

2023年国家重点研发计划 “大科学装置前沿研究”

# 高能加速器关键技术研究

项目负责人： 王建春

项目承担单位： 中国科学院高能物理研究所

参加单位： 中国科学院高能物理研究所，上海交通大学，  
中国科学技术大学，华中师范大学，  
中国科学院上海硅酸盐研究所，浙江大学



# 报告提纲

- **项目概要**
- **研究任务分解和主要研究工作**
- **实施关键节点和实施计划**
- **研究团队、组织管理和保障、国际合作**
- **预期成果**
- **总结**

# “大科学装置前沿研究”重点专项2023年度项目申报指南

科技部重点研发项目（2016,2018）已打下坚实基础，本项目更进一步研发关键技术，提升中国在国际竞争中的地位

## 1.7 高能加速器关键技术研究（共性相关技术）

### 研究内容：

针对未来高能正负电子对撞机高加速梯度的需求，开展正电子在等离子体尾场中的高效、高品质加速原理研究：通过调整束流相关参数，实现对加速效率、束流质量及容错度的全方位提升；研制基于铁基超导体的射频超导腔，获得关键性能参数。针对实验技术，研发无线数据传输和控制技术；研发4D晶体电磁量能器，实现优秀的能量、位置和时间分辨；研发低功耗、快读出和高定时精度的硅像素传感器芯片和大规模读出样机。

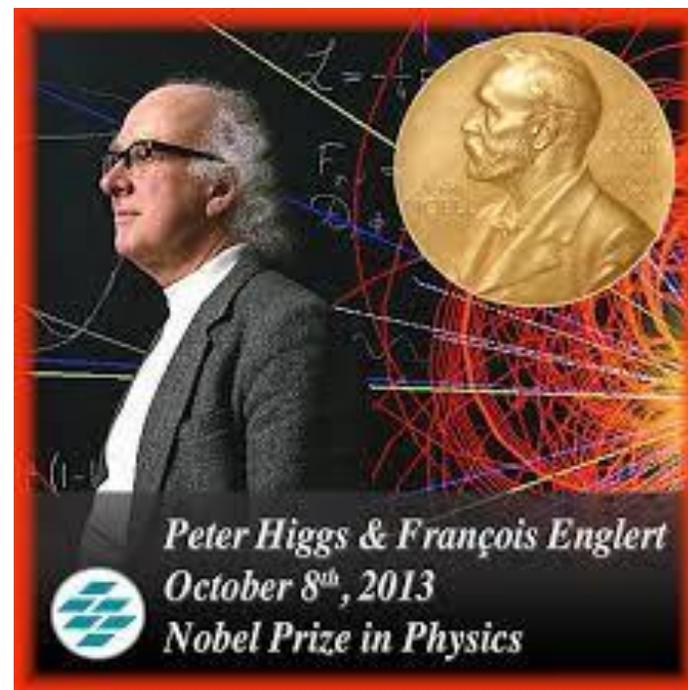
### 考核指标：

设计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%；铁基超导腔频率4-8GHz，Q值 $0.8-2 \times 10^6$ 。研制数据及控制无线传输系统，传输处理能力达30Gbps。4D电磁量能器样机MIP探测效率95%，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%。硅像素顶点和高压CMOS径迹探测器样机的位置和定时精度、功耗分别达3和 $10\mu\text{m}$ ，100和10ns，100和 $200\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

**研究内容：**镀膜超导腔、正电子加速方案  
硅像素探测器、电磁量能器、无线数据传输技术

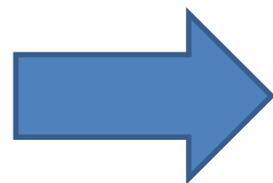
# 项目概要

# 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

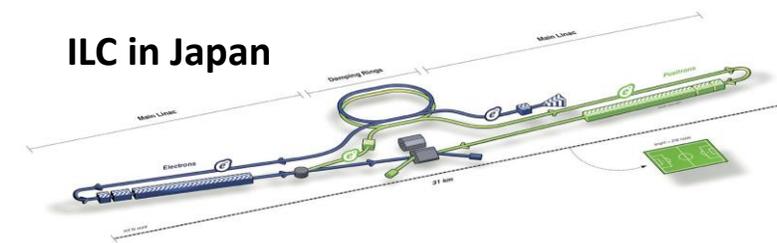
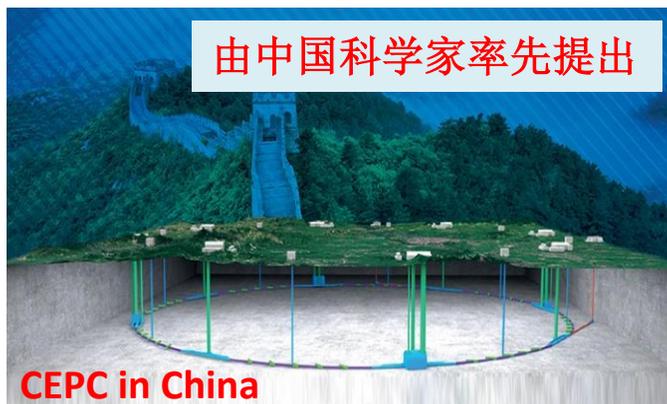


美国

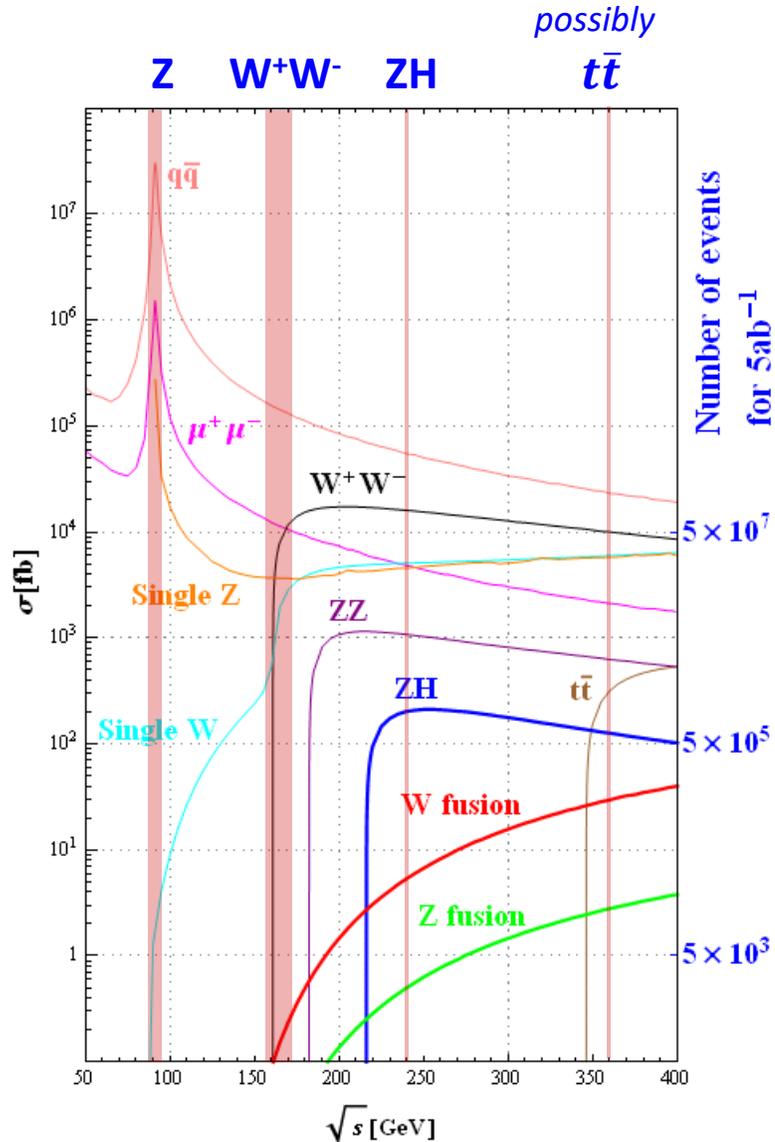
- ❑ 2013和2016年的香山会议：CEPC是实现中国加速器物理发展的**最佳历史机遇和途径**
- ❑ 2020年欧洲粒子物理战略规划：“An electron-positron Higgs factory is the **highest-priority** next collider”
- ❑ 2022年ICFA：“a Higgs factory as the **highest priority** for realizing the scientific goals of particle physics”
- ❑ 2023年美国的P5报告也把非美国本土的正负电子希格斯工厂列为重要考虑和研发目标

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

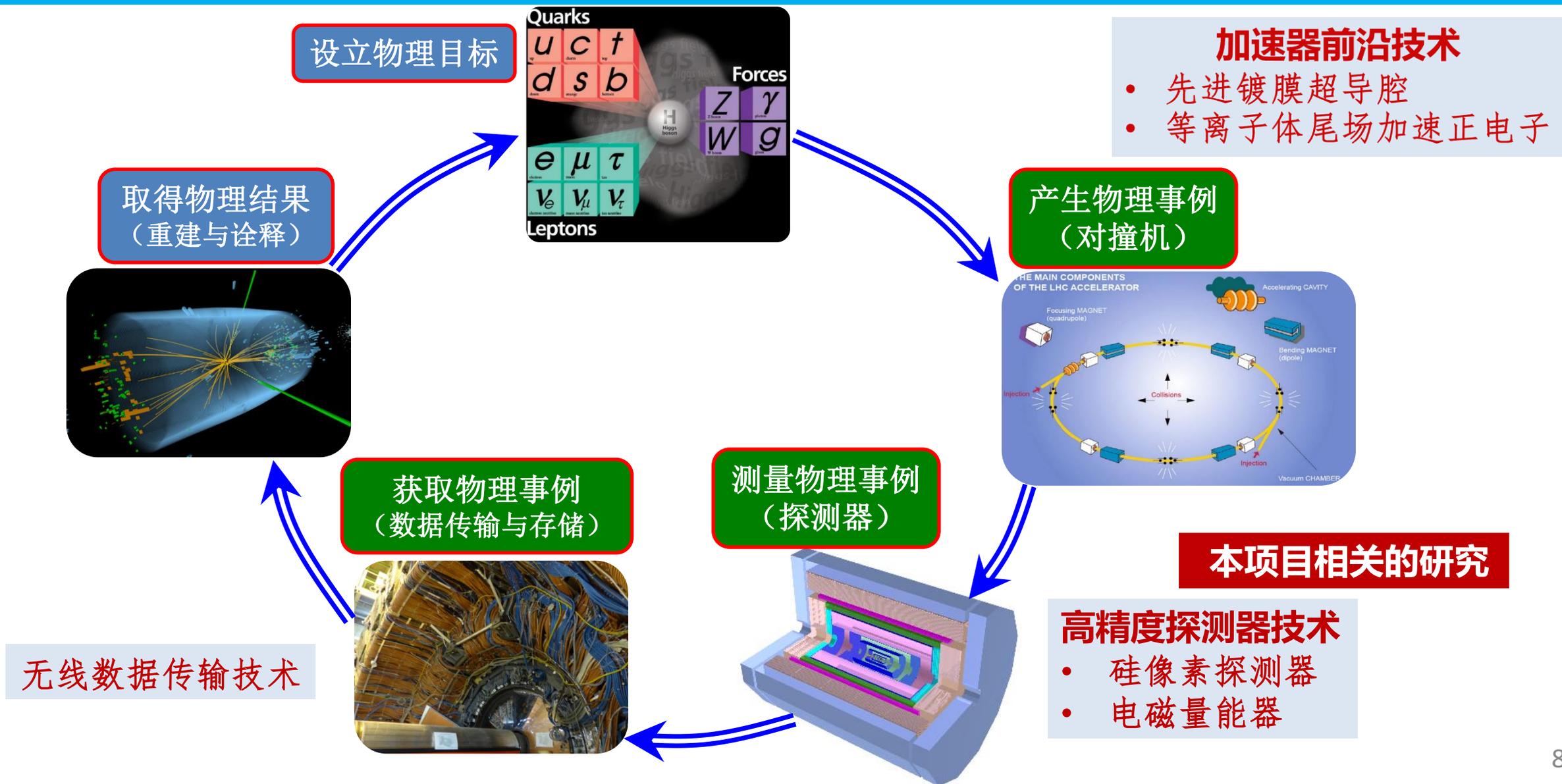


Operation mode		ZH	Z	W+W-	$t\bar{t}$
$\sqrt{s}$ [GeV]		~240	~91	~160	~360
Run Time [years]		10	2	1	~5
30 MW	$L / IP$ [ $\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	5.0	115	16	0.5
	$\int L dt$ [ $ab^{-1}$ , 2 IPs]	13	60	4.2	0.6
	Event yields [2 IPs]	$2.6 \times 10^6$	$2.5 \times 10^{12}$	$1.3 \times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

Both 50 MW and  $t\bar{t}$  modes are upgrades

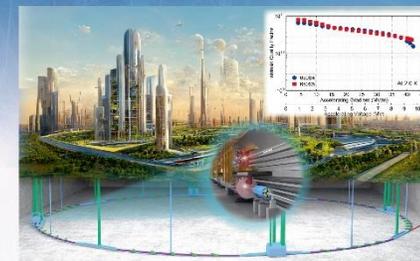
海量的Higgs, W, Z, 甚至顶夸克事例, 为高精度的希格斯物理和电弱物理过程的精确测量, 味物理和QCD的研究, 以及寻找新物理带来机遇

# 粒子物理研究的生物链



# CEPC加速器系统

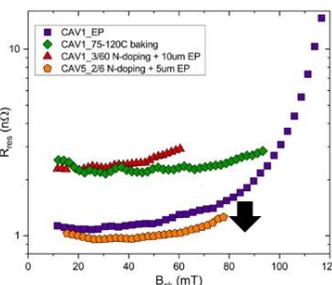
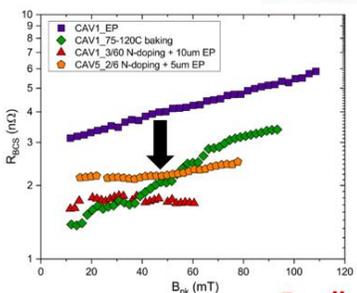
## Nuclear Science and Techniques



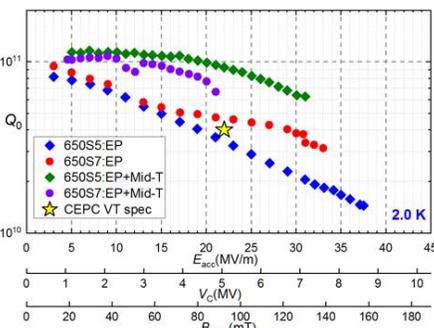
- 科技部重点研发项目的主要成果：高性能650 MHz超导腔，高梯度S波段加速结构，高精度低场二极磁铁，微波屏蔽波纹管等等。

### 650 MHz state-of-the-art

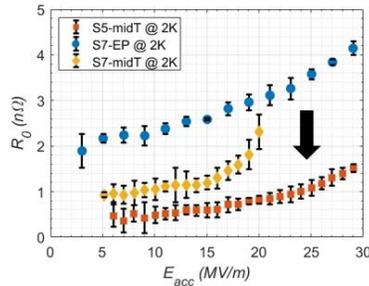
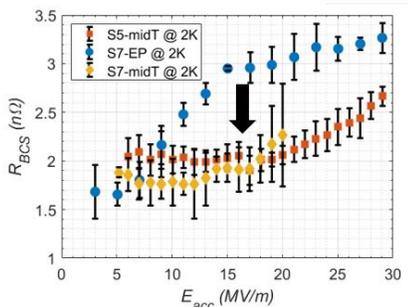
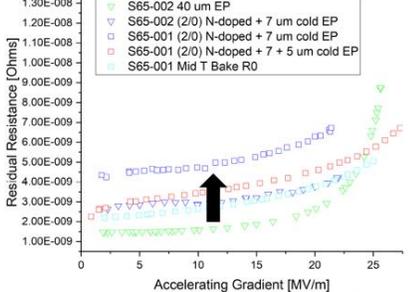
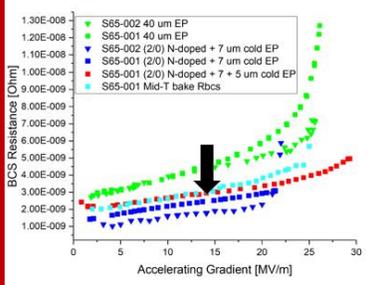
#### 1-cell@FNAL



#### 1-cell@IHEP



#### 5-cells



650 MHz超导腔：NST期刊封面（上）  
国家“十三五”科技创新成就展（下）

A. Miyazaki, Summary of Progress in high Q and high gradient, TTC2022 Meeting, 25-27 January 2022.

本项目研究更先进的加速技术：  
镀膜超导腔、等离子体尾场加速正电子

# 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

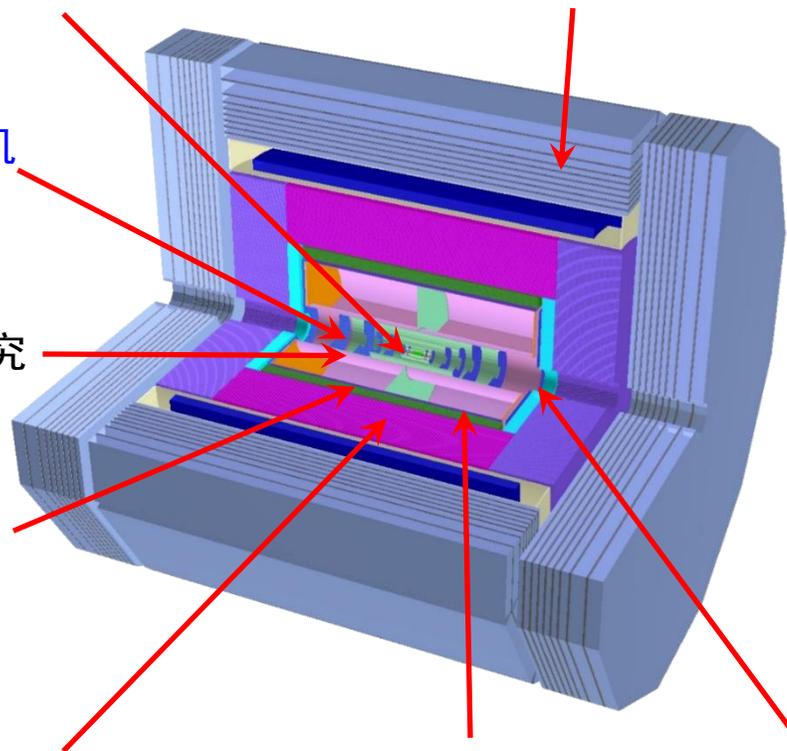
## 电磁量能器

- 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



## 硅外径迹探测器 亮度量能器

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

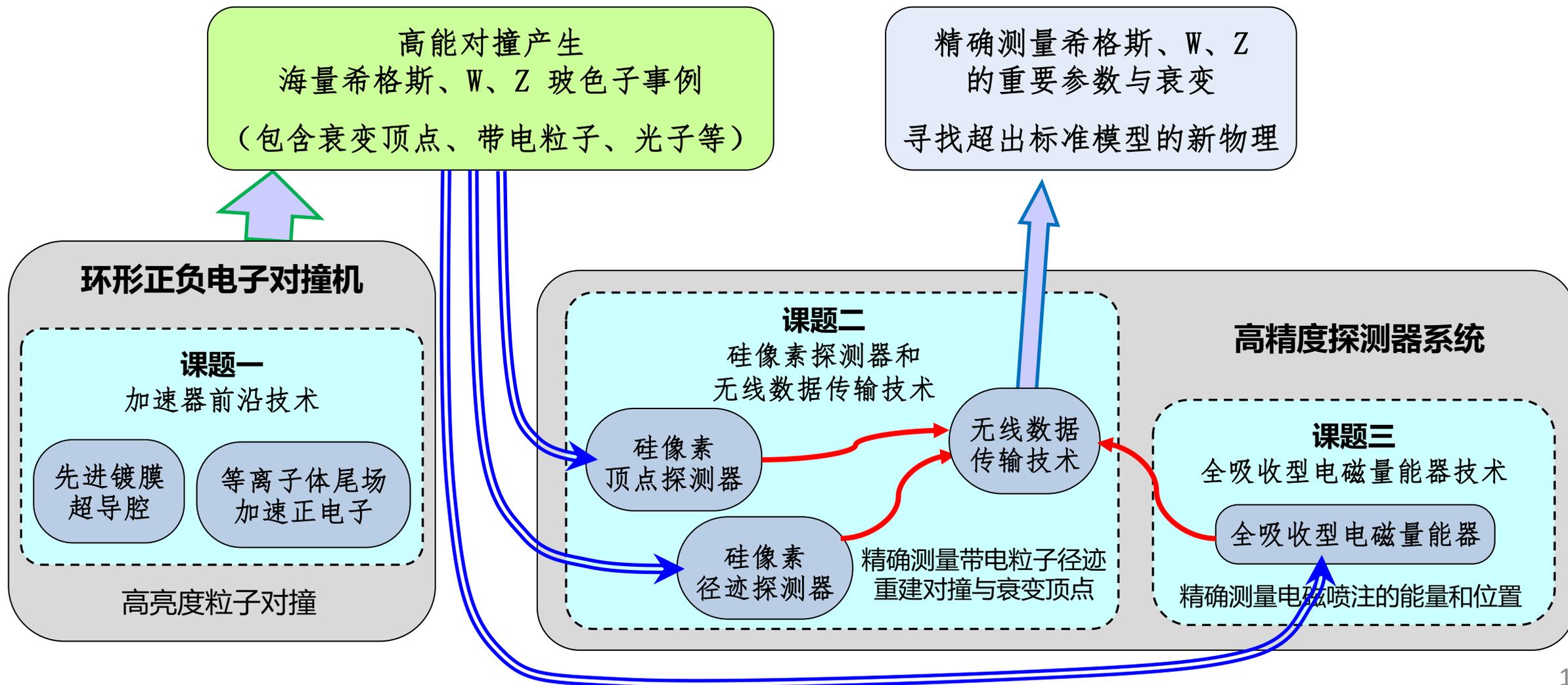
## 其它相关研究

- MOST1: MDI本底研究
- MOST1: 切伦科夫探测器
- MOST3: 无线数据传输技术

# 研究任务分解和主要研究工作

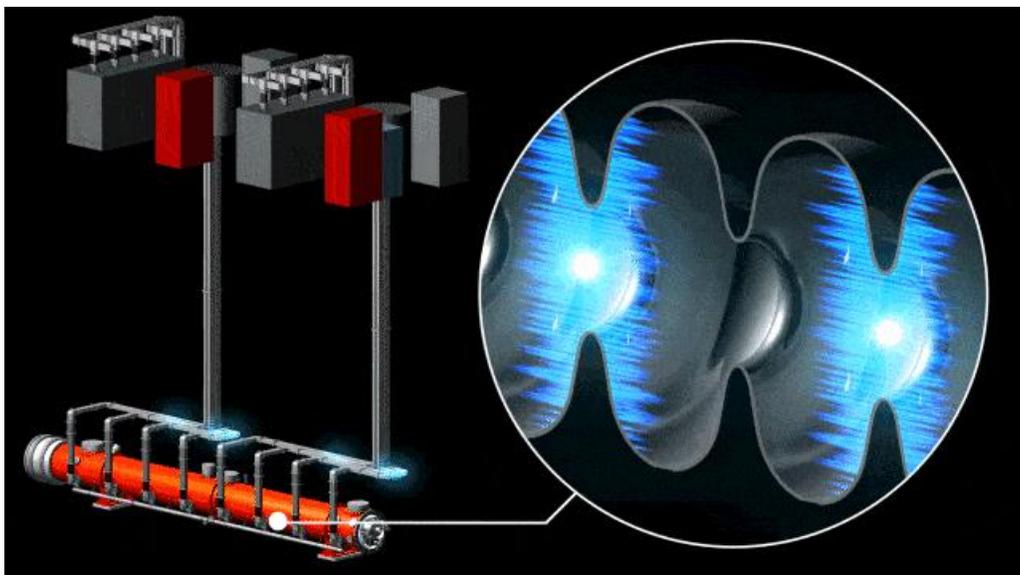
# 项目研究目标和任务分解

## 研究希格斯、W、Z 物理

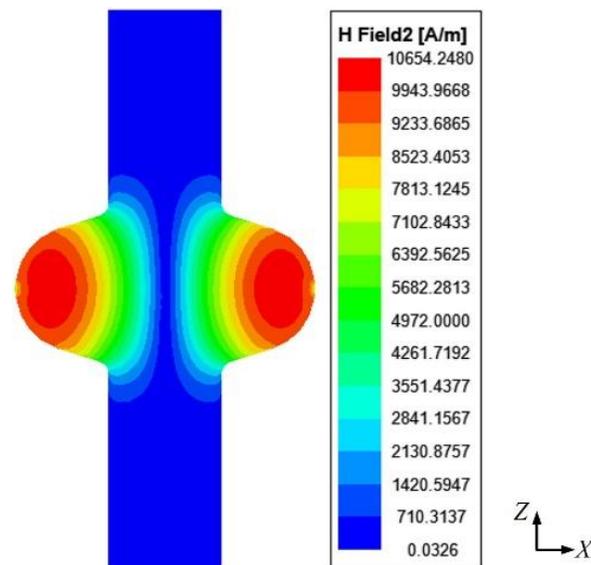


# 课题一：基于下一代射频超导材料的镀膜超导腔

- **物理需求：**目前加速器大多采用铌超导腔，性能已达极限，需要新型材料突破现有极限
- **研究内容：**研发基于下一代射频超导材料（铌三锡、铁基超导体）的镀膜超导腔
- **考核指标：**镀膜超导腔的谐振频率为 4-8 GHz，品质因数达到  $0.8-2 \times 10^7$
- **研究方法和技术路线：**进行超导腔的物理和机械设计；研究铌三锡、铁基超导体的超导腔镀膜技术、后处理技术，重点解决超导薄膜表面粗糙、晶粒尺寸大小不一、厚度不均匀、射频性能不佳等关键技术难题；对超导腔进行低温下的性能测试。



超导腔加速带电粒子示意图



超导腔内磁场分布仿真

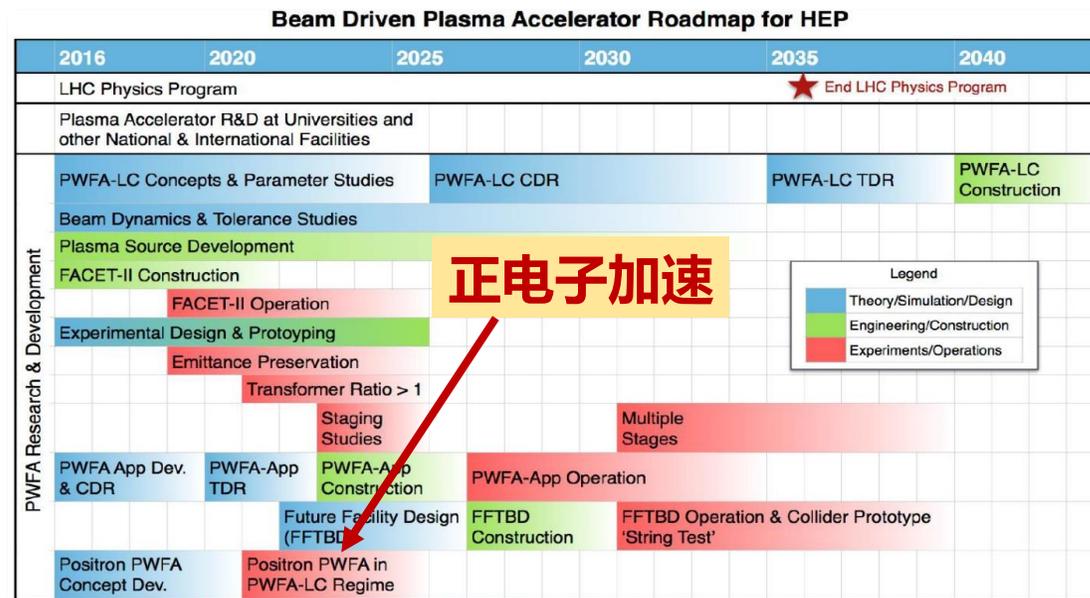
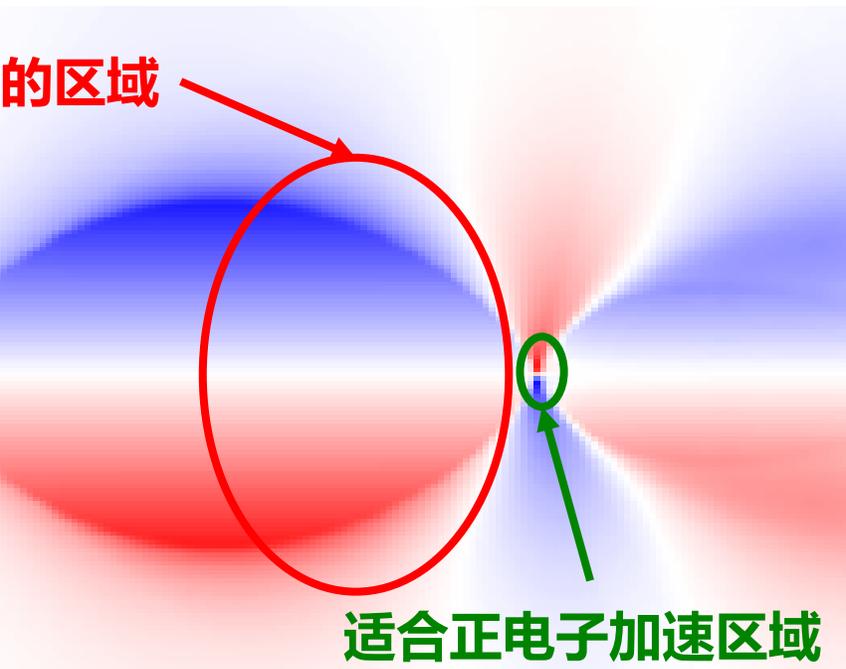


超导腔镀膜实验

# 课题一：等离子体尾场加速正电子

- **物理需求：** 等离子体尾场加速可以大幅提升加速梯度，但加速正电子极具挑战，是公认的难题
- **研究内容：** 通过模拟手段 研究等离子体尾场加速正电子的方案
- **考核指标：** 完成等离子体尾场加速正电子的设计方案，模拟得到的能量转换效率不低于 30%，能散不高于 5%，发射度增长不超过 50%
- **研究方法和技术路线：** 验证“非对称驱动电子束在中空等离子体通道中演化”方案，提升该方案的能量转换效率和束流品质，研究空泡加速结构中正电子加速的方法

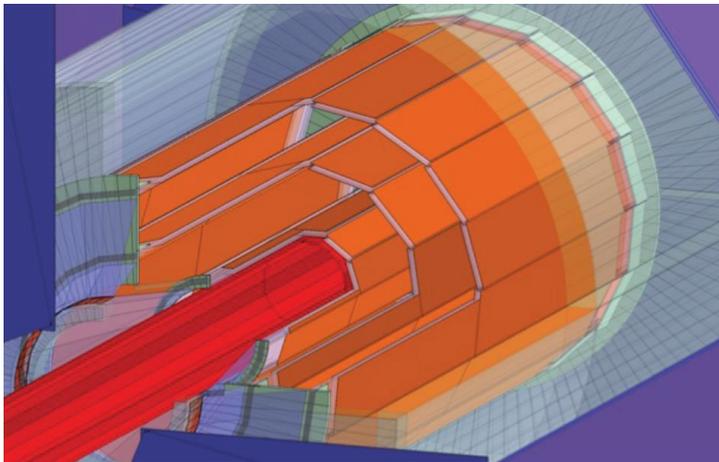
适合电子加速的区域



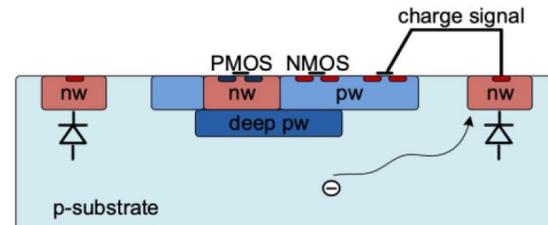
美国DOE先进加速器发展战略报告 (2016)  
美国Snowmass战略白皮书 (2022)

# 课题二：硅像素探测器

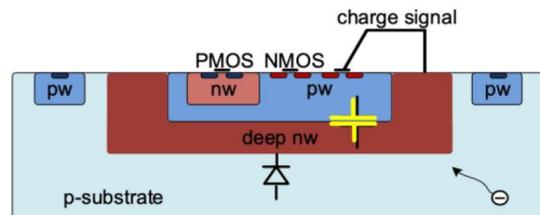
- **物理需求**：环形正负电子希格斯工厂对顶点探测器和径迹探测器的空间精度、时间精度、功耗和物质量等方面要求极为严苛，国际上已有的硅像素探测器技术不能完全满足要求
- **研究内容**：深入研究像素传感器芯片，使顶点探测器的各项指标全面达到要求；研发新型的高压CMOS技术
- **考核指标**：硅像素顶点探测器样机的位置和定时精度、功耗分别达  $3\mu\text{m}$ ,  $100\text{ns}$ ,  $100\text{mW}/\text{cm}^2$   
高压CMOS径迹探测器样机的位置和定时精度、功耗分别达  $10\mu\text{m}$ ,  $10\text{ns}$ ,  $200\text{mW}/\text{cm}^2$
- **研究方法和技术路线**：分别进行高空间分辨、高时间分辨芯片和高压CMOS芯片的优化设计；**推动国产55nm技术的发展**；在样机中组合使用高空间分辨芯片和高时间分辨芯片，研究和提高整体性能



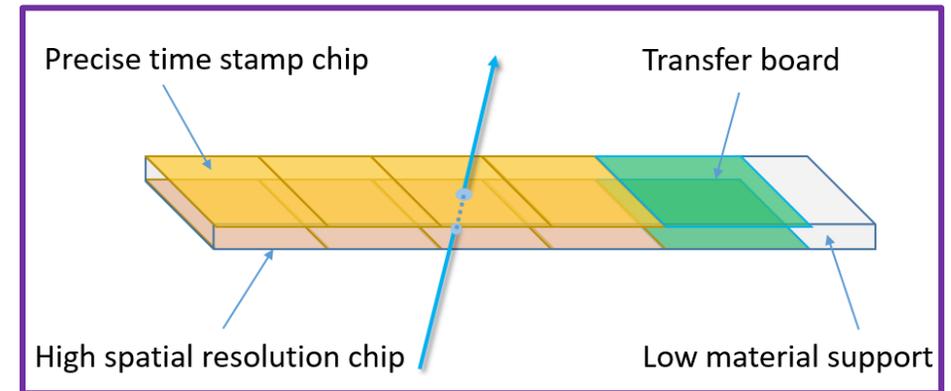
CEPC 顶点探测器设计



CMOS with small electrode



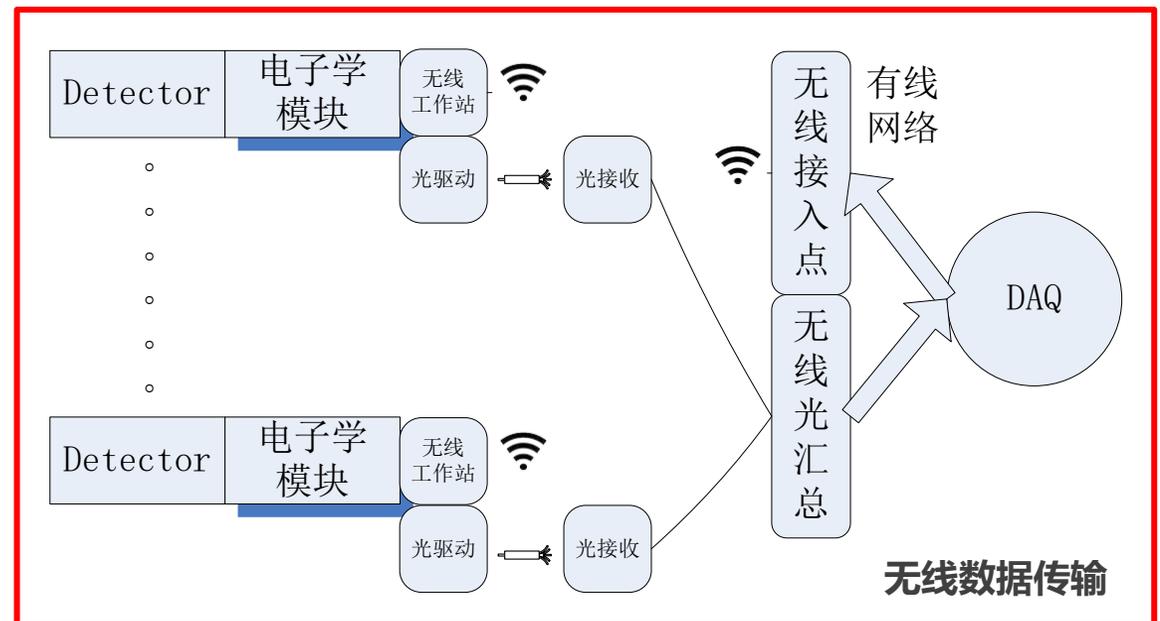
High Voltage CMOS



探测器模块方案

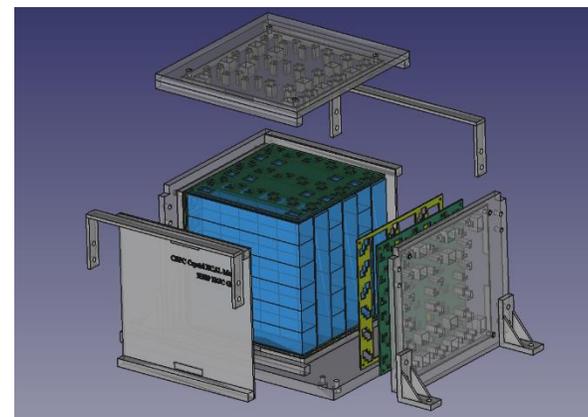
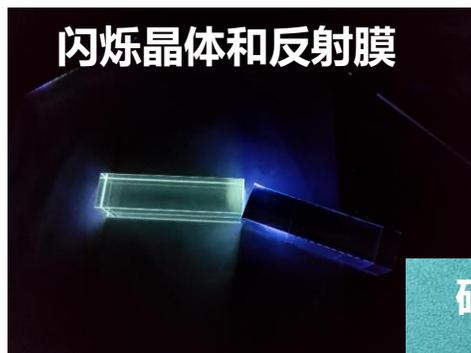
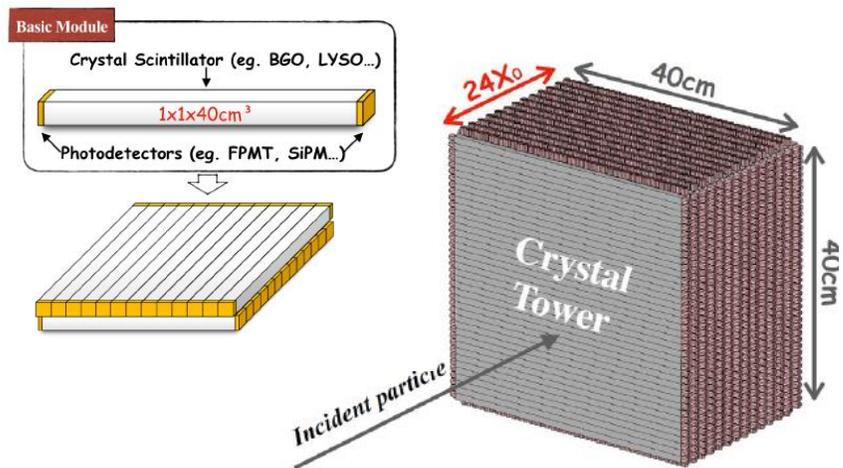
# 课题二：无线数据传输技术

- **物理需求**：现代大型对撞机实验要求更加紧凑的探测器系统以提高精度和效率，但高密度结构带来巨大挑战，大量线缆增加了探测器的死区和物质量，直接影响到探测效率和测量精度
- **研究内容**：研发无线数据传输技术，减小对线缆的依赖，并以应用于高能物理实验为目标
- **考核指标**：多通道无线数据传输原型系统总传输带宽  $\geq 30\text{Gbps}$ ，满足数据上传下发的需求
- **研究方法和技术路线**：上行高带宽数据采用无线的光通信，下行的低带宽配置信息采用无线的电通信，用硅像素顶点探测器样机来检验其性能表现



# 课题三：全吸收型电磁量能器技术

- **物理需求**：已经研发了基于先进粒子流算法的取样型高粒度量能器样机，典型的电磁能量分辨 **15 – 20%**，需要进一步的提升
- **研究内容**：设计兼具**高粒度**和**全吸收型**优点的电磁量能器，研制样机并测试其性能
- **考核指标**：样机的MIP探测效率大于95%；模拟1-60GeV电磁簇射能量分辨达到  **$3 - 4\% / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 1.5\%$** ，线性度为1.5%；模拟验证探测器系统的喷注能量分辨达到3-4%
- **研究方法和技术路线**：长条型的晶体**交错排布 + SiPM双端读出**，实现高粒度和更好的时间分辨



全吸收型电磁量能器样机

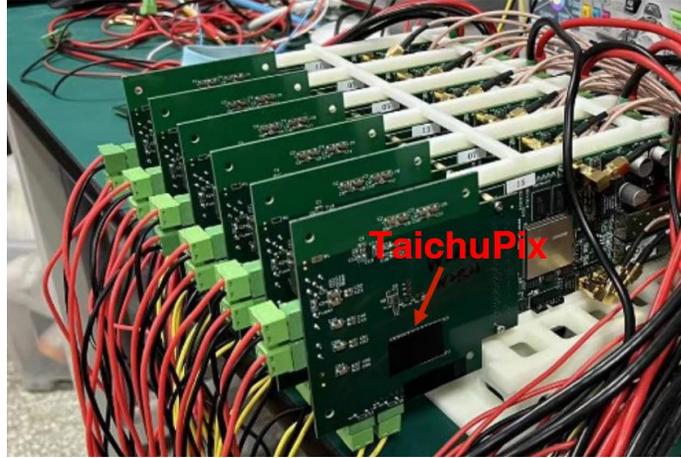
# 研究基础：加速器前沿技术研究

- 在射频超导和等离子体加速技术领域有深厚的物理和技术储备
  - 建立了功能齐全的**射频超导实验室**，为超导腔的研究提供实验平台
  - 成功研制了 650 MHz 高性能超导腔，**性能指标达到国际领先水平**，入选了国家“十三五”**科技创新成就展**
  - 在铌基底上成功制备了超导的铁硒薄膜
  - 掌握**高可信度**等离子体尾场加速模拟计算工具



# 研究基础：硅像素探测器及无线传输技术

- 拥有先进的半导体探测器实验室
- 成功研制TaichuPix和JadePix硅像素芯片及探测器样机，完成束流测试，达到国际先进水平
- 团队完成了首版55nm 高压CMOS 芯片的设计和流片，正在进行测试，和设计迭代
- 完成了WiFi功能验证模块的设计及测试

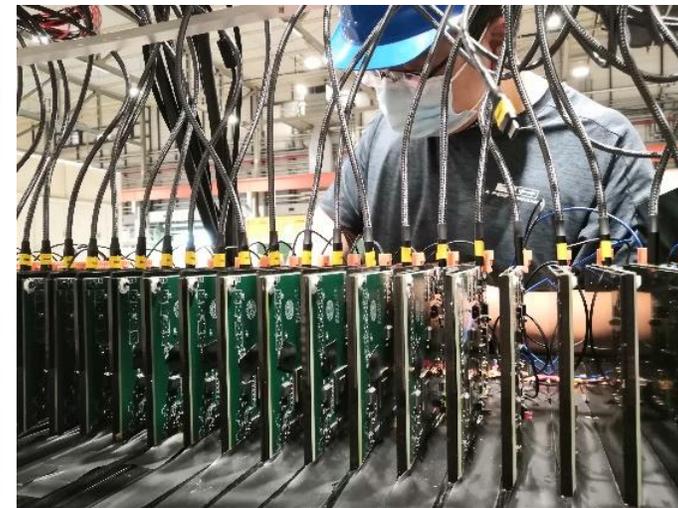
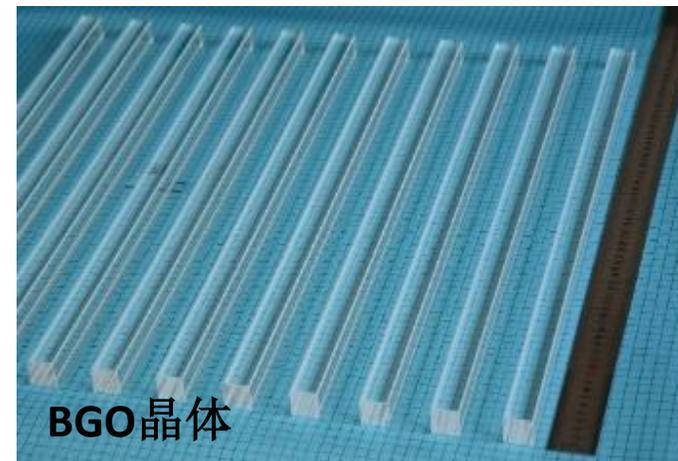


## WiFi功能验证模块



# 研究基础：量能器技术

- 团队已成功研制了基于塑料闪烁体和SiPM的取样型**电磁量能器样机**和**强子量能器样机**
- 利用CERN的高能粒子束流完成了性能测试，掌握了SiPM和读出电子学等核心技术
- 具有丰富的大尺寸**闪烁晶体**生长和性能研究经验



**基于上述研究基础，可确保本项目按计划进行，顺利完成任务，达到目标！**

# 风险分析

- 本项目瞄准的是原创技术，有一定的技术风险。经风险分析，**均有相应的预案**，能保障项目顺利实施，达到指标要求。

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

# 研究现状和预期目标

内容	现状	指标
新材料镀膜超导腔	铌三锡超导腔研究尚集中在较低频段(0.5-4 GHz)在加速效率更高的频段(4-8 GHz)还是空白基于铁基超导体的超导腔还停留在理论上	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 <b>1%</b> , 能散 <b>20%</b> , 发射度增长 <b>10倍</b>	模拟 <b>能量转换效率30%</b> , 能散不高于 <b>5%</b> , 发射度增长不超过 <b>50%</b>
硅像素顶点探测器	位置精度 <b>5<math>\mu</math>m</b> , 定时精度 <b>3<math>\mu</math>s</b>	<b>位置精度3<math>\mu</math>m</b> , 定时精度 <b>100ns</b> , 功耗 <b>100mW/cm<sup>2</sup></b>
高压CMOS径迹探测器	在高能物理实验中 <b>尚无实际应用</b>	位置精度 <b>10<math>\mu</math>m</b> , 定时精度 <b>10ns</b> , 功耗 <b>200mW/cm<sup>2</sup></b>
无线数据传输系统	在高能物理实验中 <b>尚无应用</b>	传输处理能力达 <b>30Gbps</b>
高粒度全吸收型电磁量能器样机	取样型高粒度电磁量能器的电磁簇射能量分辨约为 <b>15 - 20% /<math>\sqrt{E}</math></b>	模拟1-60GeV <b>电磁簇射能量分辨达3 - 4% /<math>\sqrt{E} \oplus 1.5%</math></b> , 线性度 <b>1.5%</b> , 喷注能量分辨 <b>3-4%</b> ; MIP探测效率 <b>95%</b>

聚焦本领域前沿技术; 研究指标量化, 可考核;  
涵盖指南的全部任务和考核指标

# 经费预算

项目总预算经费1800万元，全部来自专项经费，根据任务需求和相关规定，认真合理编制预算，能够确保项目顺利完成。

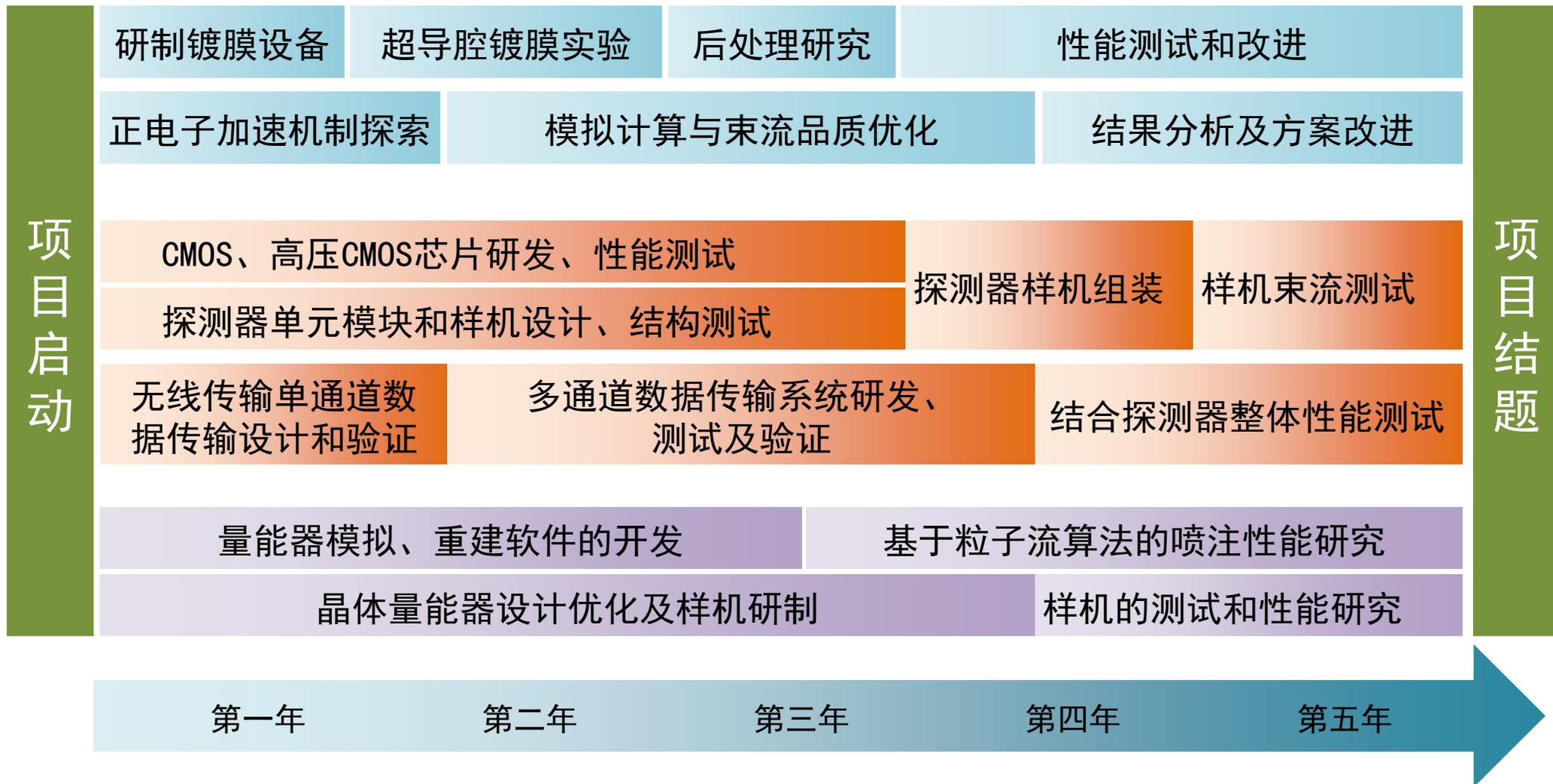
	经费预算（万元人民币）					占比
	设备费	业务费	劳务费	间接费	合计	
课题 1	81.9	173.1	24.5	80.5	360	20%
课题 2	51	625	63	197	936	52%
课题 3	28	299.5	67.5	109	504	28%
合计（万元）	160.9	1097.6	155	386.5	1800	
占比	8.9%	61.0%	8.6%	21.5%		

其中材料费和测试费分别占19.4%和27.2%

主要包括购买晶体原料、芯片流片、和读出电子学等费用

# 实施关键节点和实施计划

# 总进度安排



**研究团队、组织管理和保障、国际合作**

# 研究团队负责人



## 王建春：项目负责人和课题二负责人

中国科学院高能物理研究所研究员，博士生导师  
中国科学院“百人计划”A类学术帅才  
高能物理研究所实验物理中心副主任  
CEPC物理与探测器联合负责人  
LHCb半导体上游径迹探测器项目负责人  
AMS中国团队半导体径迹探测器升级任务负责人  
长期从事重味物理和粒子探测技术研究，先后参加L3、CLEO、LHCb和AMS等国际合作实验，及BTeV和CEPC的预研，主导和参与多个探测器的研发工作。



## 沙鹏：课题一负责人

中国科学院高能物理研究所正高级工程师，博士生导师  
粒子物理卓越中心“青年拔尖人才”  
CEPC射频超导召集人  
长期从事加速器和射频超导技术研究，先后参加了BEPC II、ADS等多个项目。主持研制了650 MHz高性能超导腔，性能达到国际领先水平，入选国家“十三五”科技创新成就展。



## 杨海军：课题三负责人

上海交通大学教授，博士生导师  
粒子与核物理研究所所长  
上海市粒子物理和宇宙学重点实验室主任  
CEPC项目副主任  
长期从事高能粒子物理实验前沿研究，先后参加L3实验、ATLAS实验等，负责研制CEPC高颗粒度量能器样机。

# 研发团队

## ■ 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



沙鹏



李大章



翟纪元



董超



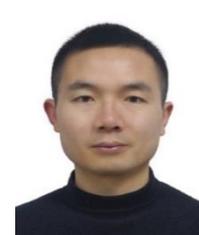
靳松



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



杨海军



李刚



刘勇



陈俊锋

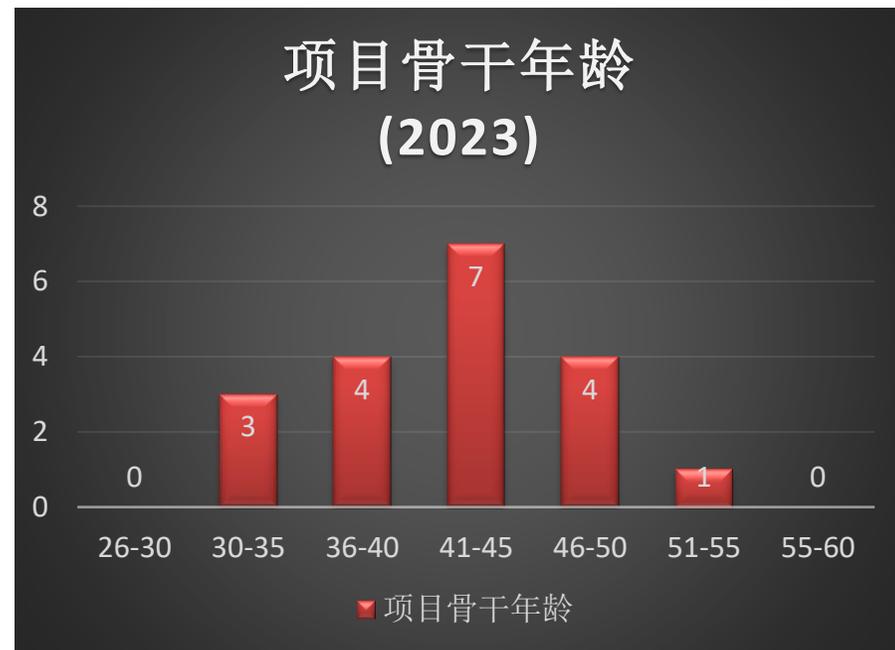


周勇

其中7人、2人分别参加过前两次科技部重点研发项目

# 研发团队及分工

项目骨干	性别/年龄/技术职称	任务分工
李大章	男/43/ 研究员	基于等离子体的新加速原理
翟纪元	男/43/ 正高级工程师	射频超导理论
董超	女/35/副研究员	超导薄膜技术
刘佰奇	男/36/高级工程师	加速器真空技术
靳松	男/43/高级工程师	超导腔表面处理技术
董明义	男/47/ 研究员	硅像素探测器研发、测试
周扬	男/39/ 副研究员	硅像素传感器芯片研发
江晓山	男/50/ 研究员	无线数据传输技术研发
卢云鹏	男/43/ 正高级工程师	硅像素传感器芯片及探测器研发
李一鸣	女/40/ 副研究员	高压CMOS像素探测器研发、测试
朱宏博	男/42/ 教授	高压CMOS像素探测器研发、测试
杨苹	女/37/ 副教授	硅像素传感器芯片研发
周勇	男/36 /副教授	量能器软件开发、性能模拟和分析
刘勇	男/41/ 副研究员	量能器设计、优化、建造、测试
陈俊峰	男/45/ 研究员	晶体生长、性能表征
李刚	男/48/ 研究员	探测器模拟及软件开发



项目骨干**19**人，正高11人，副高8人  
平均年龄42岁；**9**名博士后，**16**研究生

**研究骨干此前承担了科技部重点研发计划等项目，取得了丰硕的研究成果**

# 组织管理

- 项目申报单位高能物理研究所承担过多个大科学装置项目，如北京正负电子对撞机、北京谱仪、大亚湾实验等，拥有丰富的组织和管理能力，能保障项目的顺利实施
- **项目负责人**全面主持方案实施，项目进展，经费分配，科研交流等
- **课题负责人**分管课题研究任务规划、具体实施安排，组织例会，解决问题，确保课题按计划开展
- **大部分研究骨干**此前也承担过科技部重点研发计划等项目，**有丰富的经验**
- 项目定期组织协调会，邀请专家对项目进行指导，确保各项任务按期完成
- 组织召开项目中期及结题前预评审会
- 已建立专门会议网页和文档管理数据库，对论文、专利和会议报告、实验数据等进行规范管理、存档

# 项目专家组

- 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!**

# 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9个探测器研发合作组，本研究团队是相关的 DRD3 半导体探测器合作组和 DRD6 量能器合作组成员
- 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、日本东京大学和信州大学

# 预期成果

# 预期成果

- 基于下一代射频超导材料的超导腔、等离子体尾场加速正电子等研究，能显著提升高能加速器的性价比，为基于高能加速器的大科学装置提供高效率、结构紧凑的加速方案
- 实现高空间分辨、高时间分辨、低功耗的硅像素芯片设计，建造硅像素探测器样机并采用束流测试验证关键指标；完整评估国产55 nm工艺可行性
- 实现高能物理实验的高带宽无线数据传输和控制，高效利用空间，具有物质质量低、安装灵活、抗串扰和抗辐照性能强等优点，显著提升实验的灵敏度
- 利用在三维空间中密排晶体阵列作为探测介质，在三维方向和时间维度上对粒子簇射能量进行精确测量，同时高灵敏地探测低能光子，大幅度提高量能器性能
- 这些研究可以改进高能量和高精度前沿的一些核心技术，增强我国在未来高能正负电子对撞机领域的竞争力

# 社会效益

- 本项目的研究成果不仅可以应用于高能物理实验，还可以广泛应用于航空航天、生物医药、环境科学、国家安全等多个领域，造福社会
- 研究提升加速梯度，促进小型可移动加速器的研制，方便应用于材料科学、公共卫生、环境保护
- 硅像素探测器和电磁量能器可以作为成像技术，应用于材料科学、医学影像、辐射防护、安全监测
- 无线数据传输技术可广泛应用在高能物理实验，并推广到其它科研领域，如复杂电离和电磁辐射环境，分布式的科学实验等

# 总结

- 本项目主攻加速器和探测器系统中的前沿技术：先进镀膜超导腔、等离子体尾场正电子加速方案、硅像素探测器、高粒度全吸收型电磁量能器、无线数据传输技术
- 研究团队具有长期合作研究经验和深厚的研究基础，可确保本项目按计划进行，顺利完成任务，达到目标
- 依托单位拥有丰富的组织和管理能力，能保障项目的顺利实施
- 研究成果可满足高能量对撞机实验的技术挑战和需求，提高国际竞争力，也为我国未来的大科学装置储备技术、培养人才

**谢谢各位专家！**

**backup**

# 科技部重点研发计划CEPC相关的研究

MOST1	
加速器物理设计 (高杰)	对撞机设计方案
	主环lattice
	注入增强器
	对撞区
加速器关键技术预研 (裴国玺)	对撞机注入系统
	超导加速腔
	强流正电子源
	S-Band 加速管
探测器模拟和物理研究 (高原宁)	概念设计
	软件
	MDI本底研究
探测器关键技术预研 (杨海军)	硅像素芯片
	TPC
	电磁和强子量能器
	切伦科夫探测器

MOST2	
加速器关键器件的原型机 (池云龙)	低场高精度二极磁铁样机
	静电分离器
	弯转真空盒
	RF屏蔽波纹管
	Z能区极化束对撞设计
硅径迹探测器原型机 (Joao Costa)	硅径迹探测器原型机
高粒度强子量能器原型机 (刘建北)	成像型强子量能器原型机

MOST3	
加速器前沿技术 (沙鹏)	先进镀膜超导腔
	等离子体尾场加速正电子
硅像素探测器和无线数据传输技术 (王建春)	硅像素顶点探测器
	硅像素径迹探测器
	无线数据传输技术
全吸收型电磁量能器 (杨海军)	全吸收型电磁量能器

表 1 国外从事相关研究的主要机构（不超过 5 家）

序号	机构名称	相关研究内容	相关研究成果	成果应用情况	本项目与国外机构相关研究内容自评价 (请在框里打√)
1	美国费米国家实验室 (FermiLab)	铌三锡镀膜技术	650 MHz 和 1.3 GHz 铌三锡镀膜超导腔	用于美国传导冷却超导腔的实验	<input type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input checked="" type="checkbox"/> 跟跑
2	美国斯坦福直线加速器国家实验室 (SLAC)	正电子驱动的正电子在等离子体尾场中的加速	实验中观察到被加速正电子的能量增益	无	<input checked="" type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
3	欧洲核子研究中心 (CERN)	顶点探测器硅像素传感器芯片及探测器的研发	CMOS 像素传感器芯片 ALPIDE	应用于 ALICE 实验的内径迹探测器升级	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
4	德国卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT)	高压 CMOS 传感器芯片研究	高压 CMOS 芯片 ATLASPix3	无	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
5	加州理工学院 (Caltech)	晶体电磁量能器的研发	PbWO <sub>4</sub> 晶体量能器, CsI 晶体量能器等	CMS 实验晶体电磁量能器, Mu2e 实验电磁量能器等	<input type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input checked="" type="checkbox"/> 跟跑

# 国内外主要相关研究机构

表 2 国内从事相关研究的主要机构（不超过 5 家）

序号	研究机构	相关研究内容	代表性成果
1	北京大学	铌三锡镀膜技术	1.3 GHz 铌三锡镀膜超导腔
2	上海交通大学	激光等离子体正电子加速	模拟中正电子在激光等离子体尾场中获得了较高品质加速
3	中国科学院高能物理研究所等	顶点探测器硅像素传感器芯片及探测器样机研发	研发了 TaichuPix、JadePix 等多款硅像素传感器芯片芯片；研发了顶点探测器样机
4	华中师范大学	CMOS 传感器芯片研发	研发了 MIC 系列等多款 MAPS 像素传感器芯片，以及 TopMetal 芯片
5	上海硅酸盐研究所	晶体研制，生长，加工，性能检测	CsI (Tl), BGO 等晶体，应用于 LEP/L3, BES3, LHC-CMS, DAMPE

# 项目目标、预期成果与考核指标表

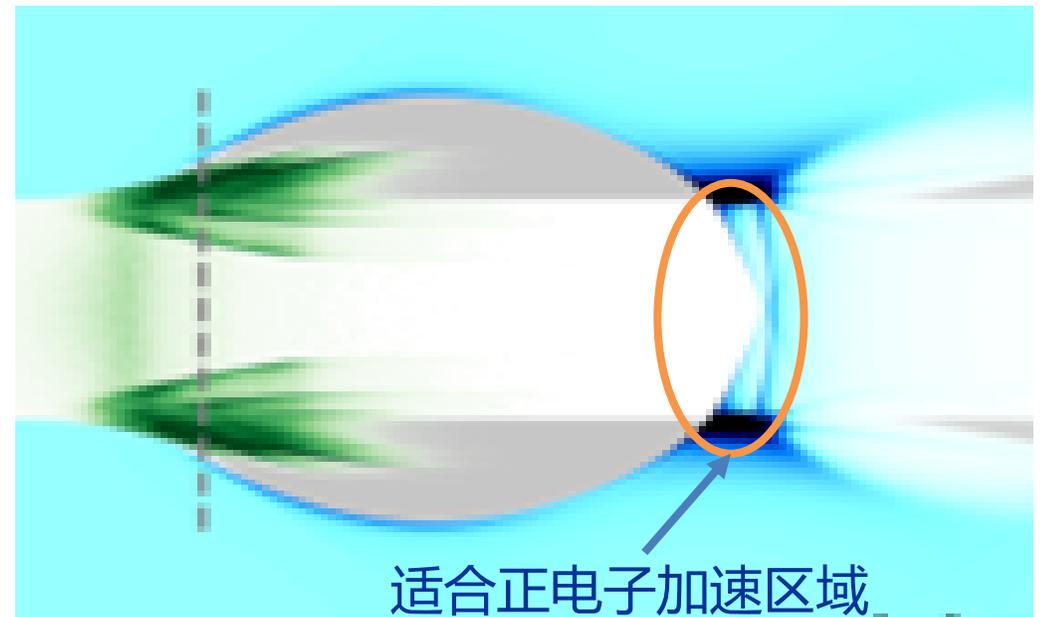
项目目标	预期成果名称	预期成果类型	对应的课题	考核指标				考核方式 (方法)及 评价手段
				指标名称	立项时已有 指标值/状态	中期指标值/状态	完成时指标值/状态	
(1) 研究新型超导腔（基于铌三锡、铁基超导体等下一代射频超导材料）、等离子体尾场加速正电子等关键技术； (2) 研发低功耗、快读出和高定时精度的硅像素传感器芯片，研发高颗粒度、高能量分辨的全吸收型电磁量能器，研制硅像素传感器和全吸收型电磁量能器的样机，研发多通道无线数据传输原型系统。	超导腔	√新技术 √新方法 √工程工艺 √论文	课题1: 加速器前沿技术研究	品质因数	/	$5 \times 10^6$	$0.8-2 \times 10^7$	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%		

# 不同加速方案的比较

- 铌超导腔 可达50 MV/m, 在2K下品质因数已达 $3 \times 10^{10}$  @1.3 GHz
- 铌三锡镀膜超导腔 理论上可达 100 MV/m , 实验室尚未实现
- 铁基材料镀膜超导腔 理论上可达 200 MV/m, 实验室尚未实现
- 等离子体尾场加速电子 可达 100 GV/m, 实验室已达20-100 GV/m, LBNL的LWFA已经实现 ~40 GV/m, 尚未实用
- 等离子体尾场加速正电子 理论上可达 100 GV/m, 实验室尚未实现

# 非对称驱动电子束在中空等离子体通道中演化

- 非对称驱动电子束在中空等离子体通道里演化后形成的尾场结构图，绿色的驱动电子束，深浅代表电子密度。绿色的是背景等离子体电子，深浅也是代表电子密度。黄色区域是适合正电子加速的区域（横向聚焦，纵向加速）
- 单束对称的驱动束在中空等离子体中也可以驱动适合正电子加速的场，但非常敏感。
- 驱动束轴线如果和等离子体通道轴线有极小offset（比如0.1um）就很快会发生尾场的偏轴，所以这种方案只是理论上可行，不具有现实意义。
- 非对称指初始时水平/垂直束团尺寸不一样。
- 如果用非对称束，就可以利用这种演化，在极短时间内从一个束流变成一个环状束流（二维图看着像两个，实际上是环形的）。这个环形束流很稳定，且形成的尾场很理想



## 课题二：研究方案和技术路线

### ■ 本课题技术路线的可行性：

#### – 180nm CMOS工艺

相对成熟的芯片工艺，项目团队利用该工艺已成功研制了TaichuPix和JadePix等硅像素芯片，并具备了像素芯片设计能力

#### – 55nm 高压CMOS工艺

开拓性探索，项目团队在55nm 非高压CMOS 工艺上验证了类似高压CMOS 的深n阱收集电极结构，测试结果符合预期

#### – 低物质质量探测器样机

前期研究验证了双面型探测模块的设计及部分性能指标，高空间分辨芯片和高时间分辨芯片组合使用可实现样机的全面性能指标

#### – 无线数据传输技术

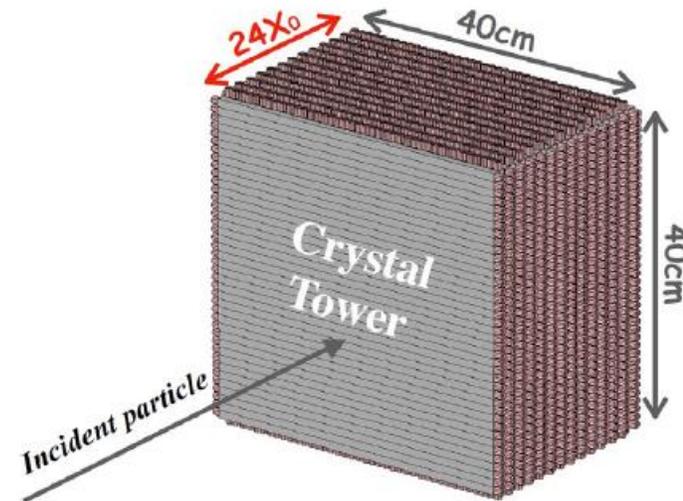
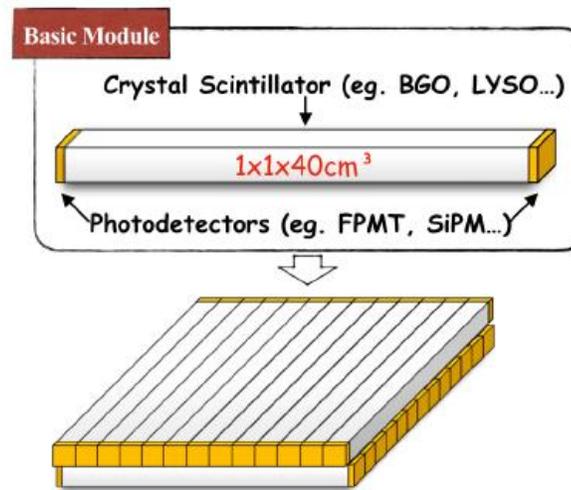
从实现单通道到多通道的数据传输原型，再到搭建最终的无线传输系统，并结合实际的硅像素探测器测试系统性能。研究方法合理，技术路线可行

# 课题三：研究目标、内容和关键技术

■ **研究目标：** 研制国际上首个基于粒子流算法的高粒度全吸收型晶体电磁量能器样机

■ **研究内容：**

- 闪烁晶体批量生产制备和性能测试
- 晶体+SiPM灵敏探测模块设计优化
- 读出电子学和数据获取系统的研制
- 量能器物理设计，机械设计和制作
- 探测器模块集成为电磁量能器样机
- 宇宙线，束流测试分析和性能研究



□ **关键技术：** 大长径比晶体光响应均匀性调制技术、闪烁晶体批量制备和质量控制技术、晶体表面处理和反射膜选型与包覆、晶体与SiPM耦合技术、大动态范围信号读出系统、灵敏探测模块与读出电子学的高度集成技术等

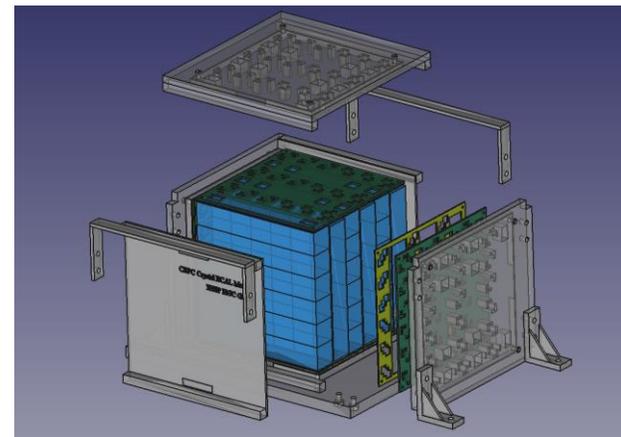
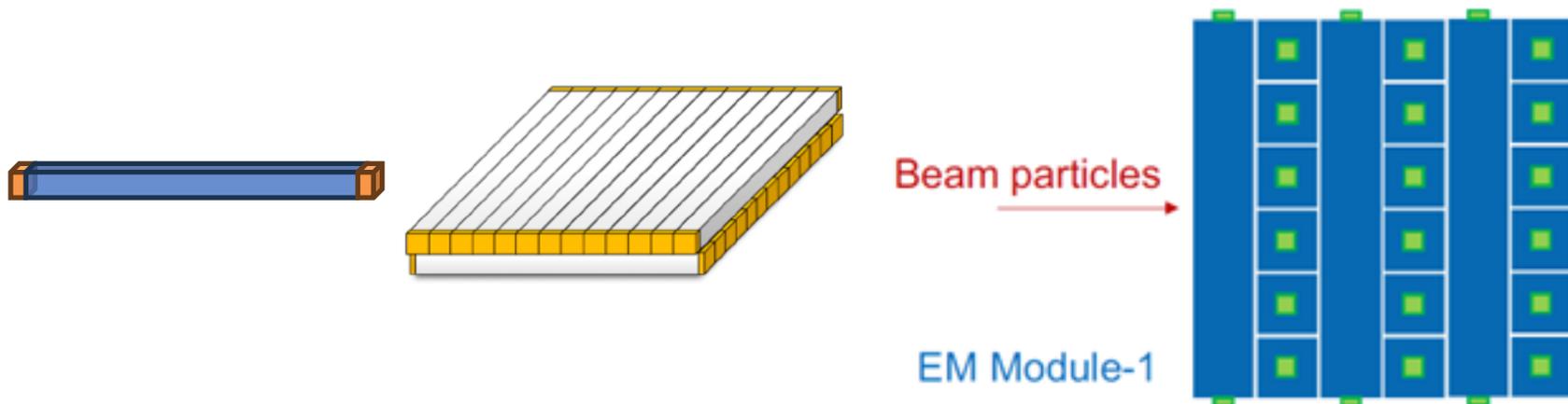
## 课题三：研究方案和技术路线

### ■ 本课题技术路线的可行性：

- **国内自主研发高性能闪烁晶体**：采用上海硅酸盐研究所独创的多坩埚下降法装置，研究晶体生长的特性和调控，进行各种光学性能测试与分析，确保课题组获得高品质的晶体用于样机研制
- **国内自主研发先进的SiPM器件**：拟采用北京师范大学NDL研制的SiPM和日本滨松的MPPC作为光电转换器件，样机研制将有助于提升国内SiPM的性价比和应用
- **团队成功研制了基于塑料闪烁体和SiPM的取样型电磁和强子量能器样机**，并利用CERN的高能束流完成测试，掌握了SiPM和读出电子学高度集成组装的核心技术

# 课题三：创新点

- 研制国际首个基于粒子流算法的高粒度全吸收型晶体电磁量能器样机
  - 取样型 → 全吸收型，显著提升电磁能量分辨【 $3-4\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ 】
  - 采用长条晶体 → 大幅减少电子学读出通道
  - 长条晶体正交密排 → 提高颗粒度，满足粒子流算法需求
  - 晶体两端读出 → 提高电磁簇射的时间响应和位置分辨
  - 晶体与SiPM相结合 → 结构小巧紧凑，提高低能光子(MeV量级)的探测灵敏度



# 收集效率

- 利用 $40 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  BGO晶体条进行宇宙线测试
- BGO 光产额~ 8000光子/MeV, GEANT4模拟 ~9.1 MeV / MIP
- 宇宙线测试结果 MVP ~ 1799 PE / MIP
- 总体效率  $1799 / (8000 \times 9.1) \sim 2.5\%$
- 包括SiPM (S13360, S14160)的量子效率 25-30 %
- 不算SiPM效率, 其它的~10%