

国家重点研发计划 “大科学装置前沿研究”

高能加速器关键技术研究 年度会议报告

项目负责人：王建春

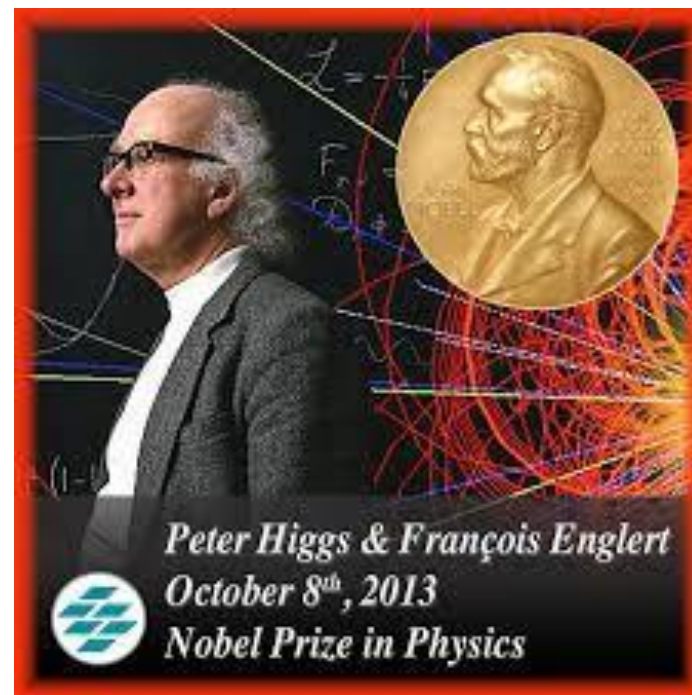
上海硅酸盐研究所, 2025年5月28日



报告提纲

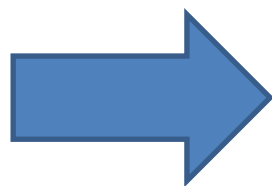
- 项目背景、研究内容、任务分解
- 各项任务进展亮点
- 进度安排和重要日程
- 研究团队与经费使用情况
- 人才培养和科研交流
- 小结

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

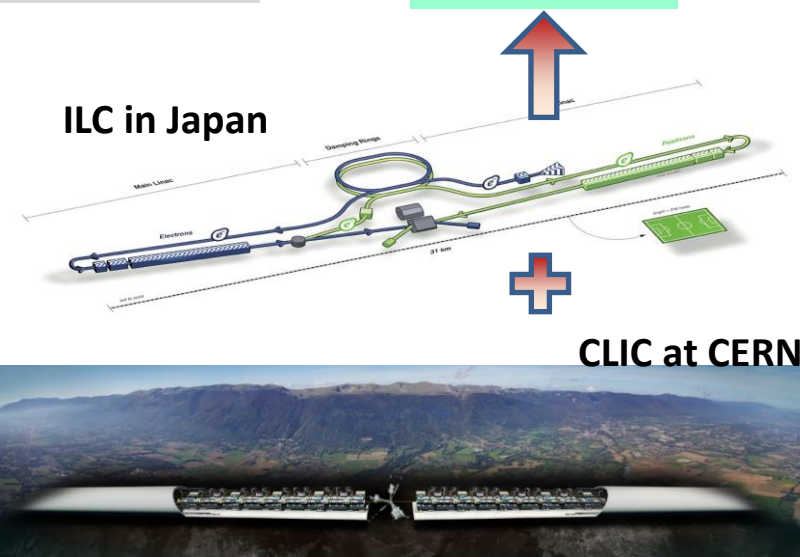
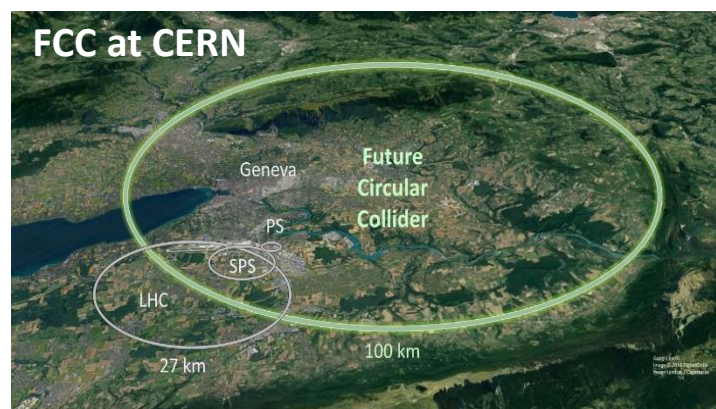
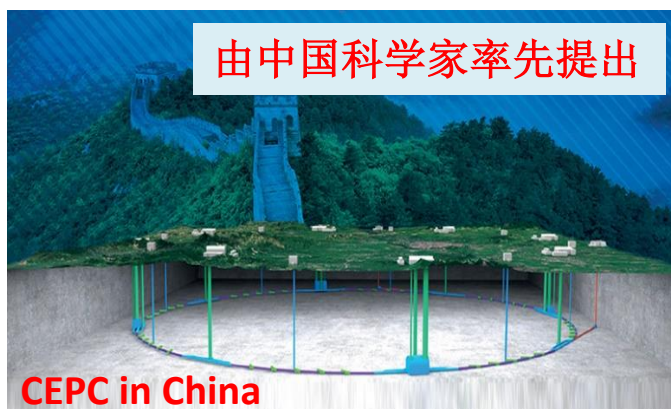
正负电子希格斯工厂的国际竞争



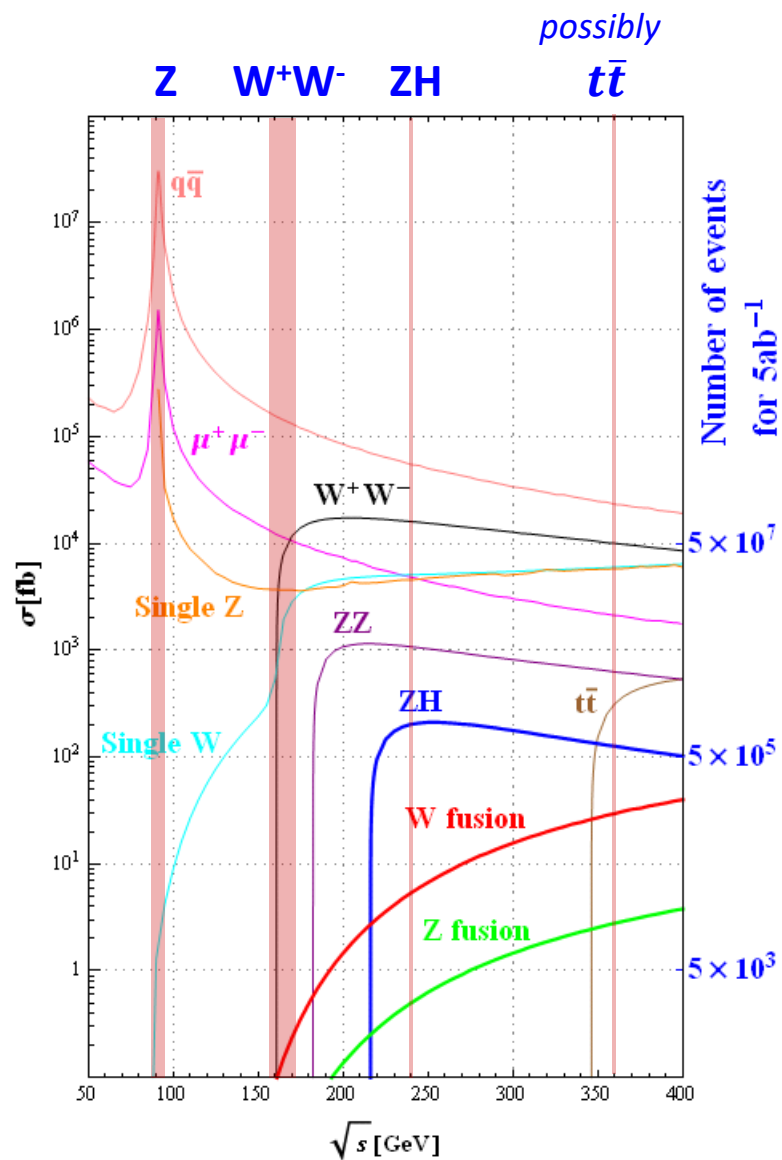
- ❑ 2013和2016年的香山会议：CEPC 是实现中国加速器物理发展的**最佳历史机遇和途径**
- ❑ 2020年欧洲粒子物理战略规划：“An electron-positron Higgs factory is the **highest-priority** next collider”
- ❑ 2022年ICFA：“a Higgs factory as the **highest priority** for realizing the scientific goals of particle physics”

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**

四个团队相互合作，也**激烈竞争**



CEPC运行计划和物理目标



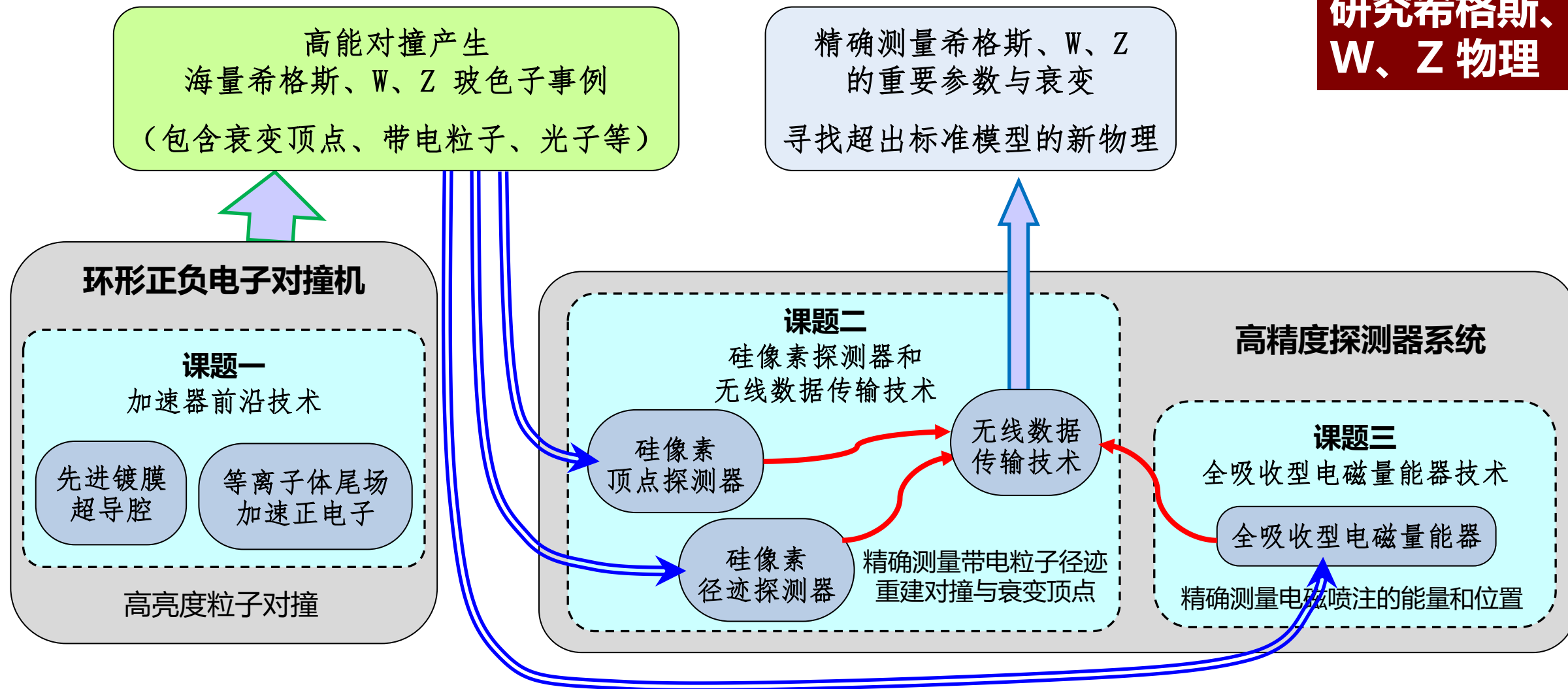
Operation mode		ZH	Z	W ⁺ W ⁻	<i>tt̄</i>
$\sqrt{s}$ [GeV]		~240	~91	~160	~360
Run Time [years]		10	2	1	~5
30 MW	$L / \text{IP} [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$	5.0	115	16	0.5
	$\int L dt [\text{ab}^{-1}, 2 \text{ IPs}]$	13	60	4.2	0.6
	Event yields [2 IPs]	2.6×10^6	2.5×10^{12}	1.3×10^8	4×10^5
50 MW	$L / \text{IP} [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$	8.3	192	26.7	0.8
	$\int L dt [\text{ab}^{-1}, 2 \text{ IPs}]$	22	100	6.9	1
	Event yields [2 IPs]	4.3×10^6	4.1×10^{12}	2.1×10^8	6×10^5

1-year Z in the first 10-year operation
@ Low Luminosity $\sim 26 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{IP}$

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

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	指标
课题一： 加速器前沿技术	360 万	新材料镀膜超导腔	频率4-8GHz，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3μm ，定时精度100ns，功耗100mW/cm ²
		高压CMOS径迹探测器	位置精度10 μ m，定时精度10ns，功耗200mW/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 |

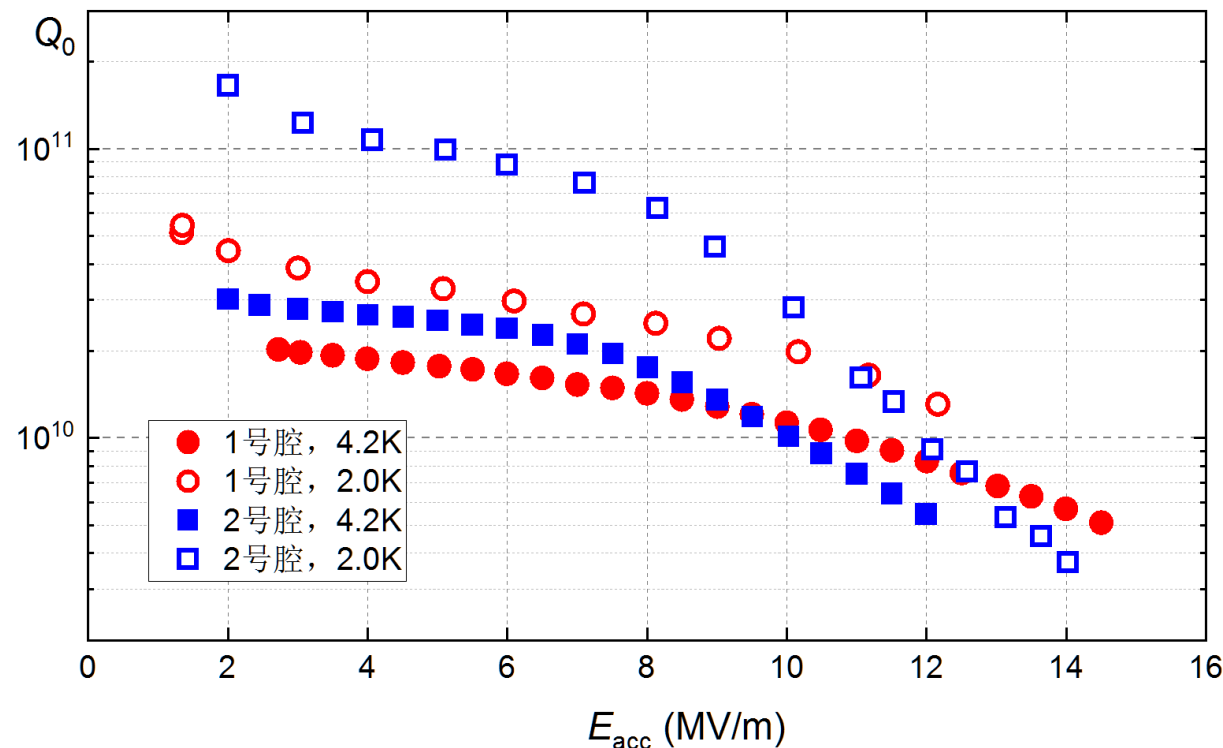
感谢各位专家 在项目研究和其它方面给予全方位的指导！

课题一：基于下一代射频超导材料的镀膜超导腔

- 铌三锡镀膜超导腔的性能获得了大幅度提高，1.3 GHz铌三锡镀膜超导腔低场下的品质因数达到了 3.0×10^{10} @4.2K（与Cornell、FNAL相当）
- 4~8 GHz铌三锡超导腔的设计已完成，下一步将开展制造、镀膜和性能测试
- 进行了铌三锡镀膜超导腔的传导冷却（无液氦）测试，取得成功

细节请见 沙鹏 的报告

1.3 GHz铌三锡镀膜超导腔测试结果（液氮浸泡）



铌三锡镀膜超导腔的传导冷却测试

课题一：等离子体尾场正电子加速机制研究

探索多种正电子加速机制，并对比较其加速效果

	空泡机制	中空等离子体通道中正负电子束重合模式	中空等离子体通道中非对称模式
• 电荷量	~100pC	~1nC	~1nC
• 加速梯度	>1GeV/m	>1GeV/m	>5GeV/m
• 能散	~1%	<1%	~1%
• 发射度	~mm-mrad	~mm-mrad	~mm-mrad
• 能量效率	~30%	~50%	~30%
• 其他	不需要特殊等离子体结构 可同时加速正负电子束	需要外部聚焦	在电荷量、梯度上具有优势

Shiyu Zhou *et al.*, arXiv:2211.07962.
Shiyu Zhou *et al.*, PRAB 25, 091303 (2022)
Shiyu Zhou *et al.*, PRL 127, 174801 (2021) (Editors' Suggestion)

穿越真空-等离子体界面对PWFA正电子加速的影响

PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 28, 031301 (2025)

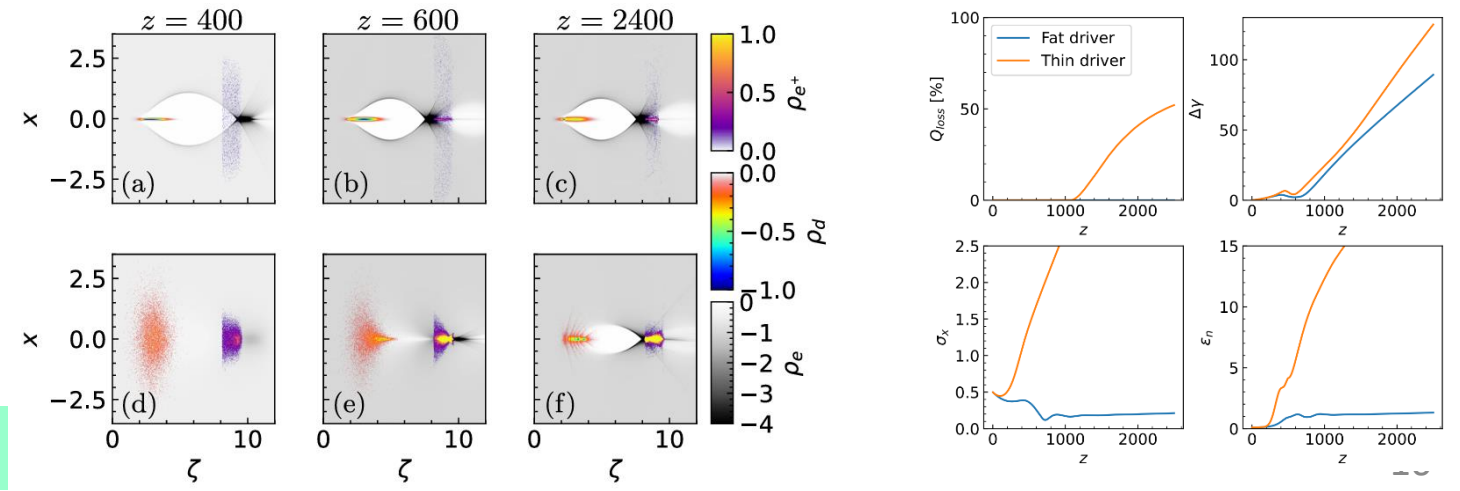
Vacuum-plasma transition effect on positron acceleration in the bubble regime plasma wakefield accelerators

Jia Wang[✉], Ming Zeng^{✉,*}, Dazhang Li^{✉,†} and Jie Gao
*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 100049 Beijing, China
and University of Chinese Academy of Sciences, 100049 Beijing, China*

(Received 25 July 2024; accepted 15 August 2024)

细节请见 李大章 的报告

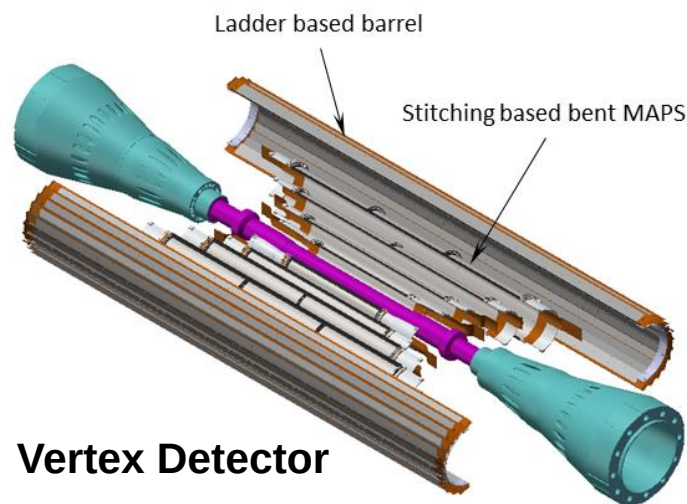
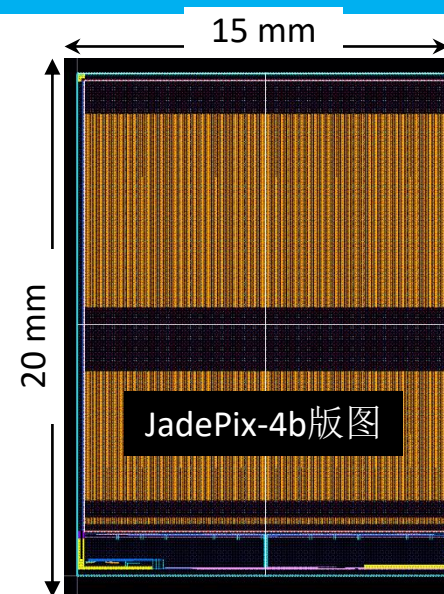
基于BEPCHII直线加速器的等离子体加速实验装置改造进展



课题二：硅像素顶点探测器

细节请见 董明义 的报告

- 完成了JadePix-4b的版图设计
 - 像素尺寸： $20 \times 30 \mu\text{m}^2$, 长条形有利于提高 $r\phi$ 方向分辨
 - 芯片尺寸： $20 \times 15 \text{ mm}^2$ (896 $\times$ 480像素)
 - 2025年5月5日提交了最终设计版本 开始流片 (TJ-180nm)
- 基于TaichuPix3 正在设计 TaichuPix-**Stitching**芯片
- 运用卷曲TaichuPix-Stitching芯片设计了**基线顶点探测器**

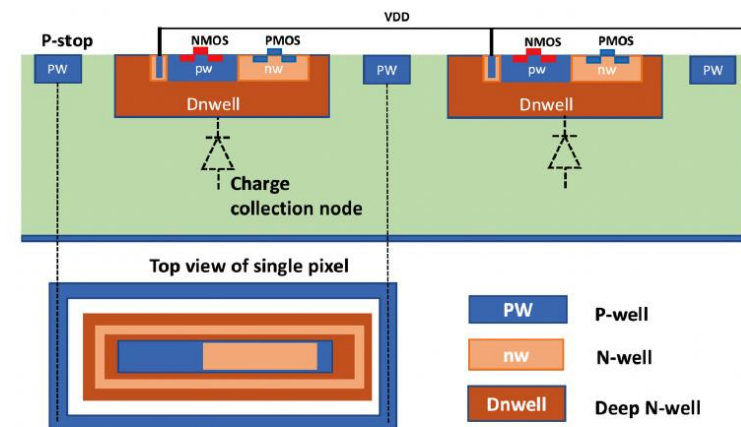


Reserved area	Pixel Matrix 1	Power switches	Pixel Matrix 2	Power switches	Pixel Matrix 3	Power switches	Pixel Matrix 4	Power switches	Pixel Matrix 5	Power switches	Pixel Matrix 6	Power switches	Pixel Matrix 7	Power switches
	Biasing		Biasing		Biasing		Biasing		Biasing		Biasing		Biasing	
	Matrix Periphery		Matrix Periphery		Matrix Periphery		Matrix Periphery		Matrix Periphery		Matrix Periphery		Matrix Periphery	
I/O pads														
Sealring & reserved area														

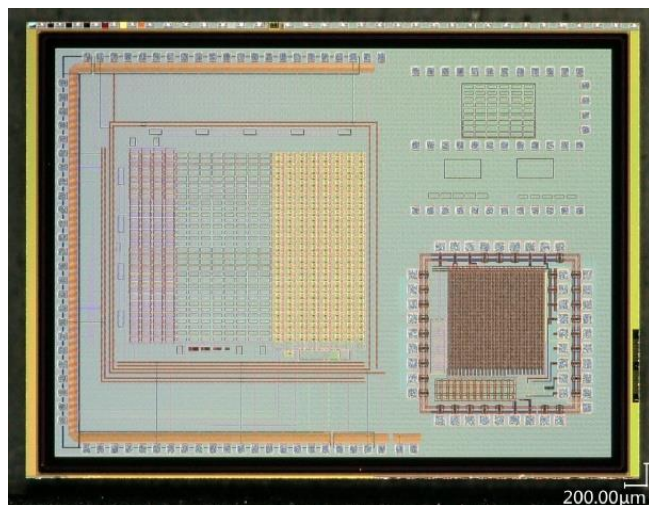
Half RSU (Repeated Sensor Unit)

课题二： 高压-CMOS硅像素径迹探测器

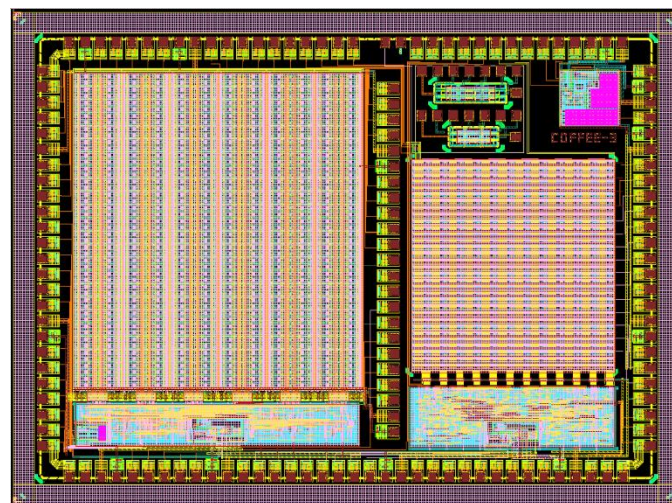
- 完成了首个55nm工艺的高压CMOS**原理验证芯片**COFFEE2的制备和性能测试
- 今年1月提交了COFFEE3**全功能芯片**的设计，实现双阵列两种读出策略；已完成流片，即将开始各种测试
- 预期可实现10微米空间分辨目标



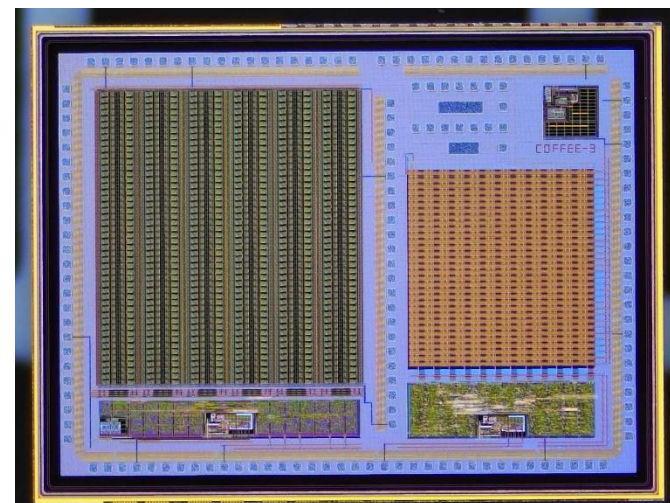
55nm 高压CMOS工艺截面示意图



COFFEE2 芯片照片



COFFEE3 芯片版图



COFFEE3 芯片照片

细节请见 董明义 的报告

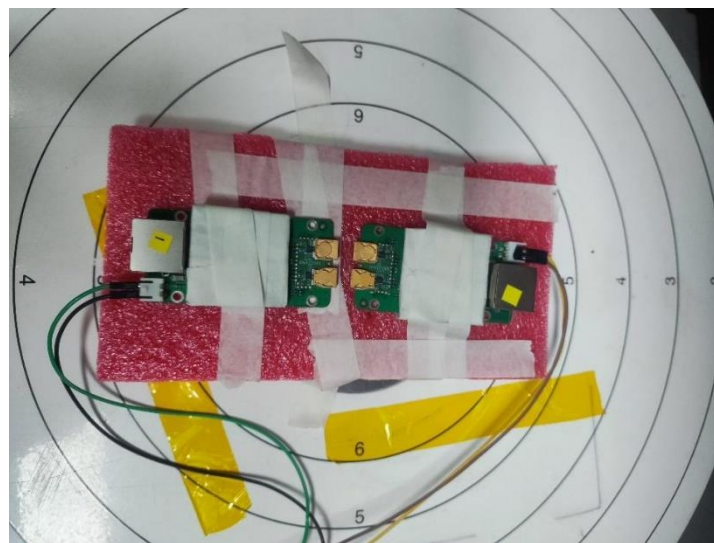
课题二：无线数据传输技术

- 联合中科院微电子所、意法半导体公司、华为公司的专业团队，通过多次讨论，技术路径优化，最终构建了可批量获取的**毫米波系统解决方案**
- 在完成单通道样机的基础上，进一步完成了核心芯片耐辐照性能测试，并完成小批量生产
- 今年内将完成小型化的多**通道毫米波系统集成**

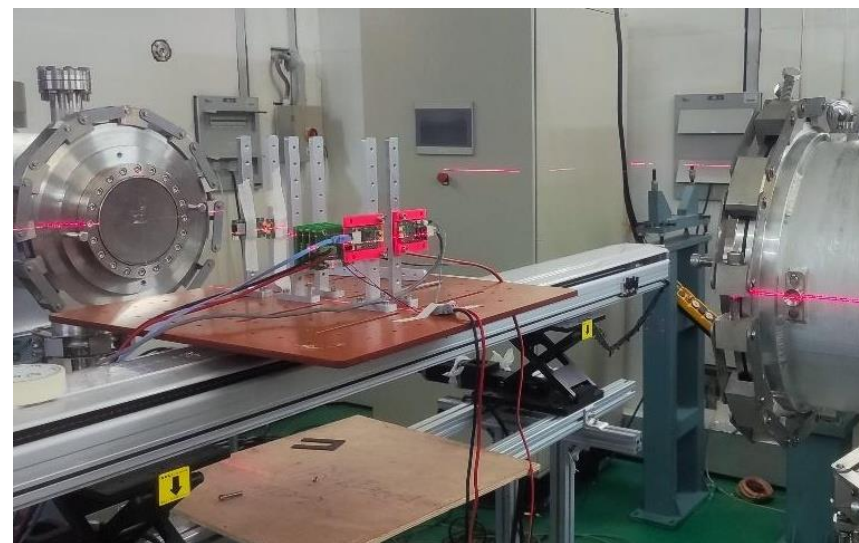
细节请见 **胡俊** 的报告



定制的单通道毫米波收发模组



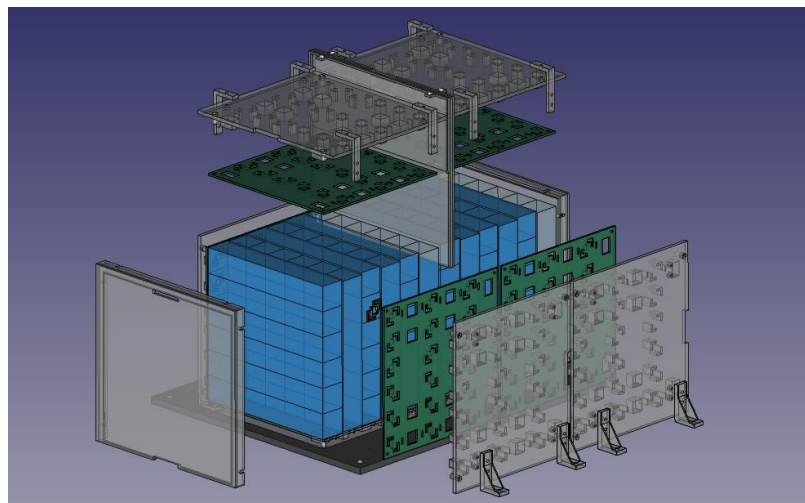
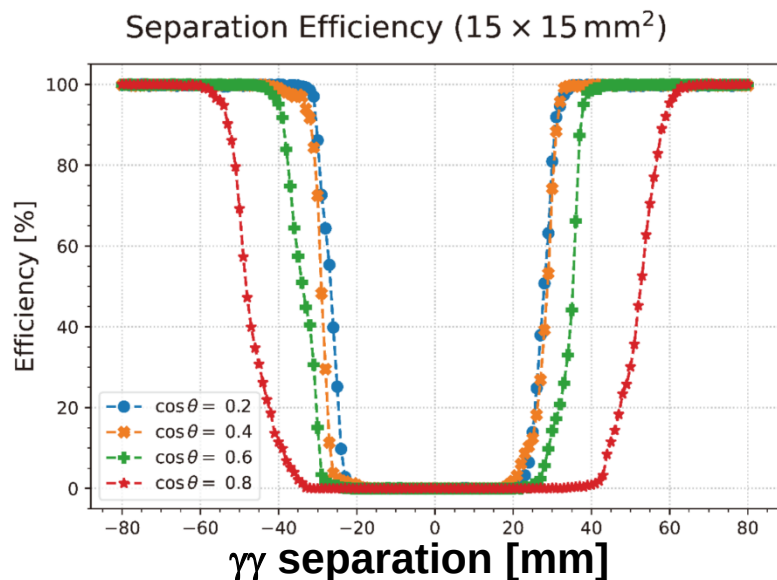
总剂量测试 (X光机)



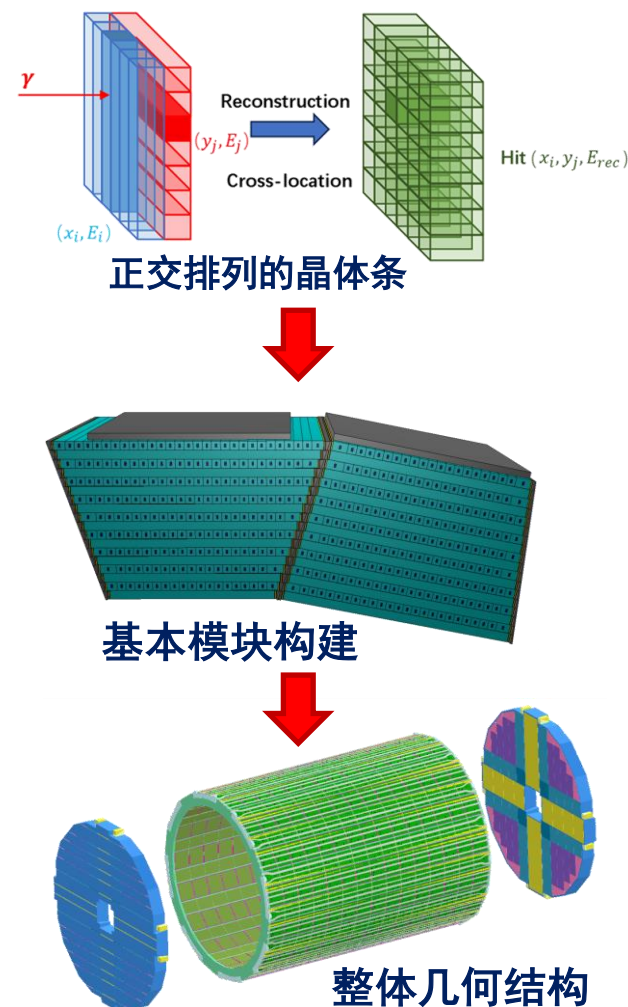
非电离能损测试 (白光中子源)

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区分，双光子末态希格斯粒子质量的精确重建
- ❑ 设计和研制晶体与硅光电倍增管组成的**灵敏探测器模块**，开展性能研究



晶体样机技术设计工程图

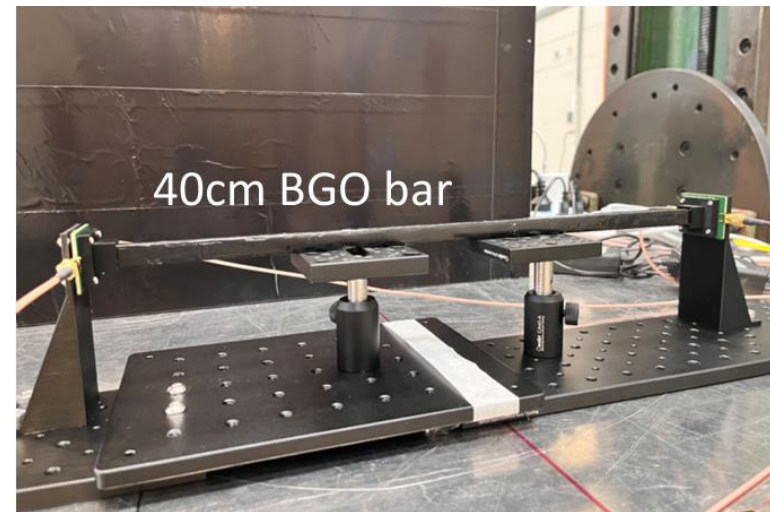
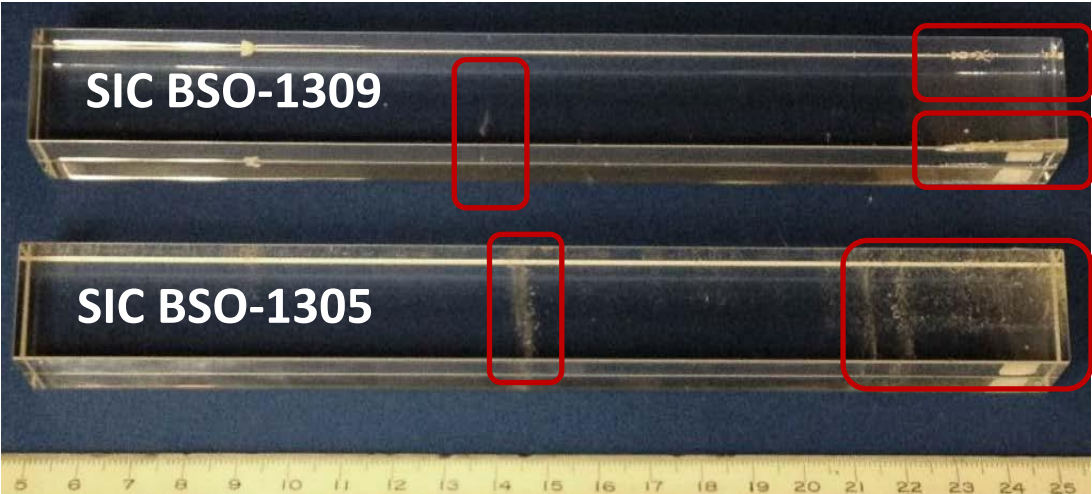


细节请见 杨海军 的报告

课题三： 新型大尺寸闪烁晶体研制

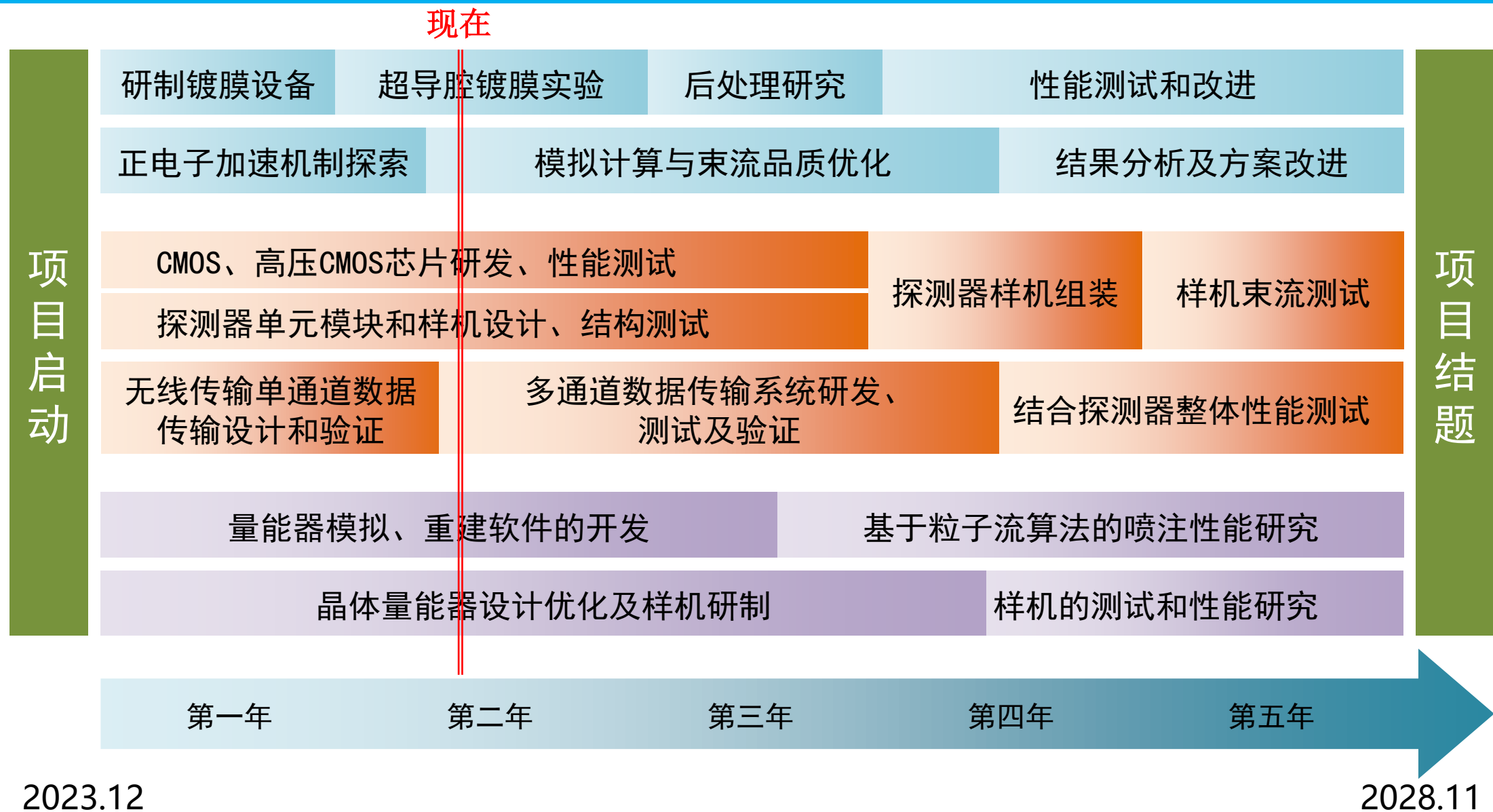
- 利用CERN 10 GeV π^- 束流对**长条 BGO 晶体**进行性能测试；批量研究晶体条的性能一致性
- 成功生长高质量的**BGO掺杂晶体**
- 研制性价比更高的大尺寸新型**BSO晶体**，在**高效制备**方面取得突破

Parameters	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	Bi ₄ Si ₃ O ₁₂ (BSO)
ρ (g/cm ³)	7.13	6.8
λ_l (cm)	22.8	23.1
$n @ \lambda_{\max}$	2.15	2.06
τ_{decay} (ns)	300	100
$\lambda_{\max}$ (nm)	480	470
Cut-off λ (nm)	310	300
Light Output (%)	100	20
Melting point (°C)	1050	1030
Raw Material Cost (%)	100	47



细节请见 陈俊锋 的报告

总进度安排



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)
- 2025.11 进展交流会议 (北京)
- 2025.12 年度技术进展报告
- 2026.05 中期评估准备会议 (北京)
- 2026.06 中期进展报告
- 2026.07 中期评估会议 (武汉?)
- 2026.11 进展交流会议 (北京)
- 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 (北京)
- 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 (杭州?)

经费使用情况

课题 / 单位	预算总额	间接经费	累计收入	累计支出	使用进度
课题一	360.00	80.50	172.80	126.54	35.2%
课题二	936.00	197.00	449.28	195.52	20.9%
高能物理研究所	648.00	136.00	311.04	117.27	18.1%
浙江大学	180.00	38.00	86.40	60.76	33.9%
华中师范大学	108.00	23.00	51.84	17.49	16.2%
课题三	504.00	109.00	241.92	147.50	29.3%
上海交通大学	144.00	32.00	69.12	34.79	24.2%
高能物理研究所	144.00	30.00	69.12	30.91	21.5%
上海硅酸盐研究所	144.00	31.00	69.12	52.02	36.1%
中国科学技术大学	72.00	16.00	34.56	29.78	41.4%
项目总体	1800.00	386.50	864.00	469.56	26.1%

单位：万元

科目名称	预算	累计支出	使用进度
一、直接费用	1413.50	364.60	25.8%
1、设备费	160.90	18.90	11.8%
2、业务费	1097.60	203.26	18.5%
3、劳务费	155.00	142.44	91.9%
二、间接费用	386.50	104.96	27.2%

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: 周勇

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

■ 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
- 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
- 中国科学技术大学: 张云龙

以及项目、课题、团队的支撑人员，
博士后、研究生、本科生等

实际参加研发工作的人员情况

课题	单位	职工	博士后	学生及其他
课题一	高能物理研究所	6+2	1	2
课题二	高能物理研究所	6+7	2	3
	浙江大学	1		2
	华中师范大学	1+1		1
课题三	上海交通大学	1		3
	高能物理研究所	2	2	2
	上海硅酸盐研究所	1+6		
	中国科学技术大学	1+1	1	1
项目总体		19+17	6	14

需要定期
及时更新

人才培养

姓名	备注
周诗宇	从清华引进中科院“百人”
张慧	从德国KIT引进中科院“百人”
吴天涯	博士后出站，任南昌大学副教授
董若石	博士后出站，加入比亚迪公司
项治宇	博士后出站，将赴中南大学任教
博士毕业 6人	
培养研究生、本科生多人	

会议交流和文章发表统计

包含不同课题在内的



		课题一	课题二	课题三	项目	合计
国际会议	大会报告	1	3	2	4	10
	分会报告	5	14	11		30
	会议墙报		5	5		10
国内会议	大会报告		4	3	3	10
	分会报告		5	2		7
	会议墙报			1		1
文章发表		2	2	2		6

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	❑ 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

❑ 三个课题研发工作按计划进展良好

- ❑ 课题一： 铌三锡超导腔镀膜实验，传导冷却超导腔的测试；等离子体尾场加速正电子方案设计已达到中期考核指标
- ❑ 课题二： 完成了JadePix-4b的设计，交付流片；TaichuPix完成了性能研究，时间分辨满足指标要求；TaichuPix-Stitching 正在设计中；HV-CMOS完成原理验证；全功能芯片完成流片，即将进行测试；无线传输研究构建了毫米波系统解决方案，完成了核心芯片耐辐照性能测试，将完成多通道毫米波系统集成
- ❑ 课题三： 开发出全新粒子流算法CyberPFA；研制出灵敏探测器模块；成功生长高质量的Ce掺杂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，每年~5月份的项目会议由各合作单位轮流主办
- ❑ 加强在国际国内会议上的交流和文章发表

感谢各位领导各位专家！