

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 年度会议报告

项目负责人：王建春

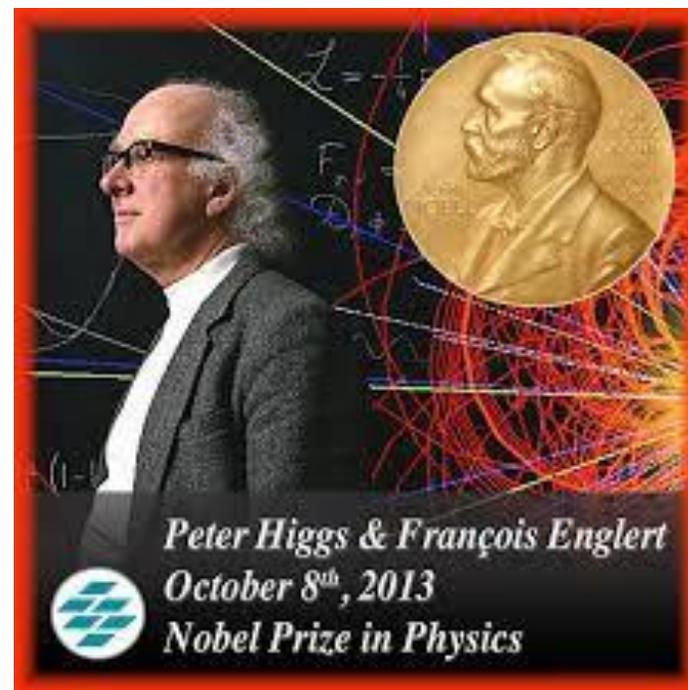
中国科学院高能物理研究所, 2024年11月29日



报告提纲

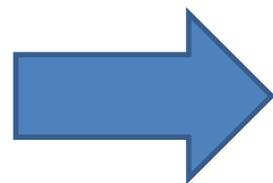
- **项目背景、研究内容、任务分解**
- **研究团队与经费使用情况**
- **重要日程和进度安排**
- **2024年各项任务进展亮点和下一步的计划**
- **人才培养和科研交流**
- **小结**

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



中国



欧盟



国际未来加速器委员会



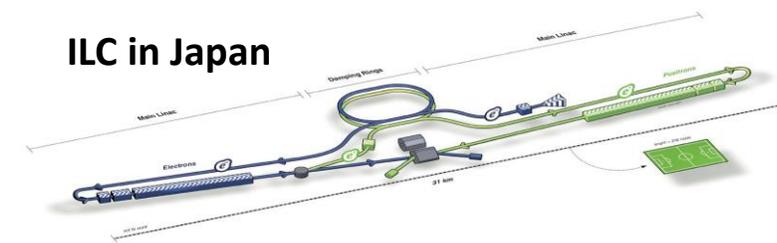
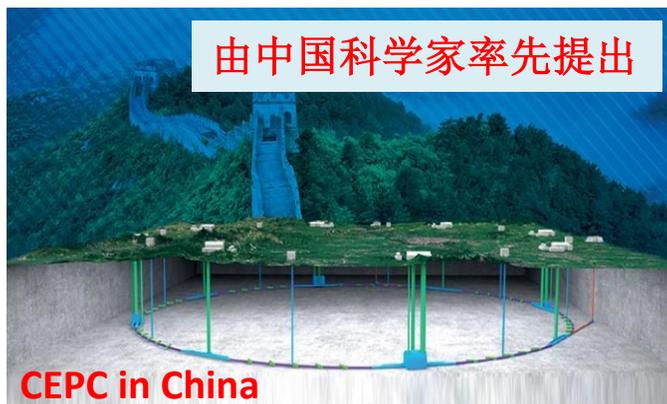
美国

P5 Report, USA, 2023

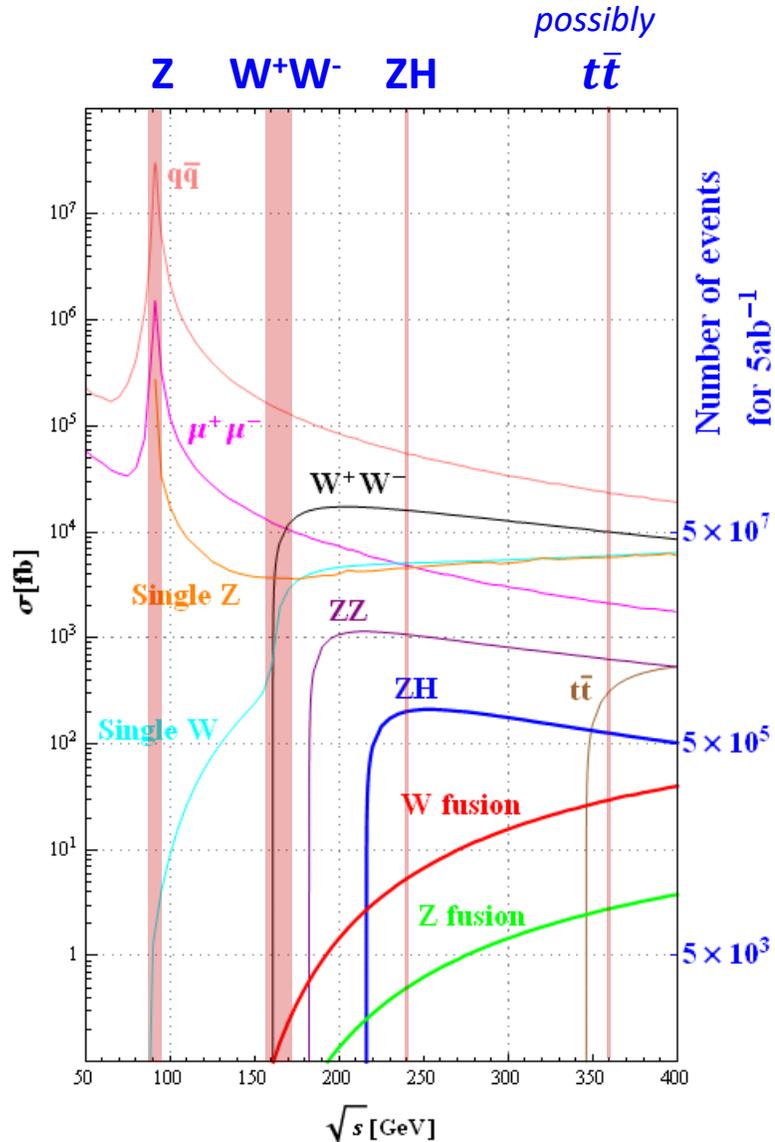
- ❑ 2013和2016年的香山会议：CEPC是实现中国加速器物理发展的**最佳历史机遇和途径**
- ❑ 2020年欧洲粒子物理战略规划：“An electron-positron Higgs factory is the **highest-priority next collider**”
- ❑ 2022年ICFA：“a Higgs factory as the **highest priority** for realizing the scientific goals of particle physics”

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**



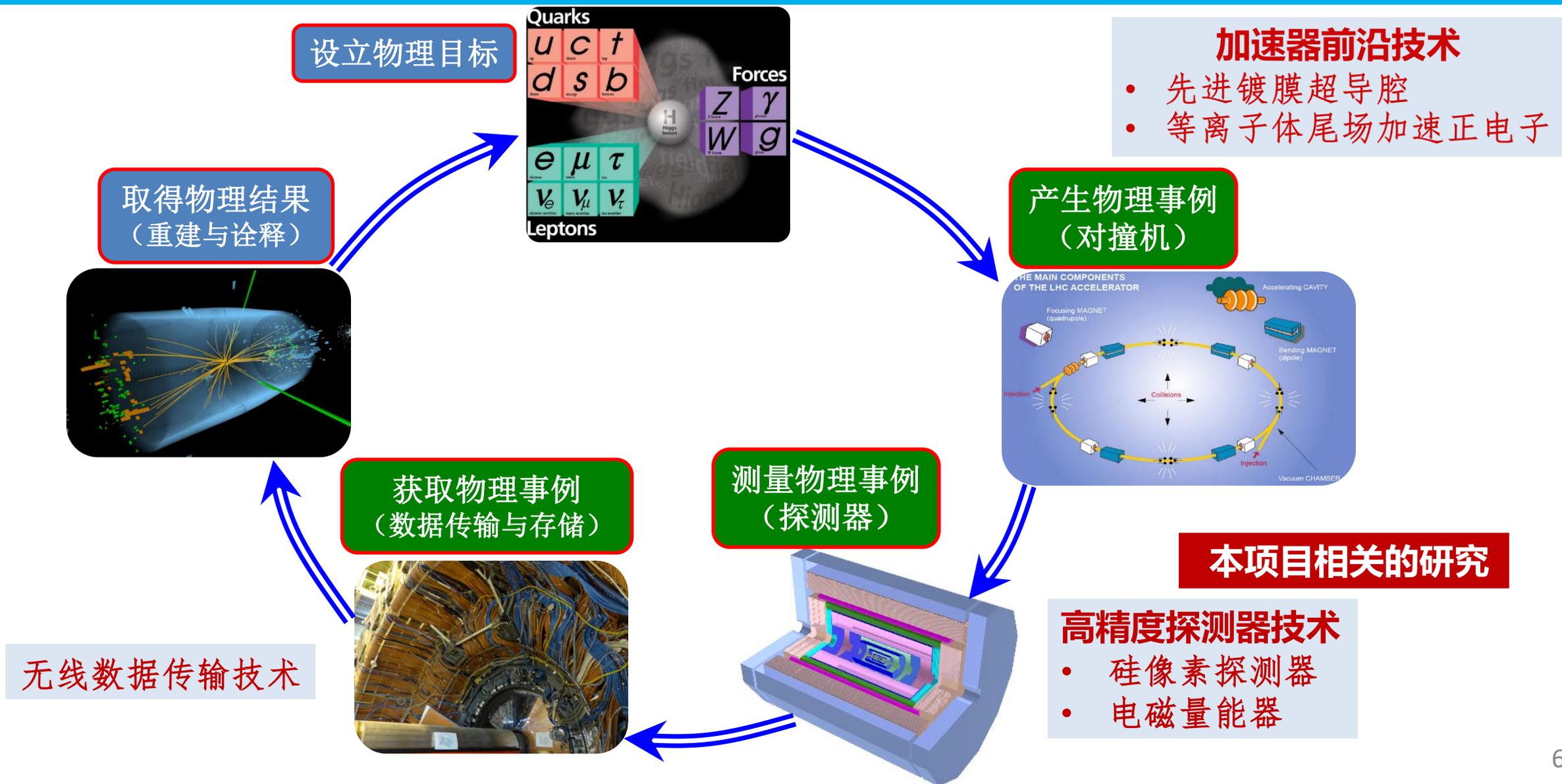
CEPC运行计划和物理目标



Operation mode		ZH	Z	W+W-	tt
\sqrt{s} [GeV]		~240	~91	~160	~360
Run Time [years]		10	2	1	~5
30 MW	L / IP [$\times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	5.0	115	16	0.5
	$\int L dt$ [ab^{-1} , 2 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 / IP [$\times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	8.3	192	26.7	0.8
	$\int L dt$ [ab^{-1} , 2 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

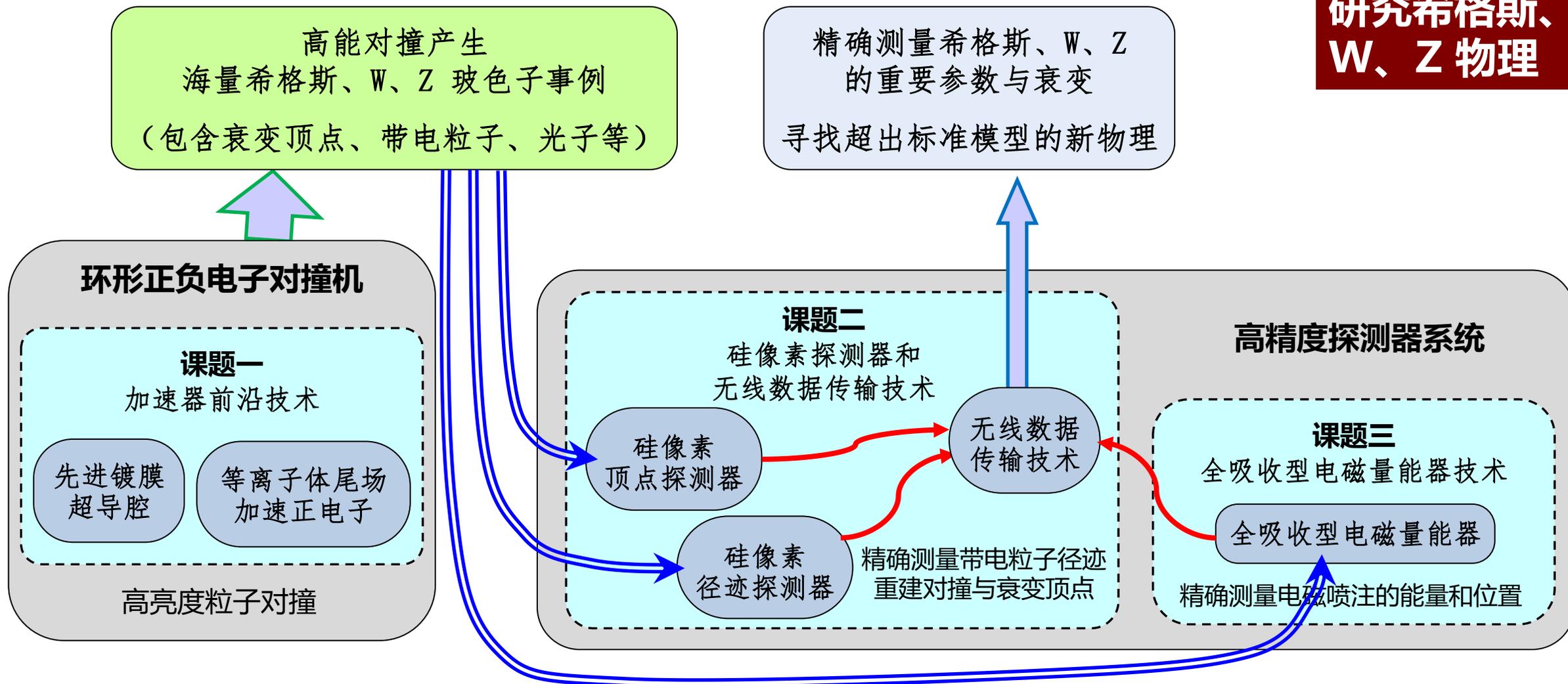
海量的Higgs, W, Z, 甚至顶夸克事例, 为高精度的希格斯物理和电弱物理过程的精确测量, 味物理和QCD的研究, 以及寻找新物理带来机遇

粒子物理研究的生物链



项目研究目标和任务分解

研究希格斯、
W、Z 物理



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

实际参与但未能列入人员

■ 课题一

- 高能物理研究所: 周诗宇

■ 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
- 浙江大学:
- 华中师范大学: 孙向明

■ 课题三

- 上海交通大学:
- 高能物理研究所:
- 上海硅酸盐研究所: 邓明雪、李文朋、齐雪君、陈雷、陆裕贵
- 中国科学技术大学: 张云龙、刘建北

尽快完成统计

实际参加人员情况

课题	单位	职工	博士后	学生及其他
课题一	高能物理研究所	7	0	3
课题二	高能物理研究所	13		
	浙江大学	1		
	华中师范大学	2		
课题三	上海交通大学	1		
	高能物理研究所	2		
	上海硅酸盐研究所	6	0	1
	中国科学技术大学	3		

尽快完成统计

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$3\mu\text{m}$ ，定时精度100ns，功耗100mW/cm ²
		高压CMOS径迹探测器	位置精度 $10\mu\text{m}$ ，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%

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	71.01	19.7%
课题二	936.00	197.00	449.28	147.30	15.7%
高能物理研究所	648.00	136.00	311.04	89.57	13.8%
浙江大学	180.00	38.00	86.40	41.47	23.0%
华中师范大学	108.00	23.00	51.84	16.26	15.1%
课题三	504.00	109.00	241.92	84.03	16.7%
上海交通大学	144.00	32.00	69.12	34.01	23.6%
高能物理研究所	144.00	30.00	69.12	5.76	4.0%
上海硅酸盐研究所	144.00	31.00	69.12	15.14	10.5%
中国科学技术大学	72.00	16.00	34.56	29.12	40.4%
项目总体	1800.00	386.50	864.00	302.34	16.8%

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	207.75	14.7%
1、设备费	160.90	11.83	7.4%
2、业务费	1097.60	95.92	8.7%
3、劳务费	155.00	100.00	64.5%
二、间接费用	386.50	94.51	24.5%

重要日程

- 2024.07.02 项目启动会议
- 2024.11.29 2024年度会议
- 2024.12 2024年度技术进展报告
- 2025.05 进展交流会议 (地点?)
- 2025.11 2025年度会议
- 2025.12 2025年度技术进展报告
- 2026.05 进展交流会议
- 2026.10 中期评估准备会议
- 2026.11-12 中期进展报告
- 2026.11-12 中期评估会议
- 2027.05 进展交流会议
- 2027.11 2027年度会议
- 2027.12 2027年度技术进展报告
- 2028.05 进展交流会议
- 2028.09 结题准备会议
- 2026.11-12 项目结题报告
- 2026.11-12 项目终期评审会议

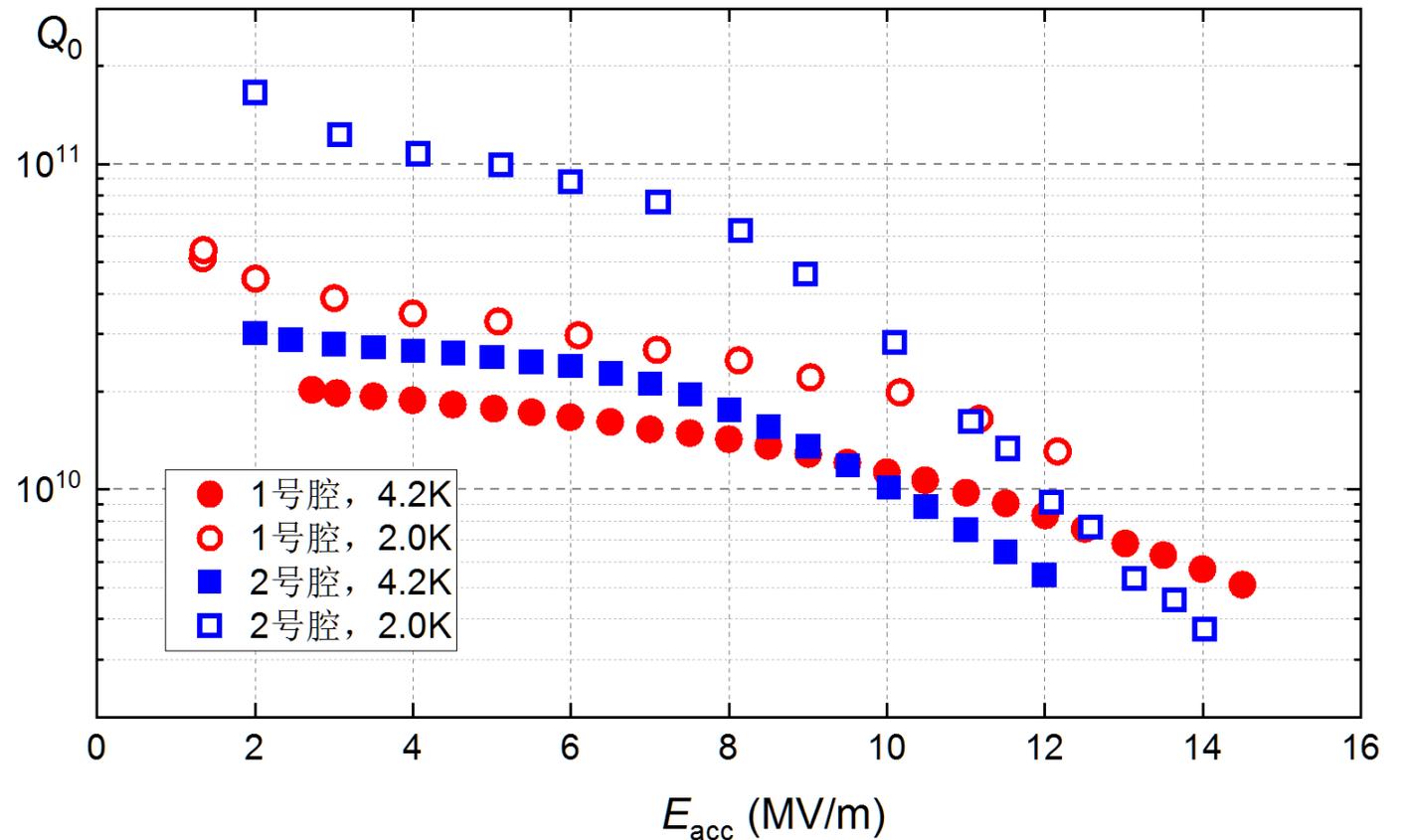
总进度安排



课题一：基于下一代射频超导材料的镀膜超导腔

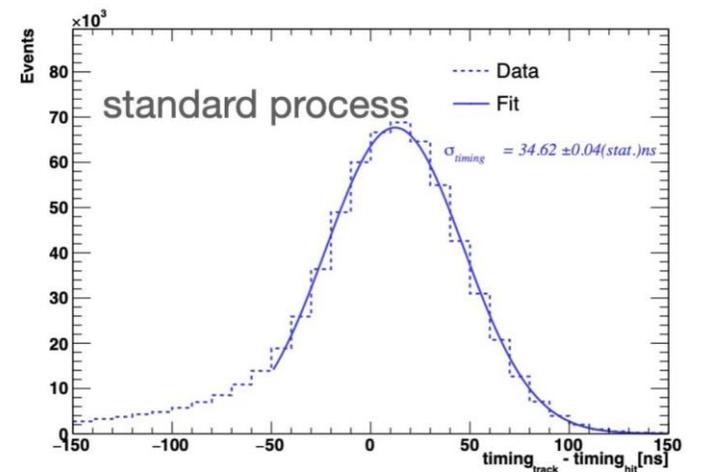
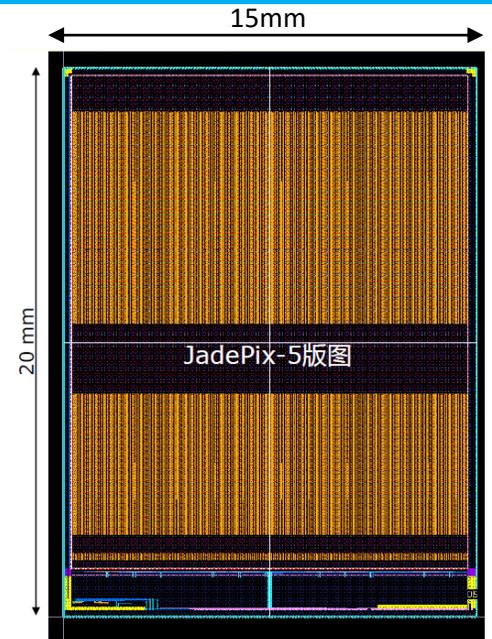
- 铌三锡镀膜超导腔的性能获得了大幅度提高，1.3 GHz铌三锡镀膜超导腔低场下的品质因数达到了 3.0×10^{10} @4.2K（与Cornell、FNAL相当）。
- 下一步将进行4~8 GHz铌三锡超导腔的镀膜实验和性能测试。

1.3 GHz铌三锡镀膜超导腔测试结果



课题二：硅像素顶点探测器

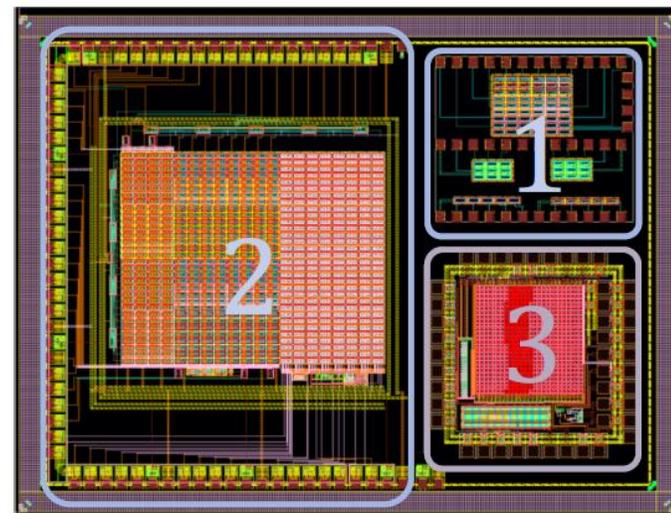
- 完成了JadePix-5的版图设计
 - 芯片尺寸： $20 \times 15 \text{ mm}^2$ (896 \times 480像素)
 - 升级了HIT驱动的像素读出逻辑，读出时间减小到1 μs
 - 解决了 $20 \times 15 \text{ mm}^2$ 大面积带来的电压衰减、时序裕量等问题，开展阵列外围电路的低功率优化设计
- 完成了TaichuPix-3测试，其时间分辨率好于50ns，满足指标要求
- 明年初将与法国IPHC合作进行JadePix-5得流片 (TJ-180nm)
- 并开始顶点探测器样机的设计工作



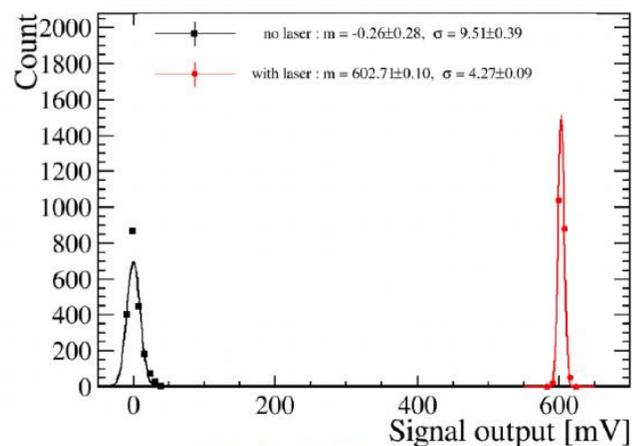
TaichuPix时间分辨

课题二：高压-CMOS硅像素径迹探测器

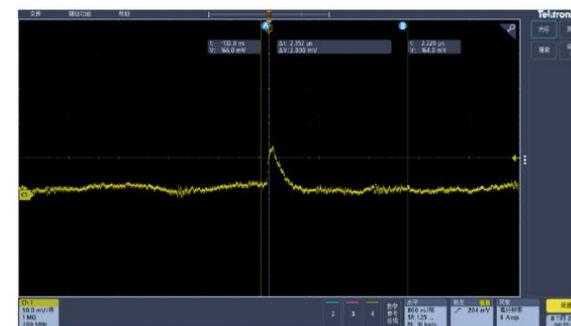
- 完成了首个55nm工艺高压CMOS原理验证芯片COFFEE2的设计、流片和初步测试
 - 2023年8月提交面积 $4 \times 3 \text{ mm}^2$ 的MPW流片
 - 初步测试观察到对激光信号、放射源信号的响应
 - 获得了预期结果，实现工艺验证
- 将于2025年1月提交下一版HVCMOS流片（COFFEE3，全功能芯片设计）
- 同时进行更多的COFFEE2测试研究



COFFEE2芯片版图



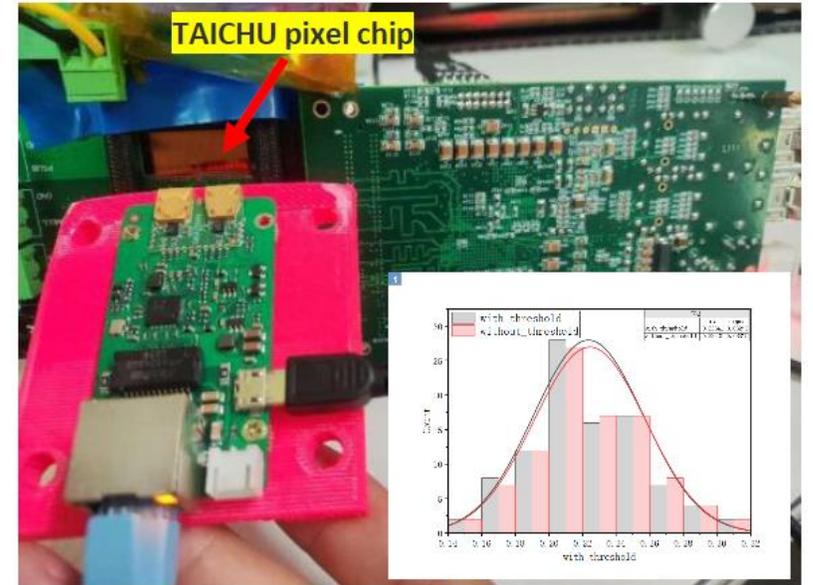
激光信号响应



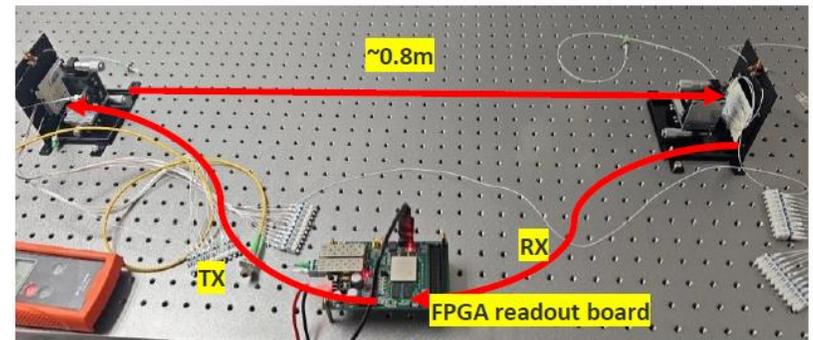
^{55}Fe 放射源响应

课题二：无线数据传输技术

- 基本解决了毫米波技术在探测器应用中传输距离、穿透性、与探测器的干扰以及通道间的串扰等关键问题
- 研发远距离毫米波传输模块，实现天线尺寸及物质量的显著减小，极大拓展了信号传输距离
- 完成了短距离无线光传输的系统搭建及误码率测试等
- 将进一步完成性能评估
- 开展多通道集成以及与探测器结合的测试



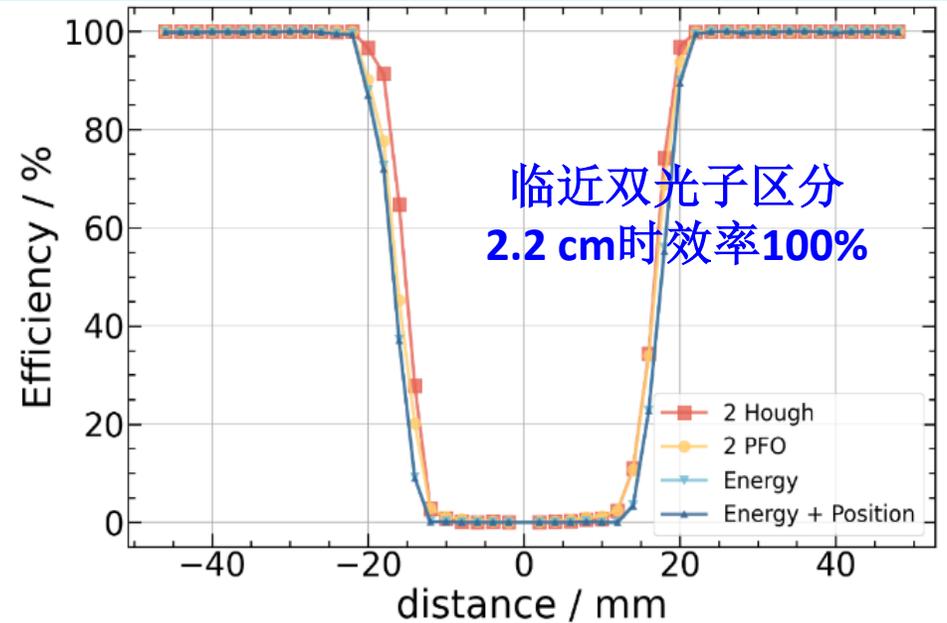
与TAICHU3像素芯片干扰测试



单通道回环测试

课题三：全吸收型电磁量能器技术

- ❑ 开发全新粒子流算法CyberPFA, 解决簇射重叠和混淆问题, 成功用于CEPCSW和分析
- ❑ 大尺寸、高质量、低成本BSO的高效制备取得突破
- ❑ 束流测试研究长条 BGO 晶体的性能
- ❑ 继续开发模拟、重建和分析软件, 优化量能器设计并获取关键参数和性能
- ❑ 研制新型BSO晶体, 提升发光性能和尺寸, 开展晶体批量制备和测试
- ❑ 设计和研制晶体与硅光电倍增管组成的灵敏探测器模块, 开展性能研究等



人才培养

课题	单位	姓名	备注
课题一	高能物理研究所	周诗宇	从清华引进中科院“百人”
课题二	高能物理研究所	张慧	从德国KIT引进中科院“百人”
课题二	高能物理研究所	吴天涯	博士后出站，任南昌大学副教授
课题二	高能物理研究所	董若石	博士后出站，加入法国IPHC做博后
课题二	高能物理研究所	李淑琦	博士生毕业，获所长奖学金优秀奖，加入瑞士PSI做博后

尽快完成统计

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	6	6	4	17
	分会报告	1	11	5		17
	会议墙报		1			?
国内会议	大会报告	2	3		2	7
	分会报告	1	4	1		6
	会议墙报					
文章发表		1	2	1		4

尽快完成统计

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，均达到中期考核指标
- 课题二： JadPix-5完成了芯片设计，即将流片；TaichuPix完成了性能研究，时间分辨满足指标要求；HV-CMOS完成原理验证芯片测试，得到了预期结果，将在明年初做全功能芯片流片；无线传输研究搭建了多种技术的测试系统并完成了部分性能的测试
- 课题三： 在长条BSO晶体制备方面重要突破；开发出全新粒子流算法CyberPFA；完成束流测试，研究长条晶体的性能
- 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，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

会议日程安排

09:00-09:10	领导讲话	李煜辉	12:30-14:00	午餐	
09:10-09:40	重点专项总体进展	王建春	14:00-14:20	TaiChuPix 测试	张颖
09:40-10:10	“全吸收型电磁量能器技术” 进展	杨海军	14:20-14:40	HVCMOS设计和测试	李一鸣
10:10-10:30	新型晶体研制	陈俊锋	14:40-15:00	无线数据传输	胡俊
10:30-11:00	合影+茶歇		15:00-15:30	茶歇	
11:00-11:20	晶体和硅光电倍增管的性能测试	齐宝华	15:30-16:00	“加速器前沿技术研究” 进展	沙鹏
11:20-11:40	长条晶体量能器的重建算法: CyberPFA	郭方毅	16:00-16:20	等离子体尾场正电子加速	李大章
11:40-12:10	“硅像素探测器和无线数据传输技术” 进展	董明义	16:20-17:20	进展和未来规划讨论	王建春
12:10-12:30	高空间分辨 CMOS sensor 设计	卢云鹏	17:20	会议结束	

Backup Slides

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%		

CEPC探测器技术攻关

硅像素顶点探测器

- MOST1: 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读出原型机和性能研究
- MOST4: 像素读出时间投影室

电磁量能器

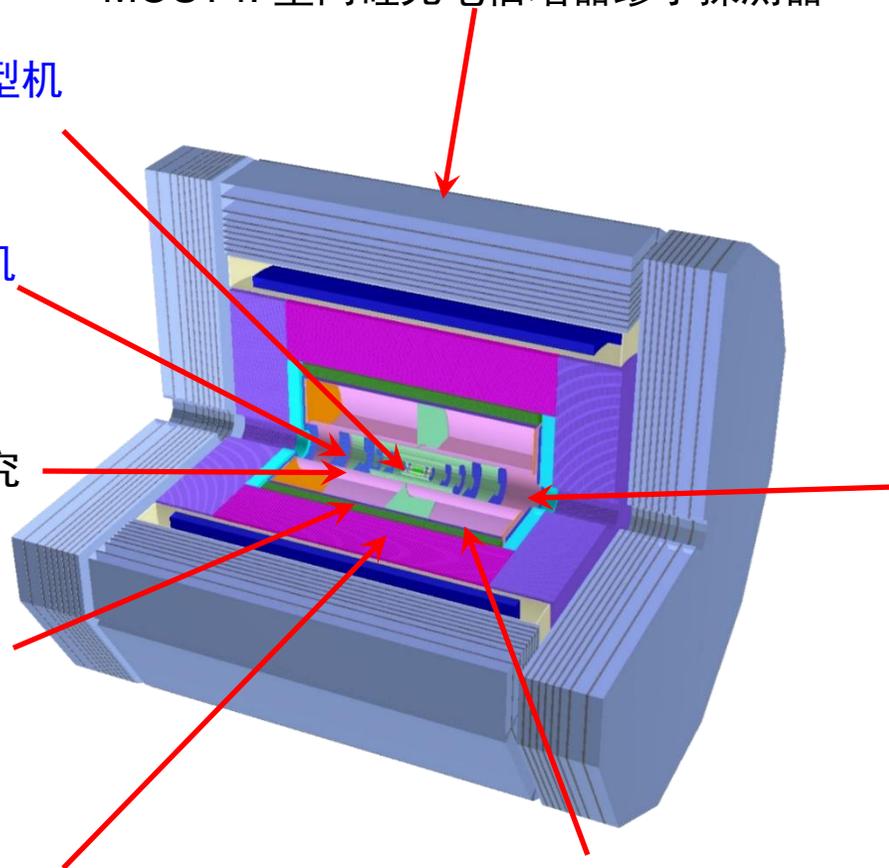
- MOST1: 取样性量能器性能研究
- MOST3: 全吸收型量能器原型机

强子量能器

- MOST1: 取样性量能器性能研究
- MOST2: 取样型量能器原型机

缪子探测器

- MOST4: 塑闪硅光电倍增器缪子探测器



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)

亮度量能器

其它相关研究

- MOST1: MDI本底研究
- MOST1: 切伦科夫探测器
- MOST3: 无线数据传输技术
- MOST4: 粒子种类鉴别漂移室

硅外径迹探测器

- MOST4: 基于AC-LGAD的时间探测器