

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

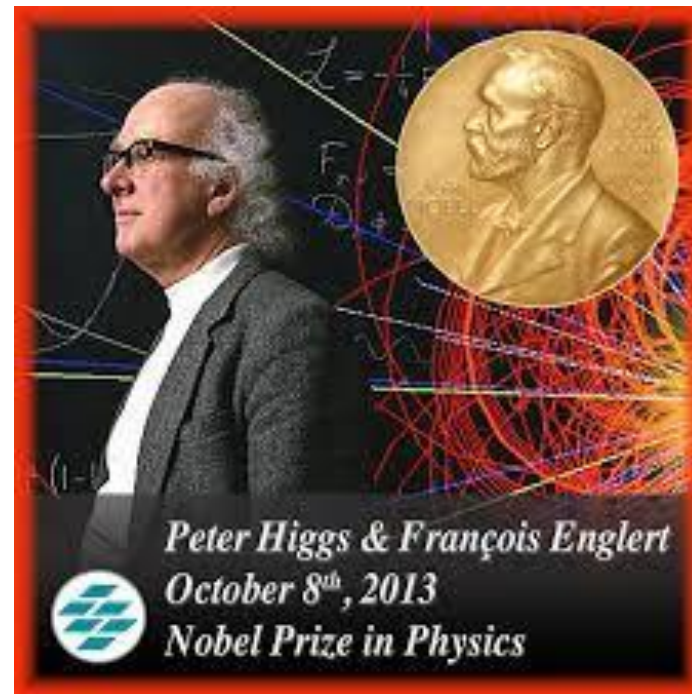
中国科学院高能物理研究所, 2024年11月29日



# 报告提纲

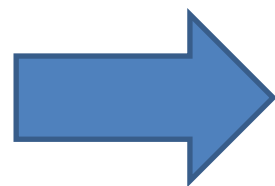
- **项目背景、研究内容、任务分解**
- **研究团队与经费使用情况**
- **重要日程和进度安排**
- **2024年各项任务进展亮点和下一步的计划**
- **人才培养和科研交流**
- **小结**

# 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

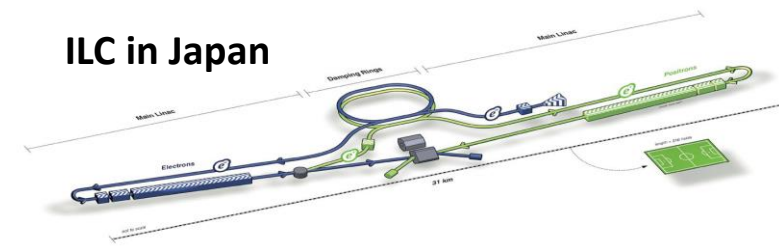
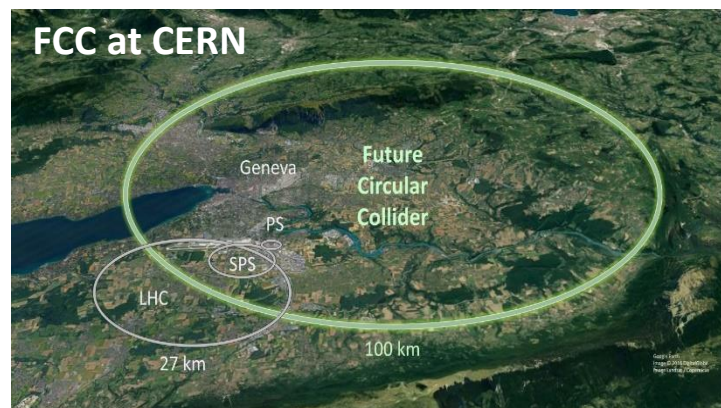
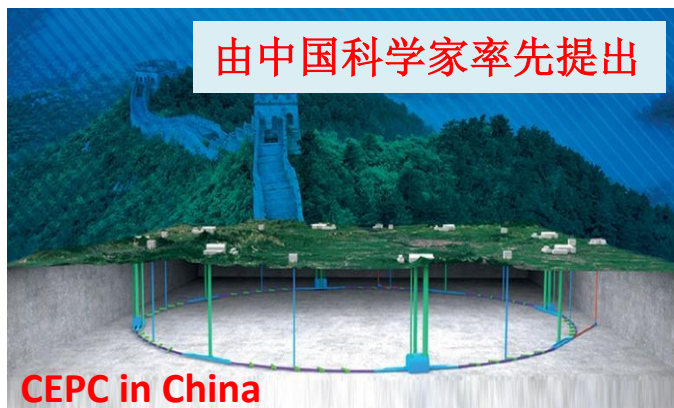
# 正负电子希格斯工厂



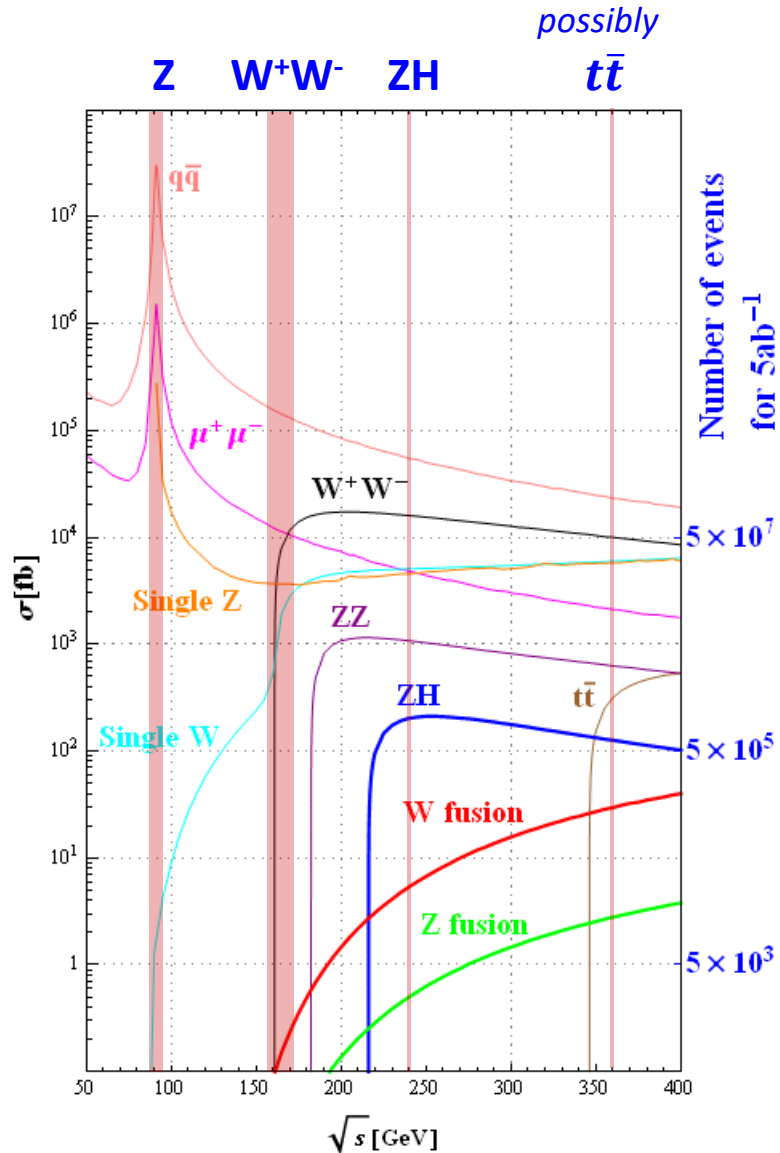
- ❑ 2013和2016年的香山会议：CEPC是实现中国加速器物理发展的**最佳历史机遇和途径**
- ❑ 2020年欧洲粒子物理战略规划：“An electron-positron Higgs factory is the **highest-priority next collider**”
- ❑ 2022年ICFA：“a Higgs factory as the **highest priority** for realizing the scientific goals of particle physics”

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**



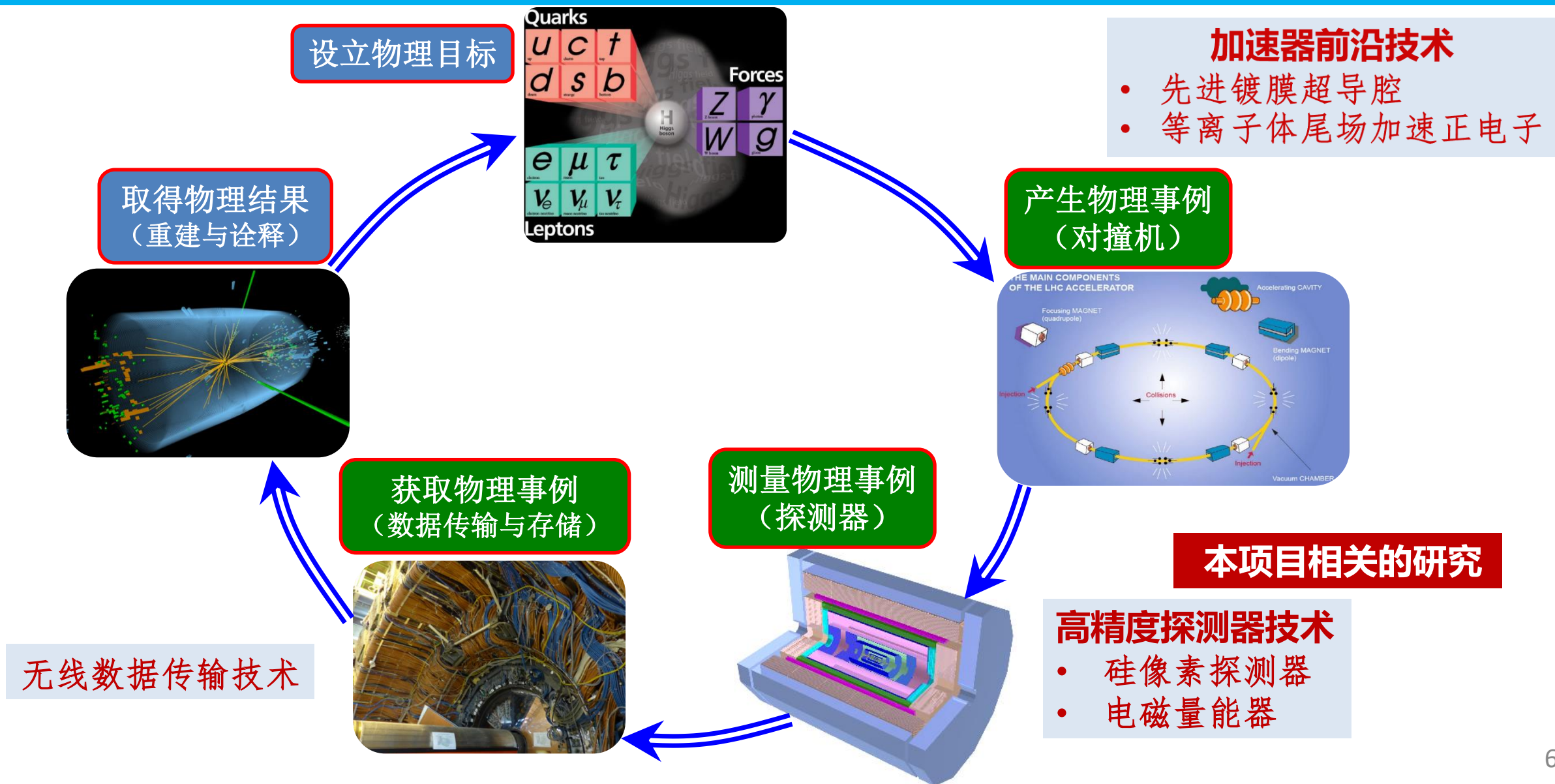
# CEPC运行计划和物理目标



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

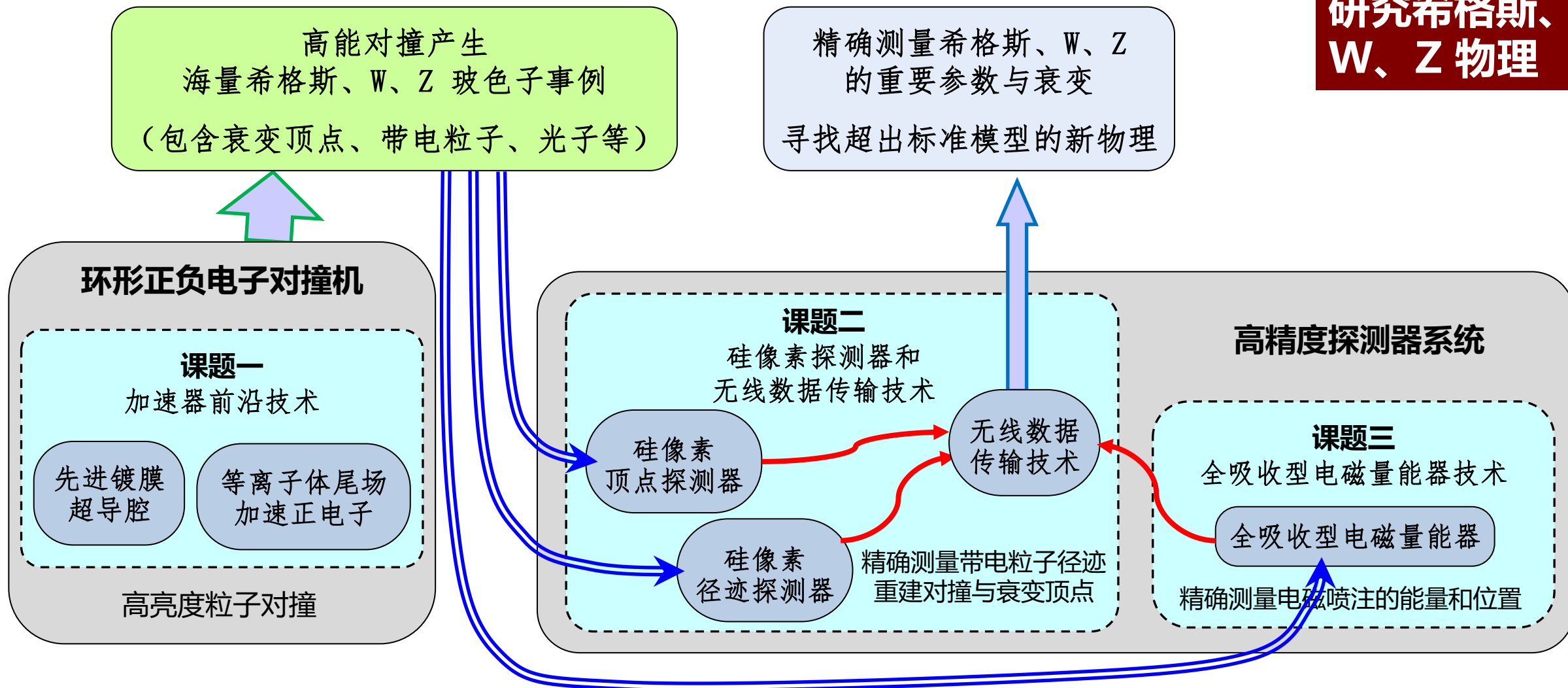
海量的Higgs, W, Z, 甚至顶夸克事例, 为高精度的希格斯物理和电弱物理过程的精确测量, 味物理和QCD的研究, 以及寻找新物理带来机遇

# 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 <b>能量转换效率30%</b> ，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	<b>位置精度<math>3\mu\text{m}</math></b> ，定时精度100ns，功耗100mW/cm <sup>2</sup>
		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 <sup>2</sup>
		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 <b>电磁簇射能量分辨达<math>3 - 4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%</math></b> ，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
<b>课题一</b>	360.00	80.50	172.80	71.01	19.7%
<b>课题二</b>	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%
<b>课题三</b>	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%
<b>项目总体</b>	<b>1800.00</b>	<b>386.50</b>	<b>864.00</b>	<b>302.34</b>	<b>16.8%</b>

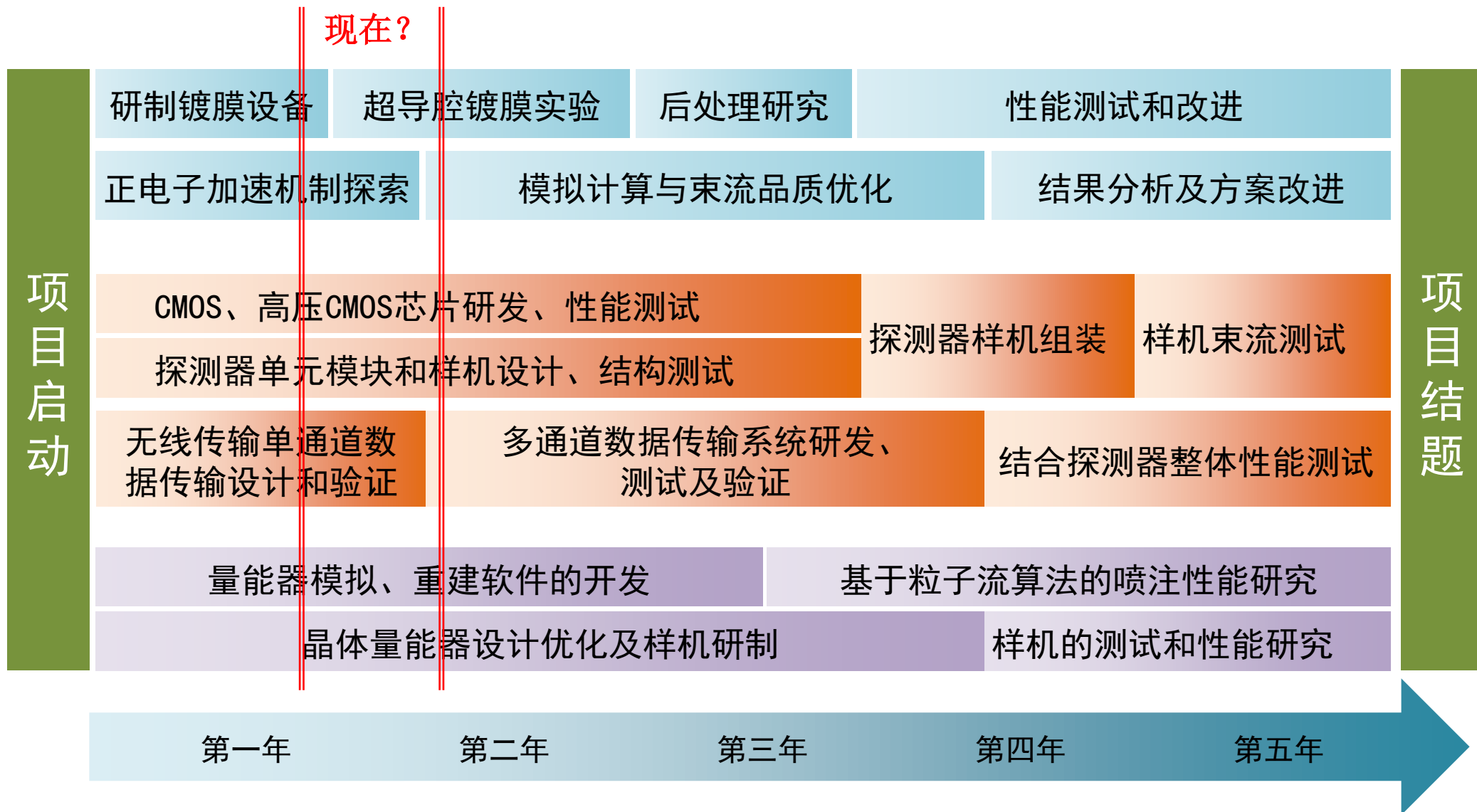
单位：万元

科目名称	预算	累计支出	使用进度
<b>一、直接费用</b>	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%
<b>二、间接费用</b>	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

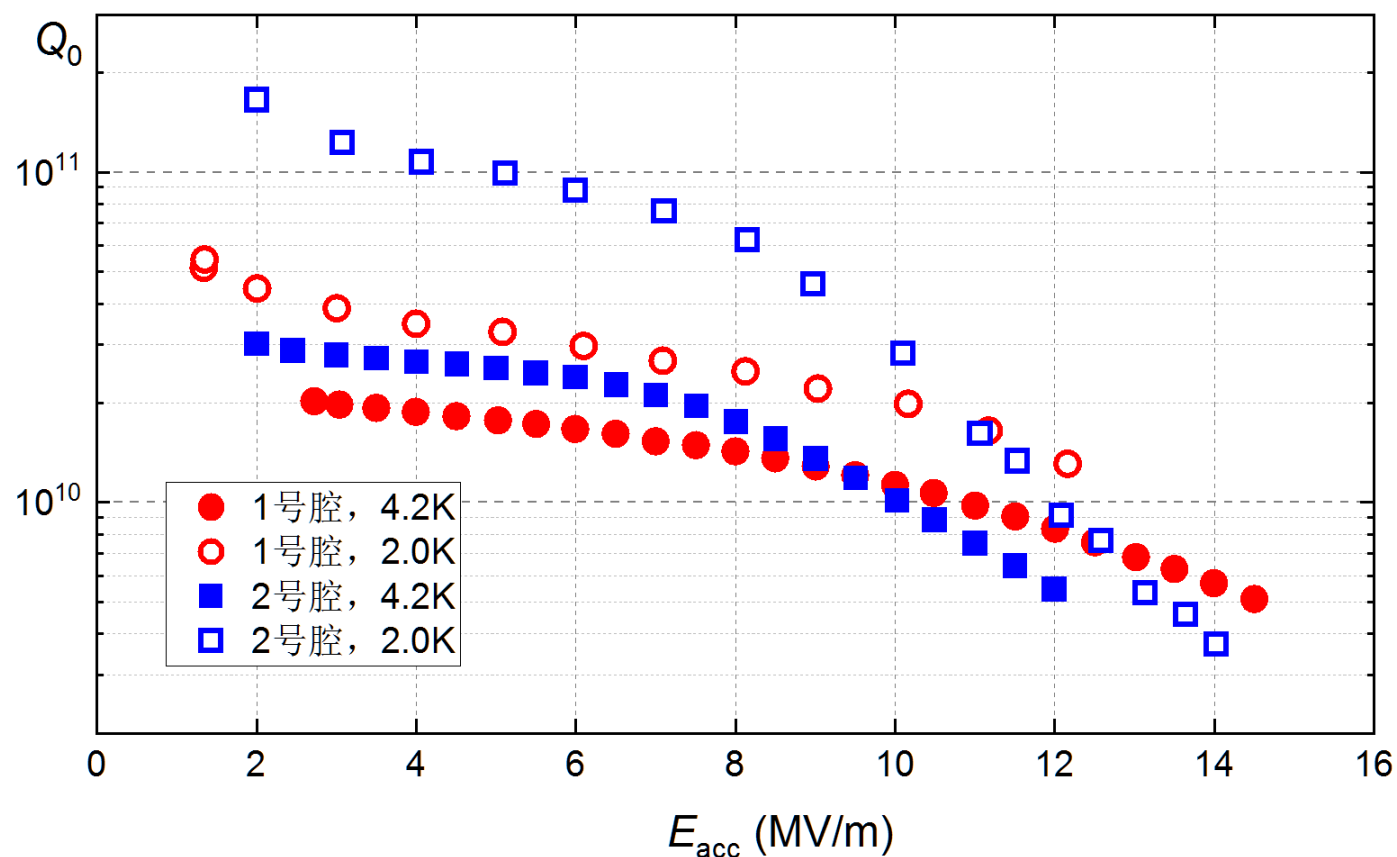
# 总进度安排



# 课题一：基于下一代射频超导材料的镀膜超导腔

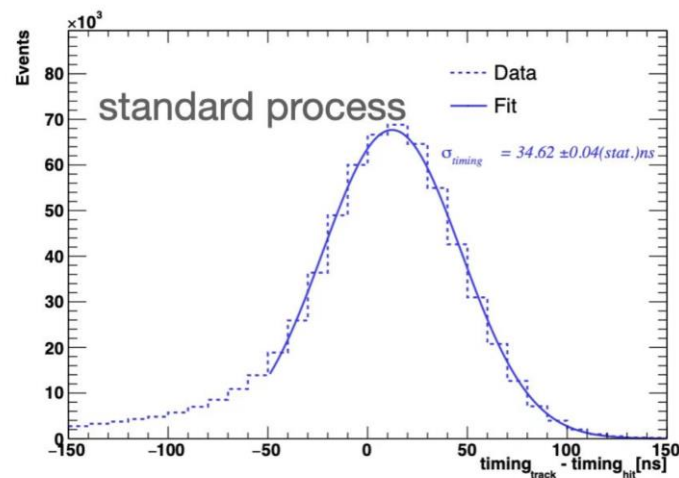
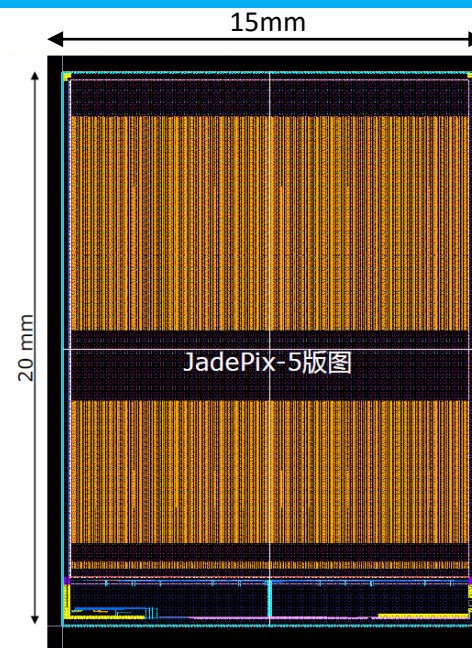
- 铌三锡镀膜超导腔的性能获得了大幅度提高，1.3 GHz铌三锡镀膜超导腔低场下的品质因数达到了 $3.0 \times 10^{10}$ @4.2K（与Cornell、FNAL相当）。
- 下一步将进行4~8 GHz铌三锡超导腔的镀膜实验和性能测试。

## 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

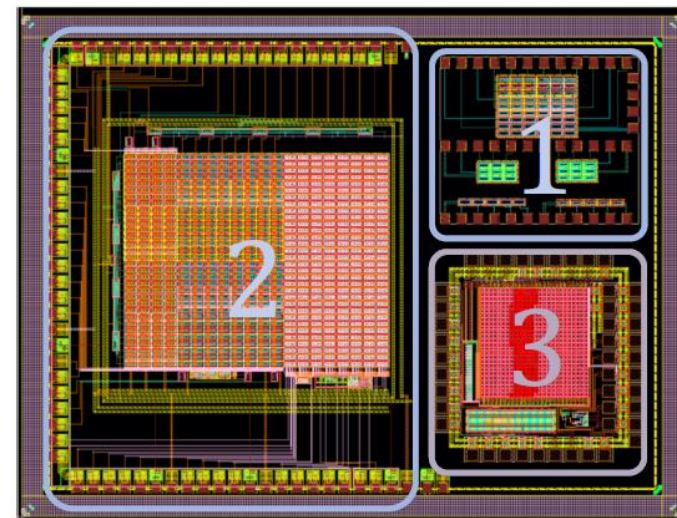
- 完成了JadePix-5的版图设计
  - 芯片尺寸：20×15 mm<sup>2</sup> (896×480像素)
  - 升级了HIT驱动的像素读出逻辑，读出时间减小到1 μs
  - 解决了20×15 mm<sup>2</sup>大面积带来的电压衰减、时序裕量等问题，开展阵列外围电路的低功率优化设计
- 完成了TaichuPix-3测试，其时间分辨率好于50ns，满足指标要求
- 明年初将与法国IPHC合作进行JadePix-5得流片 (TJ-180nm)
- 并开始顶点探测器样机的设计工作



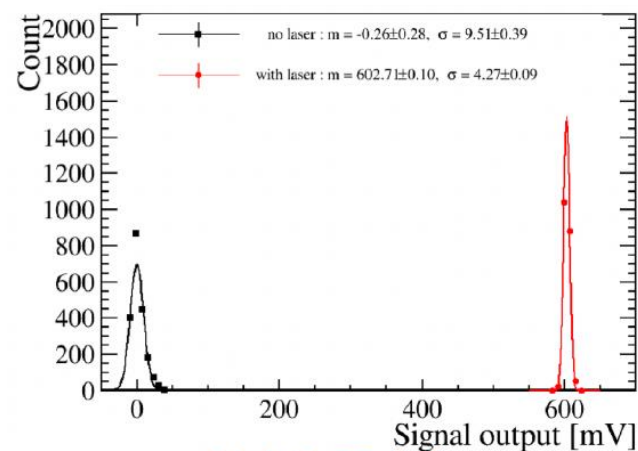
TaichuPix时间分辨

# 课题二：高压-CMOS硅像素径迹探测器

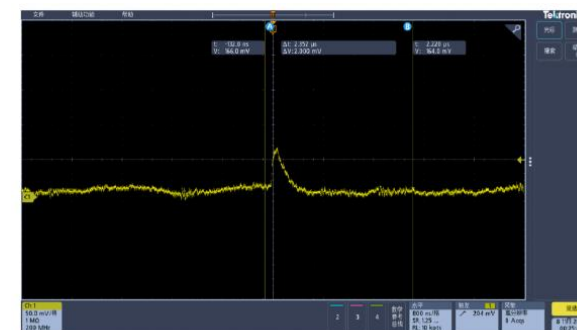
- 完成了首个55nm工艺高压CMOS原理验证芯片COFFEE2的设计、流片和初步测试
  - 2023年8月提交面积 $4 \times 3 \text{ mm}^2$ 的MPW流片
  - 初步测试观察到对激光信号、放射源信号的响应
  - 获得了预期结果，实现工艺验证
- 将于2025年1月提交下一版HVCMOS流片（COFFEE3，全功能芯片设计）
- 同时进行更多的COFFEE2测试研究



COFFEE2芯片版图



激光信号响应

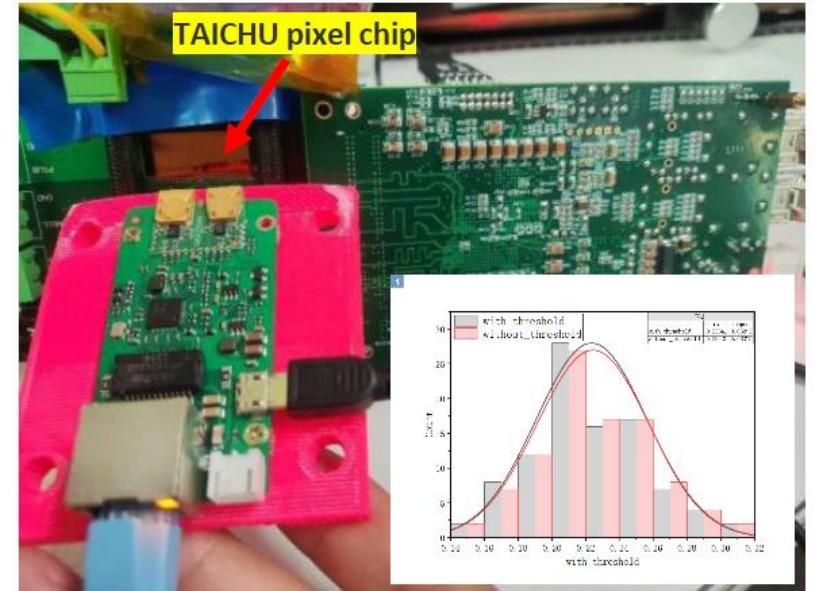


$^{55}\text{Fe}$ 放射源响应

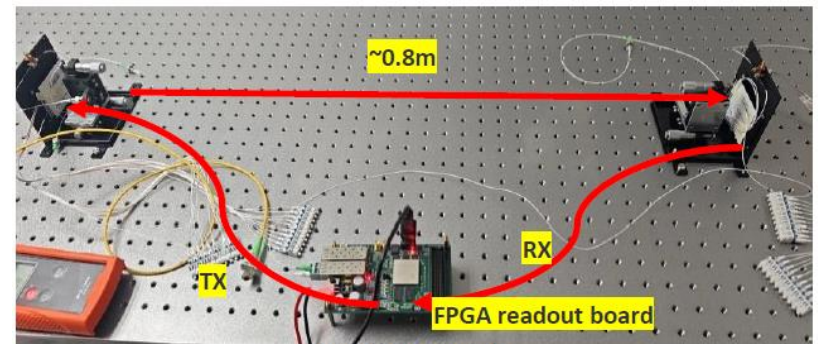


# 课题二：无线数据传输技术

- 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



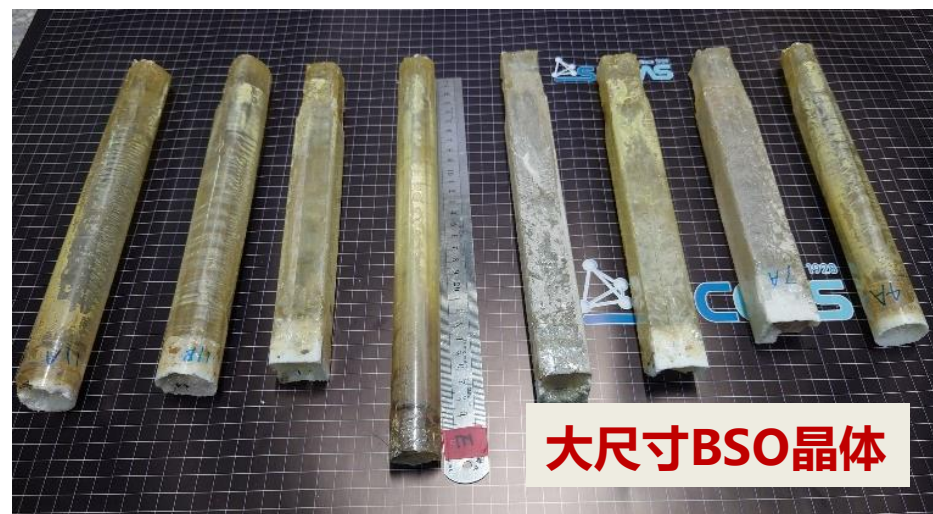
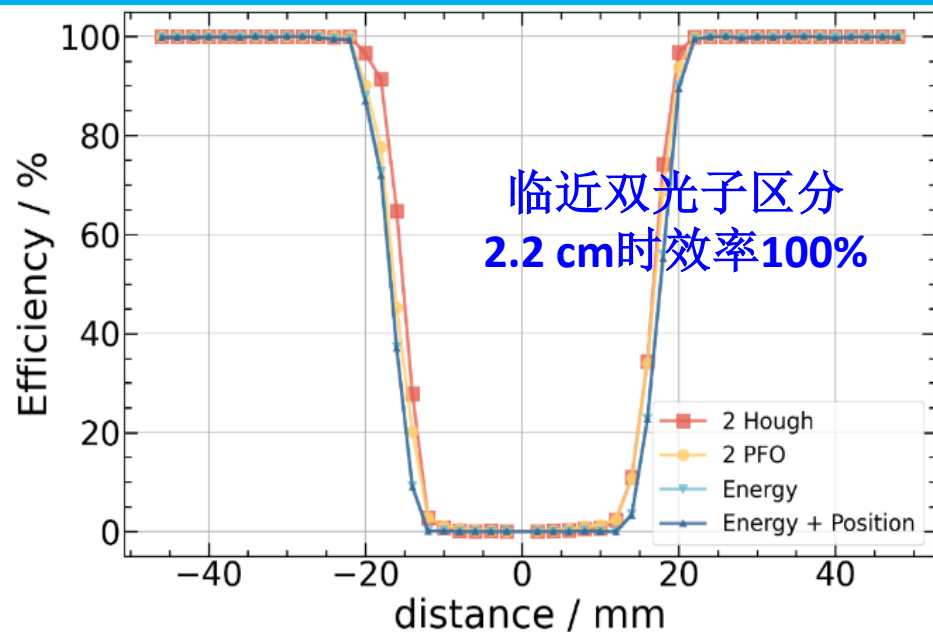
与TAICHU3像素芯片干扰测试



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 <b>国产 55nm 新工艺</b> ，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 <b>禁运风险</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>□ 联合国内团队合作开发</li><li>□ 寻求关键芯片的国内替代方案</li><li>□ 加强国际合作</li></ul>
基于铁基超导体的超导腔 <b>无先例</b> 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	/	$5 \times 10^6$	$0.8-2 \times 10^7$	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 <sup>2</sup>	100mW/cm <sup>2</sup>	
				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 <sup>2</sup>	200mW/cm <sup>2</sup>	
	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

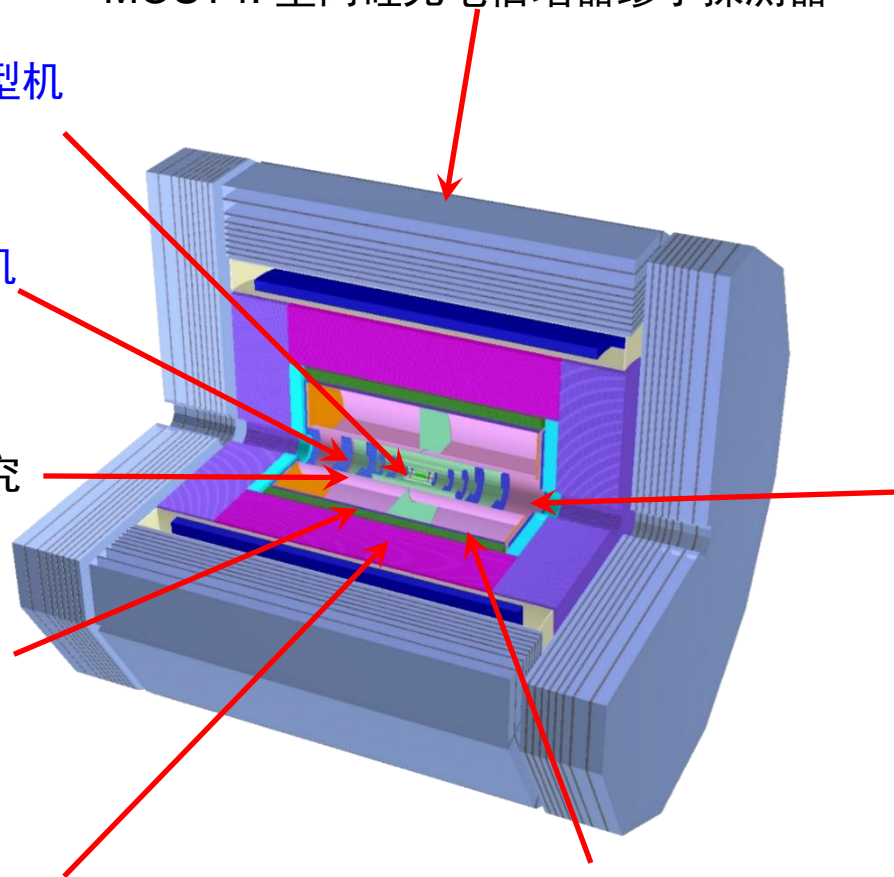
- MOST1: 取样性量能器性能研究
- MOST3: 全吸收型量能器原型机

## 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