



CEPC 物理 - 探测器 研发项目调 研

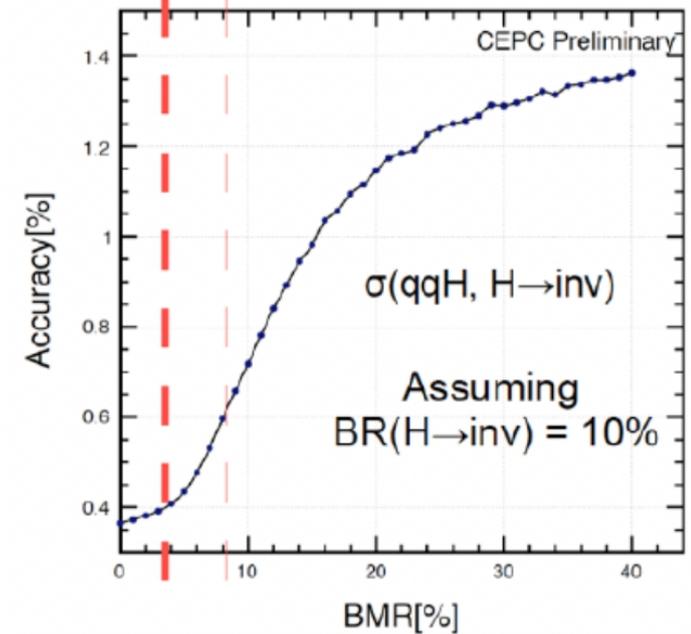
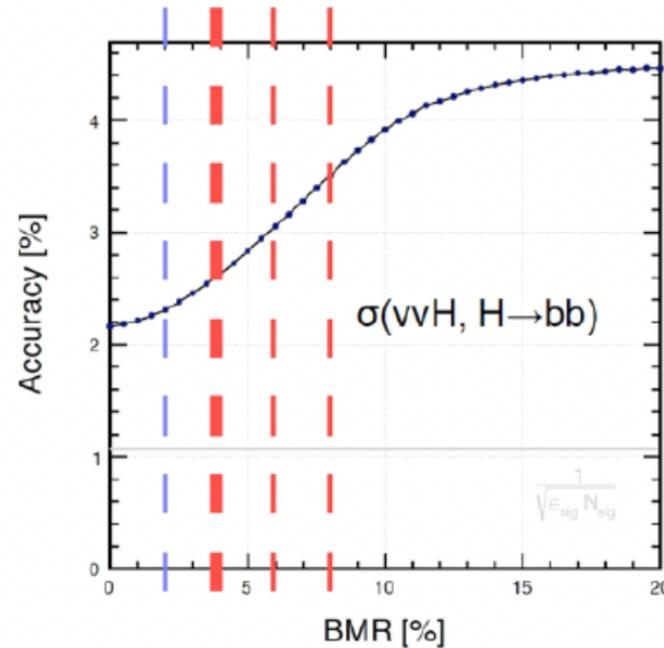
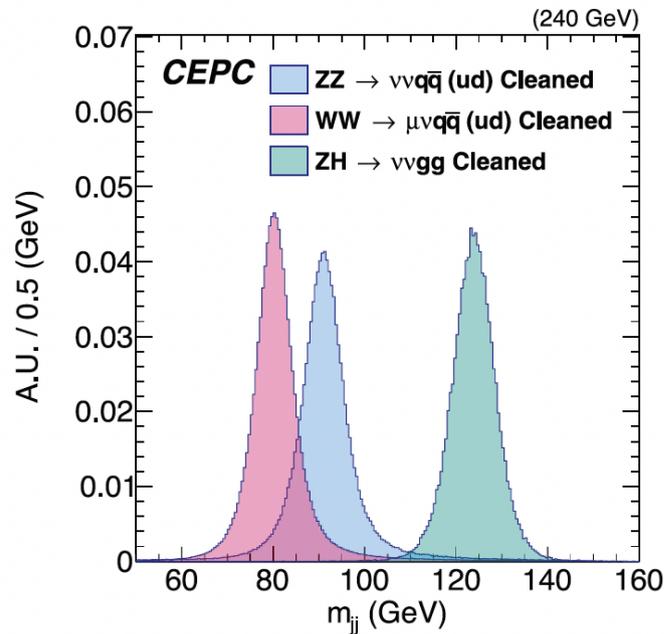
王建春，李刚，阮曼奇

同梁志均，李卫东，钱森，刘勇，魏巍，江晓山，祁
辉荣，胡俊，石澔琦，黄永盛等同事讨论

项目分类及列表

- A、有望在百万级别支持下产生亮点成果的项目：
 - PFA
 - Preparation study towards glass HCAL prototype
 - MDI Beam background simulation toolkit: development & validation
 - Gamma-ray camera R&D toward CEPC synchrotron radiation light source
 - TPC: pixel readout & dN/dx study
 - Simulation study for Physics White Paper
- B、所需人力较多、时间线较长、意义重大的项目：
 - Algorithm, Framework, Computing
- C、十四五规划中的“新兴前沿及未来技术”
 - 量子计算和人工智能在高能物理中的应用
 - “无线缆探测器”的电子学研究

A-1: PFA



- 背景:

- BMR 是 Higgs-Z 工厂探测器的核心指标，也是 PFA 性能的量度；CEPC Higgs 物理要求 $\text{BMR} < 4\%$ ；味物理、新物理则要求 BMR 越小越好。
- Baseline 已实现 3.8% 的 BMR（物理上限为 2%）；

A-1: PFA

- 目标：将 **BMR** 提升到 **3%**，对子探测器性能指标提出明确要求
 - 对 **Higgs invisible decay**，等效于 **10%** 的亮度增强
 - 对 **Higgs width**，等效于 **20%** 的亮度增强
- 方法：Arbor
 - Clustering Timing & Fragmentation Veto,
 - Energy Estimator, especially Hadron Shower Energy Estimator;
 - Geometry optimization
- 人员：曼奇等
- 经费 / 时间需求：100 万 / 3 年
 - 需一流软件 / 重建人才
 - 曾获得 **NSFC** 面上支持（支持 **Baseline** 上 **Arbor** 算法的优化，已结题）；目前无其他资源支持。

A-2: preparation toward glass-HCAL prototype

- 背景：
 - 基于玻璃探测器的 HCAL 可显著提升强子簇射、喷注能量测量性能
 - 造价控制到 1 CNY/cc 时，建造全吸收 HCAL 是可行的（体积 $\sim 200 \text{ m}^3$ ）
 - 需解决光产额、光读出、均匀性等大量技术难题
 - 需进行样机级别验证
- 目标：
 - 研究玻璃选型，控制成本至 1 CNY/cc
 - 研究读出系统，为制备物理样机做好准备
- 人员：钱森，刘勇团队
- 研究内容：
 - 配方 & 性能研究
 - 扫描高密度大尺度样品的光学特性，核辐射特性，时间特性；
 - 保持 / 提升光产额、提升密度（5–6 g/cc）。

A-2: preparation toward glass-HCAL prototype

- 研究内容：
 - 读出系统研究：
 - NDL-SiPM 电子学驱动板研制
 - 大面积 NDL-SiPM 的测试评估
- 近期目标：
 - 与 FPMT 的耦合测试
 - 单层闪烁玻璃阵列 + SiPM 阵列
 - 多层闪烁玻璃 + SiPM + PCB 模型
- 经费 / 时间需求： 100 万 / 3 年
 - 本项研究成熟后，可进行全尺寸样机建造，所需资源约 400 万

A-3: MDI-beam background simulation: toolkit development & validation

- 背景：
 - Beam background estimation 是 MDI 设计的重要环节，对于对撞机最终有效亮度以及探测器最终性能有巨大影响；是 FCC、CEPC 的共性难点。
 - 目前我们的模拟 / 实验差距估计在三个量级。
- 项目目标：
 - 开发软件集，在实验上标定验证，将模拟 / 实验差距控制到 1 个量级之内。
- 研究内容：理解本底物理机制，整合现有工具，在对撞机实验上进行验证：
 - SuperKEKB：当前公认的最佳参考；需合作。
 - B2/B2U：软件可应用于 B2U、通过 Collimator 优化压低本底。
 - CEPC/FCC：理解不同源项的标度行为，压低模拟 - 实验差距，为 MDI 设计提供参考。
- 人员：石澔筠等
- 经费 / 时间需求：100 万 / 3 年

A-4: Gamma ray camera R&D toward CEPC synchrotron source

- 背景：
 - CEPC 高能同步辐射光源能量高达 300MeV，应用广泛；需开发相应相机 / 成像系统
- 项目目标：
 - 研发较低能（150keV-MeV）Gamma 光子成像的探测系统，预计达到 10 微米量级的空间分辨能力，可得到材料内部微米量级的精细结构分辨，可应用于先进材料研发。
 - 对高能（1-300MeV）的 Gamma 相机设计展开前期模拟研究
- 研究内容：
 - 超薄闪烁晶片加工、光纤板粘接耦合、砂轮减薄机的磨削、化学机械抛光等设计技术；
 - 可调焦、辅助对焦、像差修正、光路设计；系统集成设计技术；
 - Gamma 相机空间分辨和时间分辨测试平台搭建及测试；
 - Gamma 光子响应、重建的模拟研究。
 - Gamma 光子事件甄别技术；
- 人员：黄永盛，梁志均，阮曼奇等
- 经费 / 时间需求：100 万 / 3 年

A-5: TPC – pixel readout & dN/dx study

- 背景：
 - TPC 具有物质质量小、模式识别能力强的优点。
 - 味物理等测量对 Pid 能力有强烈需求；一般认为 Pion-Kaon 的分离能力需要好于 3-sigma；而 dN/dx 在 Pid 方面极具潜力。
 - Pixel 读出有望提供极高的数据读出速率，可通过低增益读出模式改善粒子回流，有望具备 dN/dx 能力提升 Pid 性能
 - 具有良好的国际合作环境
- 项目目标及内容：
 - 建造基于 Pixel Readout 的 TPC 样机，其中 Pixel Size 不大于 0.5mm*0.5mm，进行激光 / 宇宙线 / 束流测试，验证其 dN/dx 读出能力及分辨率。
- 人员：祁辉荣等
- 经费 / 时间需求：100 万 / 3 年

A-6: Simulation study for Physics White Paper

- 背景：
 - 李卫东老师帮助 CEPC 获得了 $\sim 2k$ CPU 的计算资源
- 项目目标：
 - 完成 Z pole/ $t\bar{t}$ -bar 的官方样本产生，系统完成标志性物理分析测量，提升物理白皮书质量。
- 人员队伍：李刚，亚泉，胥爱，李钊，曼奇，高宇，外单位合作等
- 研究内容：
 - 标志性物理测量的讨论及确定
 - NLO、NNLO 精度的产生子样本产生及验证
 - 标志性物理学测量的模拟研究及整体诠释
- 经费 / 时间需求：
 - 100 万 / 3 年
 - 相关课题“CEPC 上的新物理研究”得到了 100 万的所创新支持（申请 280 万）

B-1: Algorithm, Computing, Framework

- Algorithm 是探测器设计优化的核心，需大量高水平人力投入。研究内容：
 - 漂移室重建、粒子鉴别
 - 新几何下的重建算法 (Xstal-bar ECAL, etc)
 - 高级物理标的物 (Jet Flavor, Jet Charge, etc)
- Computing, CEPC 实验面临 EB 级数据挑战。研究内容：
 - 基于中心“数据湖”和分布式缓存研究； 团队：卫东，胜森，李刚，曼奇 ...
 - 智能化数据传输及管理系统 (Rucio) 研究
 - 超算资源的规模应用研究
- Framework: 目前已参加 Key4Hep 国际合作，需进一步完成：
 - CEPC 平台软件开发，算法迁移以及验证
- 基于机器学习的探测器模拟：
 - 模拟软件框架及其同他工具的整合
 - 基于不同网络的模拟算法实现及性能研究 (GAN , VAE , AutoML 等)

人力奇缺！

小结

- 需关注 ECFA 等规划，跟踪、参与国际研发进展，把握潮流，增强协同，开动创新。
- 优先支持 A 类项目，争取亮点；
 - 围绕“探测器设计 + 新型软件 + 硬件样机 + 物理潜力分析”的主线展开，兼顾 CEPC 同步光源辐射光源关键问题；
 - 多个项目关联显著（PFA，Glass，SiPM 等），协同增效显著；
 - 需加强项目间交流协调，起到 $1+1 > 2$ 的作用。
- 算法、软件框架、计算意义重大，瓶颈在于人才和人力。
 - 加大人才引进、留所的力度；
 - 加大和高校的合作、特别是联合培养力度。
- Silicon Sensor 研究在 MOST 项目中已经取得良好进展 (Jadepix 验证高空间分辨率，Taichu 验证整合性能等)，希望能由下一期 MOST 项目（或同等级别的支持）整合上述成果，并在制造工艺上有所突破（从 180 nm 提升至 65nm）、进一步提升性能。
- Xstal ECAL，Wire Chamber 等目前已经得到一定规模的支持。
- 在 ILC 形式晦暗、FCC 强势的情况下，我们需要足够的资源、支持国际合作、以及解封后的差旅交流。

Backup

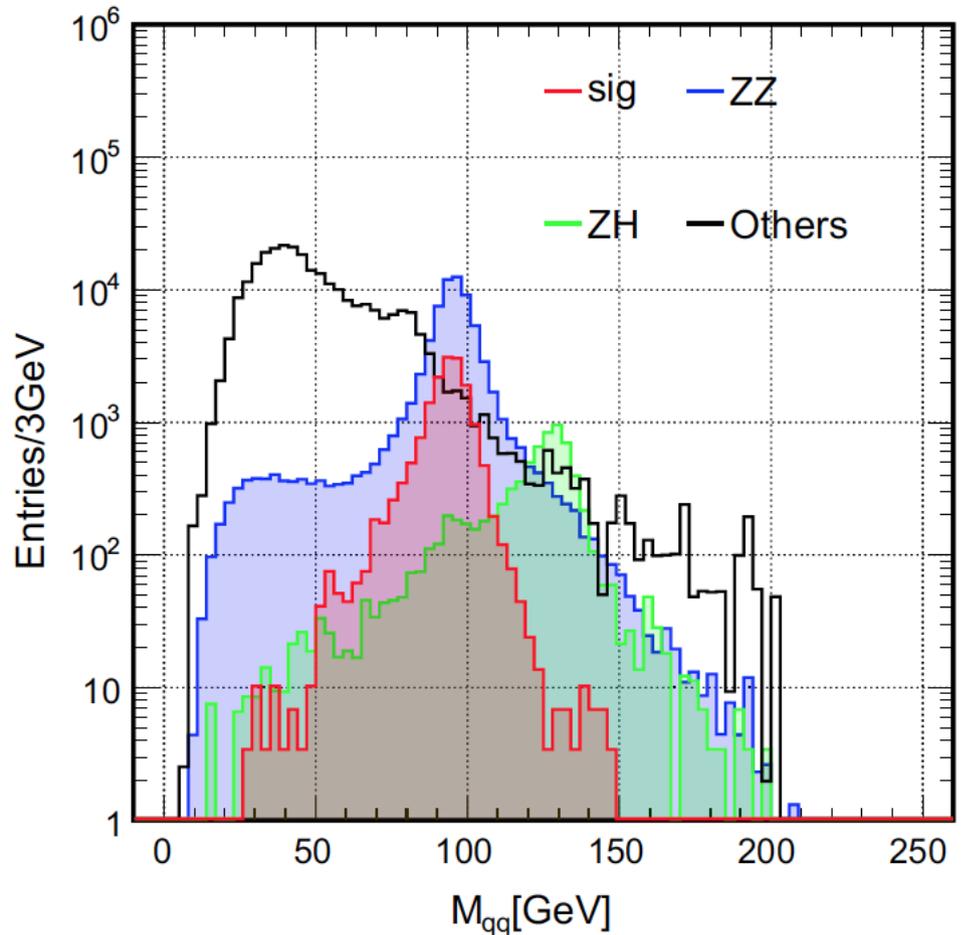
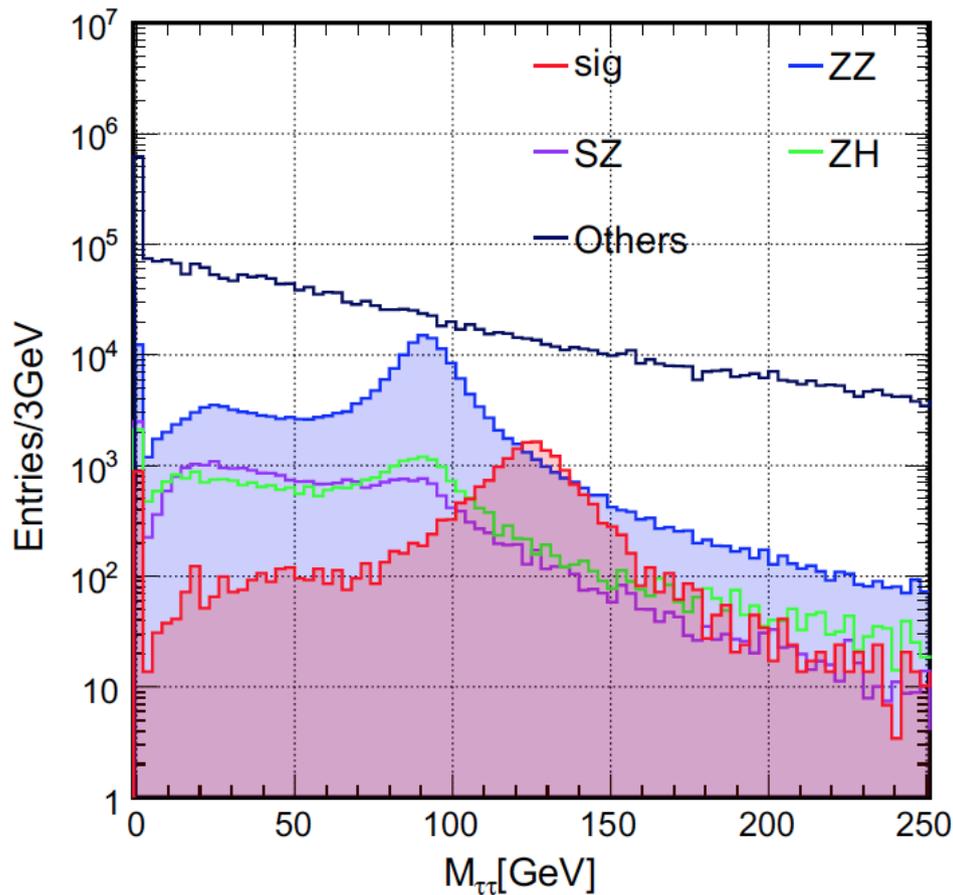
C-1: preparation study of 5G/6G DAQ

- 背景：
 - 5G/6G 芯片信号定向无线传输可节约大量探测器内部电缆，减少死区、提升性能。
 - 初步估算，目前的传输带宽比需求低至少 1 个量级；
 - 探测器内部电磁 / 噪声较为复杂。
- 项目目标：
 - 完成 1-2 个子探测器系统 5G/6G 读出系统的概念设计
 - 建造小型几何样机，模拟子探测器内部几何 / 电磁边界，通过相对成熟便宜的芯片，检测工作环境对读出性能的影响。辅以电磁仿真验证。
 - 建造基于 5G/6G 技术的读出系统样机（同华为合作）
- 人员：晓山，胡俊等
- 经费状况：
 - 显著大于 100 万（至少 10 M！。。）；
 - 人员队伍目前集中在江门项目上，预计明年可以腾出手来进行。

C-2: HEP Software @ Quantum Computing

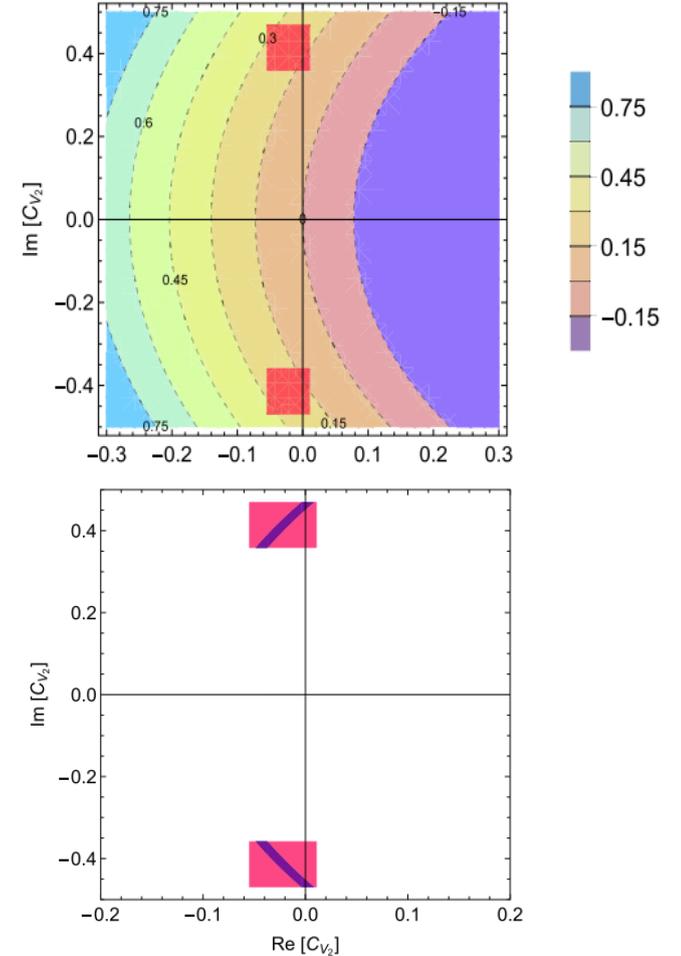
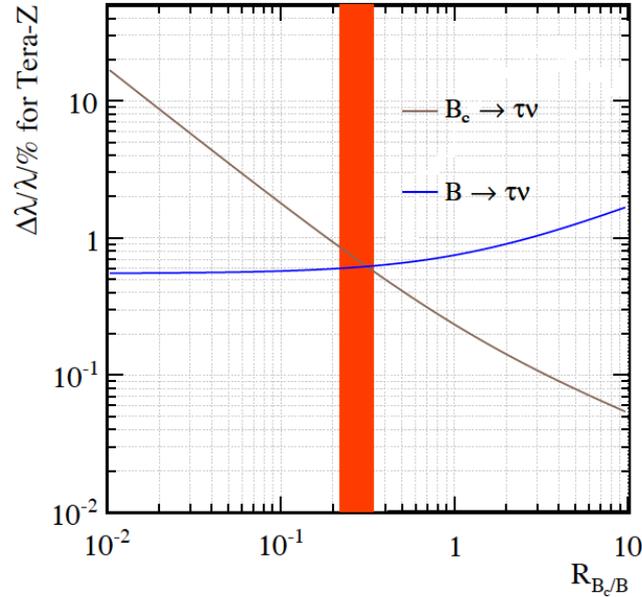
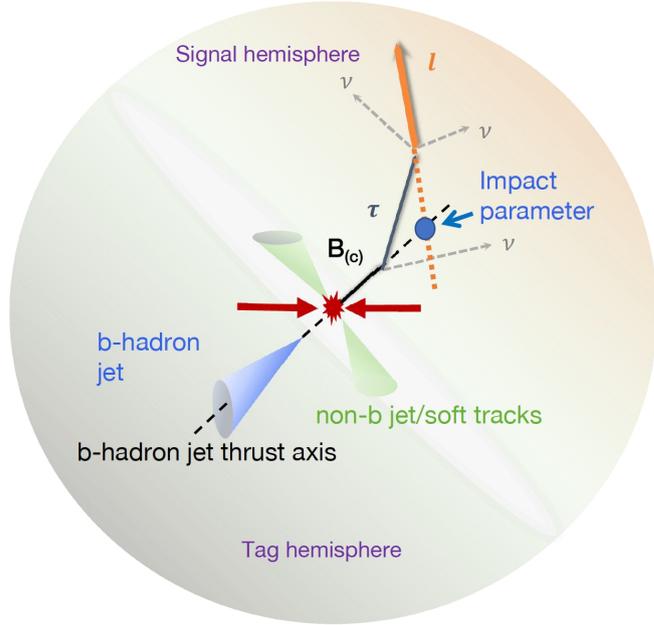
- 背景：
 - 量子计算是 HEP 软件发展的未来趋势。
 - 目前高能物理重建、分析的部分例子已在量子计算平台上成功运行，性能和经典计算相仿。
 - 在高能物理领域的量子优越性及其可诠释性尚不明晰。
- 人员队伍：李卫东等
- 项目目标：跟踪国际前沿的进展，在国内计算平台上追求应用
 - 采用 VQC ， QSVM-Kernel 及 QNN 等方法进行物理分析，将基于
 - 探索量子机器学习在探测器模拟中的应用（ QGAN ）
 - 研究量子机器学习在硅探测器中的寻迹算法
 - ...
- 经费状况： ???
 - 高能所所创新：百万级别经费支持。

Signal strength measurement of qqH , $H \rightarrow \tau\tau$ @ 240 GeV



Invariant mass of di-tau: collinear approximation that assumes the neutrinos aligns with the direction of visible tau decay product

Bc->Tau nu



Chinese Physics C Vol. 45, No. 2 (2021)

Analysis of $B_c \rightarrow \tau \nu_\tau$ at CEPC*

Taifan Zheng(郑太范)¹ Ji Xu(徐吉)² Lu Cao(曹璐)³ Dan Yu(于丹)⁴ Wei Wang(王伟)² Soeren Prell⁵
Yeuk-Kwan E. Cheung(张若筠)¹ Manqi Ruan(阮曼奇)^{4†}

¹School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210023, China

²INPAC, SKLPPC, MOE KLPPC, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

³Physikalisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 53115 Bonn, Germany

⁴Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China

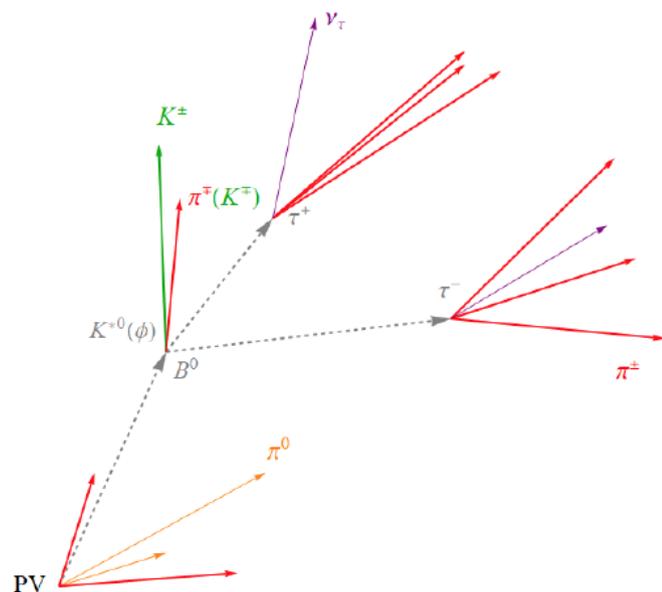
⁵Department of Physics and Astronomy, Iowa State University, Ames, IA, USA

Abstract: Precise determination of the $B_c \rightarrow \tau \nu_\tau$ branching ratio provides an advantageous opportunity for understanding the electroweak structure of the Standard Model, measuring the CKM matrix element $|V_{cb}|$, and probing new physics models. In this paper, we discuss the potential of measuring the process $B_c \rightarrow \tau \nu_\tau$ with τ decaying leptonically at the proposed Circular Electron Positron Collider (CEPC). We conclude that during the Z pole operation, the channel signal can achieve five- σ significance with $\sim 10^9$ Z decays, and the signal strength accuracies for $B_c \rightarrow \tau \nu_\tau$ can reach around 1% level at the nominal CEPC Z pole statistics of one trillion Z decays, assuming the total $B_c \rightarrow \tau \nu_\tau$ yield is 3.6×10^6 . Our theoretical analysis indicates the accuracy could provide a strong constraint on the general effective Hamiltonian for the $b \rightarrow c \tau \nu$ transition. If the total B_c yield can be determined to $O(1\%)$ level of accuracy in the future, these results also imply $|V_{cb}|$ could be measured up to $O(1\%)$ level of accuracy.

Fig. 10. (color online) Constraints on the real and imaginary parts of C_{V_2} . The red shaded area corresponds to the current constraints using available data on $b \rightarrow c \tau \nu$ decays. If the central values in Eq. (9) remain while the uncertainty in $\Gamma(B_c^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)$ is reduced to 1%, the allowed region for C_{V_2} shrinks to the dark-blue regions.

LFU Test with $b \rightarrow s\tau\tau$ Measurements

More details in the published work (arXiv:2012.00665)
[Li and Liu(2020)]

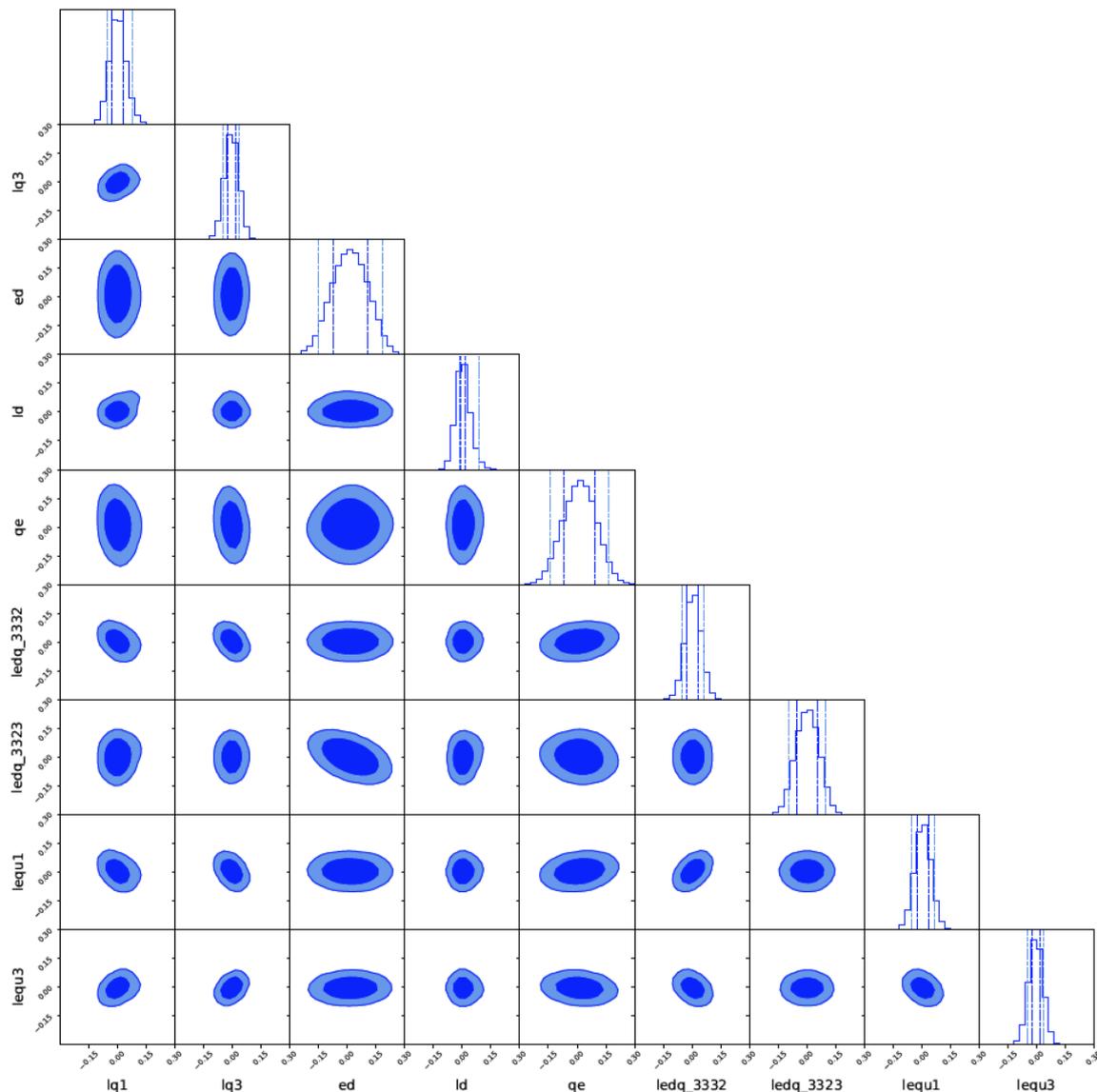


Use $\tau \rightarrow \pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \nu$
decay to locate each
vertex

Fake 3π vertex from
 $D_{(s)}^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp + X$ decays:

	Properties	Decay Mode	BR
τ^\pm	$m = 1.777 \text{ GeV}$	$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \nu$	9.3%
	$c\tau = 87.0 \text{ } \mu\text{m}$	$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \pi^0 \nu$	4.6%
D_s^\pm	$m = 1.968 \text{ GeV}$ $c\tau = 151 \text{ } \mu\text{m}$	$\tau^\pm \nu$	5.5%
		$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \pi^0$	0.6%
		$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp 2\pi^0$	4.6%
		$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp K_S^0$	0.3%
D^\pm	$m = 1.870 \text{ GeV}$ $c\tau = 311 \text{ } \mu\text{m}$	$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \phi$	1.2%
		$\tau^\pm \nu$	< 0.12%
		$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \pi^0$	1.1%
		$\pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp K_S^0$	3.0%

Current Progress in LFU Tests (II)



Preliminary: 9 effective channels: ($R_{J/\psi}$, R_{D_s} , $R_{D_s^*}$, R_{Λ_c} , $B_c \rightarrow \tau\nu$, $B \rightarrow K\nu\bar{\nu}$, $B_s \rightarrow \phi\nu\bar{\nu}$, $B^0 \rightarrow K\tau\tau$, $B^+ \rightarrow K^+\tau\tau$, $B_s \rightarrow \tau\tau\dots$)

Dim-6 SMEFT basis at NP scale $\Lambda=3$ TeV.

软件和计算 (1)

❖ CEPC平台软件和算法

- 通过参加Key4hep国际合作项目，开发CEPC的平台软件
- 算法包括：
 - 漂移室，硅探测器和量能器等探测器的模拟、重建算法
 - 粒子鉴别、PFA粒子流算法 等等

❖ 基于机器学习的探测器模拟研究

- Geant4.11将提供机器学习的接口，未来的探测器模拟将由传统的计算方法和机器学习联合完成。国际上，使用机器学习做模拟提高速度和精度，已经是ATLAS/CMS等实验的重要研究方向。
- 研究内容包括：
 - 模拟软件框架：与Gaudi，Geant4, DD4hep 的整合
 - 基于不同网络的模拟算法实现以及性能研究：GAN (Generative Adversarial Networks)，VAE (Variational Autoencoder)，AutoML 等等

1

软件和计算 (2)

❖ 量子机器学习的应用研究

- 采用VQC、QSVM-kernel和QNN等方法进行物理分析，并将基于量子计算的数据分析方法应用到国产量子计算硬件平台上。
- 量子机器学习在探测器模拟中的应用
 - QGAN based simulation: Quantum Generator + Classical Discriminator
- 量子机器学习在硅探测器寻迹中的应用

❖ 分布式计算

- CEPC实验将面临EB级数据的挑战，同时网络带宽也会有巨大提升
- 研究内容包括：
 - 基于中心“数据湖”（data lake）和分布式缓存技术研究
 - 智能化、高可靠性的数据传输和管理系统研究（[Rucio](#)）
 - 超算资源在CEPC实验中的规模应用研究

像素型时间投影室原型机研究

研究背景:

- TPC具有物质质量小、模式识别能力强，无E×B效应的优点
- 味物理等测量PID能力有很高需求，Pion-Kaon的分离能力需要好于**3-Sigma**；而像素型读出结合TOT的dN/dx在PID方面极具潜力
- Pixel读出有望可提供极高的数据读出速率($>1\text{MHz}/\text{cm}^2$)，可通过低增益(2000~3000)读实现极低离子反馈，并且在dN/dx能力提升PID的性能
- 可很好适应于高磁场环境(2-3.5T)

研究内容:

采用波形采样的低功耗读出电子学芯片，面向环形对撞束 Z run的物理需求特点，研制一套 >1000 路读出像素型读出模块的TPC原型机，完成紫外激光/宇宙线/X光机/束流测试验证实验测量，实现计数率： $>1\text{MHz}/\text{cm}^2$ ，实现像素型($<500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$)读出结合TOT的dN/dx在PID实验优化。

像素型时间投影室物理

- 相对于Pad型读出，相同尺寸和磁场下，像素型读出动量分辨可以提高**15%**

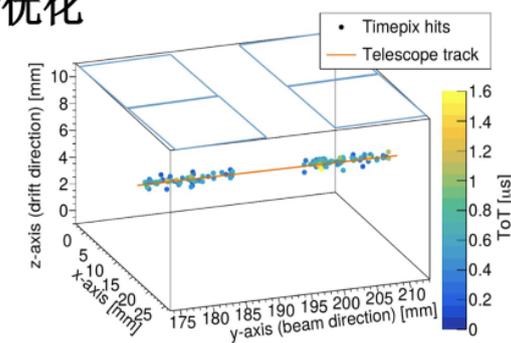
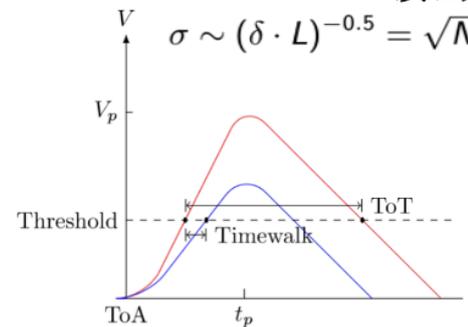
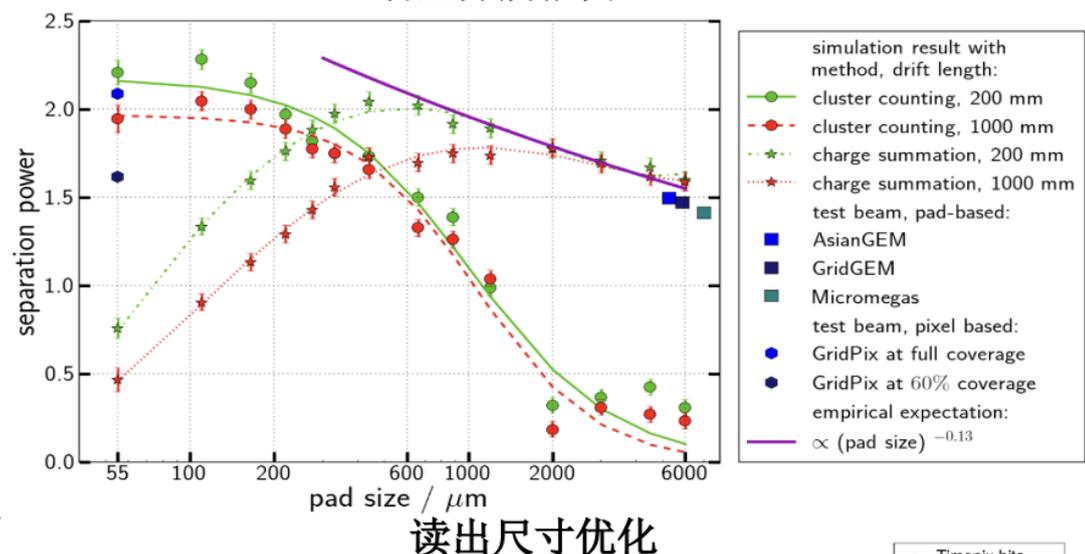
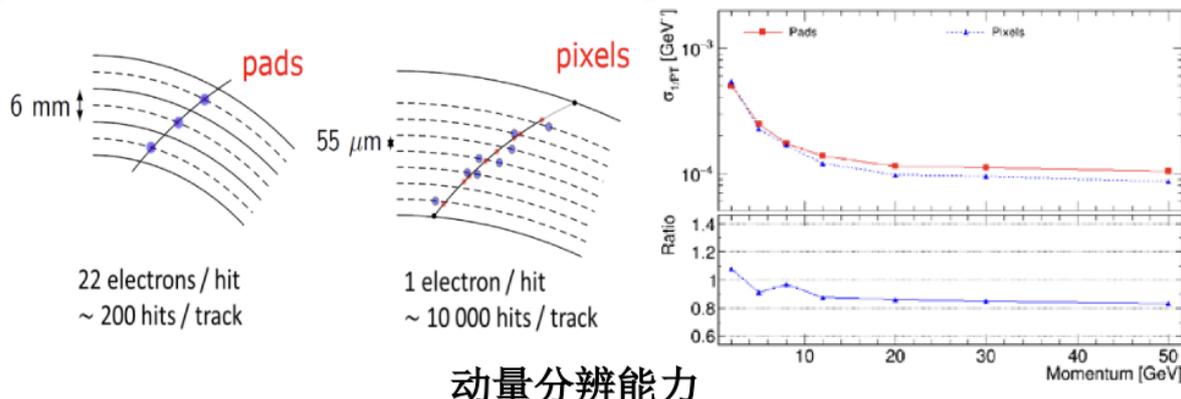
- 模拟结果对比给出

- 相对于Pad型读出，相同尺寸和磁场下，像素型**Pad Size**还需要进一步优化

- 模拟和实验结果对比给出

- 相对于Pad型读出，像素型空间上给出**电子cluster**的分辨

- 结合 dE/dx 和 电子 cluster 的 dN/dx ，需要实验优化研究



TOT方法研究电子cluster

像素型时间投影室原型机研究

研究目标:

针对CEPC高计数率Z物理要求，基于低功耗读出电子学、连续正离子抑制型读出模块，建造Pixel读出型TPC样机，其中Pixel pad size不大于 $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ ，实现紫外激光/宇宙线/X光机/束流测试，验证其高计数率、dN/dx读出能力及位置分辨率。

考核指标:

- 研制一套像素型读出模块的TPC原型机，完成验证实验测量
- 像素尺寸: $<500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$
- 计数率: $>1\text{MHz}/\text{cm}^2$
- 集成低功耗芯片（含ADC）: $<3\text{mW}/\text{通道}$

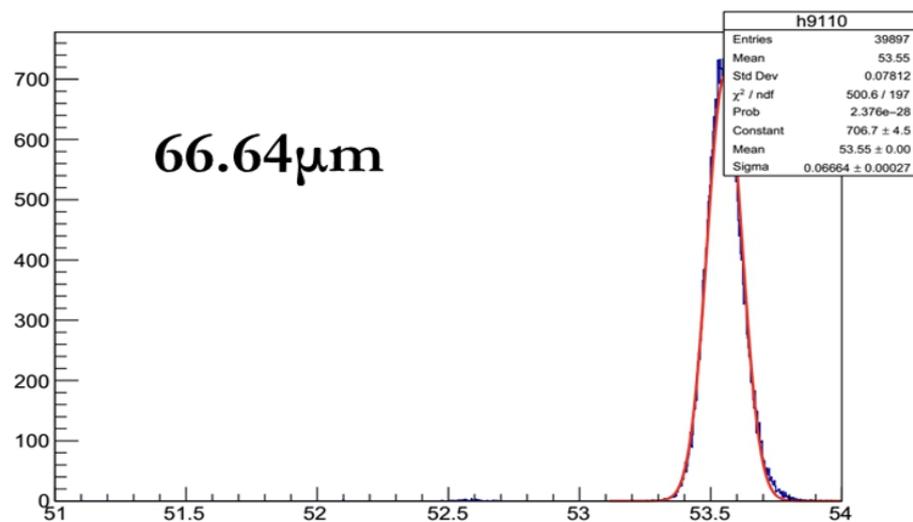
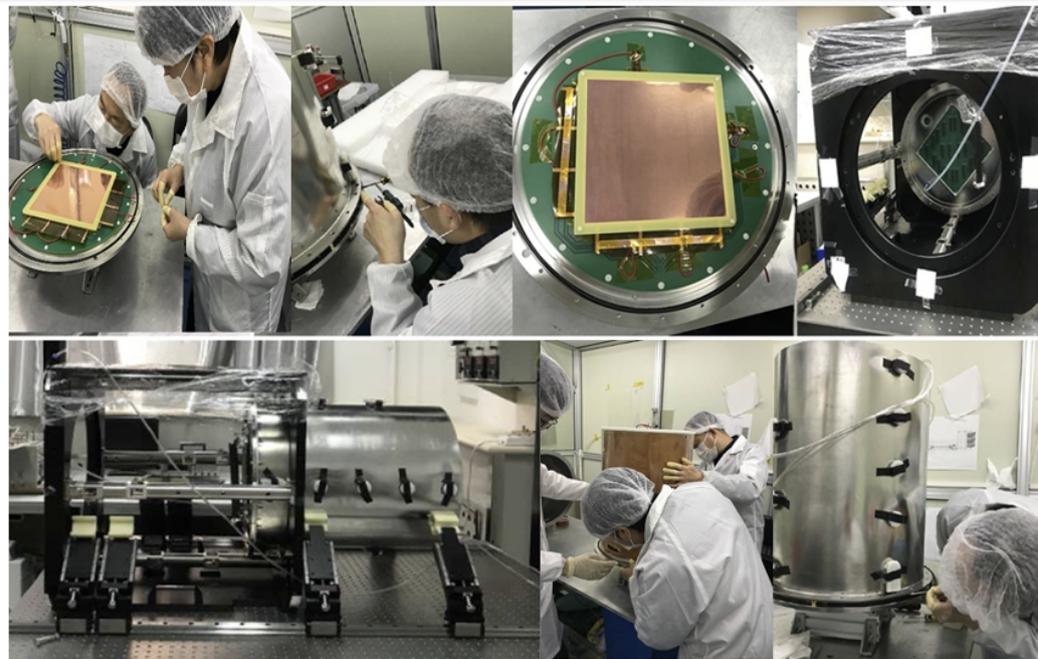
研究队伍及经费需求:

- 祁辉荣、阮曼奇、邓智、张建、常悦、喻丽雯、原之洋、余信、刘伟
- ~100万/三年

已有实验基础—探测器基础

探测器基础：

- 三种不同工作气体中的正离子反馈测量，实现增益在 <5000 ，正离子反馈抑制达到 0.1% ，二者乘积 <5 的结果研究
- 增益指标：2000-3000
- 读出电子学FEE参量
- 完成实验探测器模块的安装及128路读出的径迹实验测量
- 漂移长度：510mm
- 读出面积：200mm \times 200mm
- 实现读出电子学的调试
- 实现指标：单点位置分辨率好于 $100\mu\text{m}$
- 可紫外激光/宇宙线/X光机/束流测试

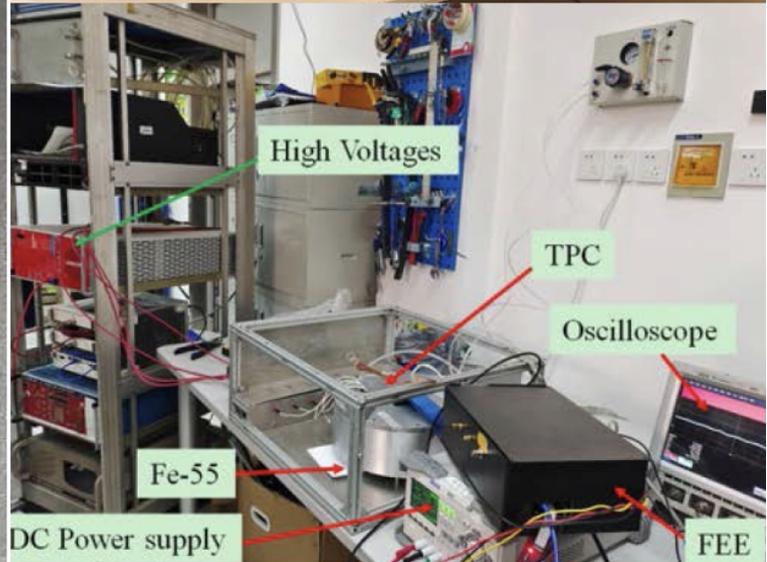
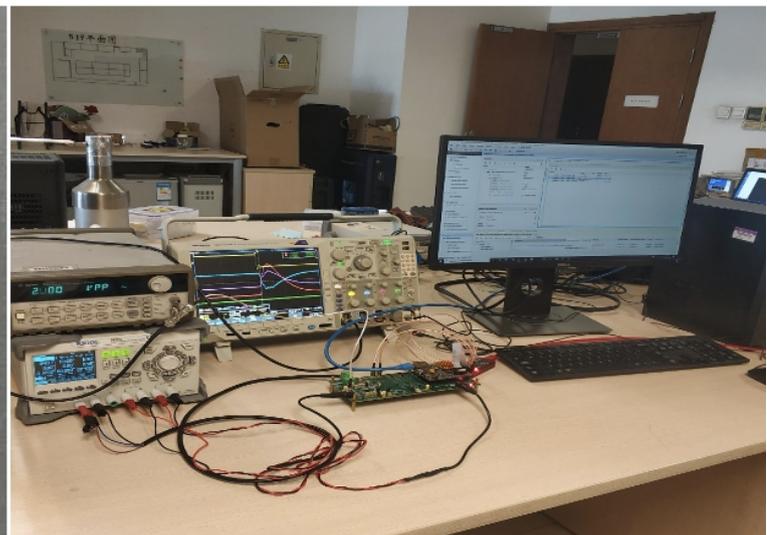
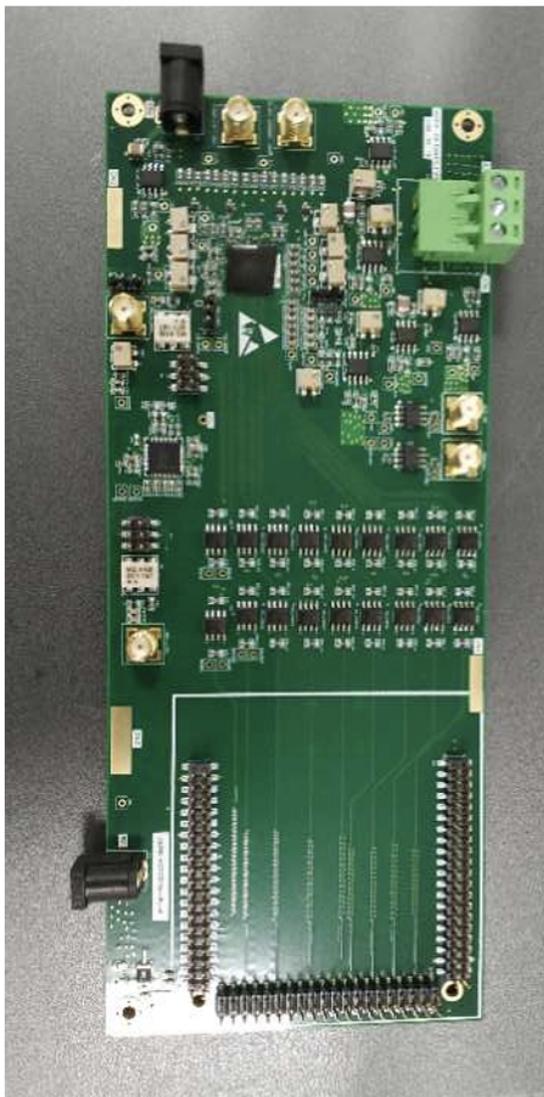


探测器基础

已有实验基础—电子学基础

电子学基础:

- 完成基于65nm工艺的低功耗高集成度TPC读出ASIC第一次流片，包括三个原型芯片
 - 模拟前端芯片+SAR ADC芯片
 - 测试模拟前端+SAR ADC芯片
- 完成16通道低功耗高集成度TPC读出ASIC第二次流片，包括一个原型芯片
 - 16通道模拟前端+SARADC芯片
- 完成初步模拟输出性能测试工作
- 初步指标:整板芯片功耗已实现设计指标 (<5mW/单通道, 实际测量2mW/单通道)



65nm ASIC芯片测试实物图