

赵忠尧博士后面试答辩

Interview of the Chung-Yao Chao Fellowship

答辩人：缪鹏

博后导师：韩良 教授

博士导师：金革 教授

2021年6月5日



中国科学技术大学

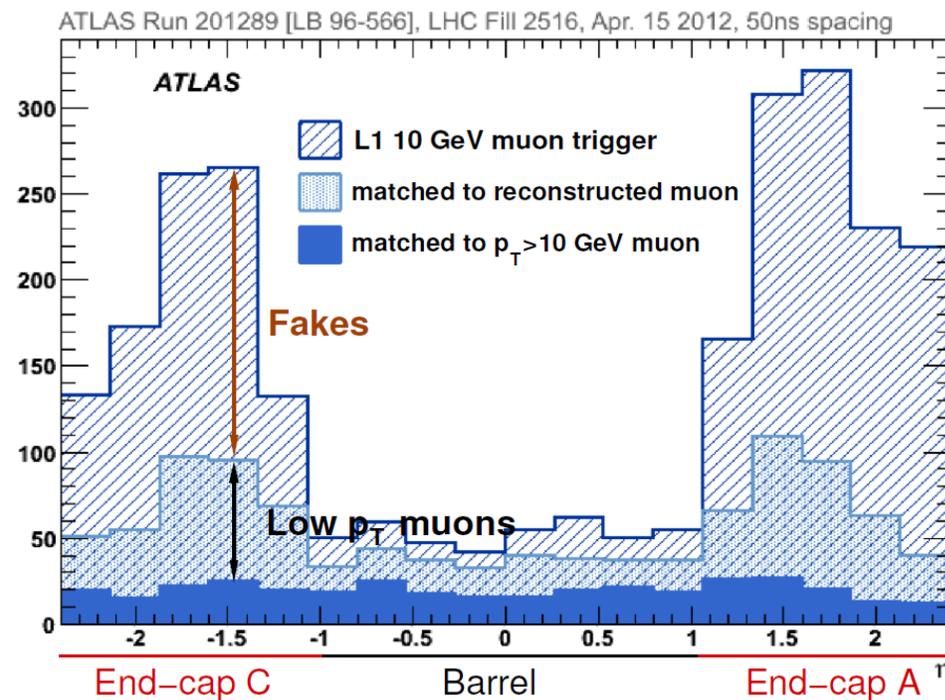
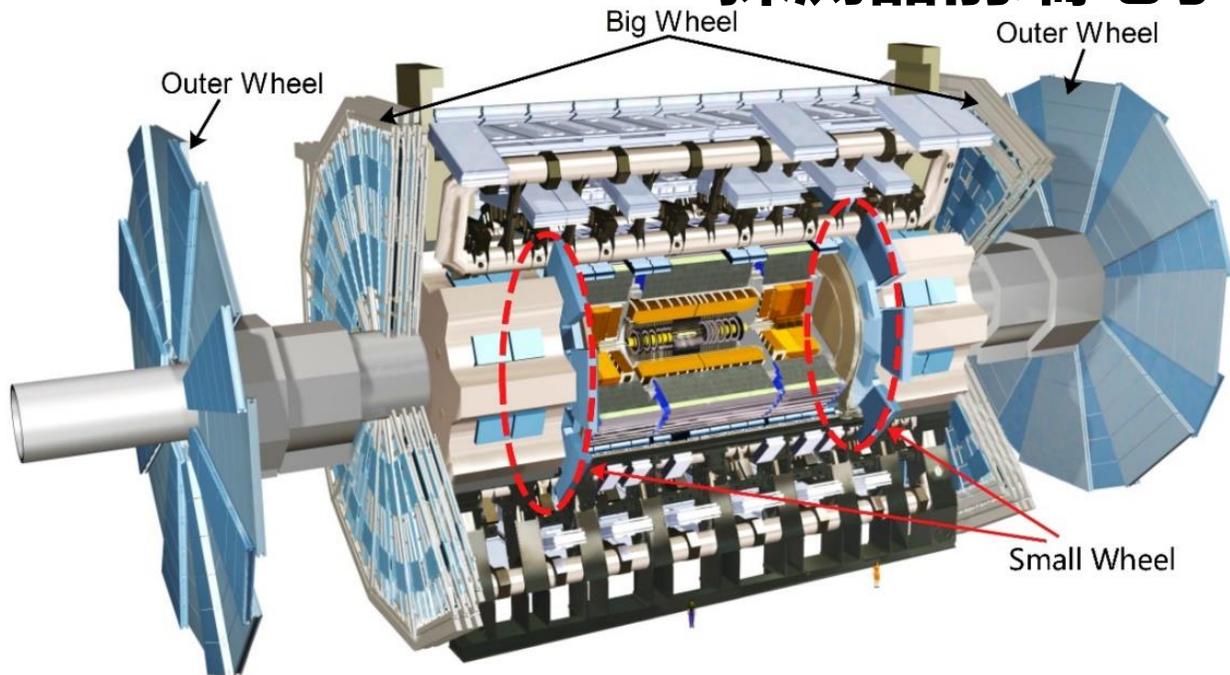
University of Science and Technology of China

目录

- 个人简历
- 工作介绍
- 未来工作计划

- 2010年9月 - 2014年06月：中国科学技术大学 本科
专业：光信息科学与技术
- 2014年9月 - 2020年12月：中国科学技术大学 博士
专业：物理电子学
导师：金革 教授
- 2021年1月至今：中国科学技术大学 博士后
专业：粒子物理与原子核物理
导师：韩良 教授
- 主要工作内容： ATLAS NSW sTGC探测器前端电子学系统研制

ATLAS NSW sTGC探测器前端电子学研制背景



- LHC将于2026年完成升级：亮度提升7倍！
(当前亮度 $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- 高亮度 \rightarrow 高事例率 \rightarrow 超过现行ATLAS Muon谱仪的设计极限 \rightarrow 需要进行同步升级
- ATLAS Muon谱仪：结构上分为 End-cap 和 Barrel

伪事例率 $>90\%$ ，且集中在端盖部分

ATLAS Muon谱仪的升级主要就是针对端盖区域

New Small Wheel

伪事例来源:

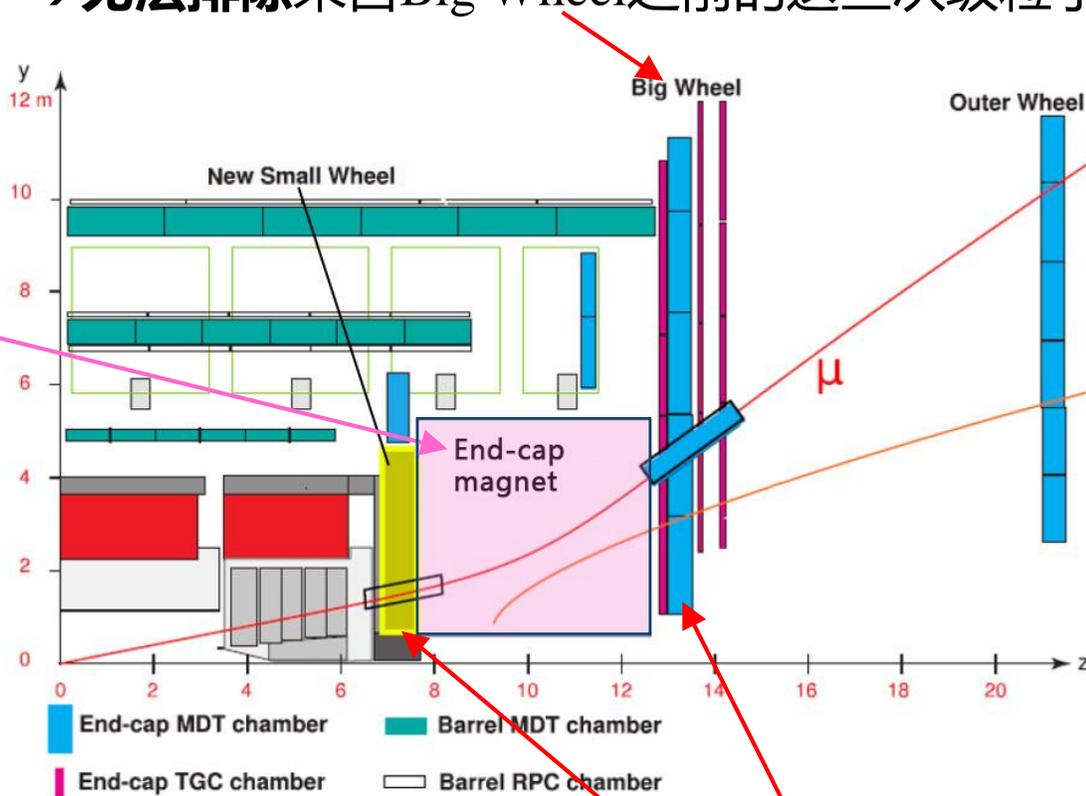
主要是Small Wheel和Big Wheel之间的端盖磁铁中产生的次级粒子。

升级的主要任务:

将端盖部分的 Small Wheel替换为 New Small Wheel (NSW)。

现行的触发机制: 只使用Big Wheel进行触发

→无法排除来自Big Wheel之前的这些次级粒子。



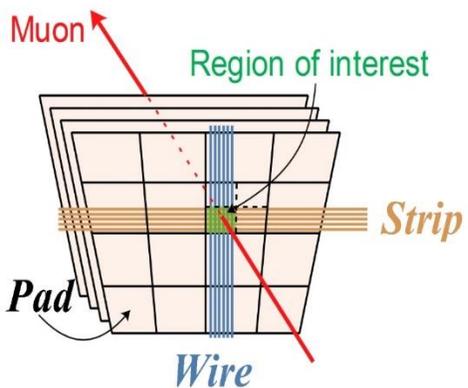
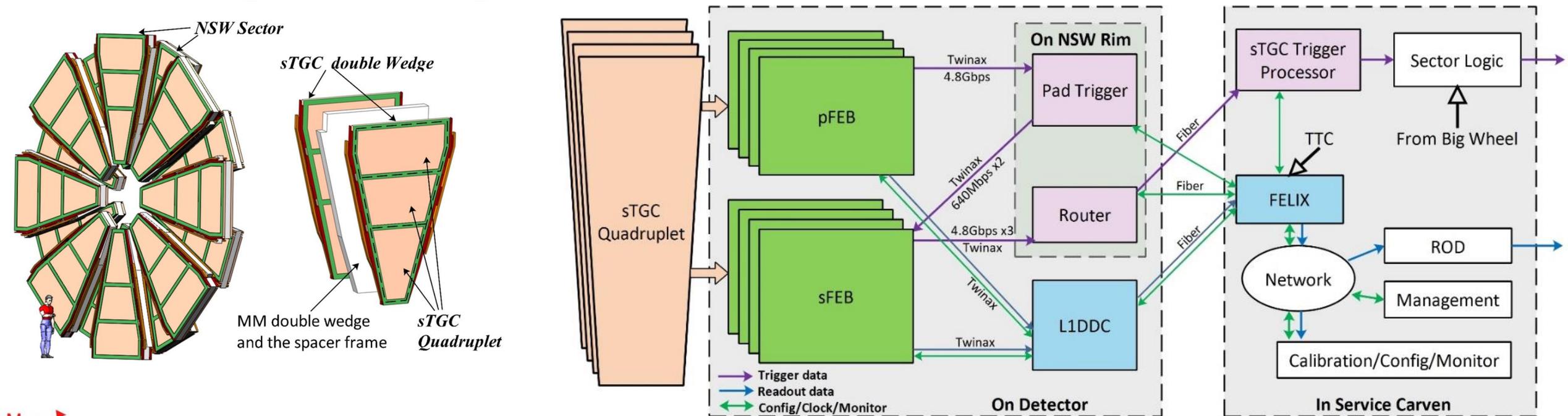
升级后的触发机制: 使用NSW和Big Wheel进行符合

→可剔除这些次级粒子, 以及运动方向不指向对撞点的粒子。



极大提高ATLAS Muon谱仪的触发效率, 使其能够工作在LHC升级后的高事例率环境下。

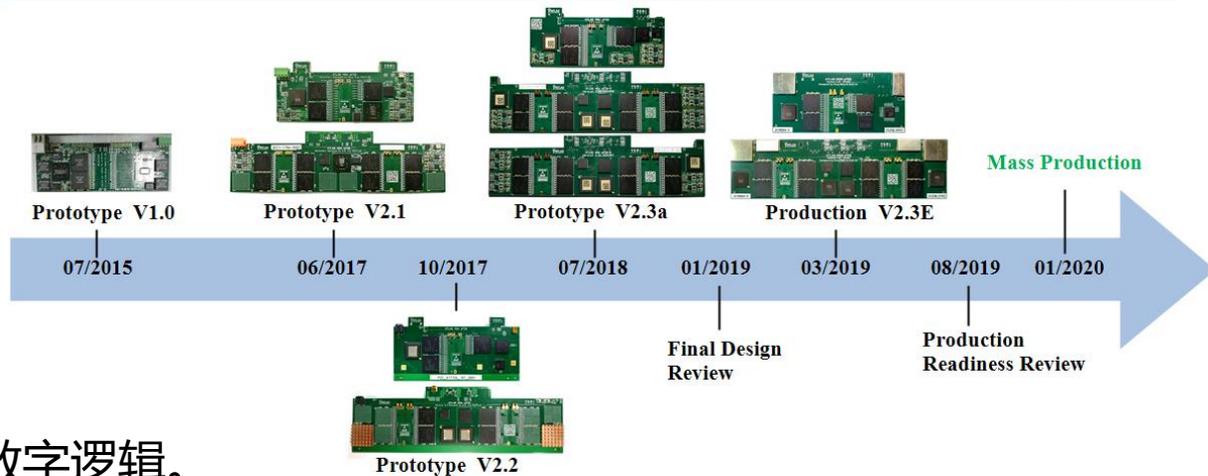
small-strip Thin Gap Chamber(sTGC)



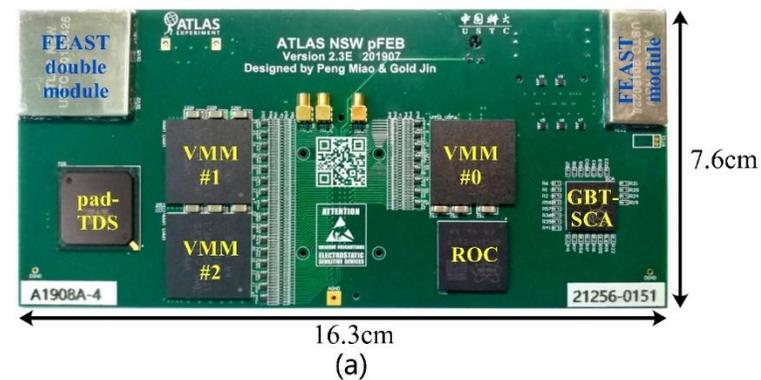
- sTGC用作**在线触发**，时间分辨率优秀，可分辨周期25ns的束团；
- sTGC 将采用 Strip+Pad+Wire 三维高速读出、L0/L1 两级触发新结构；
- 根据读出信号特征与机械结构，将前端电子学分为两种：
 pFEB(Pad:128通道， Wire:64通道)； sFEB(Strip:512通道)。

Pad Trigger: Pad触发板
 Router: 触发数据路由板
 Trigger Processor: 触发处理板
 L1DDC: Level-1数据驱动板
 FELIX: 前端链接交换板

sTGC前端板



- **功能复杂:** 电荷放大 + 成型 + 甄别 + 数字化 + 事例重建 等一系列功能的实现。精密的模拟电路 + 复杂的数字逻辑。
- **规模庞大:** 通道总数将接近40万。全部前端板总数将接近两千块。
- **重要性高:** sTGC 前端电子学是整个ATLAS Muon谱仪端盖触发与读出的起点，其性能直接决定着整个ATLAS Muon谱仪的性能指标。



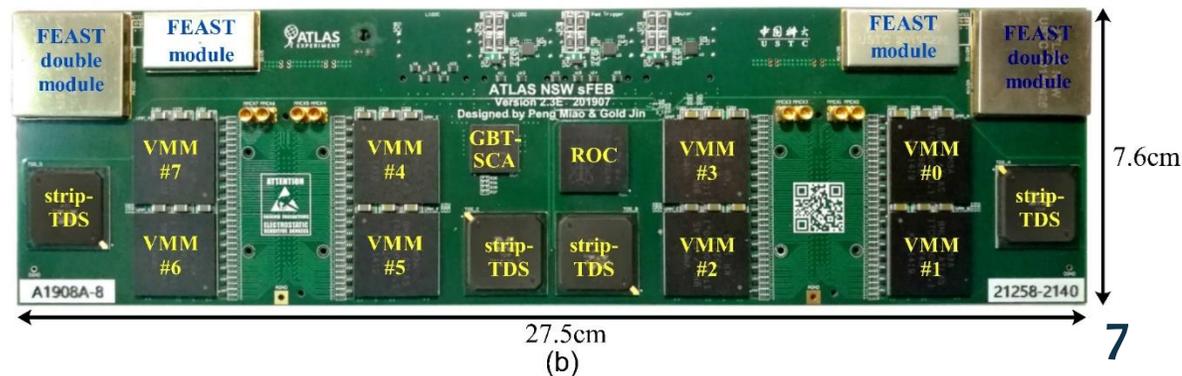
- **设计难度高:** 需要解决

高密度(单板最大512通道, 其中sFEB单板器件数2470)、

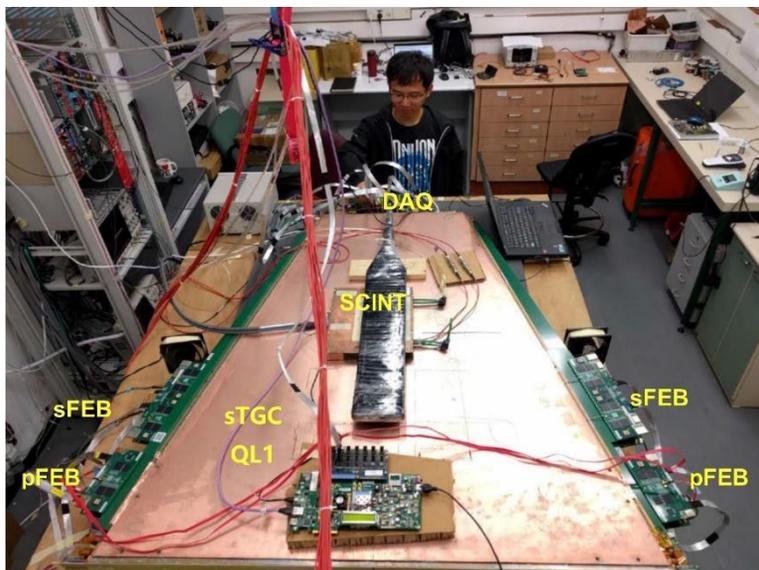
低噪声(<1fC ENC)、**高速**(>20Gbps/sFEB)、**强磁场** (0.5T)、

抗辐照(15kHz/cm²)、**高压打火**(3.3kV)、**高功耗**(>20W/sFEB)

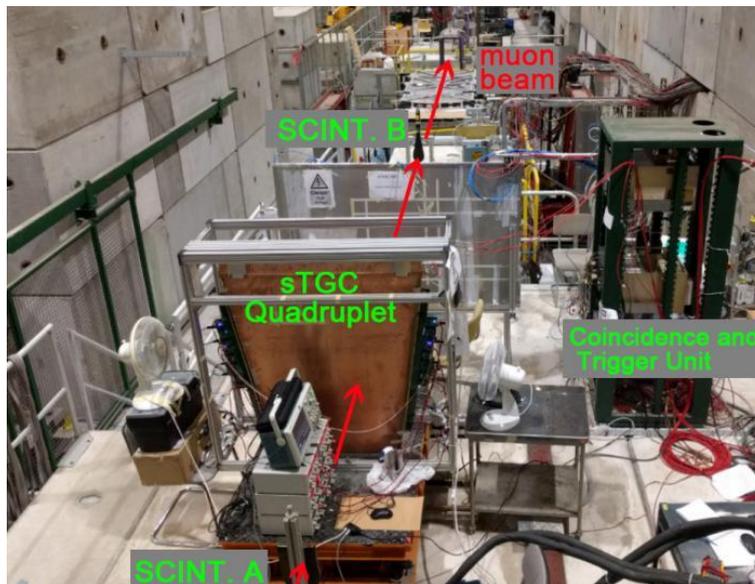
等诸多技术难题, 设计难度大。



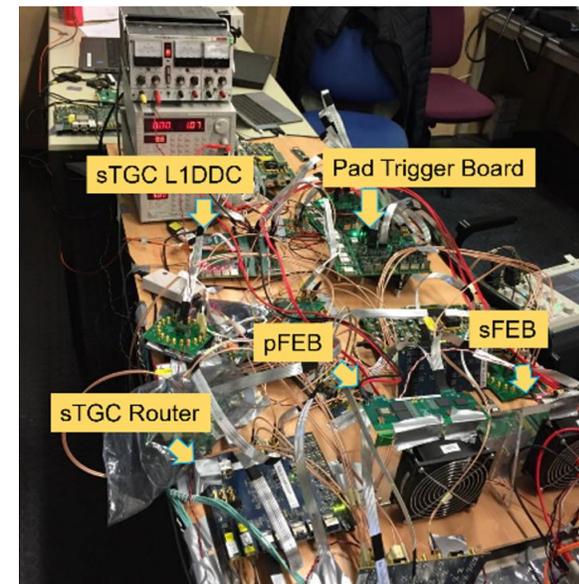
测试与结果



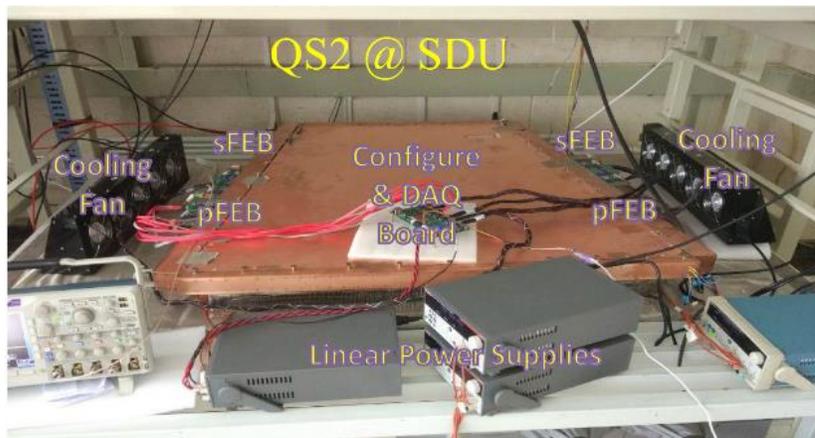
以色列Weizmann研究所探测器联合测试



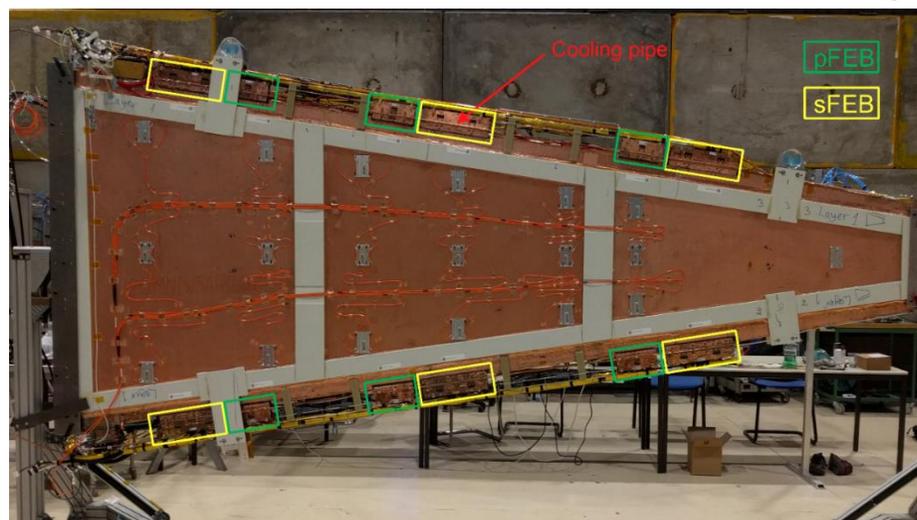
CERN 150GeV Muon束流测试



CERN Integration Week联合测试



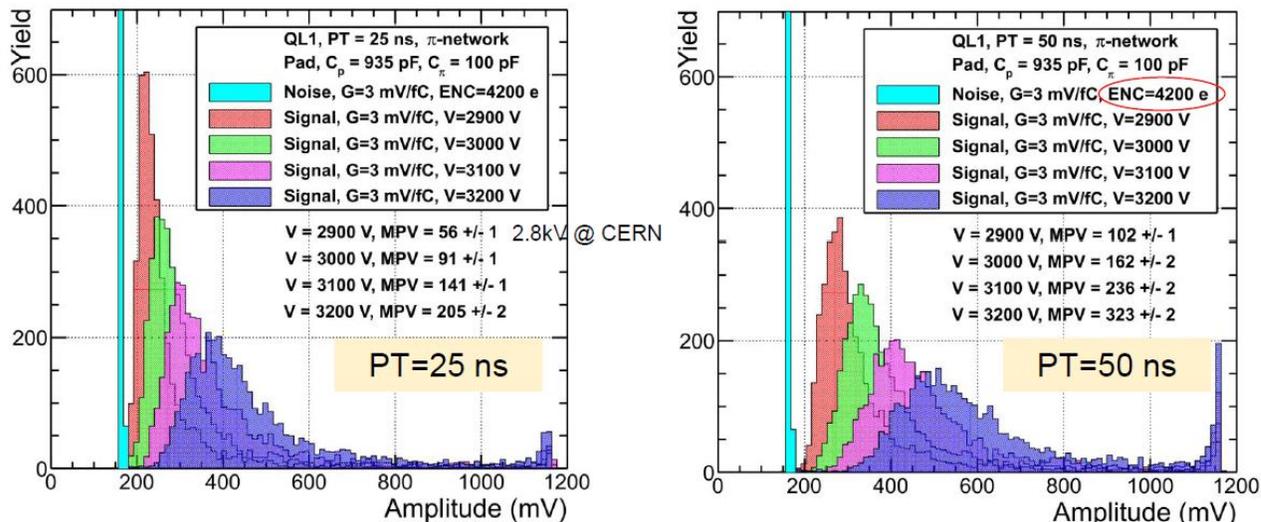
山东大学探测器联合测试



Full Wedge的安装与测试

All Tests Passed!

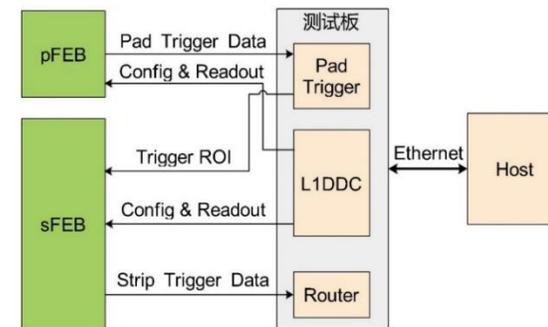
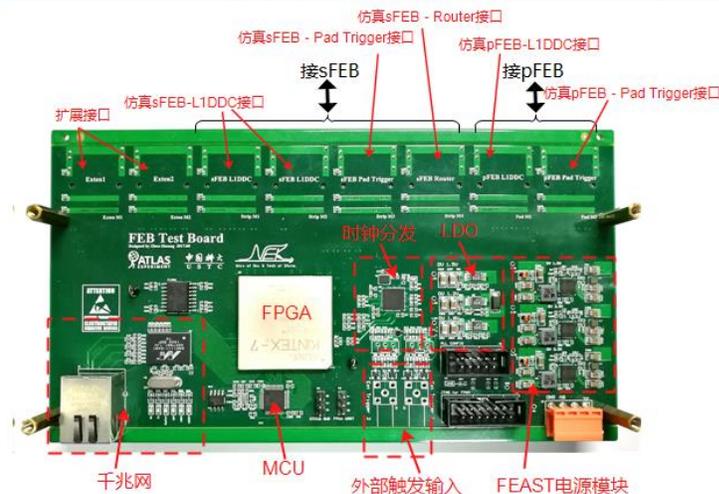
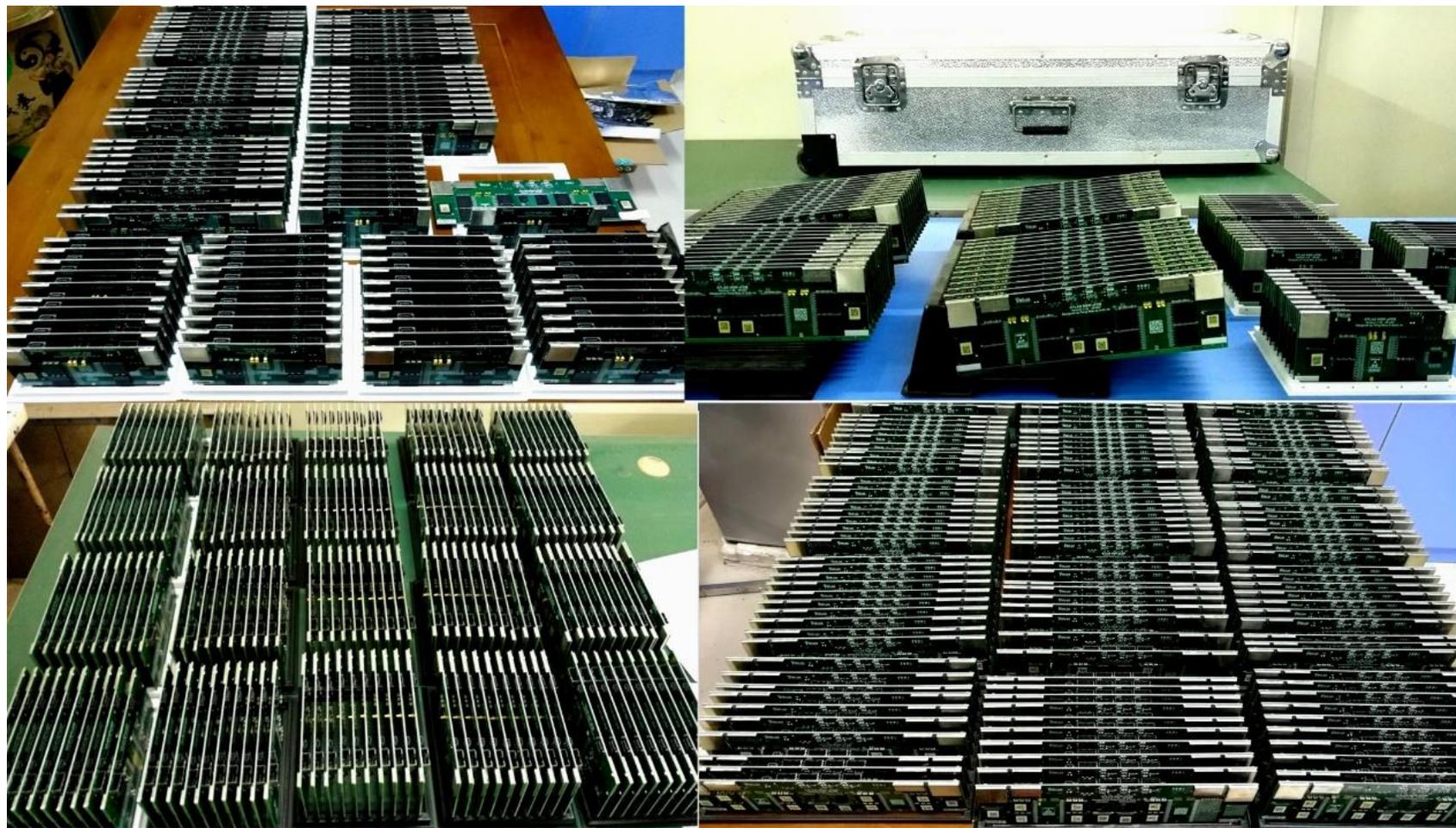
测试与结果



- sTGC前端电子学的设计已于2019年，通过了ATLAS NSW项目组的“Final Design Review”（最终设计评审）以及“Production Readiness Review”（生产就绪评审）。
- 这两个重要评审的顺利通过，也意味着sTGC前端电子学的设计工作成功完成。

关键指标	要求	测试结果
前端噪声水平	<1 fC	<1fC满足要求
通道最大触发速率	~1 MHz/channel	2MHz正常
非线性度	<2%	1.7%
片内基线差异	<40mV	<20mV
整板功耗	<30W (sFEB) <15W (pFEB)	22W (sFEB) 7W (pFEB)
效率	>60%	>70%
TTC解码功能	功能性验证	均正常工作
ASIC配置功能	正常	均正常工作
读出通路功能	正常	均正常工作
触发通路功能	正常	均正常工作
前端保护	保护电压3.3kV	3.5kV
辐照环境	460 Gy (TID)	满足
磁场环境	最高0.5T	0.6T下正常
ASIC散热需求	<50°C	<33°C

sTGC前端板批量生产



2021年5月前，所有pFEB、sFEB已经完成批量生产、测试，并成功交付CERN!

发表论文

- **Peng Miao**, Feng Li, Liang Guan, Iliia Ravinovich, et al., The development of the Front-End Boards for the small-strip Thin Gap Chambers detector system of the ATLAS Muon New Small Wheel upgrade [J], 2020 JINST 15 P11024.
- **Peng Miao**, Feng Li, Liang Guan, et al., The Scheme of the TTC Alignment for the sTGC Front-End Board Mass Production. ATL-COM-MUON-2020-057.
- Shengquan Liu, Feng Li, **Peng Miao**, et al., Development of sTGC strip front-end readout prototype for ATLAS new small wheel upgrade[J], Rev. Sci. Instrum. 89, 126104 (2018).
- Feng Li, Shengquan Liu, Kun Hu, Xu Wang, Lu Houbing, Xinxin Wang, Hang Yang, Tianru Geng, **Peng Miao**, Ge Jin. Performance of Pad Front-End Board for Small-Strip Thin Gap Chamber with Cosmic Ray Muons [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 65, No. 1 p.597-603 (2018).
- Xinxin Wang , Feng Li , Shengquan Liu, **Peng Miao** , et al., A Scanning Test System of p/sFEB Based on FPGA XADC for the ATLAS Phase-I sTGC Upgrade [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 66, No. 7 p.1249-1253 (2019).
- Houbing Lu, Feng Li, **Peng Miao**, Kun Hu, et al., Development of FEB Configuration Test Board for ATLAS NSW Upgrade [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 66, No. 8 p.2028-2032 (2019).
- Shuang Zhou, Feng Li, **Peng Miao**, et al., Automatic test system for pFEB and sFEB mass production[J], Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 946 (2019) 162645.
- Xiao Zhao, Wenlong Li, Dengfeng Zhang, Changyu Li, Han Li, Shengquan Liu, **Peng Miao**, et al., Cosmic test of sTGC detector prototype made in China for ATLAS experiment upgrade[J], Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 927 (2019) 257–261.

会议报告

- **Peng Miao**, Feng Li, Shengquan Liu, Zhilei Zhang et al., An sTGC Prototype Readout System for ATLAS New-Small-Wheel Upgrade, IEEE Real Time Conference (RT) 2018, Colonial Williamsburg, USA, Jun/2018.
- Feng Li, Xinxin Wang, **Peng Miao**, Shuang Zhou, Zhilei Zhang, Tianru Geng, Shengquan Liu, Liang Han, and Ge Jin. The Study of Multi-Layer sTGC Test System for ATLAS Phase-I upgrade, IEEE Real Time Conference (RT) 2018, Colonial Williamsburg, USA, Jun/2018.
- Shuang Zhou, Shengquan Liu, **Peng Miao**, et al., A High Precision Signals Readout System for Micromegas Detector Based on the VMM, IEEE Real Time Conference (RT) 2018, Colonial Williamsburg, USA, Jun/2018.
- Shuang Zhou, Feng Li, **Peng Miao**, et al., A Trigger Inspection Platform for sTGC Detector Front-End Electronic Boards, 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICET49382.2020.9119518.
- 此外，多次于ATLAS NSW合作组会议、ATLAS Muon Week上进行过报告。

- **协助参与ALTAS NSW 系统集成安装**

目前，New Small Wheel正处于集成安装阶段，pFEB/sFEB与探测器的集成安装需要来自各个合作方的通力合作，以尽快完成最后的安装与调试工作。

- **进一步开展将pFEB/sFEB应用于其他新型微结构气体探测器以及其他应用领域研究**

如：基于Micromegas探测器的核燃料空隙检测系统研制（预研中）

- **STAR sTGC探测器前端电子学系统研制**

充分利用 ATLAS NSW sTGC 前端读出系统设计已取得的技术优势以及成功经验，为BNL STAR sTGC探测器系统开发前端电子学系统。（预研中）

Thank you!



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

New Small Wheel的结构

- NSW由两种探测器组成:

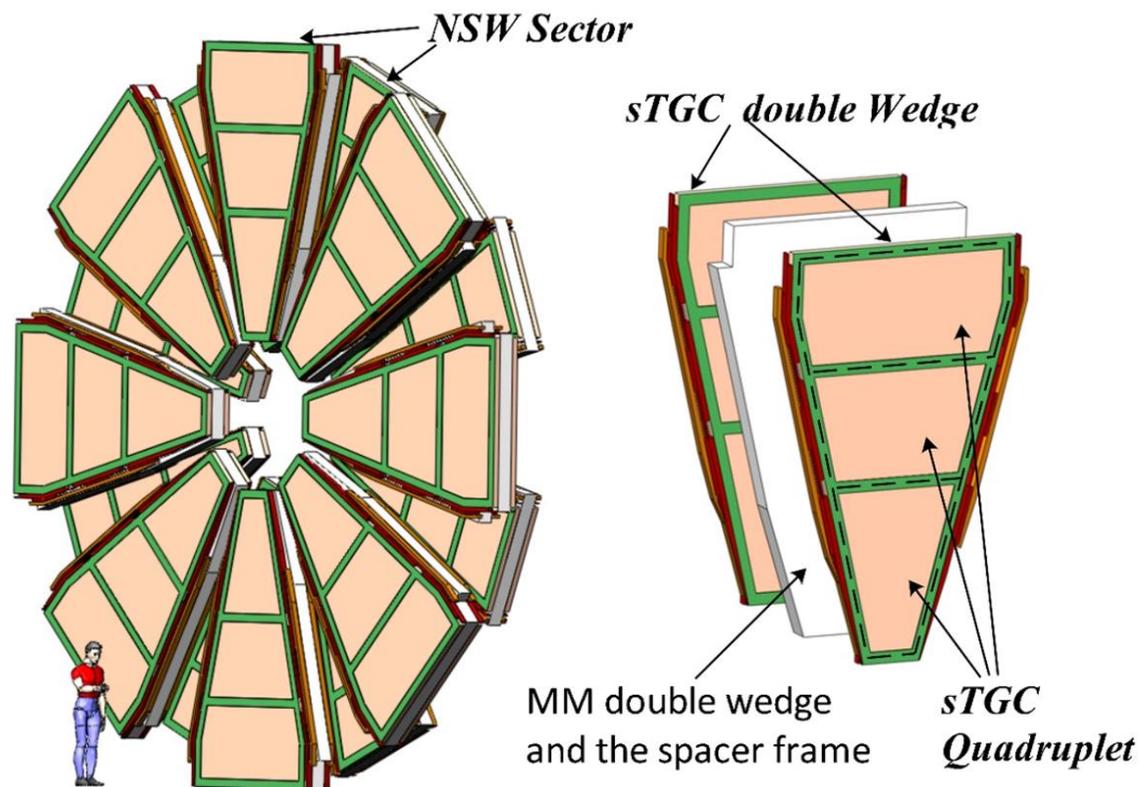
small-strip Thin Gap Chamber , 简称**sTGC**。

因为时间分辨率优秀, 可分辨周期25ns的对撞束团, 所以主要用作**在线触发**;

同时**兼有径迹测量**功能, 位置分辨率最高可达50um

Micromegas, 进行Muon径迹测量。

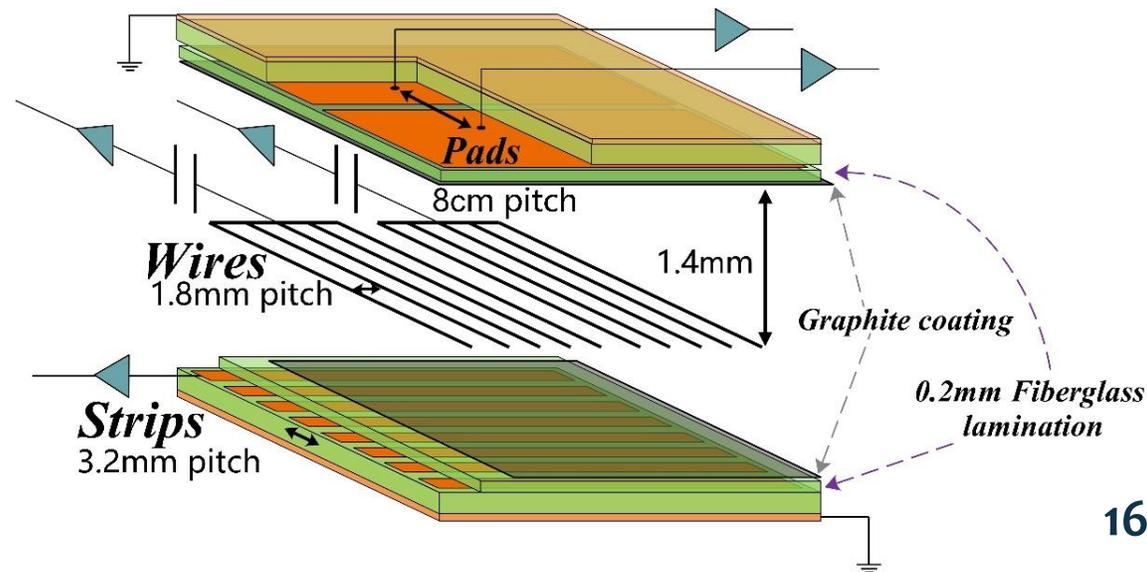
- NSW直径约**10米**, 由**16个扇区** (Sector) 组成。
- 每个扇区都含有**两个相同的sTGC Wedge**。
- 每个sTGC Wedge都由**三个sTGC Quadruplet**组成。
- NSW预计于2021年底完成安装与调试。



sTGC探测器的结构

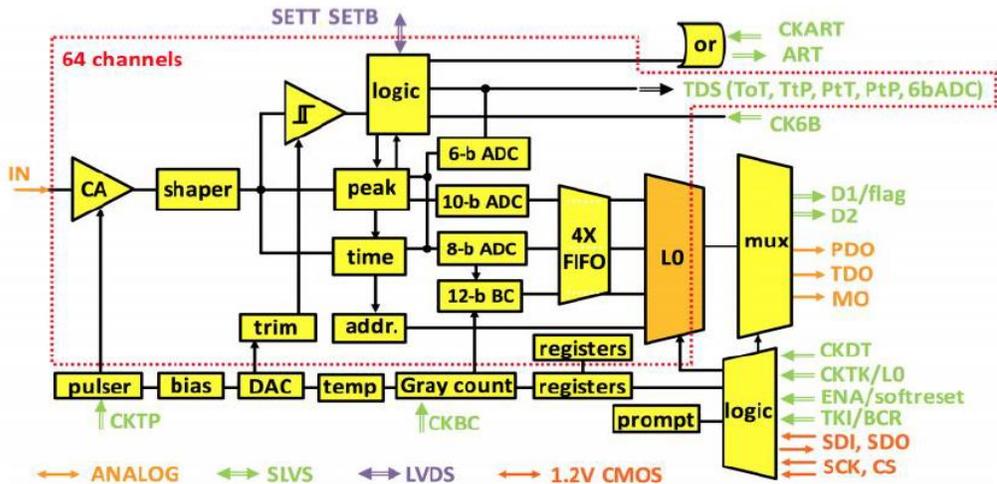
一共含有三种读出电极wire、pad和strip，并以“三明治结构”组成一个气隙。

- **Wire:** 是位于最中间的一层**阳极丝**，由间距1.8mm的张紧镀金钨丝组成，每根丝的直径仅有50微米。
- **Pad:** 是长宽约8厘米的**矩形覆铜层**。
- **Strip:** 是间距为3.2毫米的**覆铜条**，与wire的方向相互**垂直**。Pad和strip与wire层的距离均为1.4mm。
- **阻性层:** 在pad和strip的表面覆盖有厚度200微米的绝缘层，绝缘层的上方喷涂有一层极薄的石墨阻性层。这两层石墨阻性层在探测器的边缘位置进行接地，用作阴极板。
- **屏蔽层:** Pad和strip的背面是一层完整的金属铜层，在接地后作为屏蔽层使用。
- sTGC探测器的工作电压大致为**2.9kV到3.2kV**。
- 每个Quadruplet由**4层sTGC气隙**组成。
- NSW sTGC的读出通道总数**接近40万**。

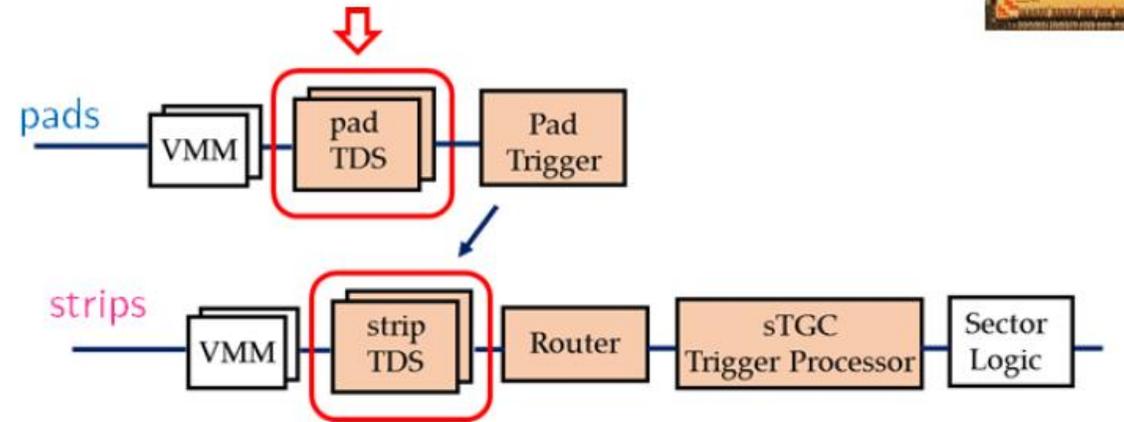
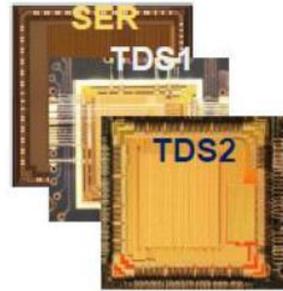


关键ASIC:

- **VMM**: 专为NSW设计的前端读出芯片, 集**电荷放大-成型-甄别-数字化**等功能于一身, 兼有电荷测量与时间测量
- 抗辐照工艺 (IBM 8RF-DM工艺)
- 64个**模拟通道**
- **电荷极性**可调: positive, negative
- **增益**可调: 0.5, 1, 3, 4.5, 6, 9, 12, 16mV/fC 共8种
- **成型时间**可调: 25ns, 50ns, 100ns, 200ns 共4种
- 内部FIFO: 4MHz事例率和16 μ s延迟下的数据安全性

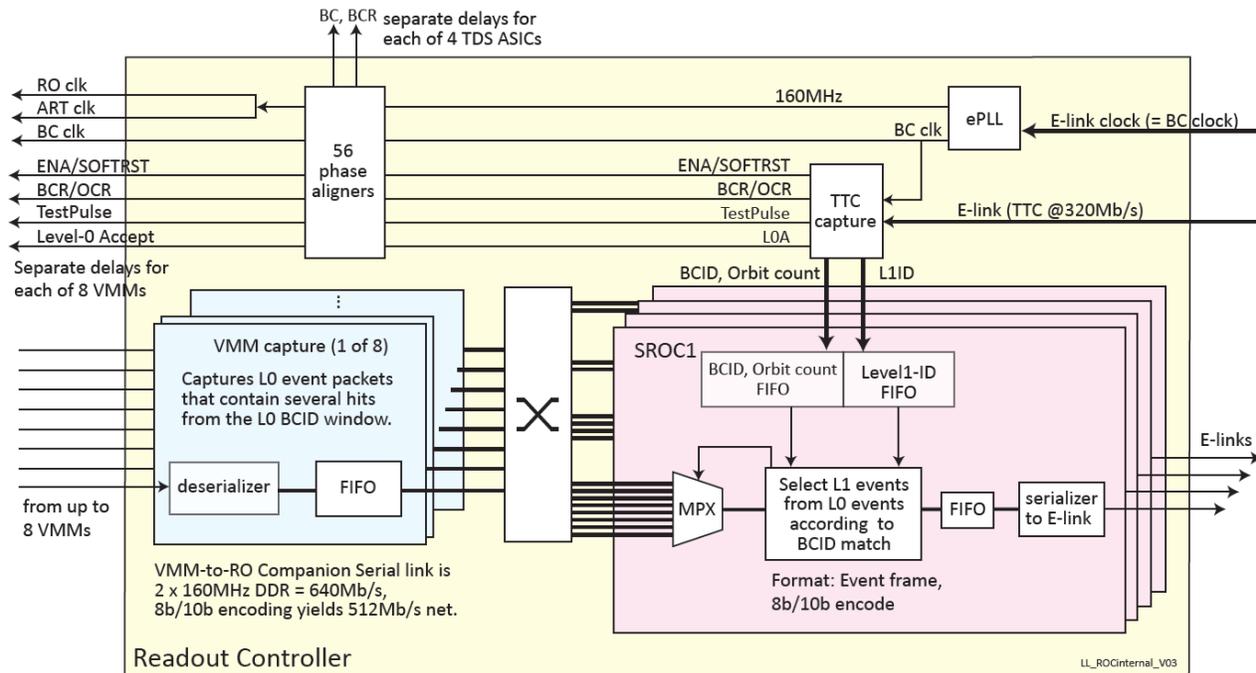


- **TDS** (Trigger Data Serializer) 是专为NSW sTGC探测器设计的**触发数据串行传输芯片**
- 两种模式: pad模式和strip模式, 分别用于pFEB与sFEB
- TDS的串行数据率为**4.8Gbps**
- 每片TDS具有**128通道**。
- 具有低延迟, 低功耗, 抗辐照等特点

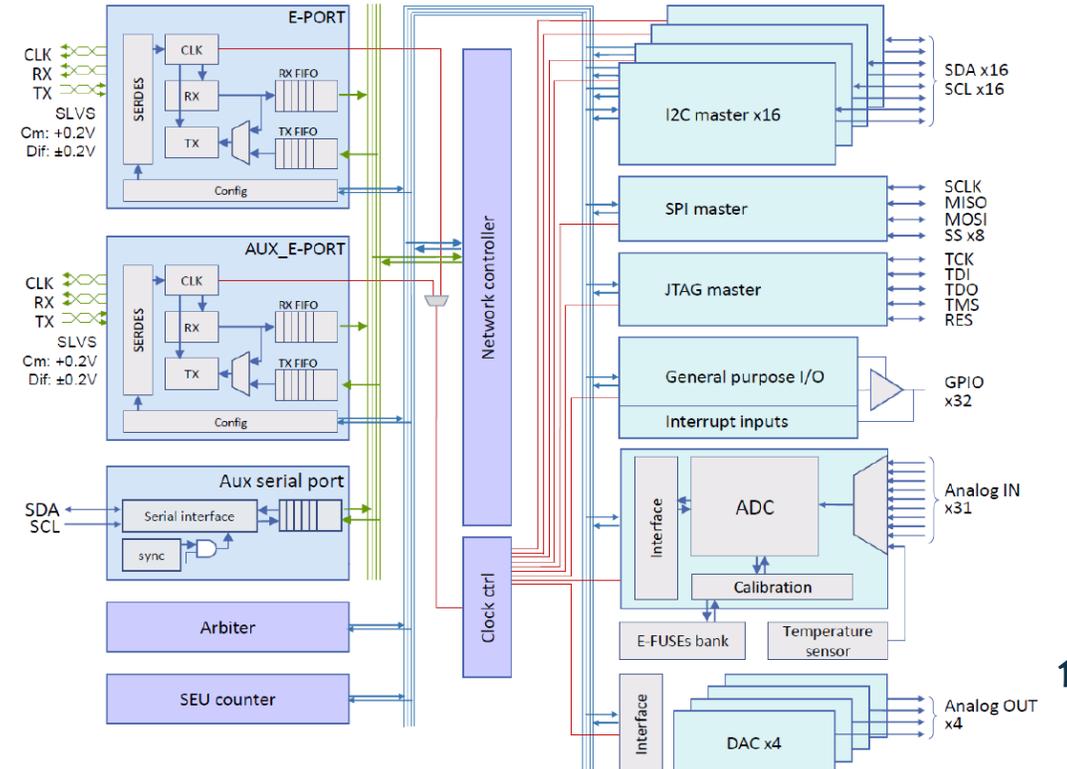


关键ASIC:

- **ROC (Read Out Controller)** 用于对最多8片VMM进行**数据读出**
- **GBT-SCA (Giga-Bit Transceiver- Slow Control Adapter)** 是CERN为高能物理实验开发的慢控芯片。负责**配置ASIC, 并回读监测数据**。
- 提供了丰富的慢速接口, 其中sTGC前端板用到的有:
 - SPI, 7-bit I2C, 10-bit I2C, GPIO, ADC
- **四大功能:**
 - **全局时钟扇出:** 将40MHz全局时钟分发到其他ASIC
 - **TTC解码:** 对320Mbps的TTC序列进行解码
 - **系统控制与同步:** 控制VMM和TDS, 实现板载ASIC的同步
 - **Level-1事例重建与读出:** 最大读出速率2.56Gbps

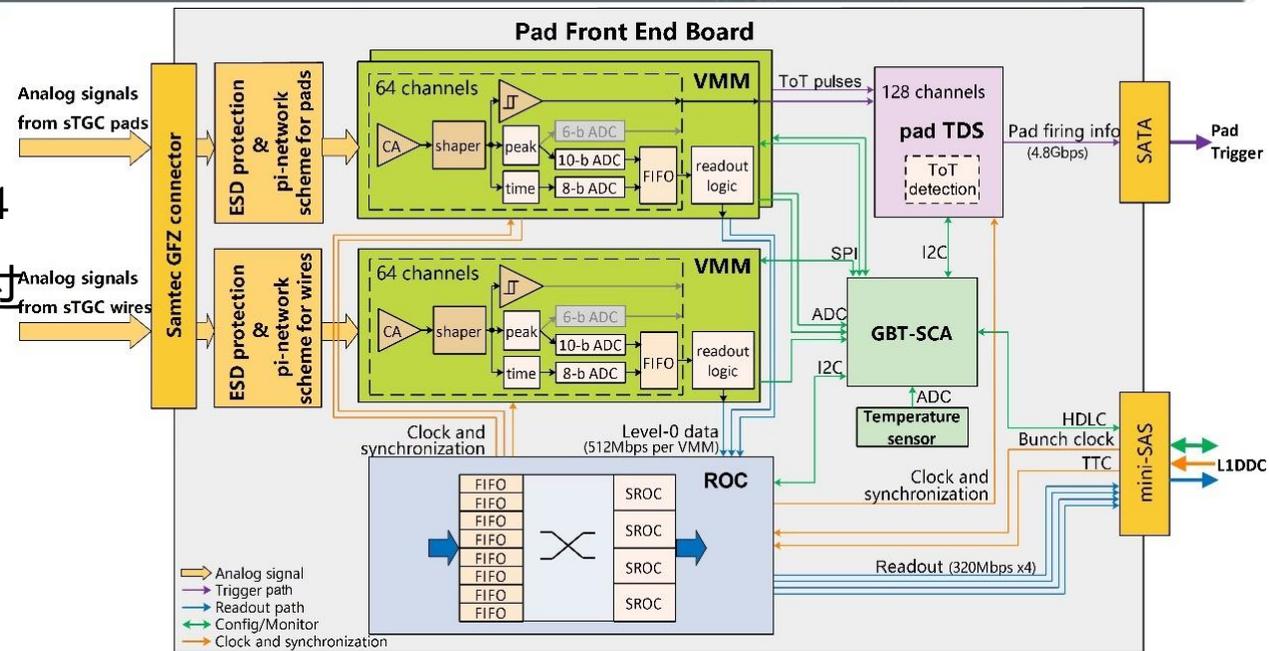


SPI, 7-bit I2C, 10-bit I2C, GPIO, ADC



pFEB总体结构

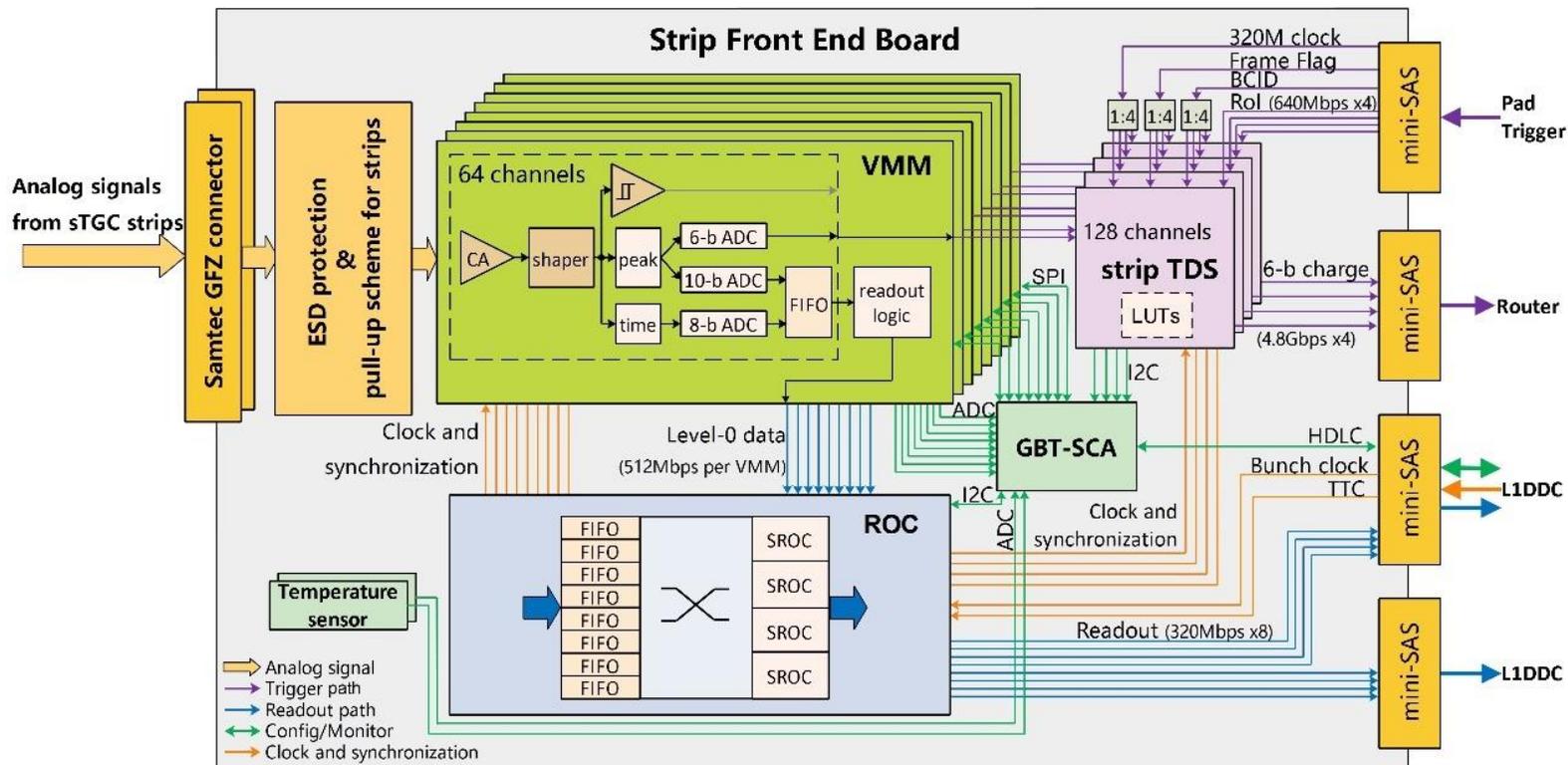
- 信号将通过GFZ接插件输入到VMM。其中wire信号有64通道，而pad信号需要128通道。在VMM之前，还要经过前端保护电路和VMM前端网络。



- 对于触发通路：** VMM生成的pad信号的ToT脉冲将送给pad-TDS以生成串行化后的pad触发数据，随后将以4.8Gbps的速率发送给Pad Trigger板进行后续ROI信息生成。
- 对于读出通路：** ROC将对来自L1DDC的TTC信号进行解码，获得触发信号并分发给VMM，将数字化后的幅度及时时间测量数据从VMM的FIFO中打出，发送给ROC进行事例重建。ROC会将满足触发时间窗口的有效事例发送给L1DDC。
- 对于监控通路：** GBT-SCA负责VMM、TDS、ROC的配置，板级参数的监测，如温度、基线、阈值等信息。

sFEB总体结构

- sFEB用于处理sTGC探测器的strip信号，通道数量与pFEB有所区别，共有512通道，8片VMM。
- 其读出通路以及监控通路与pFEB过程类似。

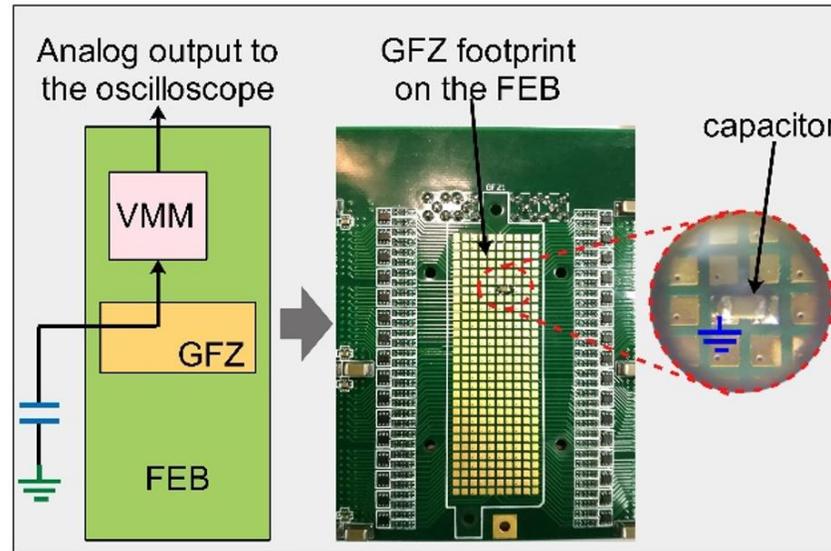


- 对于触发通路：**与pFEB不同。每片strip TDS，用于接收并缓冲来自128个VMM通道的6比特strip电荷信息。在接收到来自Pad Trigger板生成的ROI信息后，strip TDS将根据预定义的内置查找表信息，将ROI区域包含的strip电荷量读出，同样以4.8Gbps的速率串行发送给后续的Router板。为了节省与Pad Trigger板通信所需的信号线数量，sFEB将使用扇出芯片（fanout chip），用于扇出送往4片TDS的相同信号。

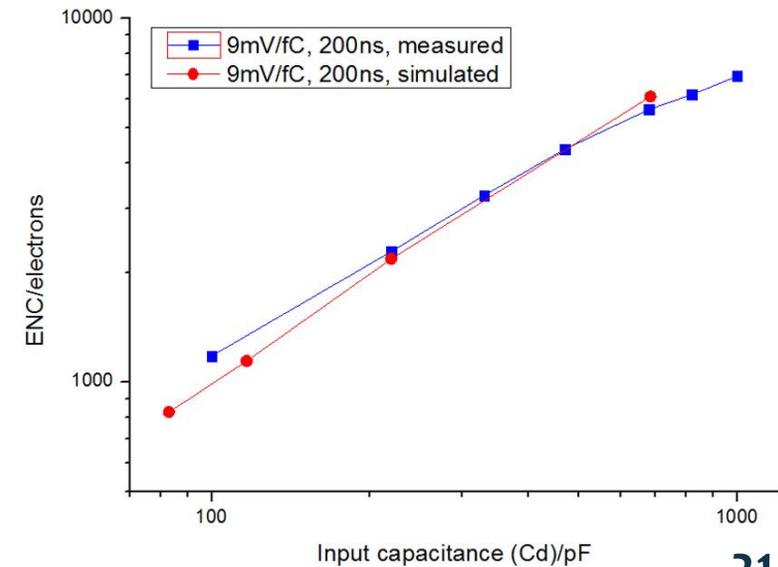
电子学噪声测试

- sTGC前端板的一个最重要的指标就是其噪声水平。
- **测量方法**: 为了在排除探测器干扰的情况下评估sTGC前端板的噪声水平, 将电容直接焊接在sTGC前端板的GFZ焊盘上, 用于模拟探测器输入电容。改变此电容值, 测量在不同输入电容的情况下, sTGC前端板的噪声水平, 并与芯片理论值进行对比。
- **测试结果**: 对于sTGC探测器, 最为关心的输入电容范围即为100pF~1000pF。在此范围内, **实测的噪声值与理论值十分接近**。

- 因此可以认为, **sTGC前端板的设计对VMM噪声的影响, 成功降低到理论值附近**。



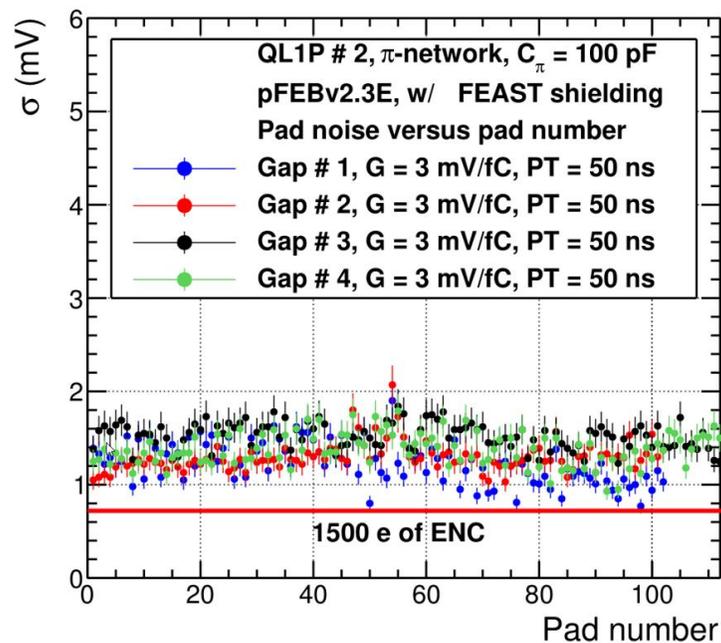
(a)



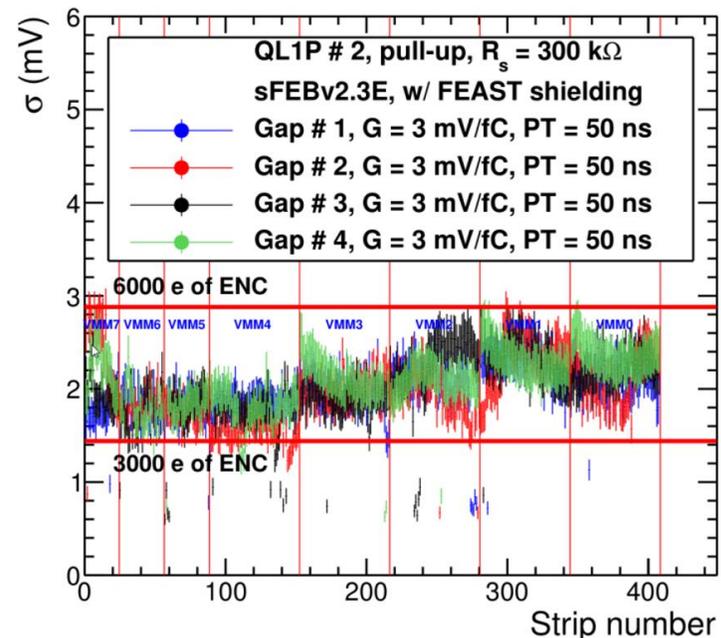
(b)

sTGC探测器集成测试：噪声测试

- 使用示波器测量sTGC前端板安装到sTGC探测器之后的所有通道的噪声水平。



(a)



(b)

- 对于pFEB：所有通道的噪声水平都在**1500 到4000 ENC**之间（即 **0.24fC 到 0.64fC** 之间）。
- 对于sFEB：整个QL1的**近2000条strip**的噪声水平都在**3000到6000ENC**之间。QL1是探测器中最大的型号，等效的strip输入电容也最大，因此其噪声水平也最高。
- 因此，噪声水平**满足1fC的设计要求**。