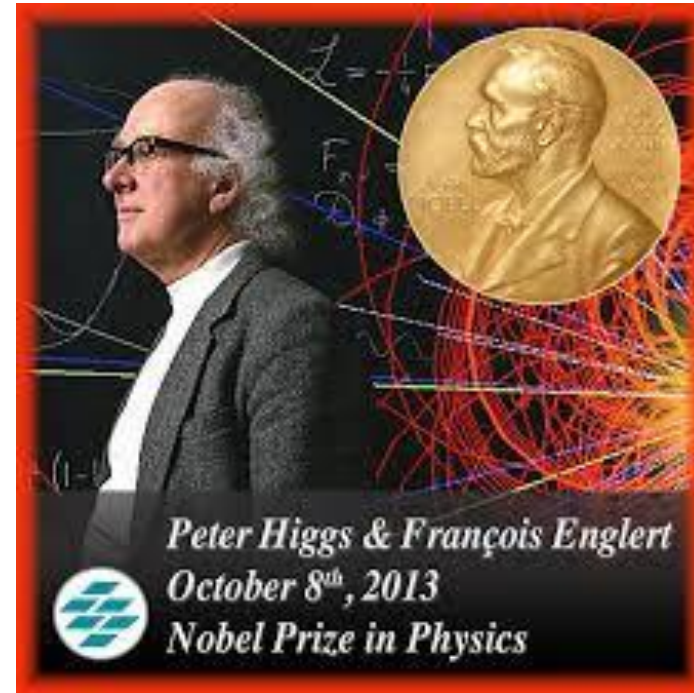
高能物理研究所, 2026年5月18日



报告提纲

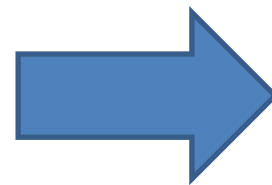
- **项目背景、研究内容、任务分解**
- **各项任务进展亮点**
- **进度安排和重要日程**
- **研究团队与经费使用情况**
- **人才培养和科研交流**
- **小结**

希格斯粒子：探索新物理的工具



2012年LHC发现希格斯粒子 是粒子物理发展的重要里程碑

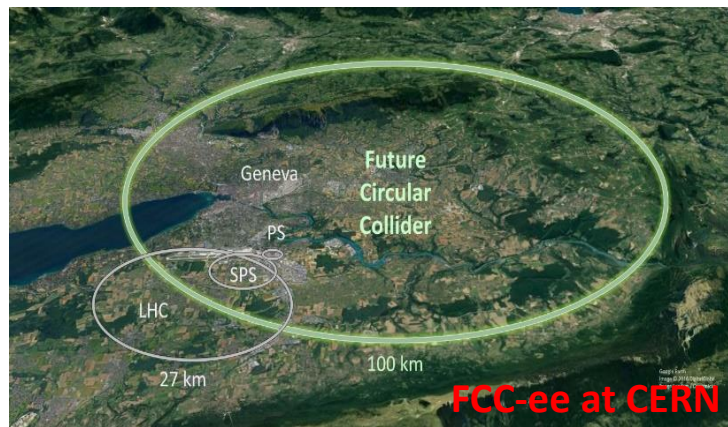
希格斯粒子是
标准模型的最后一块拼图



希格斯粒子成为
探索新物理的关键探针

希格斯粒子质量 = 125 GeV

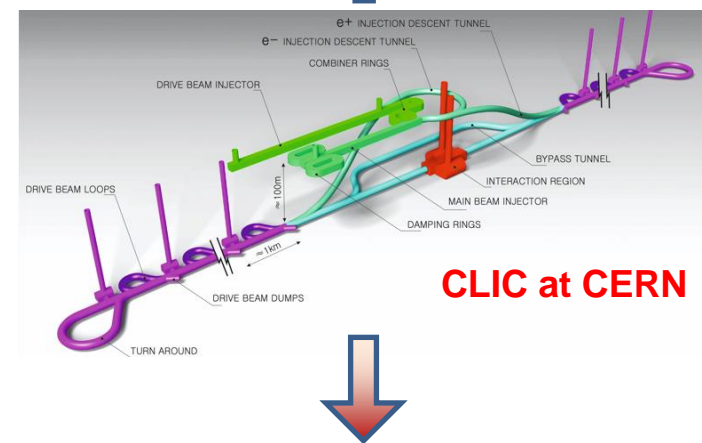
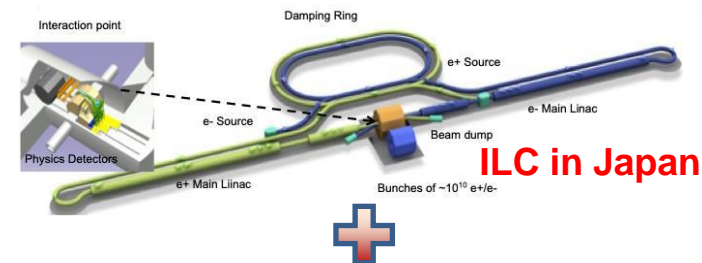
正负电子希格斯工厂的国际竞争



正负电子希格斯工厂
被公认为是
下一代对撞机的最高优先

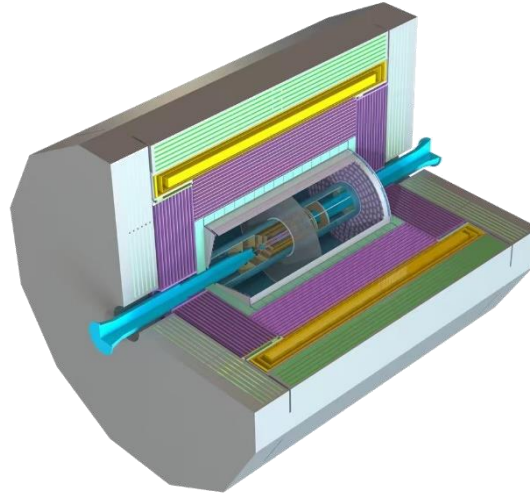
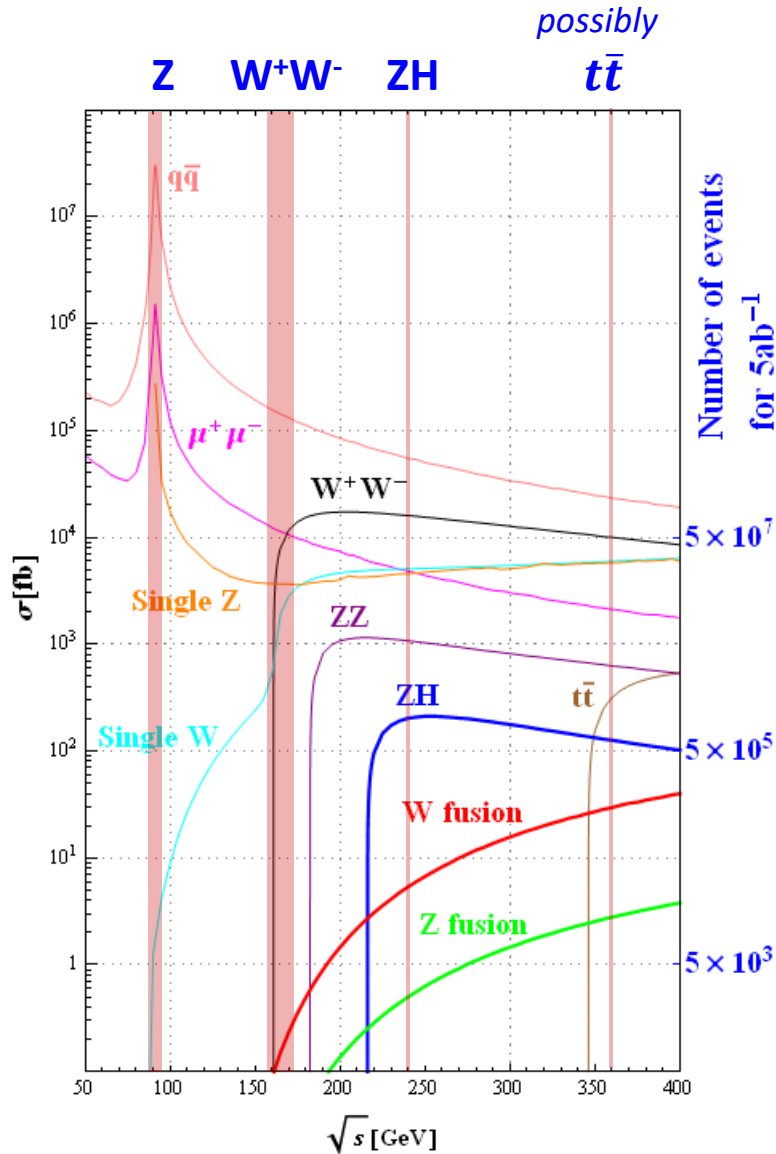
- ❑ 2013和2016年的香山会议：
CEPC是实现中国加速器物理发展的
最佳历史机遇和途径
- ❑ 加速器TDR和基线探测器TDR分别在
2023年和2025年相继推出
- ❑ 2025年底未能进入十五五支持项目
- ❑ 继续深化技术研究、拓展国际合作
- ❑ 2022年ICFA: “a Higgs factory as the **highest priority** for realizing the scientific goals of particle physics”
- ❑ 美、日支持未来希格斯工厂，对不同项目的支持度也在不断调整

- ❑ 2020年欧洲粒子物理战略规划
“An electron-positron Higgs factory is the **highest-priority next collider**”
- ❑ 2026年欧洲粒子物理战略规划
“The FCC-ee is recommended as the preferred option for the next **flagship collider at CERN**”
- ❑ 需在2026. 5. 22 CERN理事会特别会议上获得通过，在2028年正式决定



LCF at CERN ?

CEPC运行计划和物理目标



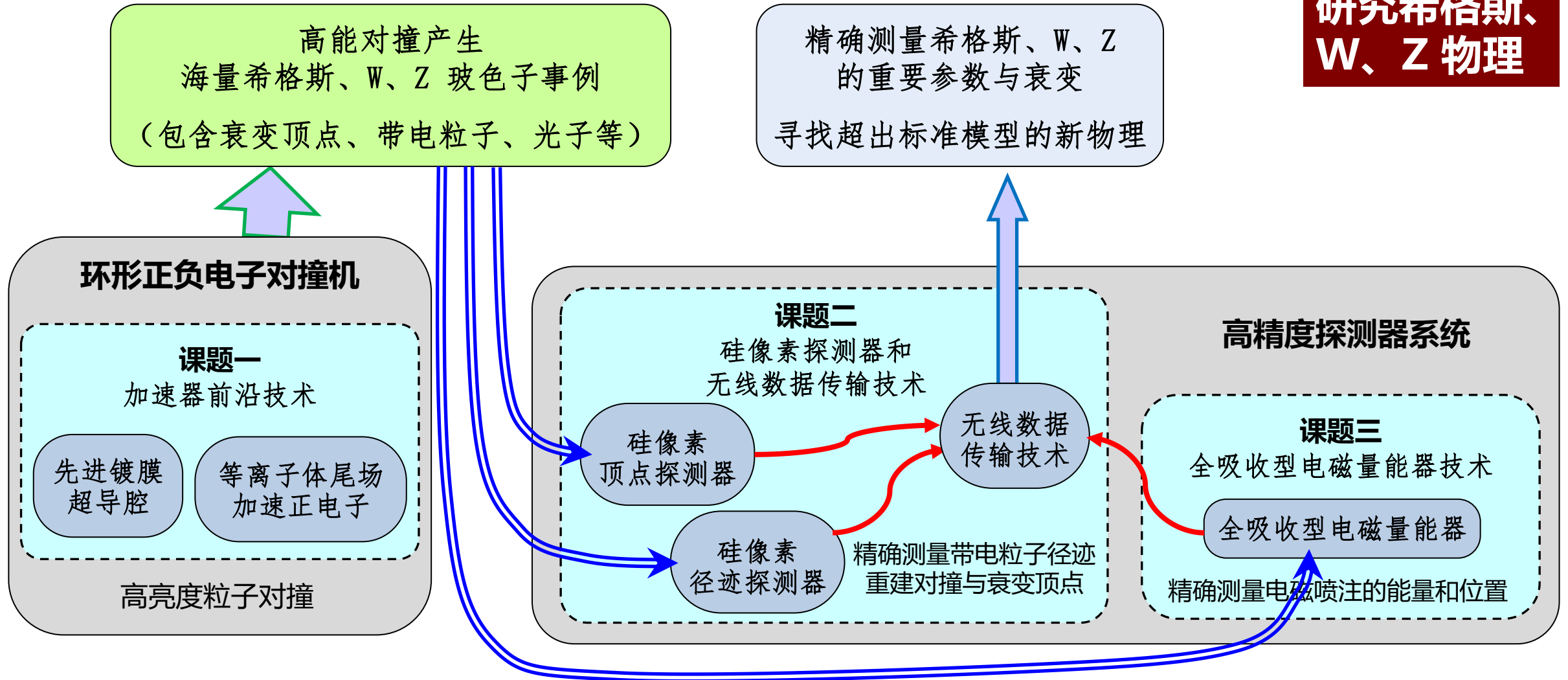
海量的Higgs, W, Z, 甚至顶夸克事例，为高精度的希格斯物理和电弱物理过程的精确测量，味物理和QCD的研究，以及寻找新物理带来机遇

Baseline Scenario in TDR			
Operation mode	ZH	Z	W+W-
\sqrt{s} [GeV]	240	91	~160
SR Power (MW)	30	12.1	30
$L / IP [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	5	26	16
Run Time [years]	15	4	1
$\int L dt [\text{ab}^{-1}, 1\text{-IP}]$	10	13	1.2
Event Yields	2.0×10^6	5.6×10^{11}	1.0×10^7

Optimal Scenario (2 IPs, 50 MW)				
Operation mode	ZH	Z	W+W-	$t\bar{t}$
\sqrt{s} [GeV]	240	91	~160	~360
$L / IP [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	8.3	192	26.7	0.8
Run Time [years]	10	2	1	~5
$\int L dt [\text{ab}^{-1}, 2 \text{ IPs}]$	22	100	6.9	1
Event yields [2 IPs]	4.3×10^6	4.1×10^{12}	2.1×10^8	6×10^5

项目研究目标和任务分解

研究希格斯、
W、Z 物理



研究内容和考核指标

课题	预算	内容	中期指标	结题指标
课题一： 加速器前沿 技术	360 万	新材料镀膜超导腔	频率4-8 GHz，Q值 5×10^6	频率4-8 GHz，Q值 $0.8-2 \times 10^7$
		等离子体尾场加速 正电子方案	模拟 能量转换效率10% ，能散不 高于10%，发射度增长不超过2倍	模拟 能量转换效率30% ，能散不 高于5%，发射度增长不超过50%
课题二： 硅像素探测 器和无线数 据传输技术	936 万	硅像素顶点探测器	位置精度$5\mu\text{m}$ ，定时精度 $1\mu\text{s}$ ，功 耗 $150\text{mW}/\text{cm}^2$	位置精度$3\mu\text{m}$ ，定时精度100ns， 功耗 $100\text{mW}/\text{cm}^2$
		高压CMOS径迹探 测器	位置精度 $10\mu\text{m}$ ，定时精度100ns， 功耗 $500\text{mW}/\text{cm}^2$	位置精度 $10\mu\text{m}$ ，定时精度10ns， 功耗 $200\text{mW}/\text{cm}^2$
		无线数据传输系统		传输处理能力达30Gbps
课题三： 全吸收型电 磁量能器	504 万	高粒度全吸收型电 磁量能器样机	模拟1-60GeV 电磁簇射能量分辨达$3 - 4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ ，线性度1.5%	
				喷注能量分辨3-4%；MIP探测效 率95%

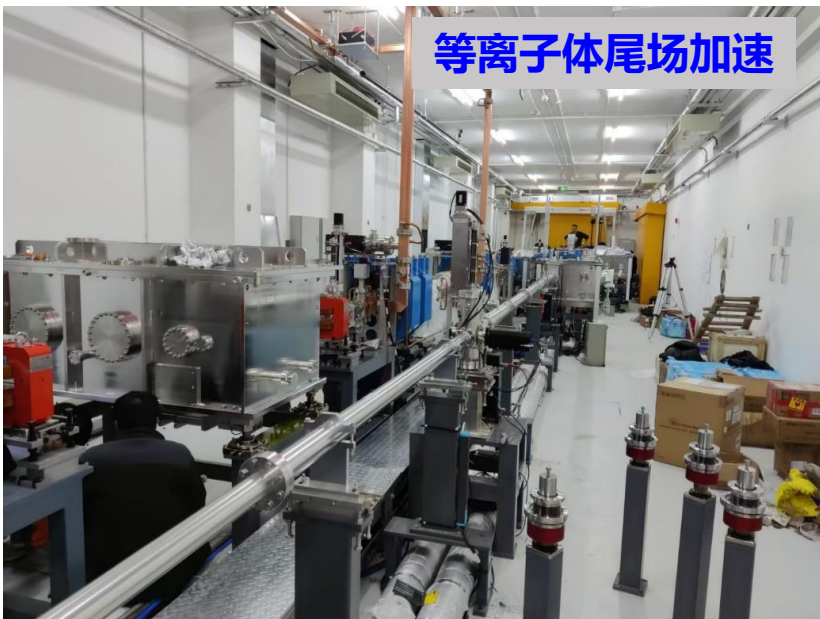
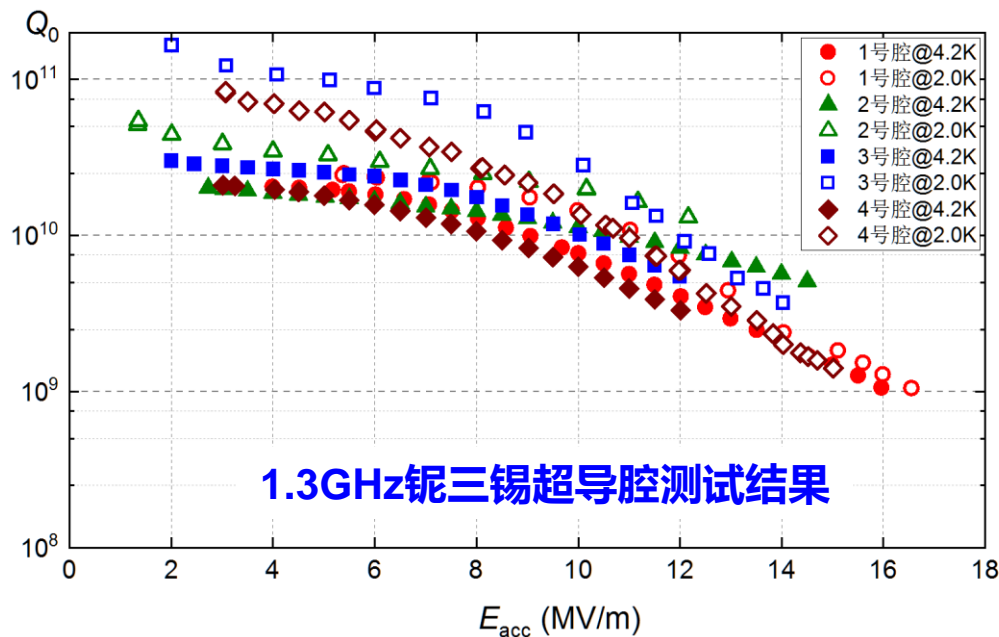
项目专家组

- 向导 教授（责任专家） 上海交通大学
- 高原宁 院士、教授（组长） 北京大学
- 邓海啸 研究员 中国科学院上海高等研究院
- 郭超英 教授 斯特拉斯堡大学
- 刘建北 教授 中国科学技术大学
- 王启东 研究员 中国科学院微电子所
- 王希龙 研究员 中国科学院大连化学物理研究所
- 王义 教授 清华大学

感谢各位专家 在项目研究和其它方面给予全方位的指导!

课题一：加速器前沿技术

- 铌三锡超导腔研究：开展了铌锡比例调控、薄膜厚度均匀性等研究，1.3 GHz铌三锡超导腔的测试结果与国际先进水平相当，并完成了铌三锡超导腔传导冷却的实验验证
- 铁基超导腔研究： $\text{FeSe}_{0.6}\text{Te}_{0.4}/\text{Nb}$ 下临界磁场 B_{c1} 显著提高
- 等离子体尾场加速正电子：已达到验收指标

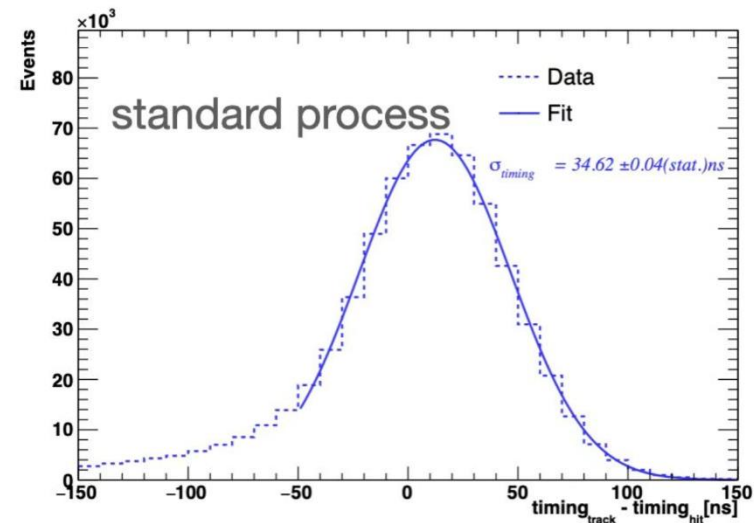
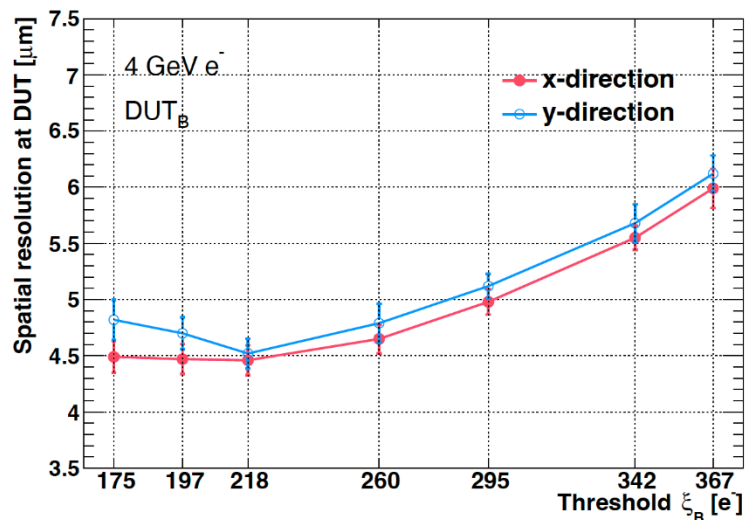
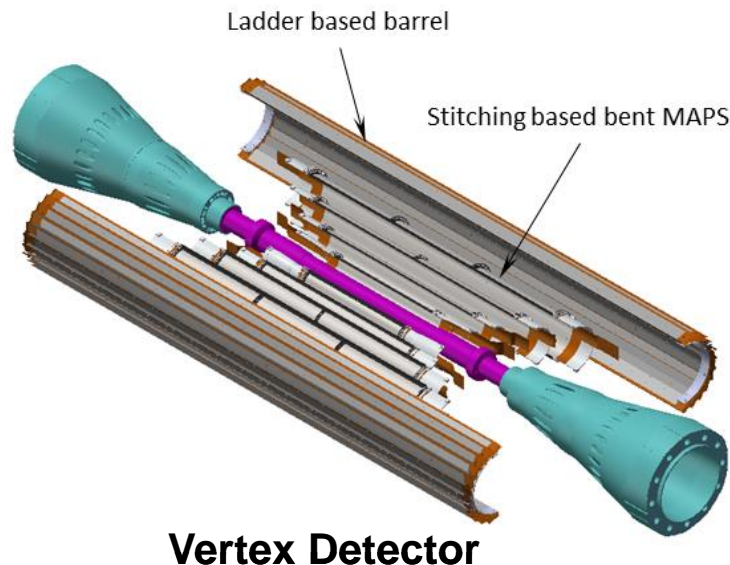


细节请见 **沙鹏、李大章**的报告

成果名称	指标名称	立项时指标值/状态	中期指标值/状态	完成时指标值/状态	本年度指标状态	考核方式
铌三锡超导腔	品质因数	/	5×10^6 @ 4-8 GHz	$0.8-2 \times 10^7$ @ 4-8 GHz	研制中，尚未进行测试	现场测试
等离子体尾场加速正电子的设计方案	能量转换效率	1%	10%	30%	优于30%	同行专家评议
	能散	20%	10%	5%	优于5%	同行专家评议
	发射度增长	10倍	2倍	50%	优于50%	同行专家评议

课题二：硅像素顶点探测器

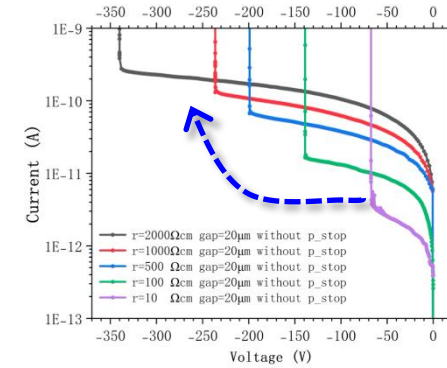
- 基于TJ-180 nm 的太初芯片的样机，性能已达到中期考核的指标
 - 位置分辨、定时精度、功耗分别达到好于5 微米、100 纳秒和100 mW/cm²
- 基于TaichuPix-Stitching的设计和减薄卷曲技术，完成了CEPC的基线探测器的技术设计报告
- 基于海力士 90nm的CIS工艺，设计下一版的像素芯片
 - 将实现好于3微米的空间分辨率



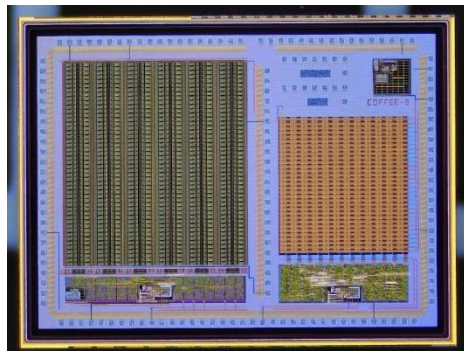
细节请见 董明义 的报告

课题二：高压-CMOS硅像素径迹探测器

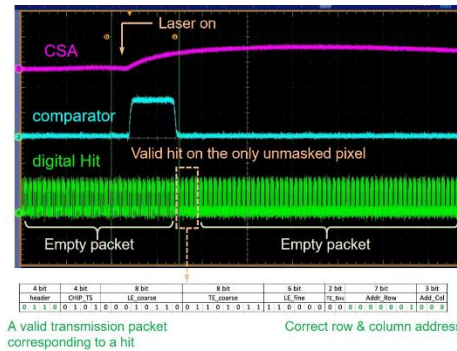
- 设计研发基于55nm高压工艺的小读出阵列原理验证芯片COFFEE3
 - 各部分基本设计功能得到全面验证，可用于下一版芯片设计
 - 有望在今年进行的束流测试中验证10微米空间分辨目标
- COFFEE3测试研究发现工艺条件限制，与国内产线合作改进工艺
 - 使用低阻晶圆击穿电压和耗尽深度受限 → 带电粒子信号的信噪比低
 - 首个新工艺设计CHiR已于2026年1月提交，预计年内可回片开展测试
 - 新设计中继承已验证的电路模块，以及和COFFEE3类似的像素阵列，预期将大幅提高击穿电压和耗尽深度



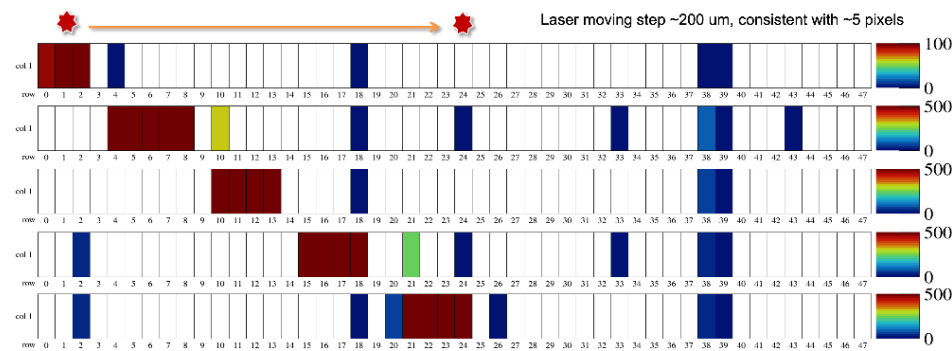
新工艺使用高阻晶圆有望提升击穿电压至超过 -200V



COFFEE3 芯片照片

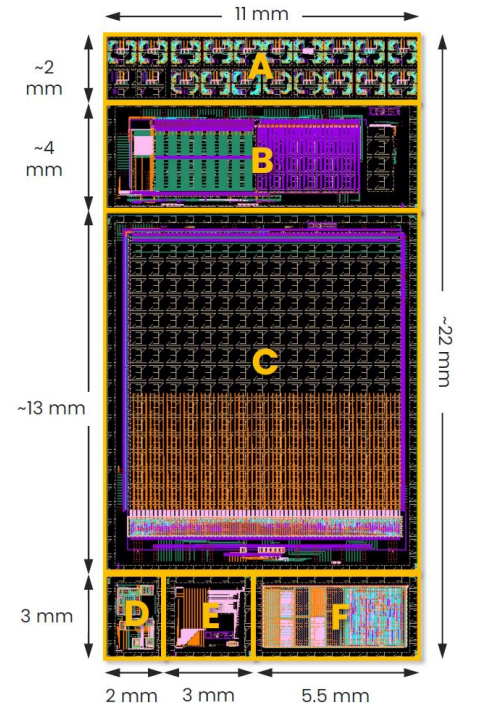


像素地址可正确解码读出



对移动的激光光斑响应符合预期

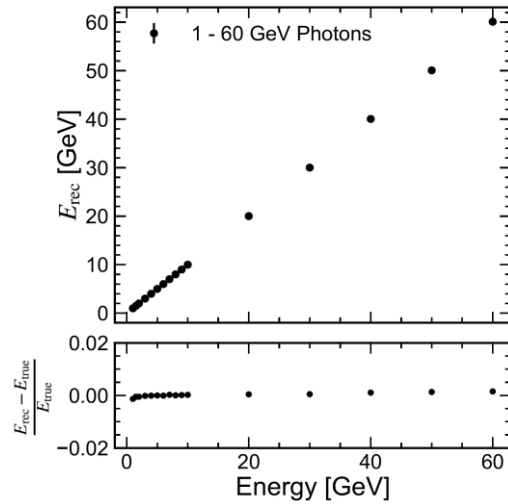
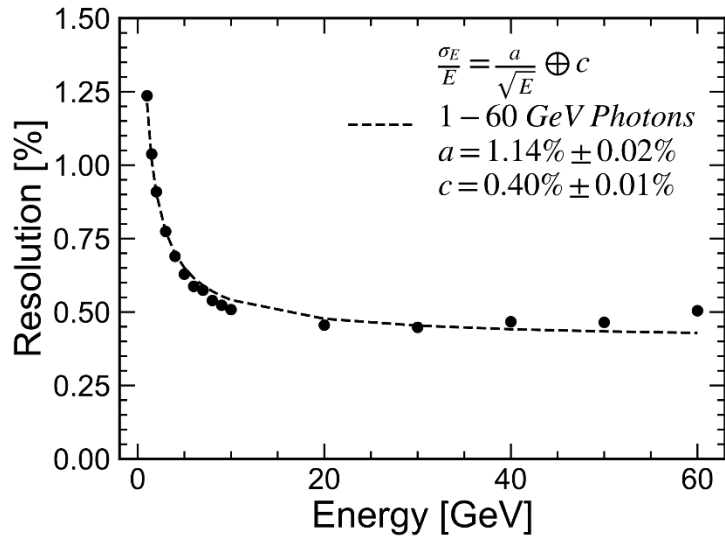
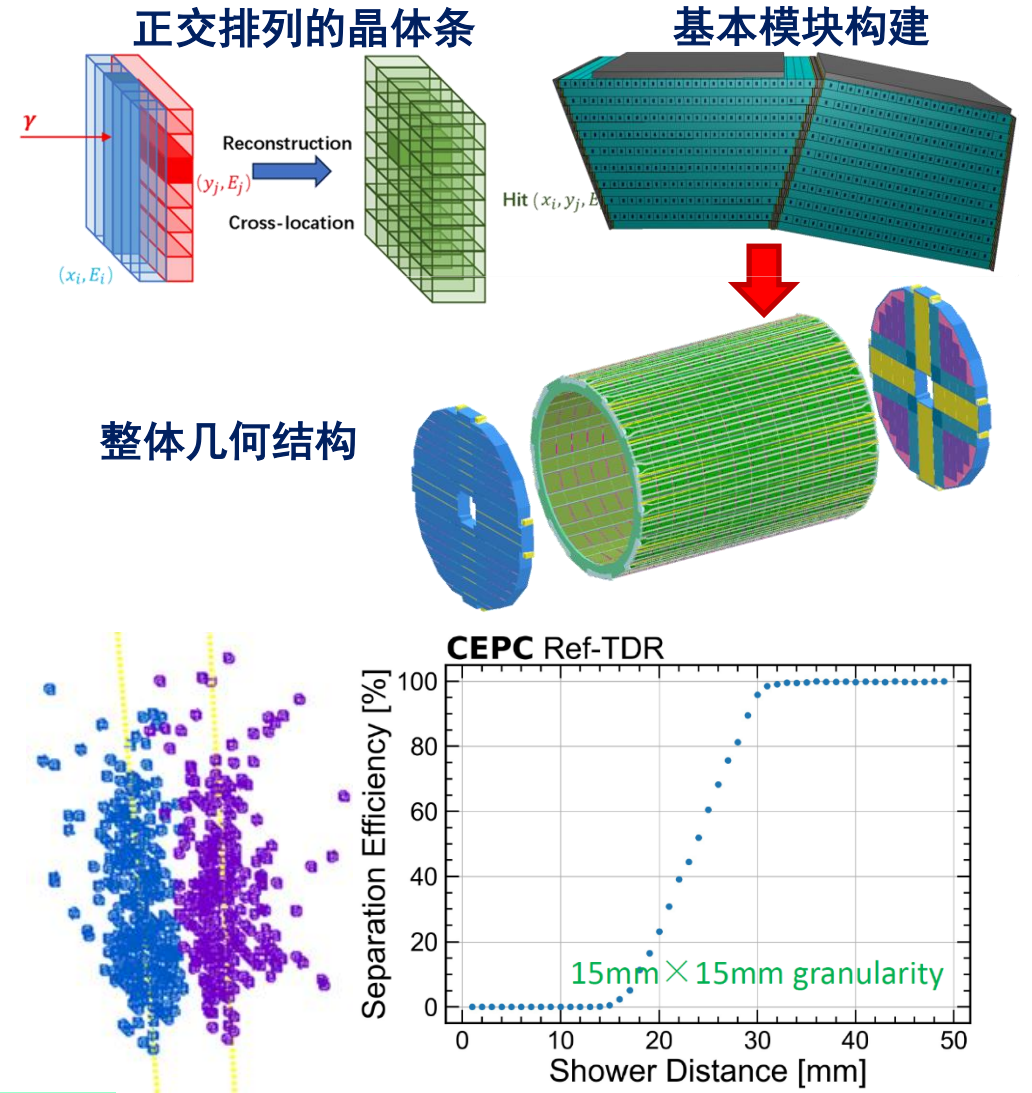
细节请见 董明义 的报告



CHiR 芯片设计版图

课题三：全吸收型电磁量能器技术

- ❑ 为基线探测器的TDR优化设计电磁量能器的几何结构
- ❑ 开发出**全新粒子流算法**解决簇射重叠和混淆问题，成功用于CEPCSW，实现临近双光子的高效率区分，双光子末态希格斯粒子质量的精确重建
- ❑ **光子电磁能量分辨率和线性度均优于课题考核指标要求**



- 能量分辨率：1.14% / $\sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 0.4\%$
- 能量线性度：< 1%
- 考核指标：3% / $\sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 1.5\%$
- 考核指标：1.5%

细节请见 杨海军 的报告

临近双光子的区分效率

课题三： 新型大尺寸闪烁晶体研制

- 利用CERN 10GeV π^- 束流对长条 BGO 晶体进行性能测试，批量研究晶体条性能一致性

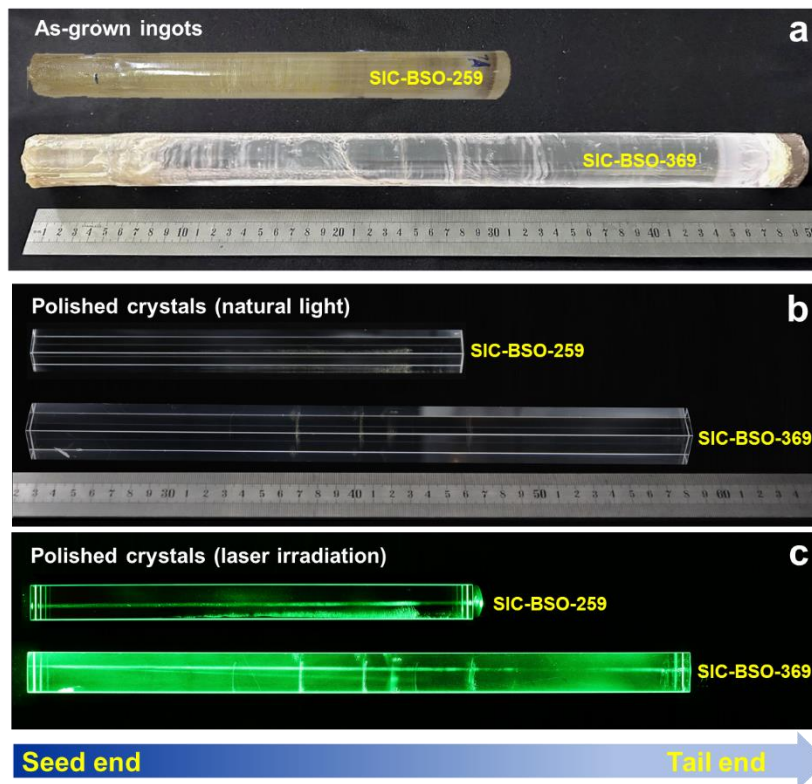
光输出均匀性 RMS/AVG ~ 0.43%



光输出均匀性 RMS/AVG ~ 3%

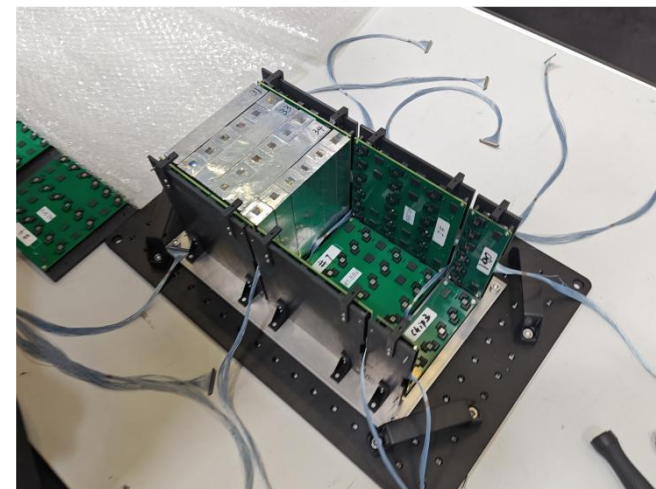
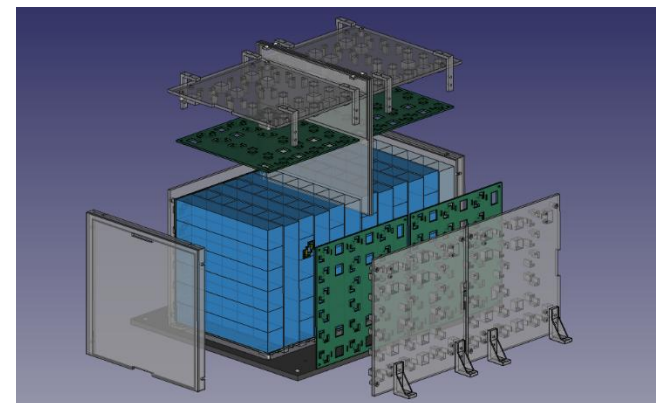


- 研制创记录尺寸的新型BSO晶体，实现**高效制备，更高性价比**
20×20×259 mm³ (SIC-BSO-259)
22×22×369 mm³ (SIC-BSO-369)
光学透过率达 **80%**，接近理论值



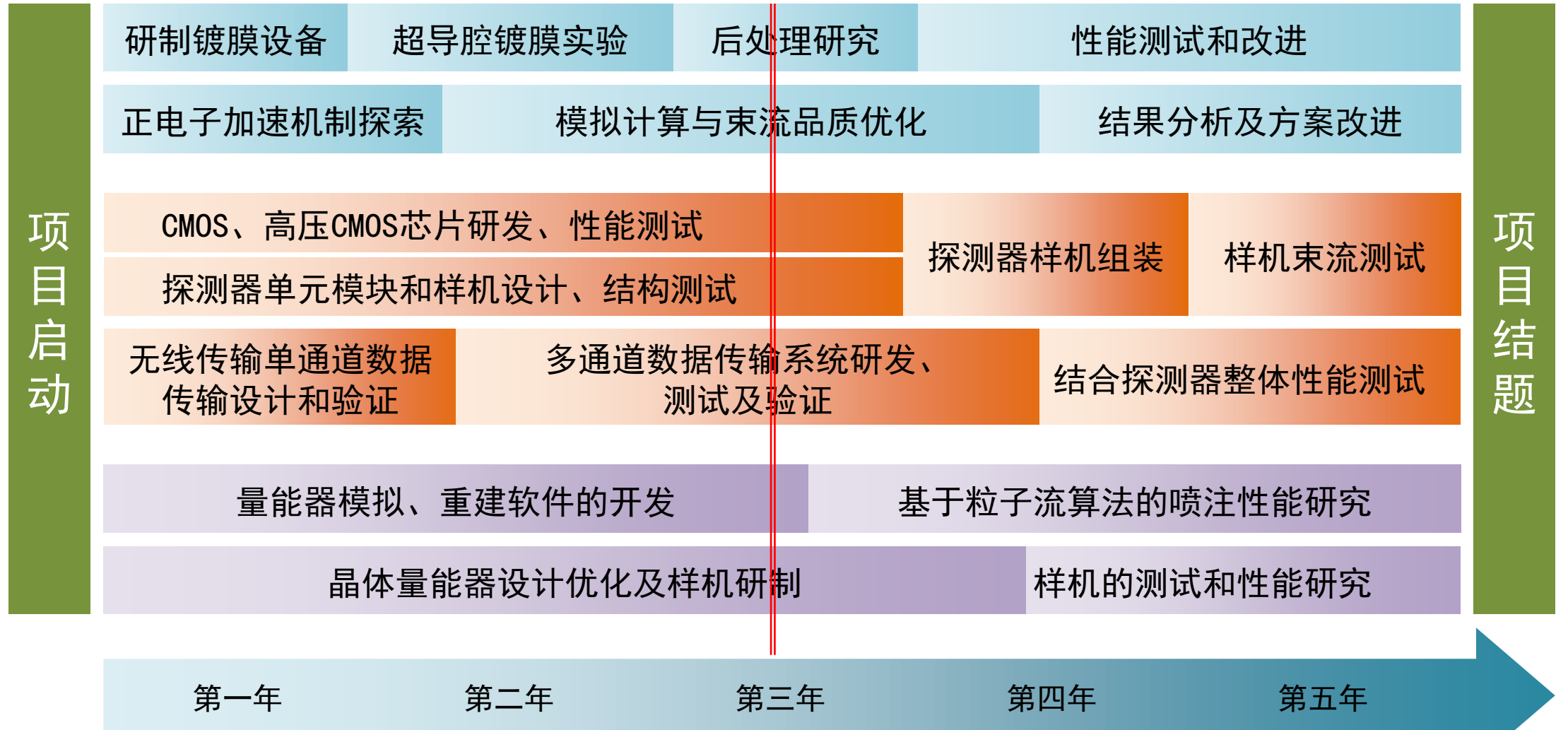
细节请见 杨海军 的报告

- 设计和研制晶体与硅光电倍增管组成灵敏探测器模块，组装量能器样机，开展性能研究



总进度安排

现在



2023.12

2028.11

重要日程

- 2024.07.02 项目启动会议（北京）
- 2024.11.29 进展交流会议（北京）
- 2024.12 年度技术进展报告
- 2025.05.28 进展交流会议（上海）
- 2025.12 年度技术进展报告
- 2026.05 中期进展报告会议（北京）
- 2026.6-7 中期进展评估报告
- 2026.11 进展交流会议（武汉）
- 2027.05 进展交流会议（合肥）
- 2027.11 进展交流会议（北京）
- 2027.12 年度技术进展报告
- 2028.05 进展交流会议（杭州）
- 2028.09 结题准备会议（北京）
- 2028.11-12 项目结题报告
- 2028.11-12 项目终期评审会议

经费使用情况

单位：万元

项目课题	预算总额	累计收入	累计支出	使用进度
课题一	360.00	288.00	222.54	61.8%
课题二	936.00	748.80	446.31	47.7%
课题三	504.00	403.20	290.16	57.6%
项目总体	1800.00	1440.00	959.01	53.3%

科目名称	预算	累计支出	使用进度
一、直接费用	1413.50	786.73	55.7%
1、设备费	160.90	41.16	25.6%
2、业务费	1097.60	539.97	49.2%
3、劳务费	155.00	206.50	133.2%
二、间接费用	386.50	171.38	44.3%

劳务费比较紧张：院博士后补贴未入账，费用安排也需要做适当调整

研究团队

项目书中所列人员

■ 课题一

- 高能物理研究所: **沙鹏**、李大章、翟纪元、董超、靳松、刘佰奇

■ 课题二

- 高能物理研究所: **王建春**、董明义、江晓山、卢云鹏、李一鸣、周扬
- 浙江大学: 朱宏博
- 华中师范大学: 杨苹

■ 课题三

- 上海交通大学: **杨海军**
- 高能物理研究所: 李刚、刘勇
- 上海硅酸盐研究所: 陈俊锋
- 中国科学技术大学: **张云龙** (周勇 退出)

未能列入但实际参与研发工作的员工

■ 课题一

- 高能物理研究所: 周诗宇、曾明、刘爽

■ 课题二

- 高能物理研究所: 魏微、胡俊、梁志均、赵梅、张颖、陆卫国、徐子骏、张慧
- 华中师范大学: 孙向明

■ 课题三

- 上海硅酸盐研究所: 邓明雪、李文朋、齐雪君、陈雷、陆裕贵、张建、李贇、倪海洪

以及项目、课题、团队的支撑人员，
博士后、研究生、本科生等

团队建设和人才培养

姓名	备注
周诗宇	从清华大学引进中科院“百人”
张慧	从德国KIT引进中科院“百人”
刘爽	从清华大学引进中科院“百人”
吴天涯	博士后出站，加入南昌大学
项治宇	博士后出站，加入中南大学
郭方毅	博士后出站，现为 CERN Fellow
董若石	博士后出站，加入比亚迪公司
王震	博士后出站，加入新凯来公司
培养博士后、研究生、本科生多人	

国际合作

- 研究团队及所属单位积极参与国际合作组织
 - 是国际射频超导合作组织 (TTC) 成员
 - 由 ECFA / CERN 牵头，为未来大型对撞机实验服务，筹组8个探测器研发合作组，本研究团队是相关的多个合作组的成员 (DRD3、4、6、7、8)
- 与国际科研团队合作密切，人员交流频繁
 - 加速器研发团队与日本KEK、德国DSEY、意大利INFN
 - 硅探测器研发团队与西班牙IFAE、法国斯特拉斯堡大学、德国卡尔斯鲁厄工学院
 - 量能器研发团队与法国IJCLab和里昂大学、德国DESY、俄罗斯JINR、日本东京大学和信州大学

问题和风险

风险点	应对方案
高压 CMOS 原理验证芯片尝试用 国产 55nm 新工艺 ，可能造成传感器性能的不确定性	充分利用模拟软件 进行优化设计，降低不确定性
国际情势的不确定性，部分电子学芯片有 禁运风险	<ul style="list-style-type: none">□ 联合国内团队合作开发□ 寻求关键芯片的国内替代方案□ 加强国际合作
基于铁基超导体的超导腔 无先例 可供借鉴	开展国内外、跨学科（凝聚态物理、材料和表面科学等）的合作，尝试各种技术路线，解决难题

按照预案在进行

小结

□ 三个课题研究工作按计划进展

- 课题一： 1.3 GHz铌三锡超导腔性能优于结题考核指标，4-8 GHz超导腔正在生产中； 等离子体尾场加速正电子方案设计已达到结题考核指标
 - 课题二： 基于TaichuPix芯片的样机性能满足中期指标，正在进行基于更先进制程 海力士90nm的芯片设计； 基于55 nm高压工艺的COFFEE芯片设计功能得到全面验证，正在束流测试中，预期可达10微米空间分辨目标； 与产线合作改进工艺，正进行CHiR芯片的生产，有望提升性能；完成多通道数据传输模型系统的研制，性能已达到结题指标
 - 课题三： 开发出全新粒子流算法，解决簇射重叠和混淆问题； 探测器样机的光子电磁能量分辨率和线性度均优于课题考核指标要求； 成功生长高质量的BGO晶体和大尺寸BSO闪烁晶体
- 在保障完成考核指标的基础之上，拓展三个课题的研究
 - 保持经常性的项目和课题的内部研讨会议，加强在国际国内会议上的交流和文章发表

感谢各位领导和专家！

会议日程安排

项目进展报告		
9:00-9:10	温良剑副所长致欢迎词	
9:10-9:40	重点专项总体进展	王建春
9:40-10:00	中期考核要求	李刚
10:00-10:30	合影+茶歇	
10:30-10:55	课题1-加速器前沿技术研究	沙鹏
10:55-11:20	课题2-硅像素探测器和无线数据传输技术	董明义
11:20-11:45	课题3-全吸收型电磁量能器技术	杨海军
11:45-12:30	专家讨论	
12:30-14:00	午餐	
14:00-15:30	专家讨论	

Backup Slides

CEPC探测器技术攻关

缪子探测器

MOST4: 缪子探测器PS+SiPM

硅像素顶点探测器

MOST1: MAPS硅像素芯片
 MOST2: 探测器原型机
 MOST3: 更高指标芯片和原型机

硅内径迹探测器

MOST3: HV-CMOS芯片和原型机

时间投影室

MOST1: Pad读出原型机
 MOST4: 像素型读出时间投影室

硅外径迹探测器

MOST4: 基于LGAD的时间探测器
 MOST5: AC-LGAD时间径迹探测器原型机

电磁量能器

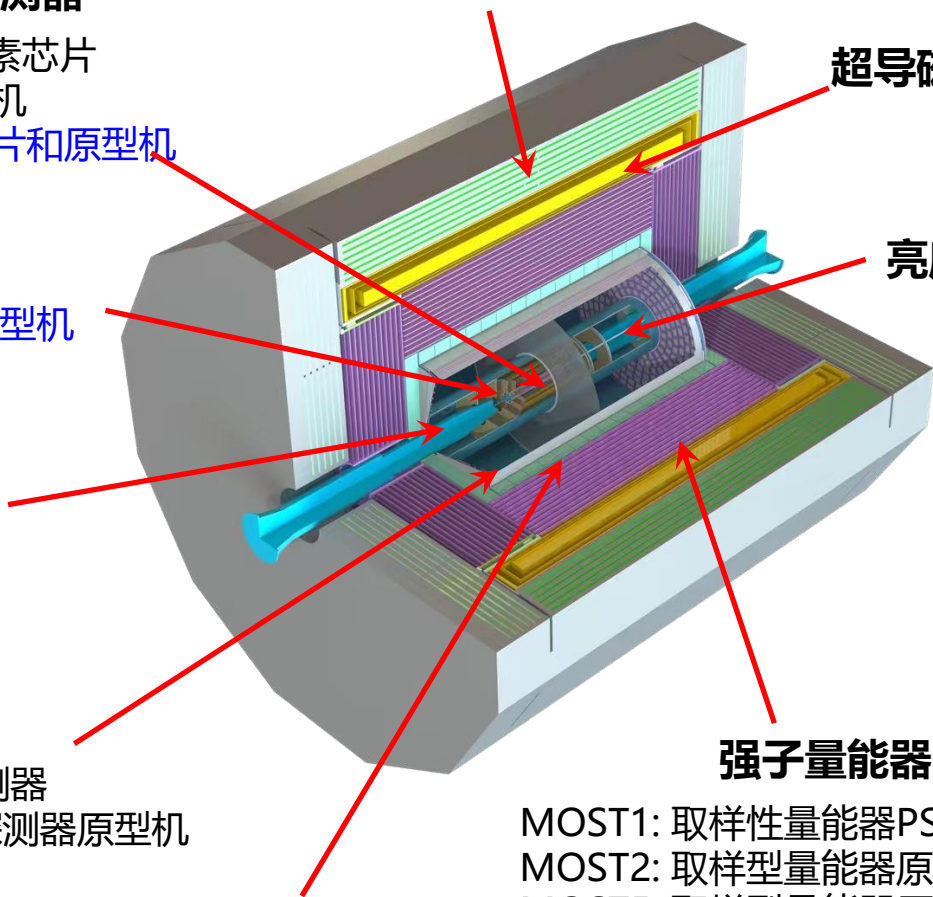
MOST1: 取样性量能器PS+Cu/W
 MOST3: 全吸收型量能器原型机

超导磁体

亮度量能器

强子量能器

MOST1: 取样性量能器PS+Fe
 MOST2: 取样型量能器原型机PS+Fe
 MOST5: 取样型量能器原型机GS+Fe



在科技部重点研发项目支持下，对CEPC探测器各子系统的性能指标逐项攻关，稳步逼近目标

MOST1 (2016-2021)
 MOST2 (2018-2023)
MOST3 (2023-2028) 本项目
 MOST4 (2024-2029)
 MOST5 (2026-2031) ?

其它相关研究

MOST1: 总体设计和模拟
 MOST1: MDI本底研究
 MOST1: MPGD切伦科夫探测器
MOST3: 无线数据传输技术
 MOST4: 总体设计优化
 MOST4: 粒子种类鉴别漂移室
 MOST5: SiPM传感器芯片
 MOST5: 电子学芯片

项目目标、预期成果与考核指标表

项目目标	预期成果名称	预期成果类型	对应的课题	考核指标				考核方式 (方法)及 评价手段
				指标名称	立项时已有 指标值/状态	中期指标值/状态	完成时指标值/状态	
(1) 研究新型超导腔(基于铌三锡、铁基超导体等下一代射频超导材料)、等离子体尾场加速正电子等关键技术; (2) 研发低功耗、快读出和高定时精度的硅像素传感器芯片,研发高颗粒度、高能量分辨的全吸收型电磁量能器,研制硅像素传感器和全吸收型电磁量能器的样机,研发多通道无线数据传输原型系统。	超导腔	√新技术 √新方法 √工程工艺 √论文	课题1: 加速器前沿技术研究	品质因数	/	5×10^6	$0.8-2 \times 10^7$	现场测试
	等离子体尾场加速正电子	√新原理 √新技术 √论文	课题1: 加速器前沿技术研究	能量转换效率	1%	10%	30%	
				能散	20%	10%	5%	
				发射度增长	10倍	2倍	50%	
	硅像素探测器	√新技术 √论文 √发明专利	课题2: 硅像素探测器和无线数据传输技术	硅像素顶点探测器样机位置分辨	约5微米	小于5微米	3微米	
				硅像素顶点探测器样机定时精度	3微秒	1微秒	100 纳秒	
				硅像素顶点探测器样机功耗	/	150mW/cm ²	100mW/cm ²	
				HVCMS径迹探测器样机的位置分辨	/	10微米	10微米	
				HVCMS径迹探测器样机的定时精度	/	100纳秒	10纳秒	
				HVCMS径迹探测器样机的功耗	/	500mW/cm ²	200mW/cm ²	
	无线传输技术	√新技术 √新方法 √论文	课题2: 硅像素探测器和无线数据传输技术	多通道无线数据传输原型系统, 总传输带宽	/	/	≥30Gbps	同行专家评议
	全吸收型电磁量能器	√新技术 √新方法 √论文	课题3: 全吸收型电磁量能器技术	电磁能量分辨	/	模拟中对1-60 GeV电磁簇射达 $3-4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ 的能量分辨和1.5%的线性度	模拟中对1-60 GeV电磁簇射达 $3-4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ 的能量分辨和1.5%的线性度	
				喷注能量分辨	/	/	模拟中喷注能量分辨3-4%	
MIP探测器效率				/	/	高于95%		