

超级陶浆装置 (STCF) 研究进展

郑阳恒

(代表STCF工作组)

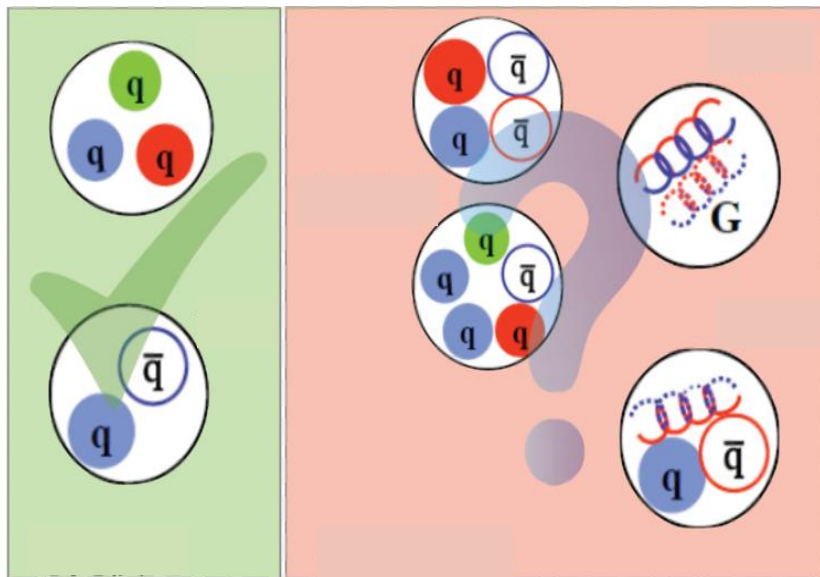
中国科学院大学

2026年7月15日，广州

提纲

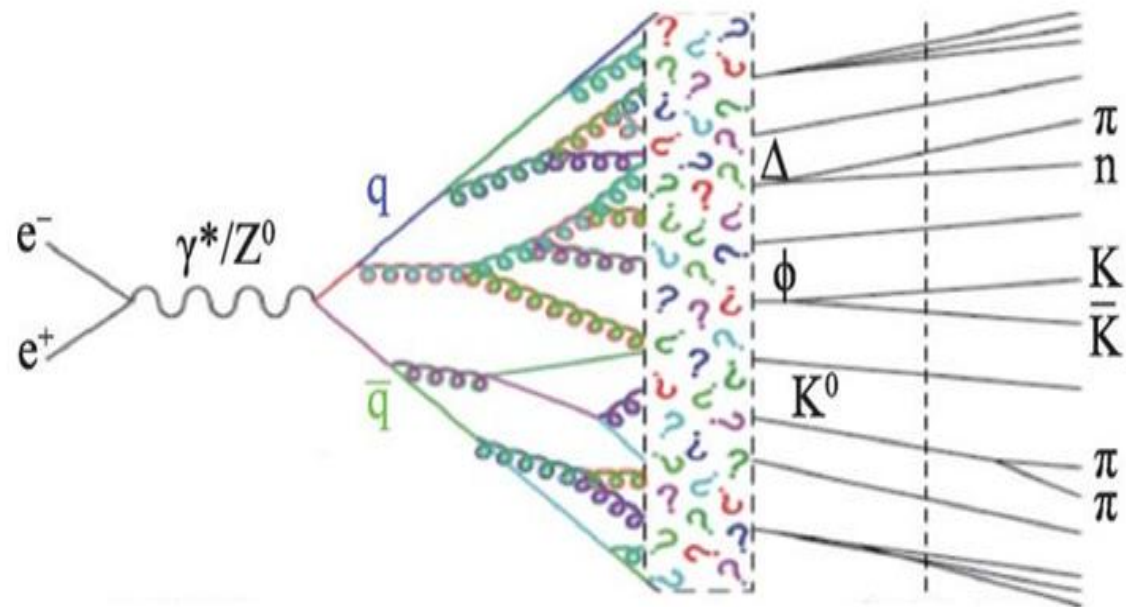
- ◆ 项目背景简介
- ◆ 项目的物理目标亮点
- ◆ 近两年以来的 关键技术攻关和研发亮点
- ◆ 总结

夸克禁闭研究中的实验观测量



普通强子 vs. 奇特强子
静态探针

可观测量：强子的产生和衰变
概率、质量谱



强子化过程
动态探针

可观测量：强子产生的角分布关联和
能量关联

实验测量+第一性原理计算+理论模型（或机器学习大模型）
⇒ 物质创生的时空演化问题

研究的基本思路

非微扰QCD，夸克禁闭问题等都非常具有挑战性！与领域的先驱们相比

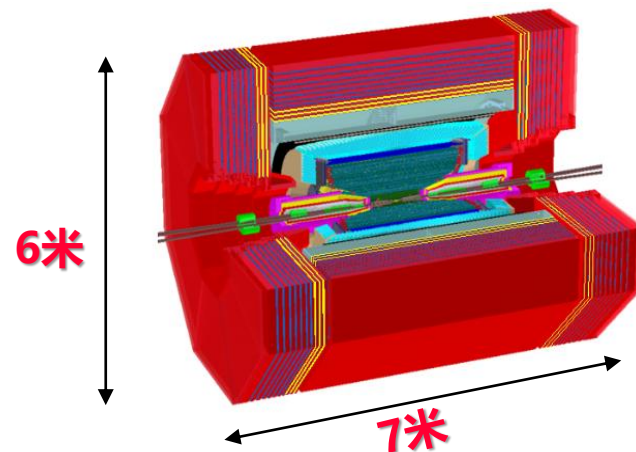
- ◆ 更先进的计算机性能和软件工具（例如：基于Tensor Flow+GPU的波形分析工具**TF-PWA**，**格点QCD**工具、**算法**的改进）
- ◆ 更先进的深度机器学习技术（例如：非微扰计算，基于深度学习的中子探测技术，模拟产生子）
- ◆ 更先进的实验装置（正在运行的**BEPCII/BESIII**，**Belle II**，**LHCb**，未来可期的**STCF**），更高统计量的数据

新一代大科学装置：超级陶粲装置 STCF

总预算：49.6 亿元

加速器：正负电子双对撞环

目标：高流强、低发射度、大能量范围、对撞点极小 β 函数和大交叉角，稳定运行与精确控制



探测谱仪

目标：在强辐照、高本底、高事例率、宽动态范围条件下超高精度粒子测量和鉴别

超高亮度
超宽连续可调能区

超高精度、超快响应
粒子探测与鉴别

超丰富
物理频谱

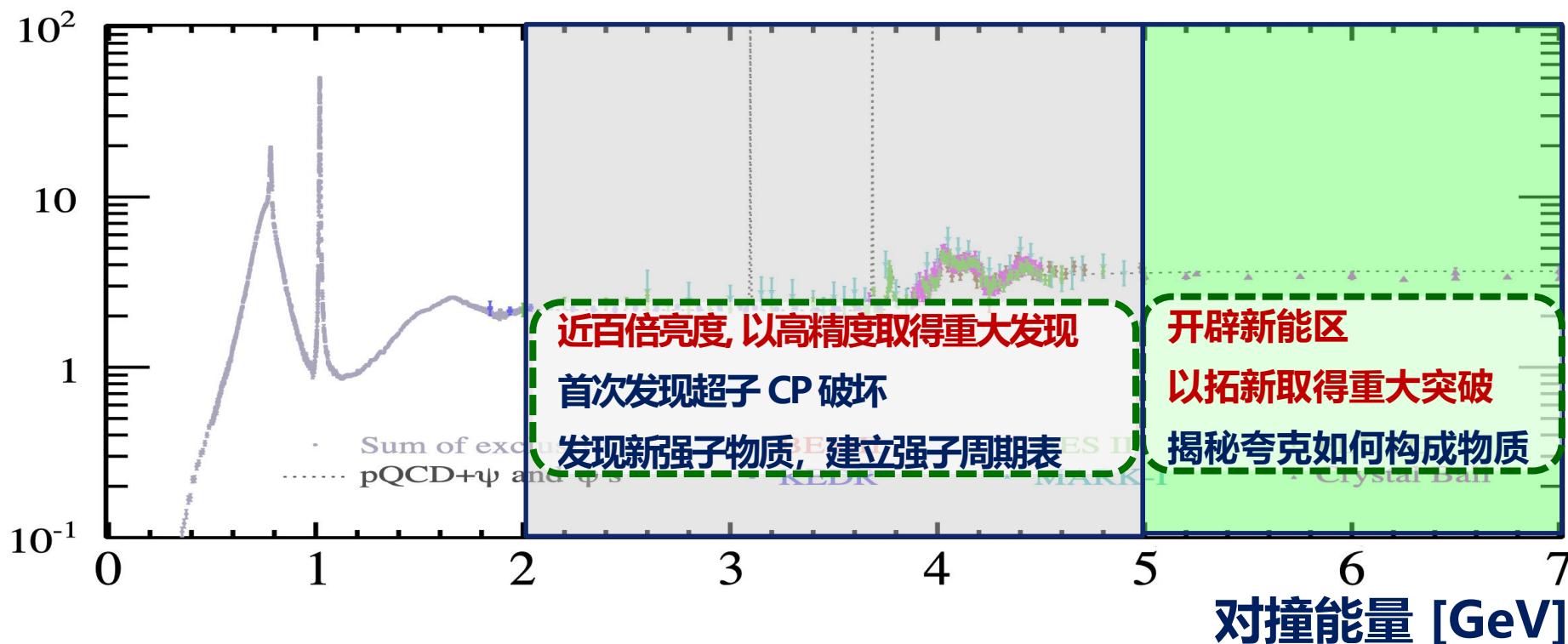
产生比现有装置高两个
量级的粲夸克和陶轻子

独特的能区，超丰富的物理

微扰与非微扰量子色动力学的过渡能区

丰富的共振结构、超大的粲偶素态产生截面、阈值产生强子对和 τ 轻子对

大量奇特量子数强子、胶子态、多夸克态、夸克胶子混合态



重大研究方向

基本对称性检验

超子和陶轻子CP破坏
 $K^0 - \bar{K}^0$ 系统CPT对称性
轻子味破坏等

探索色禁闭之谜

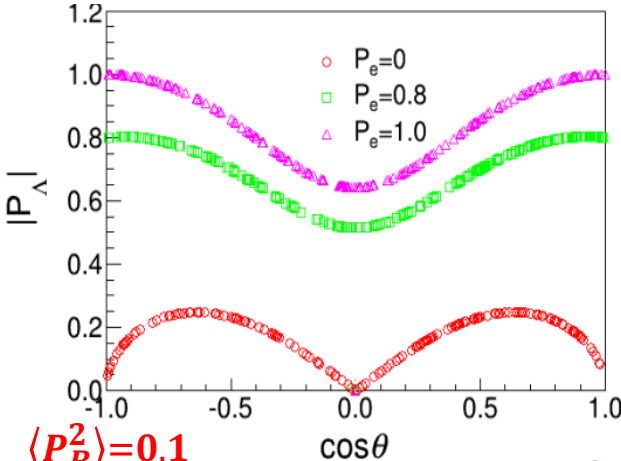
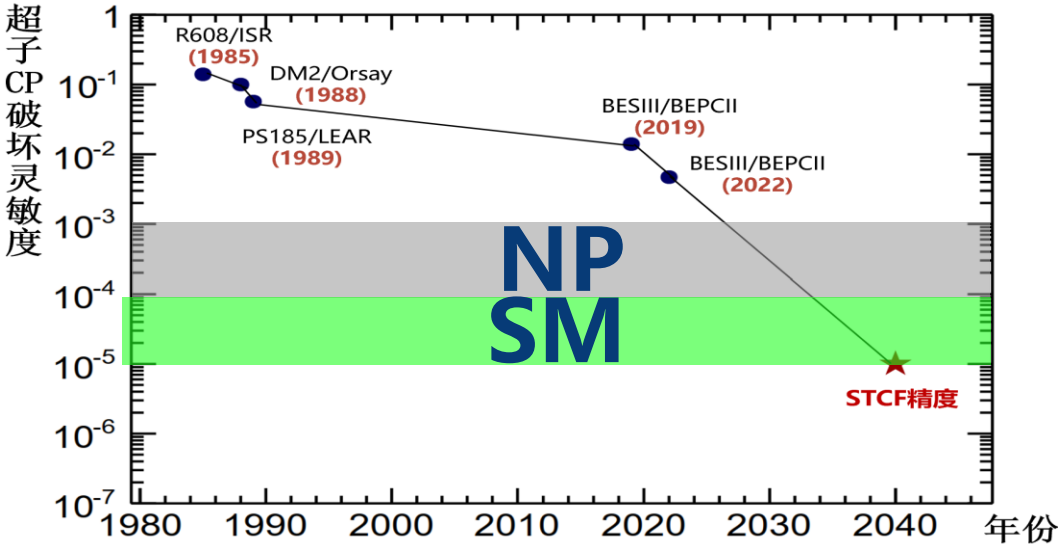
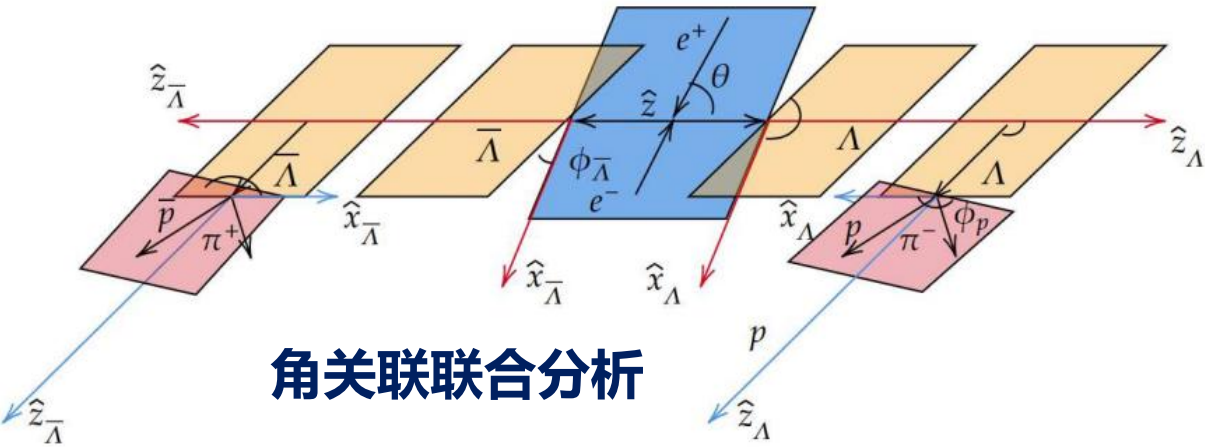
强子谱和强子结构
碎裂函数和能量关联

基本物理量精确测量

R值、陶轻子质量
电磁、强跑动耦合常数
CKM矩阵元

超子电荷宇称破缺(CPV)测量

粲夸克偶素衰变到超子对具有量子关联和极化的特性，极大提升探测超子 CP 破坏的灵敏度



$$1 \times 10^9 \Lambda\bar{\Lambda}, \quad \langle P_B^2 \rangle = 0.1 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{ACP} \sim 1.4 \times 10^{-4}$$

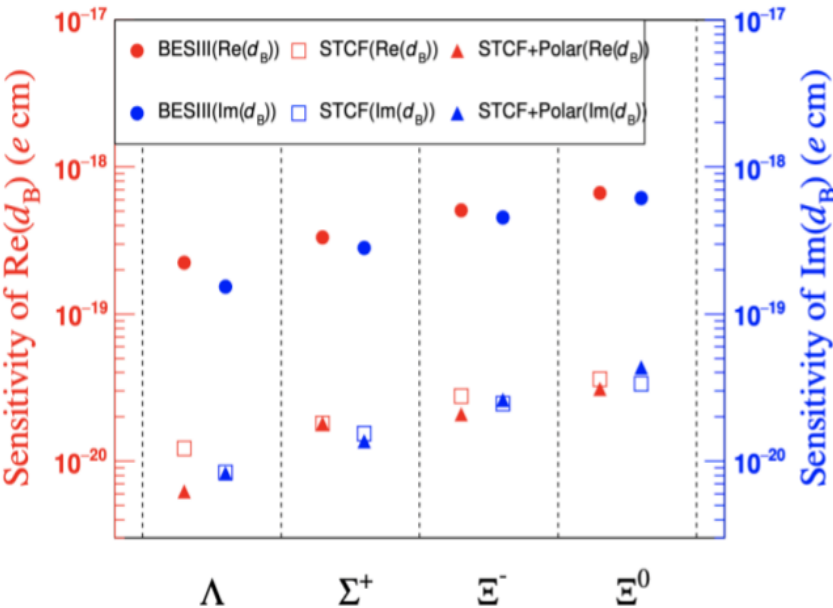
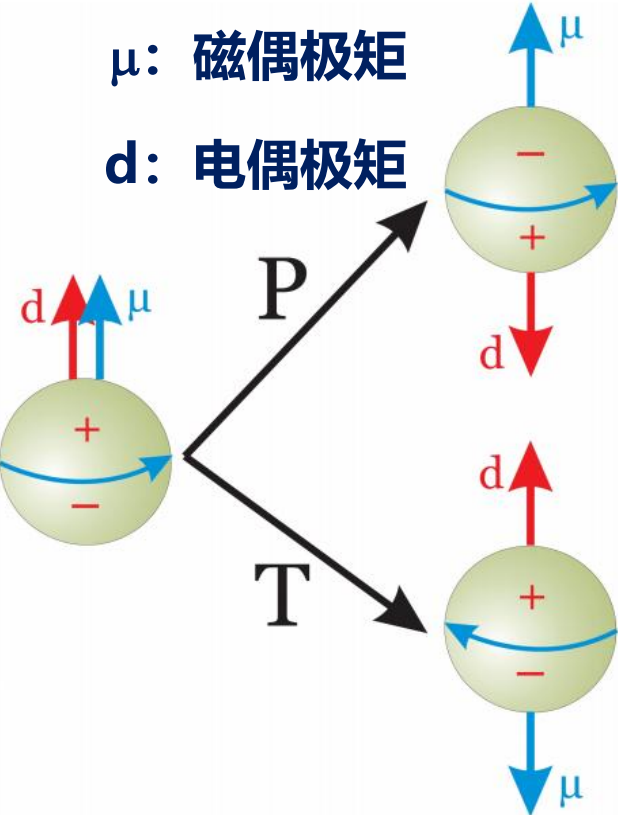
$$1 \times 10^9 \Lambda\bar{\Lambda}, \quad \langle P_B^2 \rangle = 0.8 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{ACP} \sim 5 \times 10^{-5}$$

一年 J/ψ 数据量 (3.4×10^{12}) 实现 10^{-5} 的测量精度，将首次观测到超子的 CP 破坏
束流极化将进一步提升测量灵敏度

超子电偶极矩(EDM)测量

非零电偶极矩会破坏时间反演对称性,可间接证明 CP 破坏的存在

$$\mathcal{A} = \epsilon_{\mu}(\lambda)\bar{u}(\lambda_1)\left(F_V\gamma^{\mu} + \frac{i}{2M_{\Lambda}}\sigma^{\mu\nu}q_{\nu}H_{\sigma} + \gamma^{\mu}\gamma^5F_A + \sigma^{\mu\nu}\gamma^5q_{\nu}H_T\right)v(\lambda_2)$$



(a)Sensitivity of $Re(d_B)$ and $Im(d_B)$

SM: $\sim 10^{-26}$ e cm

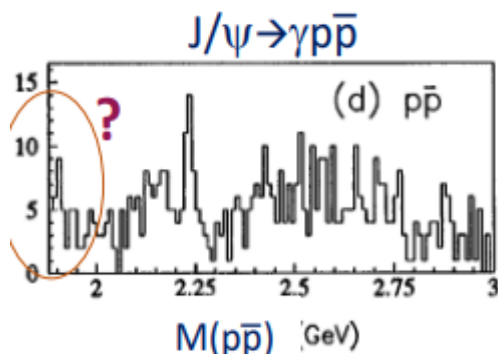
BESIII: milestone for hyperon EDM measurement
 Λ 10^{-19} e cm (FermiLab 10^{-16} e cm)
first achievement for Σ^+, Ξ^- and Ξ^0 at level of 10^{-19} e cm
a litmus test for new physics

STCF: improved by 2 order of magnitude

STCF 将开展超子全家族的 EDM 研究，灵敏度提升2个量级，实现国际最高精度

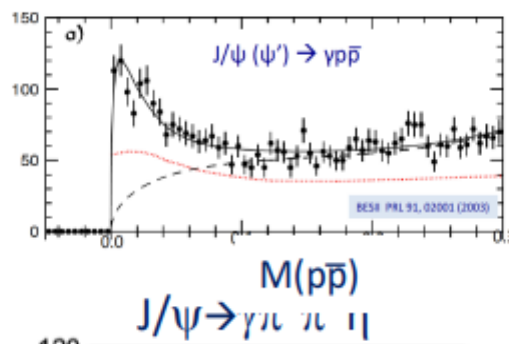
强子谱学与奇特强子态

1996: 8 M J/ψ 's



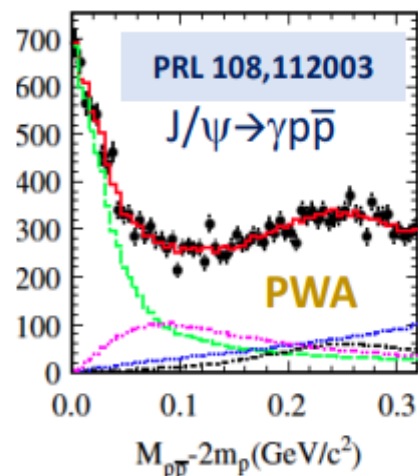
PRL 76, 3502

2002: 58 M J/ψ 's



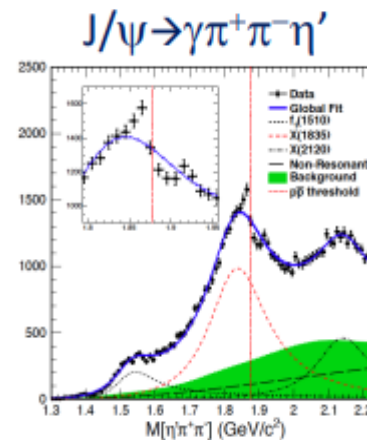
PRL 95, 262001

2011: 225 M J/ψ 's



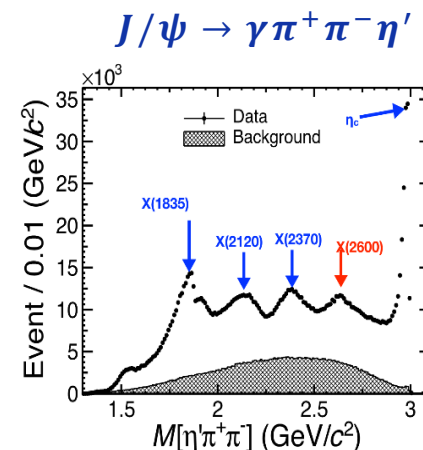
PRL 106, 072002

2016: 1.3 B J/ψ 's



PRL 117, 042002

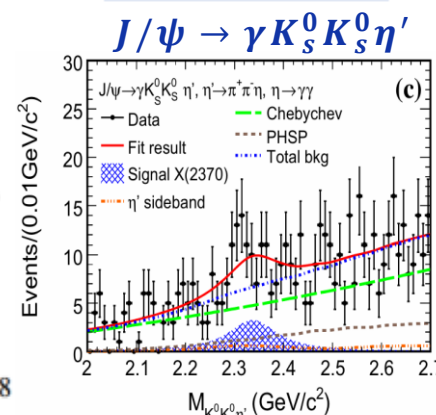
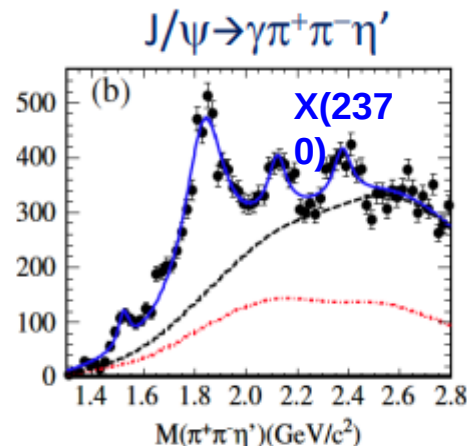
2022: 10 B J/ψ 's



PRL 129, 042001

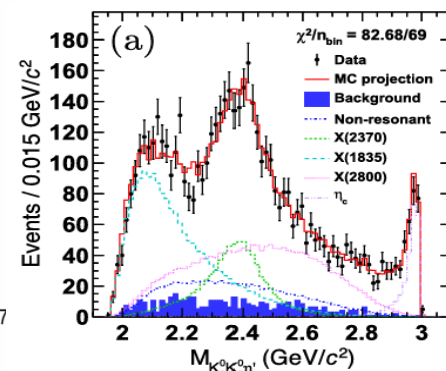
近年进展重大, 突破前黎明

独特能区、巨大统计量, 在全能区建立完整强子谱系, 有望构建“强子周期表”



EPJC 80, 746

$J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0 \eta'$



PRL 132.181901

$0^- +$ Pseudoscalar Glueball-like

基础软件工具：TF-PWA的开发与升级



<https://tf-pwa.readthedocs.io>

- ◆ 研究强子态和CP破缺的基础软件工具
- ◆ 基于TensorFlow软件库 + GPU
- ◆ 极大的简化了分波分析，加快了分析速度
- ◆ 分波分析：在**多体** ($\geq$ 三体) **末态**衰变中，通过对末态粒子的排列组合，寻找并测量**共振态**及其**量子数**。

快速

并行运算 (GPU 、 CPU)
自动微分
矢量运算

通用

适用于各种分波分析

易用

简单设置即可分析
包含各种功能 (作图 、 模拟等)
开源且提供稳定支持

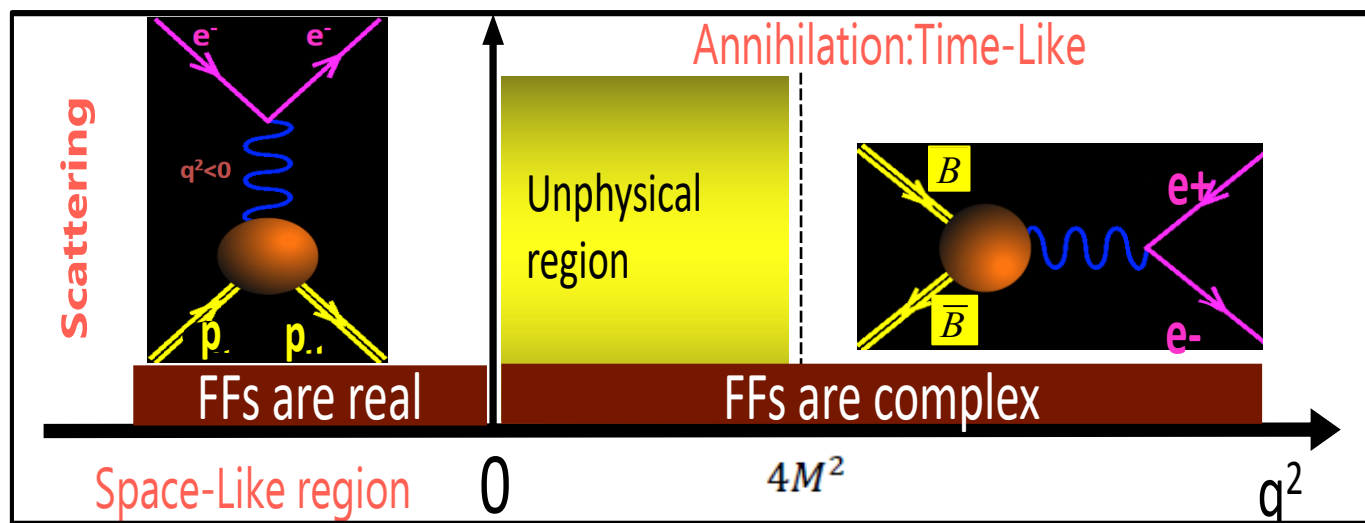
易用性 $\Rightarrow$ BESIII实验与LHCb实验上的主流分波分析工具之一

TF-PWA的应用

已发表文章 已有内部文档 正在进行的分析:

1. R. Aaij *neutro*
2. R. Aaij $D^- D_s^+$
3. R. Aaij *thresh*
4. R. Aaij *in B⁺*
5. R. Aaij *decays*
6. M. Ablikov $\Sigma(1385)$
7. M. Ablikov **JHEP**
8. M. Ablikov *hadro*
1. LHCb-AN
2. LHCb-AN
3. LHCb-AN
4. LHCb-AN
5. BAM-006 $\Lambda K^+ \pi^+ \pi^-$
6. BAM-007
7. BAM-007
8. BAM-007
9. BAM-007 $p K^- \pi^+$
10. BAM-008
11. BAM-008
12. BAM-008
13. BAM-008 *to 4.600 GeV*
14. BAM-00892, *Study*
15. BAM-00913, *Study*
16. BAM-00920, *Sea*
17. BAM-00921, *Amplitude*
18. BAM-00941, *Study*
19. BAM-00956, *PWA*
20. BAM-00957, *Sea*
21. BAM-00959, *PWA*
22. BAM-00963, *PWA*
23. BAM-00965, *Observed*
24. BAM-00968, *Study*
25. BAM-00971, *Study*
26. BAM-00986, *Partial wave*
27. BAM-00994, *PWA*
28. BAM-00996, *Study*
29. BAM-01020: *Amplitude*
30. BAM-01044: *PWA*
1. *Amplitude*
2. *Amplitude*
3. *Amplitude*
4. *Time dependent*
5. *Time dependent*
6. *Time dependent*
7. *Polarization*
8. *Measurement*
9. *Amplitude*
10. *Partial wave*
11. *Partial wave*
12. *Partial wave*
13. *Partial wave*
14. *Study of*
15. *Partial wave*
16. *Study of*
17. *Study of*
18. *Study of* $\psi(3686) \rightarrow p \bar{K}$
19. *Study of* $\psi(3686) \rightarrow n \bar{K}$
20. *Partial wave analysis of*
21. *Study of* $\psi(2S) \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \eta$
22. *Study of* $\psi(2S) \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^0$
23. *Partial wave analysis of*
24. *Partial wave analysis of*
25. *Partial wave analysis of* $\chi_{c1} \rightarrow K^+ K^- \eta'$
26. *Partial wave analysis of* $J/\psi \rightarrow \gamma \bar{\Lambda} \Lambda$
27. *Partial wave analysis of* $J/\psi \rightarrow \phi \eta f_1$
28. *Amplitude analysis of* $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 \pi^+ \pi^0$
29. *Amplitude analysis of* $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^+ \pi^-$
30. *Amplitude analysis of* $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^0$
31. *Amplitude analysis of* $\Lambda_c^+ \rightarrow p K_S^0 \pi^+ \pi^-$
32. *Amplitude analysis of* $\Xi^+ \rightarrow \Xi/\Xi/\Xi/\Xi^+$
33. *Amplitude analysis of* $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ D_s^- \pi^+ \pi^-$
34. *Polarization studies of strange-bottom baryons in* $\Xi_b^- \rightarrow \Xi^- \Xi/\Xi$ *and* $\Xi_b^- \rightarrow \Xi^- \Xi/\Xi$ *decays*
35. *Measurement of decay asymmetry parameters in* $\Xi_c^0 \rightarrow \Omega^- K^+$ *decay*
36. *Study of* $\psi(3686) \rightarrow K^- \Lambda \bar{\Xi}^+ + c.c.$
37. *Partial wave analysis of* $J/\psi \rightarrow e^+ e^- \Lambda \bar{\Lambda}$
38. *Amplitude analysis of* $\psi(2S) \rightarrow \gamma \phi \phi$
39. *Search for glueball candidates in* $\psi(2S) \rightarrow \phi K_S^0 K_S^0$
40. *PWA of* $\psi(2S) \rightarrow K \Lambda \bar{\Xi}$
41. *PWA of* $e^+ e^- \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$
42. *PWA of* $\psi(2S)$ *and* $\psi(3770) \rightarrow p \bar{p} K^+ K^-$

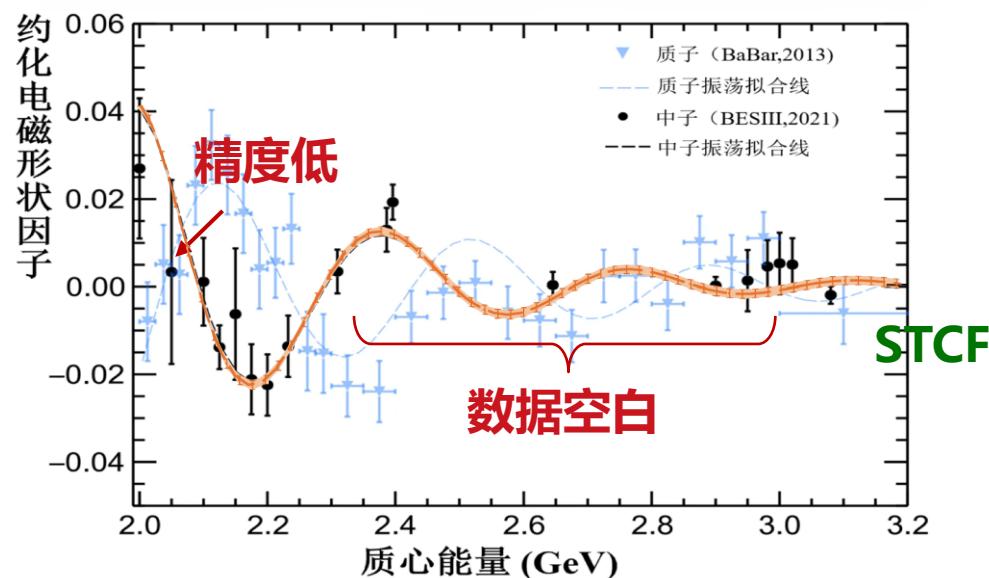
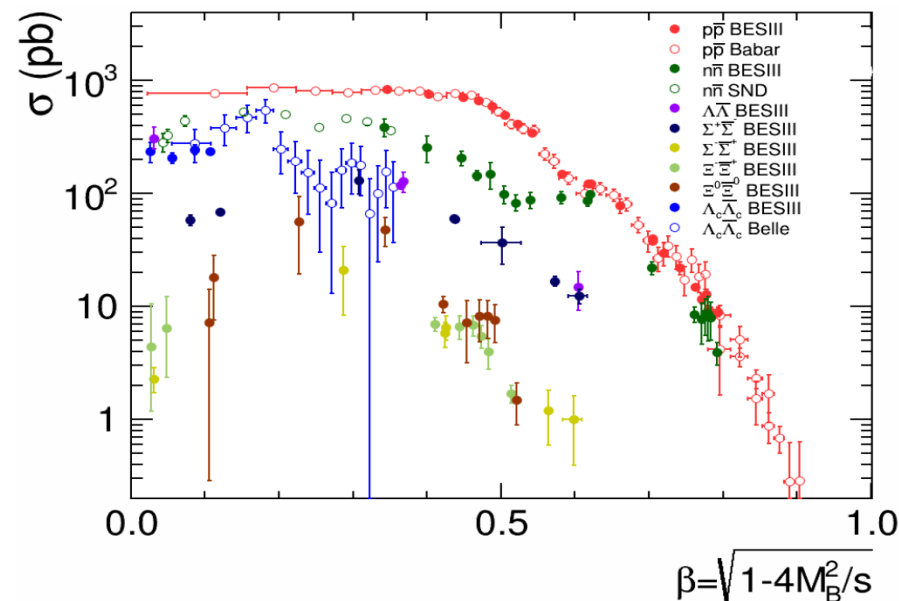
核子结构与电磁形状因子



EIC/EicC $\longleftrightarrow$ STCF

电磁形状因子是核子最基本可观测量之一，揭示核子内部**电荷与磁矩分布**，检验强相互作用理论

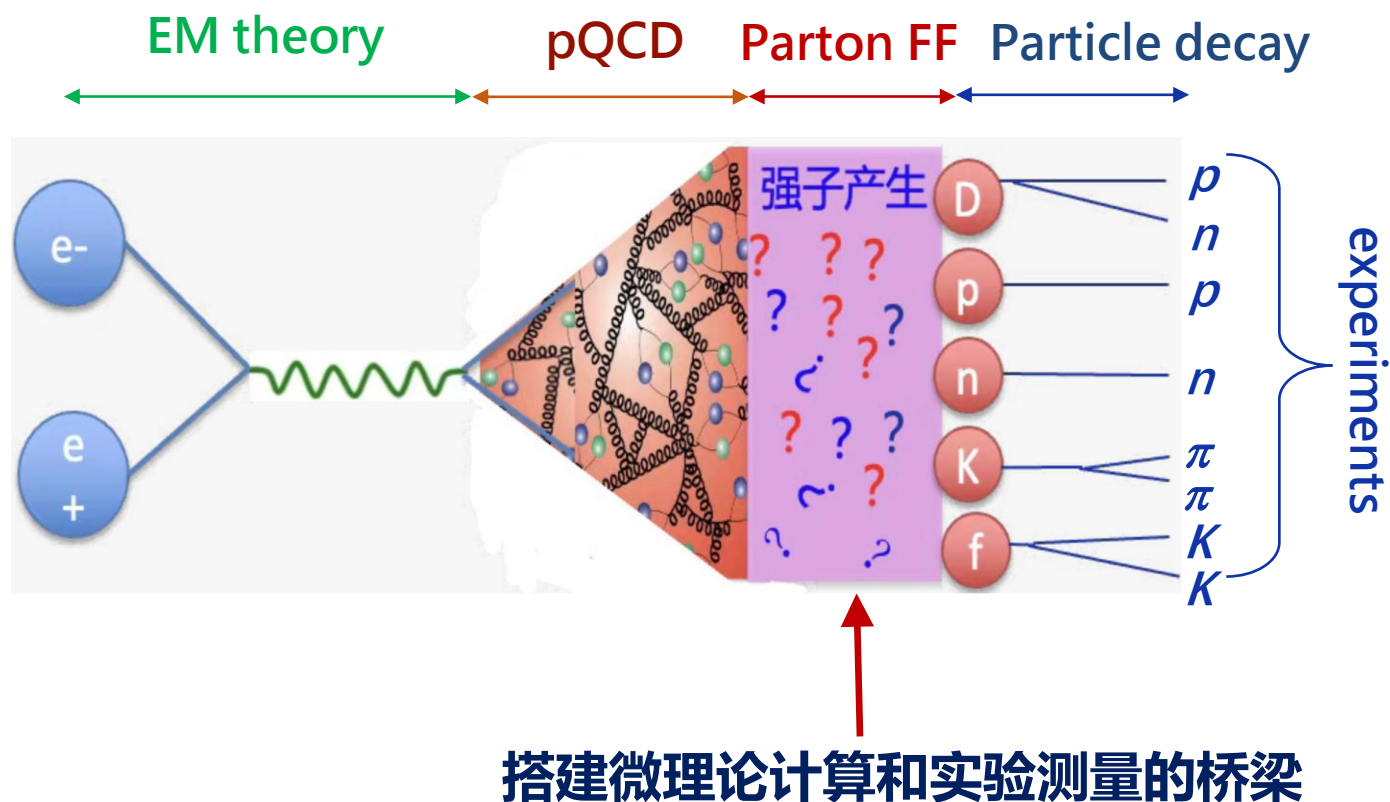
依托阈值效应与超高亮度两大优势，STCF 将开展**最高精度 (1%)** 类时电磁形状因子测量，将揭示在产生阈值处的**反常截面与中子振荡行为**



碎裂函数与能量关联函数

- 碎裂函数：描述部分子碎裂产物中**观测到强子的概率**，无法直接理论计算
- 能量关联函数：表征强子化过程中**能量权重分布特性**，具有红外安全和共线安全特性

两套**独立且高度互补**的检验 QCD
研究途径，构建强子化过程的**多维
层析成像**研究体系



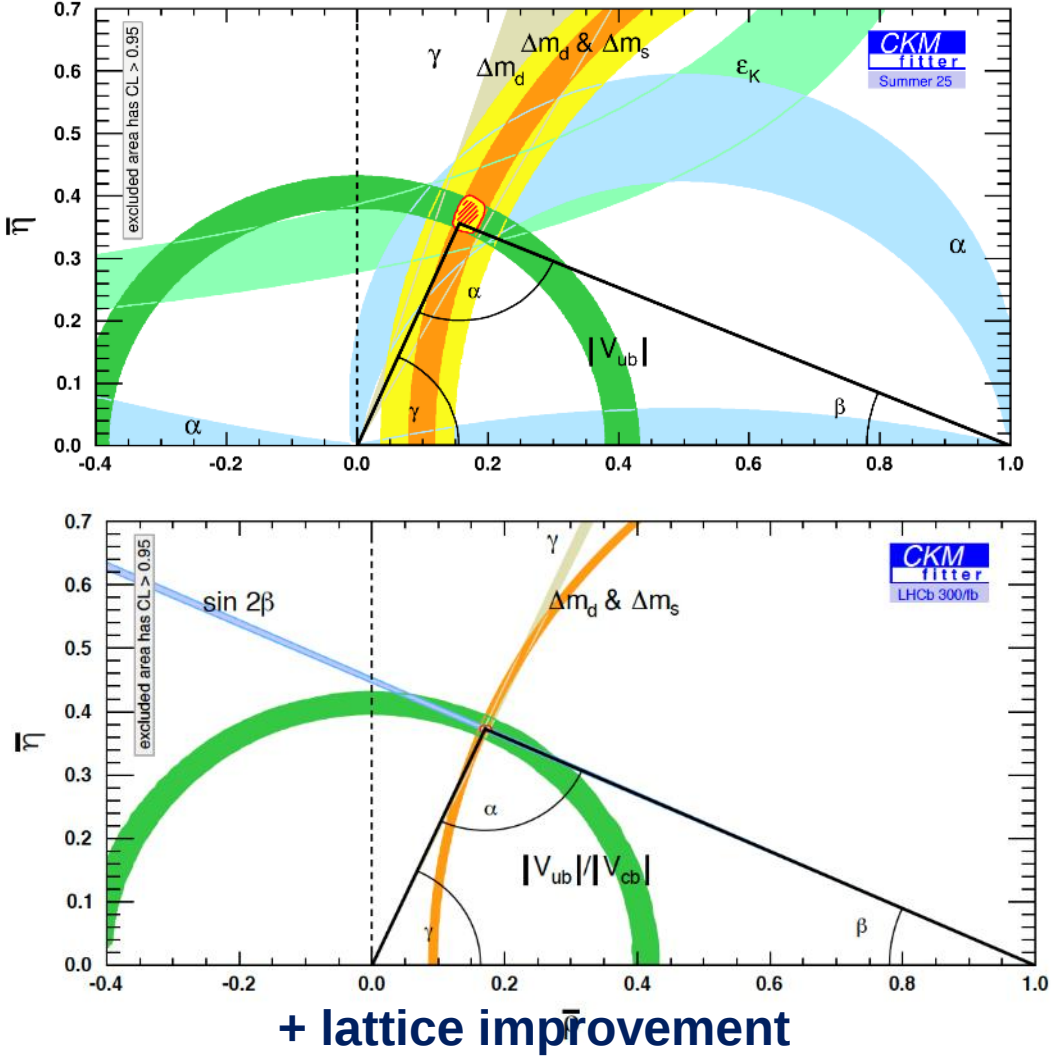
STCF 运行于**强子化效应最显著**的
能区，将积累**完备的强子化测量
数据**，实现部分子生成强子物质
动力学演化的**层析成像**表征

CKM精确测量: LHCb+Belle II+BESIII+STCF

Observable	Current LHCb (up to 9 fb ⁻¹)	Upgrade I (23 fb ⁻¹)	Upgrade I (50 fb ⁻¹)	Upgrade II (300 fb ⁻¹)
CKM tests				
γ ($B \rightarrow DK$, etc.)	4° [9, 10]	1.5°	1°	0.35°
ϕ_s ($B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$)	32 mrad [8]	14 mrad	10 mrad	4 mrad
$ V_{ub} / V_{cb} $ ($A_b^0 \rightarrow p\mu^-\bar{\nu}_\mu$, etc.)	6% [29, 30]	3%	2%	1%
a_{sl}^d ($B^0 \rightarrow D^-\mu^+\nu_\mu$)	36×10^{-4} [34]	8×10^{-4}	5×10^{-4}	2×10^{-4}
a_{sl}^s ($B_s^0 \rightarrow D_s^-\mu^+\nu_\mu$)	33×10^{-4} [35]	10×10^{-4}	7×10^{-4}	3×10^{-4}
Charm				
ΔA_{CP} ($D^0 \rightarrow K^+K^-, \pi^+\pi^-$)	29×10^{-5} [5]	13×10^{-5}	8×10^{-5}	3.3×10^{-5}
A_Γ ($D^0 \rightarrow K^+K^-, \pi^+\pi^-$)	11×10^{-5} [38]	5×10^{-5}	3.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}
Δx ($D^0 \rightarrow K_s^0\pi^+\pi^-$)	18×10^{-5} [37]	6.3×10^{-5}	4.1×10^{-5}	1.6×10^{-5}
Rare Decays				
$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	69% [40, 41]	41%	27%	11%
$S_{\mu\mu}$ ($B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$)	—	—	—	0.2
$A_\Gamma^{(2)}$ ($B^0 \rightarrow K^{*0}e^+e^-$)	0.10 [52]	0.060	0.043	0.016
A_Γ^{Im} ($B^0 \rightarrow K^{*0}e^+e^-$)	0.10 [52]	0.060	0.043	0.016
$\mathcal{A}_{\phi\gamma}^{\Delta\Gamma}$ ($B_s^0 \rightarrow \phi\gamma$)	+0.41 -0.44 [51]	0.124	0.083	0.033
$S_{\phi\gamma}$ ($B_s^0 \rightarrow \phi\gamma$)	0.32 [51]	0.093	0.062	0.025
$\alpha_\gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\gamma)$	+0.17 -0.29 [53]	0.148	0.097	0.038
Lepton Universality Tests				
R_K ($B^+ \rightarrow K^+\ell^+\ell^-$)	0.044 [12]	0.025	0.017	0.007
R_{K^*} ($B^0 \rightarrow K^{*0}\ell^+\ell^-$)	0.12 [61]	0.034	0.022	0.009
$R(D^*)$ ($B^0 \rightarrow D^{*-}\ell^+\nu_\ell$)	0.026 [62, 64]	0.007	0.005	0.002

2025

2040s



CKM机制是目前标准模型里已知的唯一CP破坏来源。
想要寻找宇宙所需的额外CP破坏来源，主要的瓶颈在于实验精度还不够高。

STCF 与未来国际高亮度前沿物理高度协同与完美互补，不可或缺

STCF 工程目标

正负电子对撞机

质心能量 → 2~7 GeV 连续可调

亮度 → $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @ 4 GeV

超高亮度、超宽能区
稳定运行

粒子探测谱仪

动量分辨率 → 0.5% @ 1 GeV/c

能量分辨率 → 2.5% @ 1 GeV

粒子鉴别能力 → K/π 4σ @ 2 GeV/c

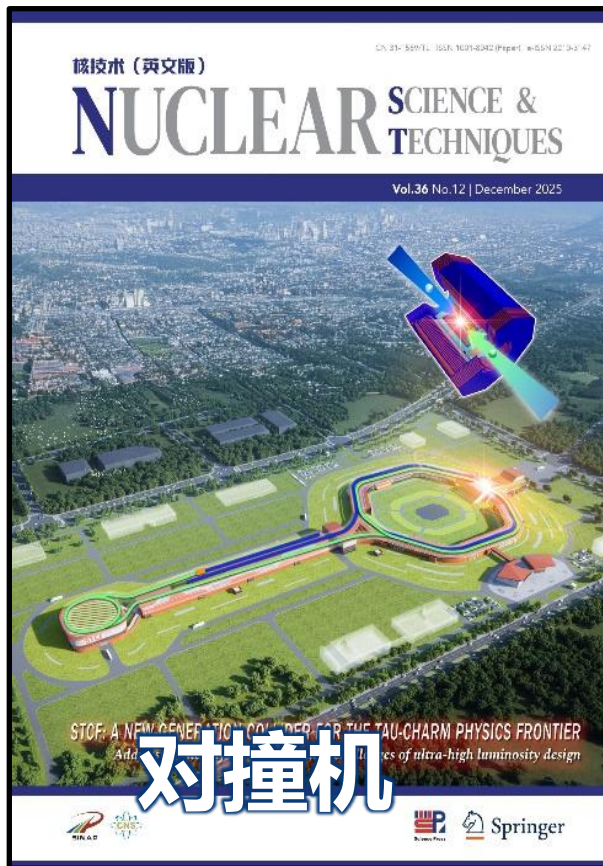
事例率与数据量 → 300KHz, 9GB/s

超高事例率、超高本底、宽动态范围
超高精度的粒子探测

STCF预研队伍



已发表概念性设计报告



- 总体概述
- 对撞环加速器物理
- 注入器加速器物理
- 技术系统设计
- 关键技术研发
- 公用基础设施需求

460 位作者
114 个单位
(国内90, 国外24)



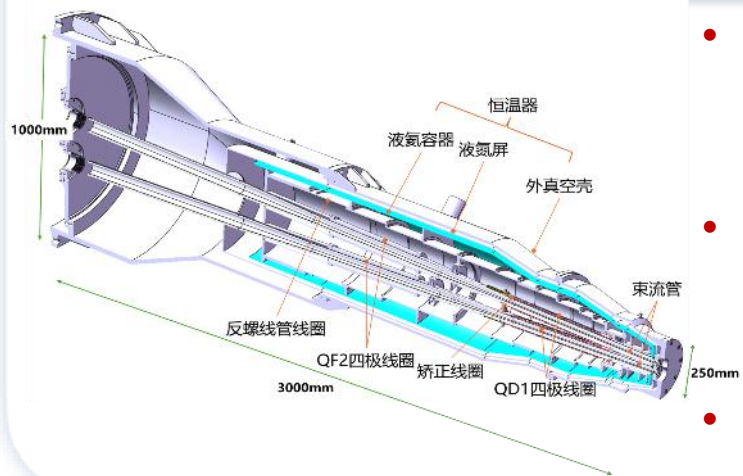
- 物理目标
- 探测谱仪设计
- 物理性能
- 未来计划

453 位作者
82 个单位
(国内64, 国外18)

确定设计方案和技术路线，得到国内外同行高度认同

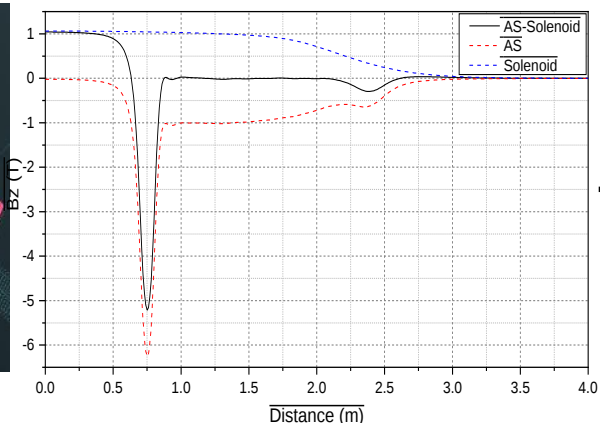
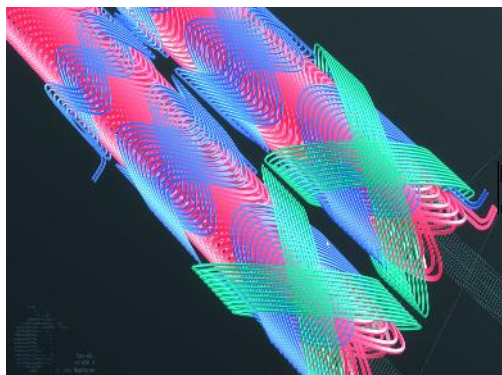
加速器技术系统：对撞区双孔径超导磁铁

实现对撞点极小束斑核心技术



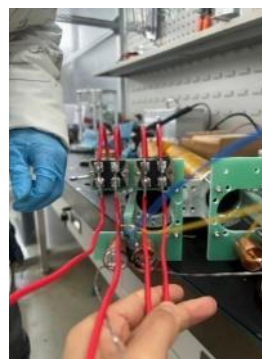
- **超高技术指标：**
高梯度 $> 50 \text{ T/m}$, 高精度 10^{-4} , 谱仪磁场屏蔽 $< 10 \text{ Gauss}$
- **空间极度受限：**
双孔径四极线圈最近距离 $< 54 \text{ mm}$, 设计空间 $< 7 \text{ mm}$
- **多种超导线圈组合：**
聚焦线圈x4, 矫正线圈x16, 螺线管x15

QD1多极矫正线圈



QD1矫正线圈设计，满足各阶设计强度要求

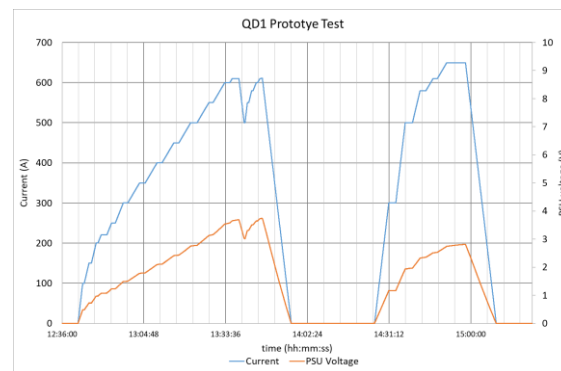
QD1全尺寸样机



接线接头



磁体+杜瓦+磁测组装



QD1样机磁场测试结果：达到验收要求

加速器技术系统：常温TM020高频腔

STCF单环需提供RF电压 **6 MV**和功率 **3 MW**，高次模充分
阻尼

新型常温TM020腔：频率499.7 MHz，结构特殊、体积大，
单腔腔压**>0.5 MV**，RF功率**≥300 kW**（国际最高）

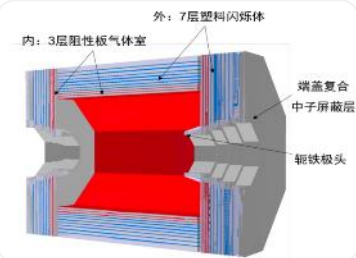
样机：完成加工、冷测和真空测试，待高功率测试



探测谱仪方案

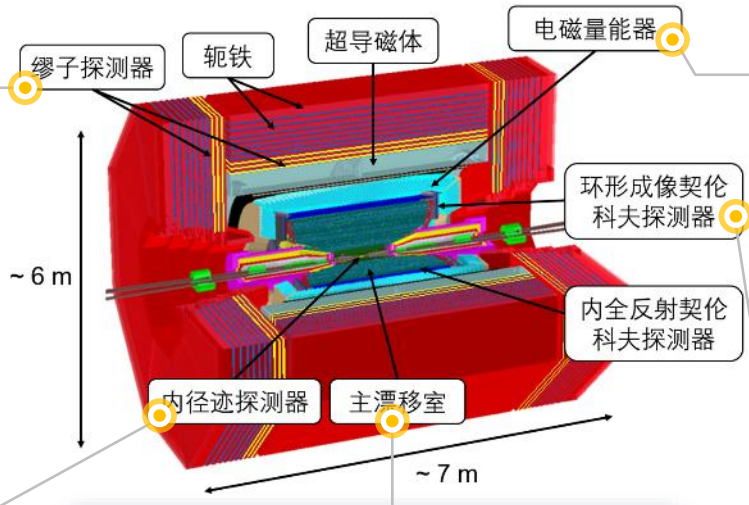
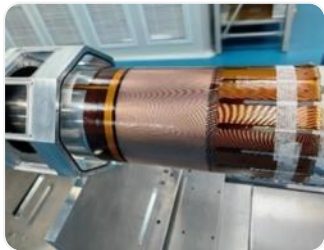
新型缪子探测器

阻性板室 + 塑料闪烁体探测



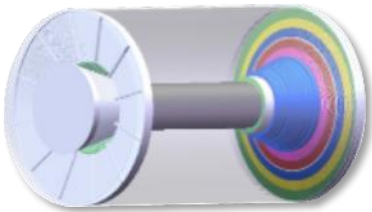
低质量内径迹探测器

阻性微槽型气体探测器



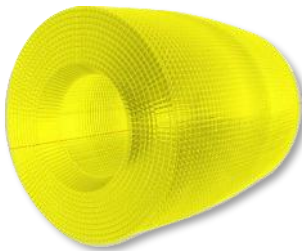
高计数率主漂移室

超低质量、超小单元漂移室



有时间信息晶体量能器

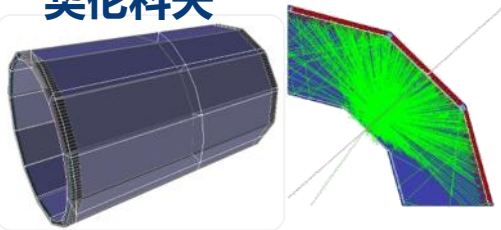
纯碘化铯+APD读出



新型成像粒子鉴别器

内全反射型契伦科夫

环形成像型



探测谱仪进展： μ RGroove内径迹探测器

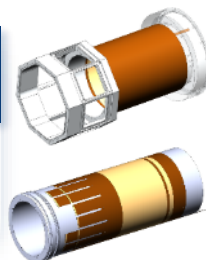
自主研制超低物质质量导电涂层

探测器物质质量为 $\sim 0.23\%X_0$



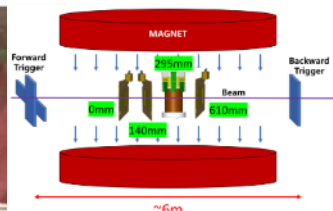
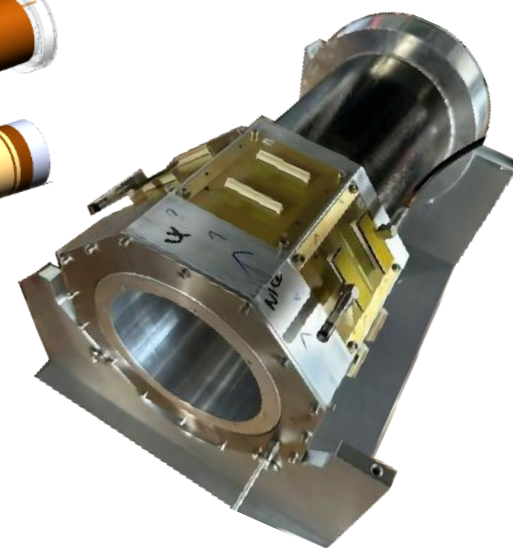
电极圆柱化无损安装及密封技术

安装过程对放大结构完全无损
可拆卸密封，实现探测器可维护



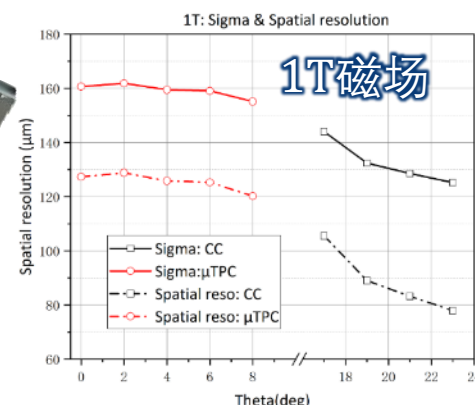
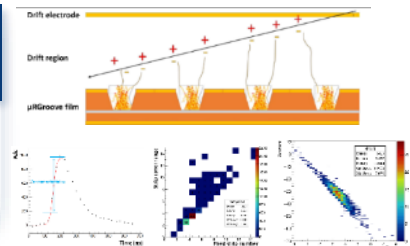
读出电子学集成电路

非线性小于1.5%，能量分辨
<10%@40fc，事例率4M Hz



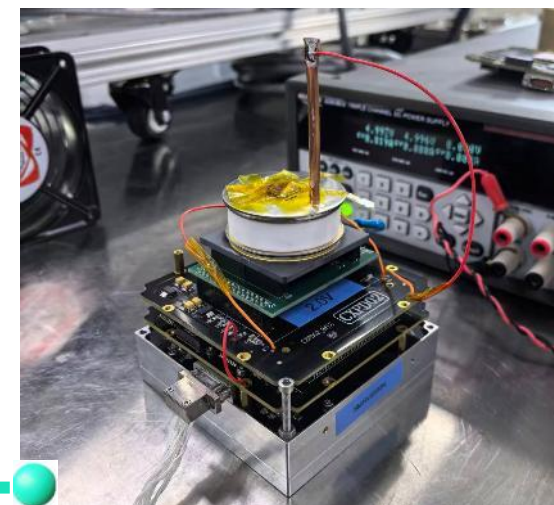
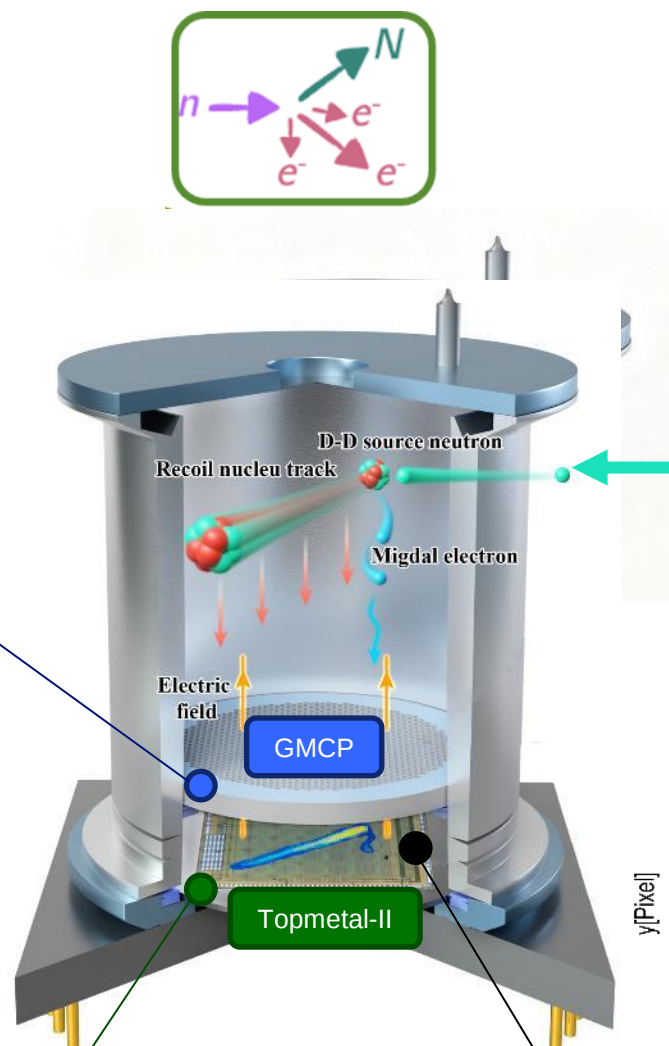
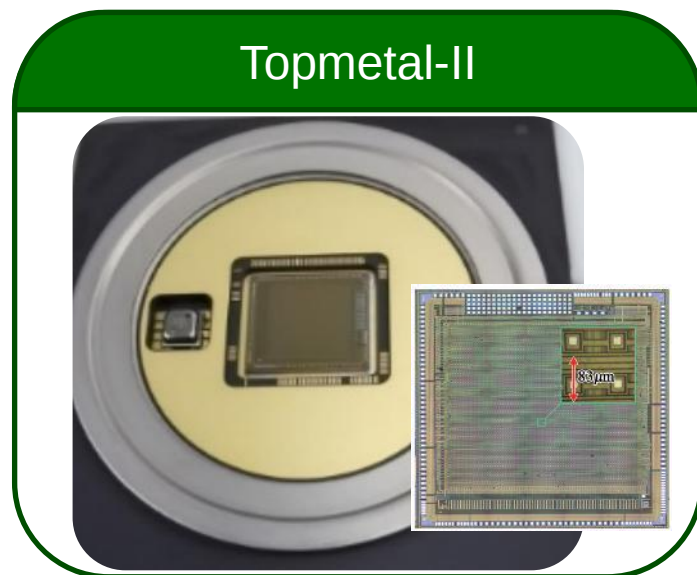
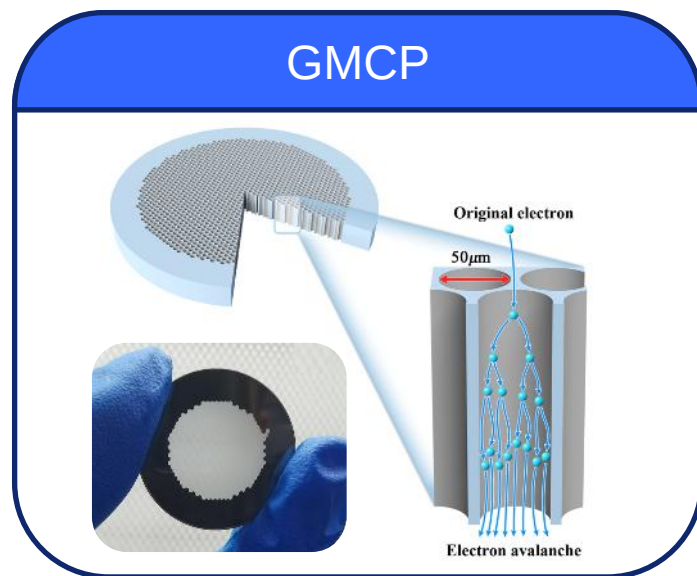
磁场下位置重建算法开发

1T磁场下位置分辨好于130 μ m

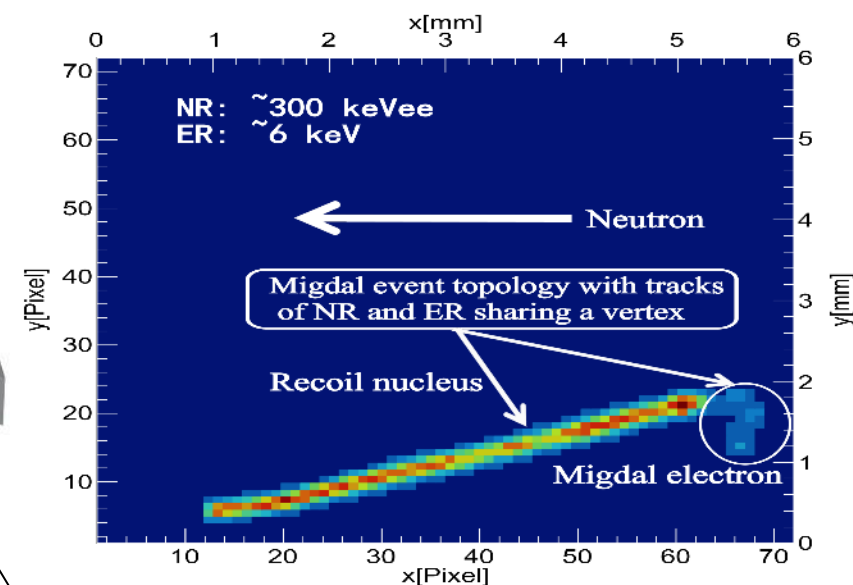


- 攻克了低物质质量电极、圆柱形安装及密封、高精度集成电路， μ TPC 模式重建等核心技术
- 探测器**物质质量与位置分辨**均为当前**国际领先水平**

Migdal效应的直接观测



氘氘中子源



探测谱仪进展：粒子鉴别器

大面积原子级超精细加工

面积 $> 0.5 \text{ m}^2$,
表面粗糙度 $< 1 \text{ nm}$



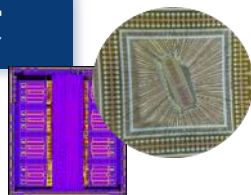
超快多阳极 MCP-PMT

单光子时间分辨 $< 45 \text{ ps}$
承受累积电荷 $> 20 \text{ C/cm}^2$



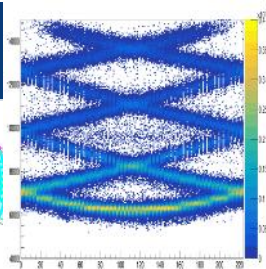
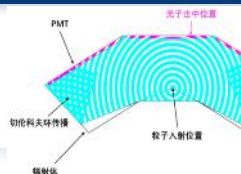
高精度定时 ASIC 研发

时间分辨率 $< 20 \text{ ps}$

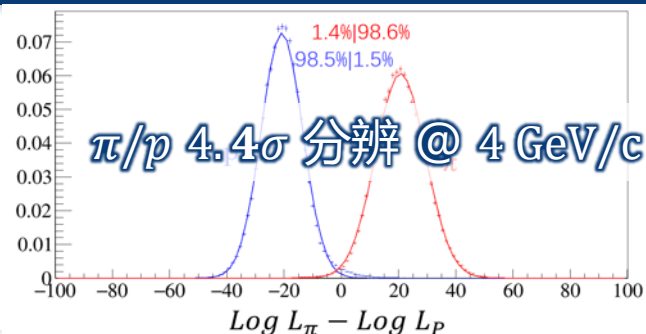


多维成像算法开发

$\pi/K > 4\sigma$ 分辨
@ 2 GeV/c



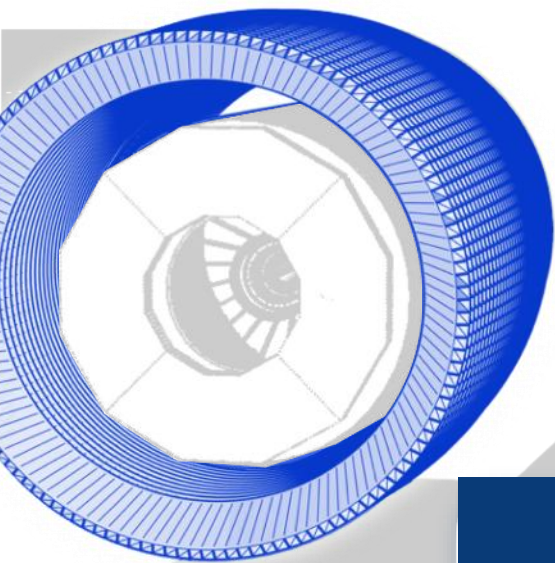
样机集成和束流联测



全尺寸样机

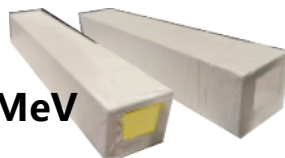
- 攻克了大面积原子级超精细加工、超快多阳极微通道板光电倍增、高精度定时 ASIC、多维成像算法等核心技术
- 性能在同类探测器中达到**国际领先水平**，满足项目需求

探测谱仪进展：电磁量能器



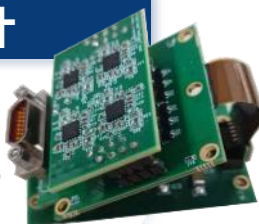
喷涂波长位移剂工艺
光产额提升3倍

高光输出
 $\sim 300 \text{ pe/MeV}$



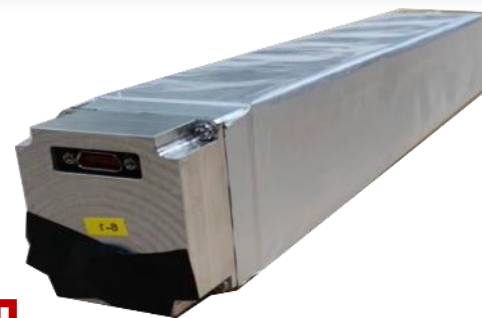
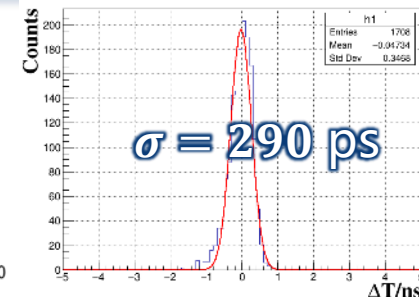
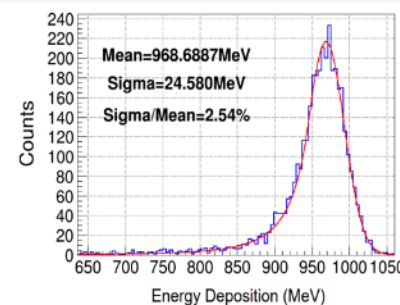
高灵敏大动态范围
读出电子学设计

低噪声水平 $< 1 \text{ MeV}$
大动态范围 > 1000 倍



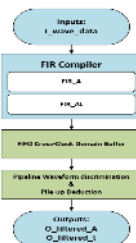
5X5样机

样机集成和束流联测



在线时间、振幅精确提取

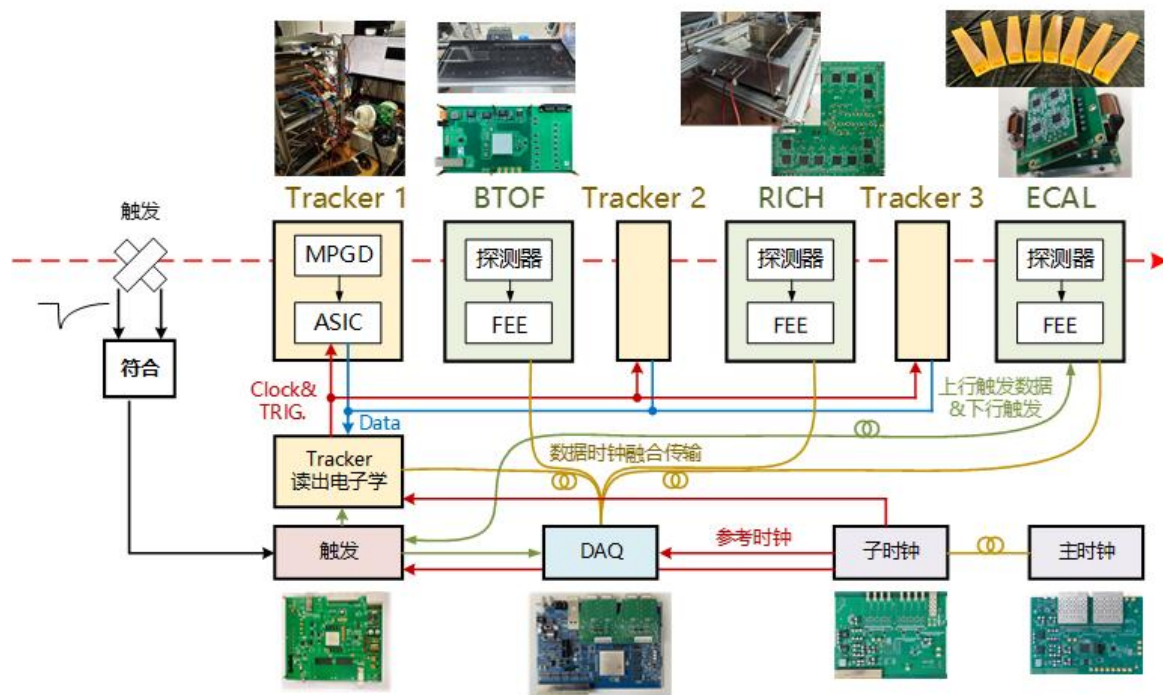
在线提取 $> \text{MHz}$
应用FPGA实现基于流水线最优滤波波形拟合



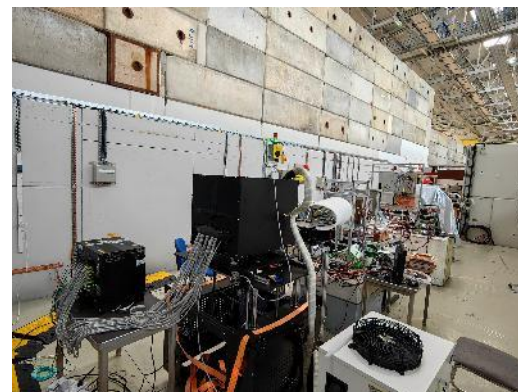
- 解决了光产额、高灵敏大动态范围读出电子学、在线时间福大信号精确提前等核心技术
- 在MHz本底事例率下实现高精度能量、时间的测量
- 性能达到**国际领先水平**，满足项目需求

探测谱仪联合束流测试

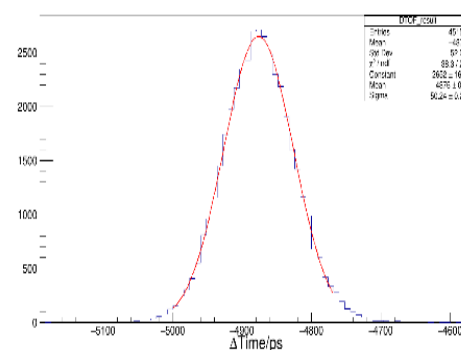
- **探测谱仪多系统的集成：内径迹探测器、桶部粒子鉴别器、端盖粒子鉴别器、电磁量能器、时钟系统、触发系统、数据获取系统**



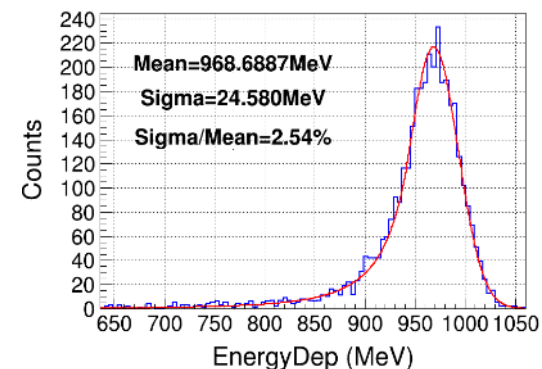
- 在欧洲核子研究中心（CERN）使用高能粒子束流，进行两次联合测试，系统性能达到甚至超过设计指标



粒子鉴别器: $\sigma_t \sim 25$ ps



电磁量能器: $\sigma_E/E \sim 2.5\%$



“十五五” 国家重大科技基础设施项目申报



2024年7月，兰州
建议书撰写动员会



2024年11月，六安
建议书讨论和物理目标凝练



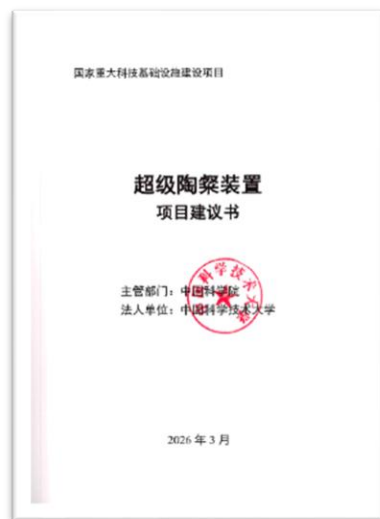
2025年7月，湘潭
建议书讨论、进度检查



2025年8月，六安
建议书初稿提交中国科学院



2025年10月，六安
建议书定稿提交国家发改委



2026年1月，国家发改委
属性评估 – 视频答辩



2026年2月，国家发改委
初步论证 — 视频答辩



2026年3月，国家发改委
竞争择优 — 现场答辩

进入发改委终评环节，暂无主管部门反馈意见

总结

- 超级陶粲装置是我国原创性提出的新一代大科学装置
 - 独创独有，技术创新性强，指标先进，具备强大的科学发现能力。
 - 在国家多个部门和安徽省政府的支持下，预研进展效果显著，在技术攻关取得重大进展，特别是在高亮度、高精度技术取得突破。
 - 选址在合肥未来大科学城，能够充分发挥综合性国家科学中心集群效应。
 - 投资体量、运行经费适当，性价比极高，非对称优势显著。安徽省已承诺将全力配合保障匹配经费及时到位。
- 在AI和新的计算工具、算法和软件的加持下，我们又拥有BEPCII-U/BESIII, Belle II, LHCb, 和未来可期的STCF海量数据 ⇒ 突破的临界点!

谢谢！

特别致谢彭海平、刘建北、傅金林、钱文斌、
刘倩、吕晓睿等提供报告材料！

Flagship Measurements at STCF (IAC推荐)

STCF aims to reveal the mystery of how quarks form matter and the symmetry of fundamental interactions

Scientific question: how quarks form matter

- 🚩 Hadron generation: fragmentation and energy correlator
- 🚩 Exotic hadronic states and more

Scientific question: symmetry of fundamental interactions

- 🚩 CP violation in the hyperon decay
- 🚩 Precise measurements of Strong phases in D decays
- 🚩 New physics search: $D_s \rightarrow \mu \nu$

The main considerations:

1. The **uniqueness** of the topics, aiming to **avoid direct competition** with Belle II and LHCb;
2. The ease of **understanding by the general public**, which is beneficial for gaining project approval in China;
3. Potential **synergies with other experiments** such as EIC/EicC, creating a win-win situation. For these reasons, these topics are ranked at the top.