

# 大型强子对撞机上CMS和ALICE实验探测器升级年会

## 课题三： FoCal电子学研究进展

吝守龙 贾世海 孙鹏飞 王浩祯 李笑梅\*

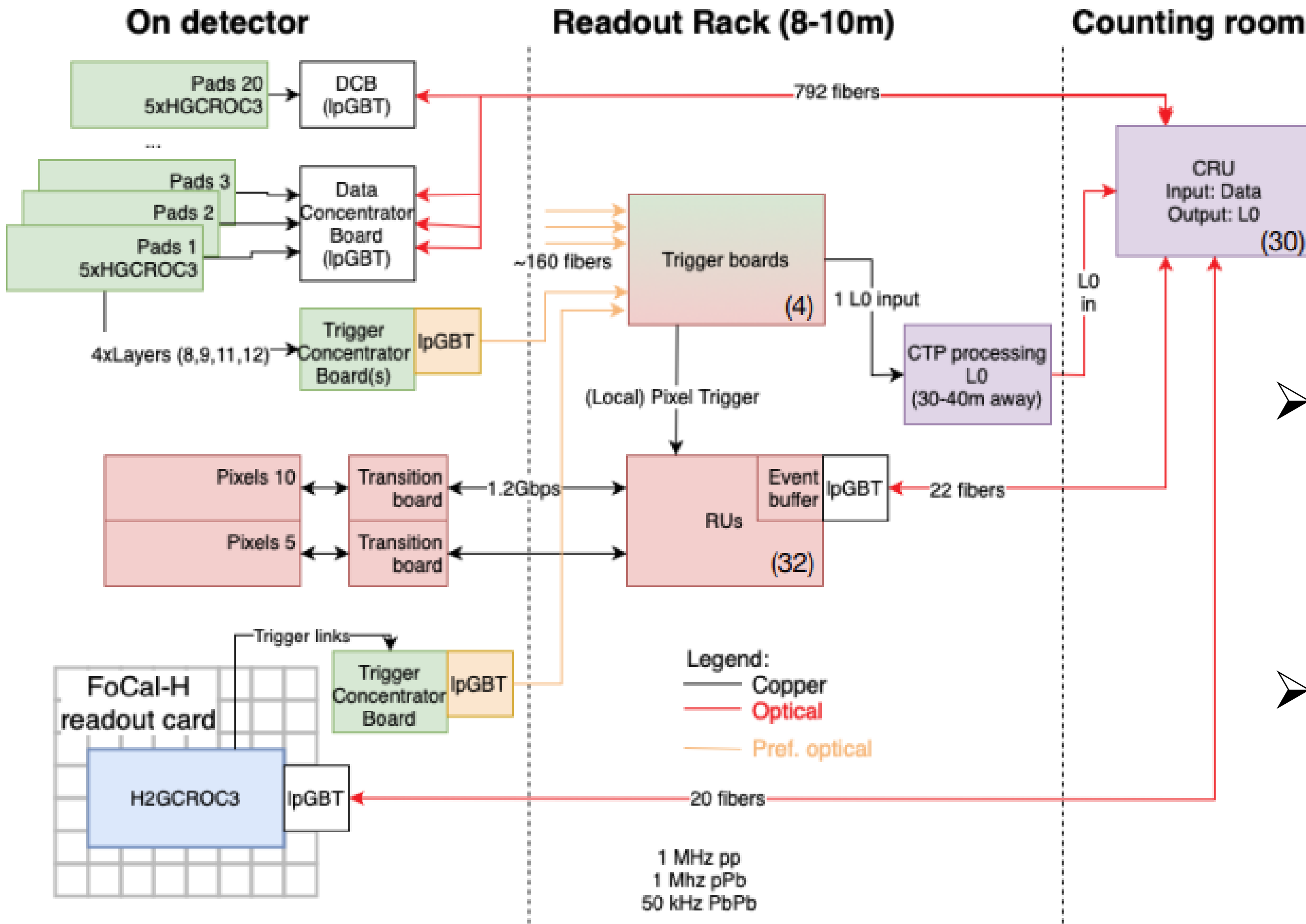
## 一、FoCal读出电子学研究背景

## 二、FoCal读出电子学研究任务和考核指标

## 三、FoCal读出电子学研究进展

## 四、总结和计划

# 一、研究背景



FoCal读出电子学系统

- FoCal-H, FoCal-E平板层使用**前端电子学芯片** HGCROC + IpGBT将数据直接传输至通用读出单元 (CRU)
- FoCal-E像素层采用**核心读出单元 (RU)** 采集 ALPIDE数据后将数据打包后经过IpGBT传输至 CRU

## 二、研究任务和考核指标

### • 2024年12月-2025年5月

- **任务计划：**完成初版RU样机的研制，开展相关功能测试
- **考核指标：**完成初版RU样机的研制
- **完成情况：**已完成测试电子学PCB硬件和固件，并开展了模块测试工作

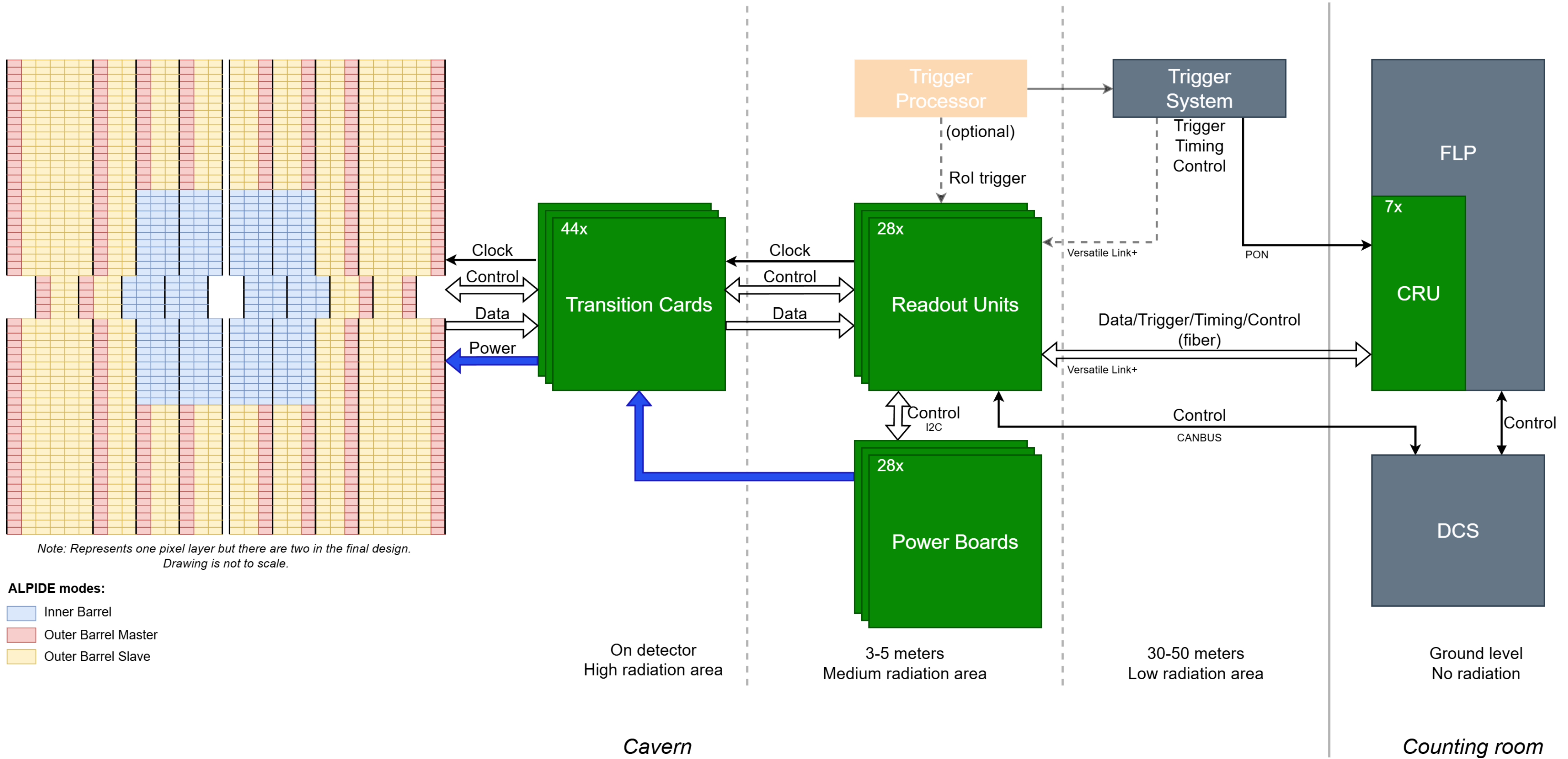
### • 2025年6月-2025年11月

- **任务计划：**验证 FPGA 对前端芯片的快速控制与高速数据获取，验证 FPGA 与计算机的以太网通信，制订改进计划，开展第二版读出板样机研制
- **考核指标：**完成初版 RU 测试实验，根据验证结果，制定 RU 改进计划
- **完成情况：**已在卑尔根进行探测器读出测试，已完成内层外层转接板设计并改版两次，读出单元和电源板硬件设计完成，完成数据通道固件代码，新版RU原理图以及PCB设计基本完成

### • 2025年12月-2026年6月

- **任务计划：**完成第二版 RU 样机的研制，开展样机测试与改进，对关键性能指标进行测量
- **考核指标：**完成第二版 RU 样机的研制
- **完成情况：**PCB设计最终确认。转接板，电源板原型已经生产并测试。新版读出单元正在等待生产

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



- ALPIDE modes:**
- Inner Barrel
  - Outer Barrel Master
  - Outer Barrel Slave

FoCal-E像素层读出电子学系统

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



## • 电子学硬件设计、生产和测试

- 硅像素模块测试转接板设计、**生产、测试**
- 内层/外层模块两种转接板设计、**生产**
- 集线板设计、**生产、测试**
- 电源板设计、**生产、测试**
- 读出单元设计、**测试**

## • 固件设计和验证

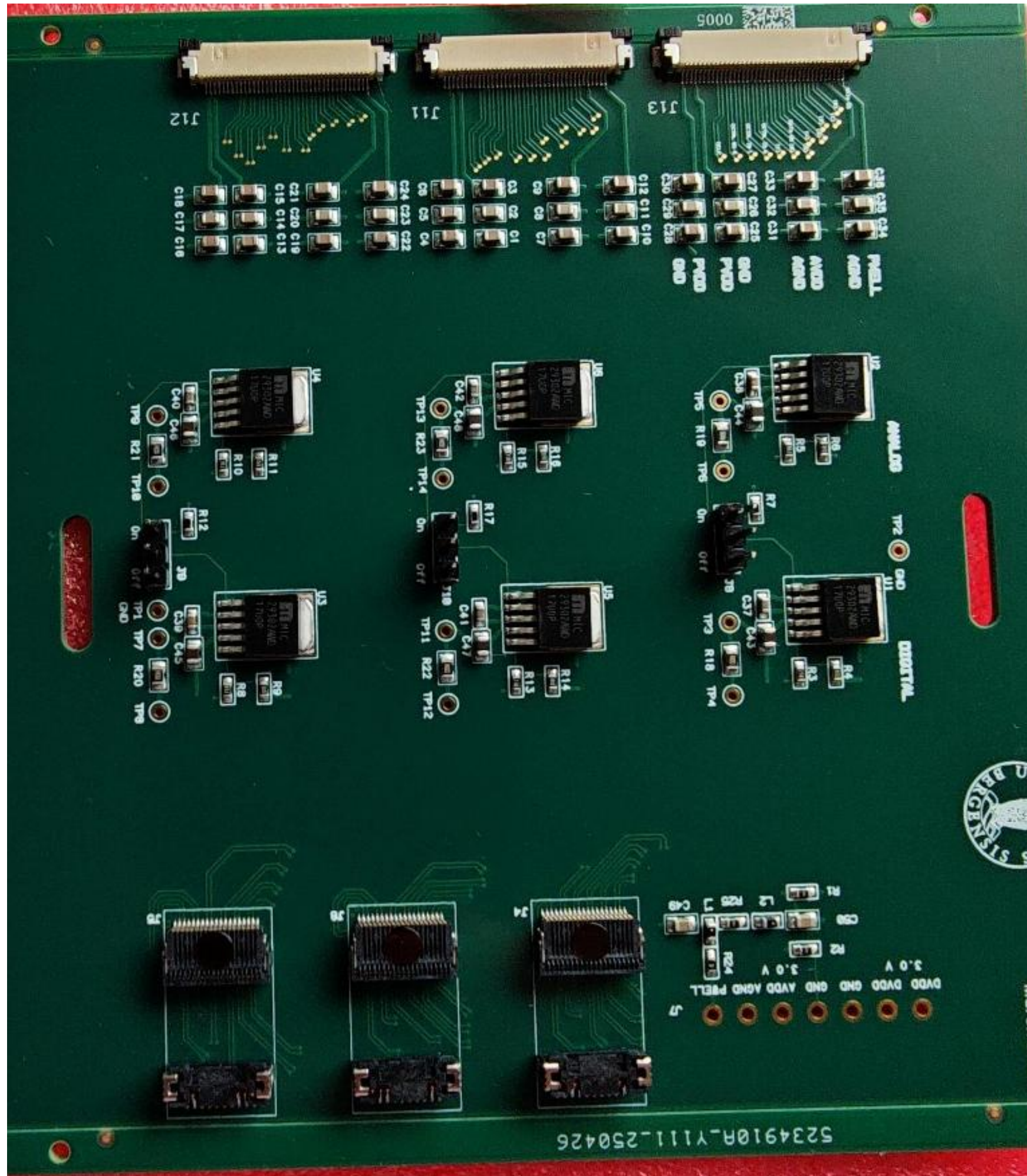
- **读出链路仿真模拟研究，CRU数据压缩逻辑研究**
- 读出单元数据通道，IpGBT数据打包器，触发模块设计和验证
- FoCal像素层探测器数据协议制定与**CRU用户逻辑研发**
- VLDB+板IpGBT数据传输测试
- 固件TMR抗辐照研究

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



## • 硅像素模块测试转接板设计、生产、测试

- 硅像素模块测试转接板主要用于为硅像素探测器提供的模拟、数字电源提供稳定的工作电压，并进行单个模块的转接
- 于2025年完成了原理图设计，PCB设计以及在国内生产，并前往挪威完成了探测器模块和转接板的测试



转接板实物图

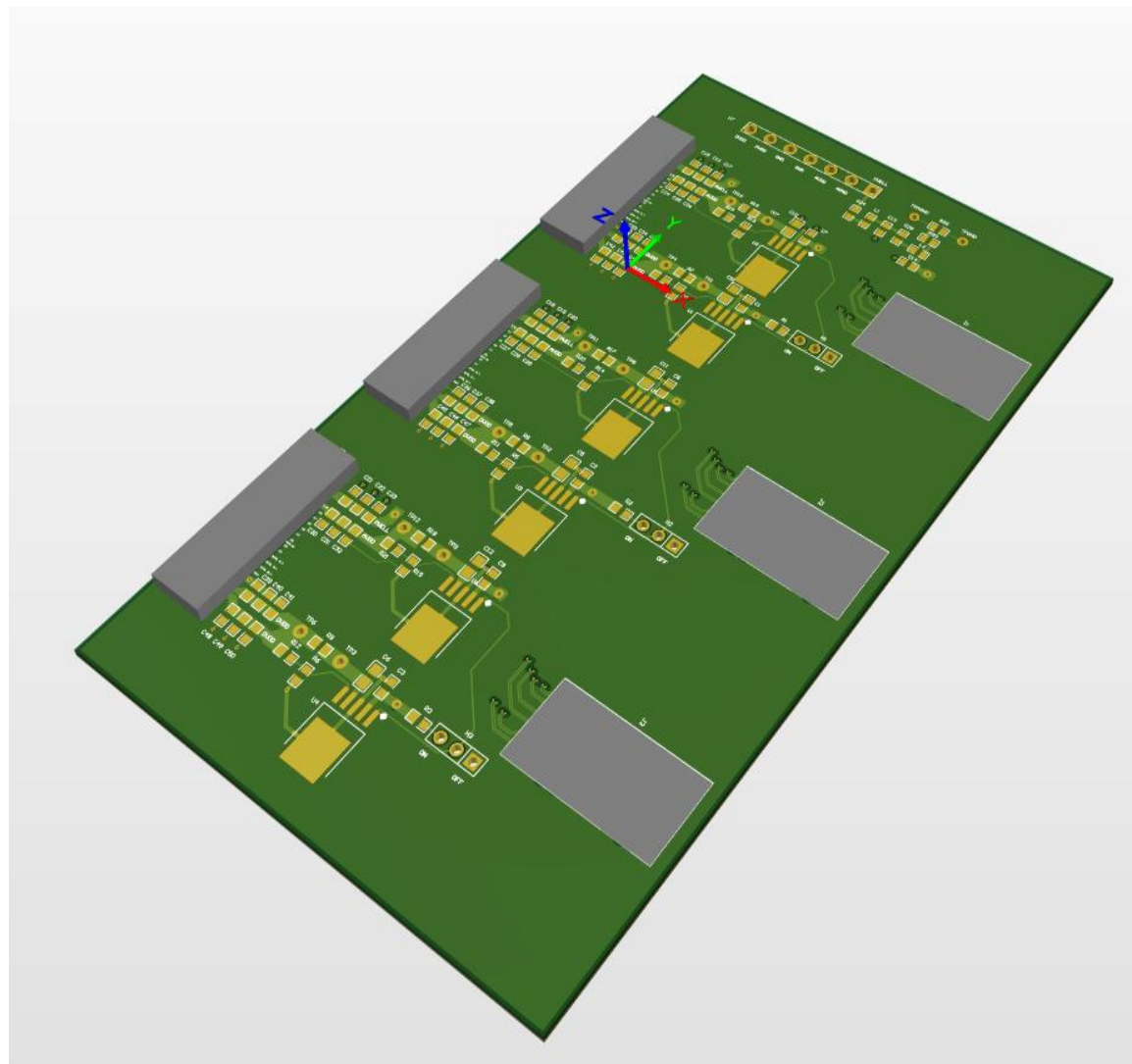
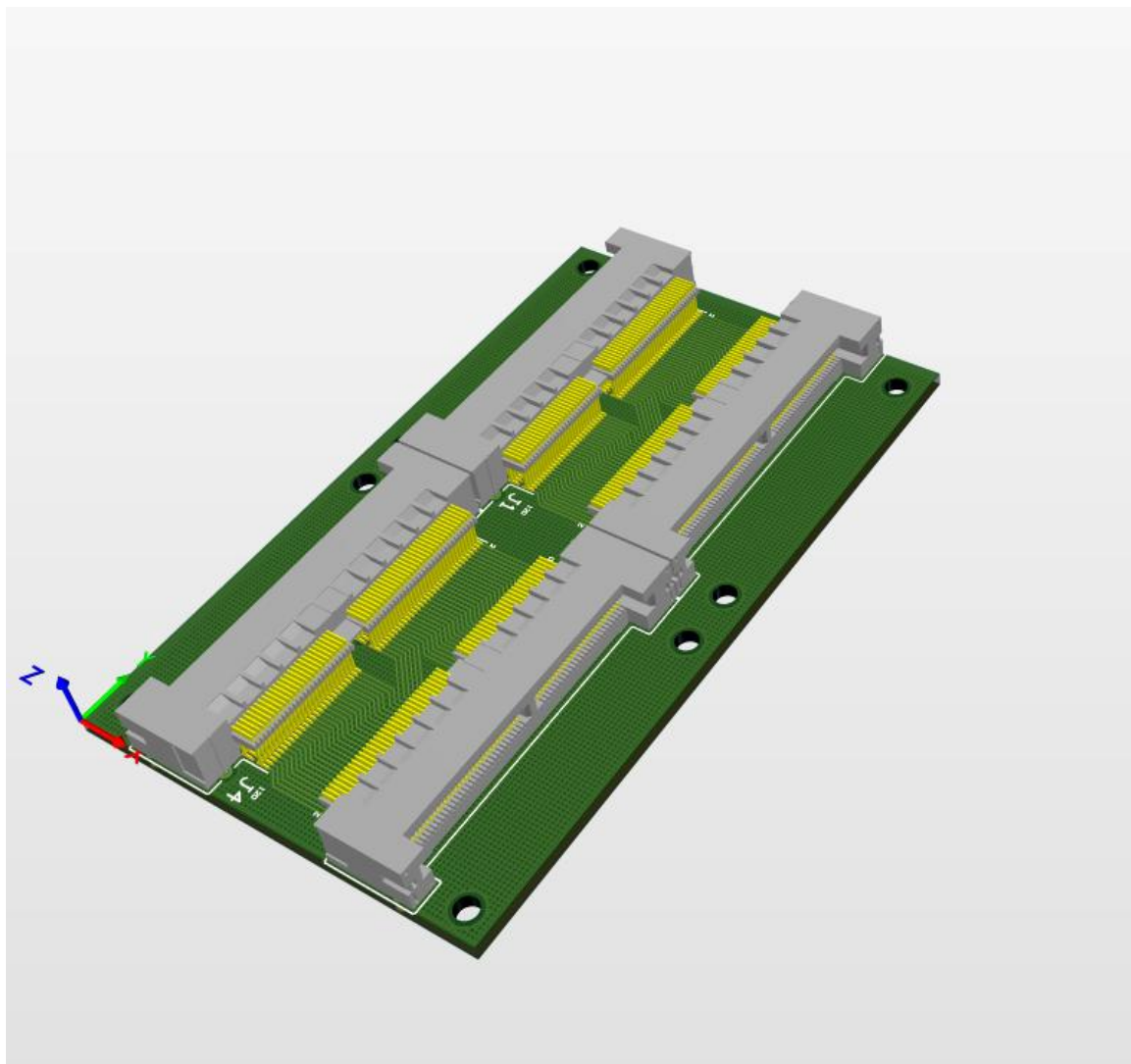
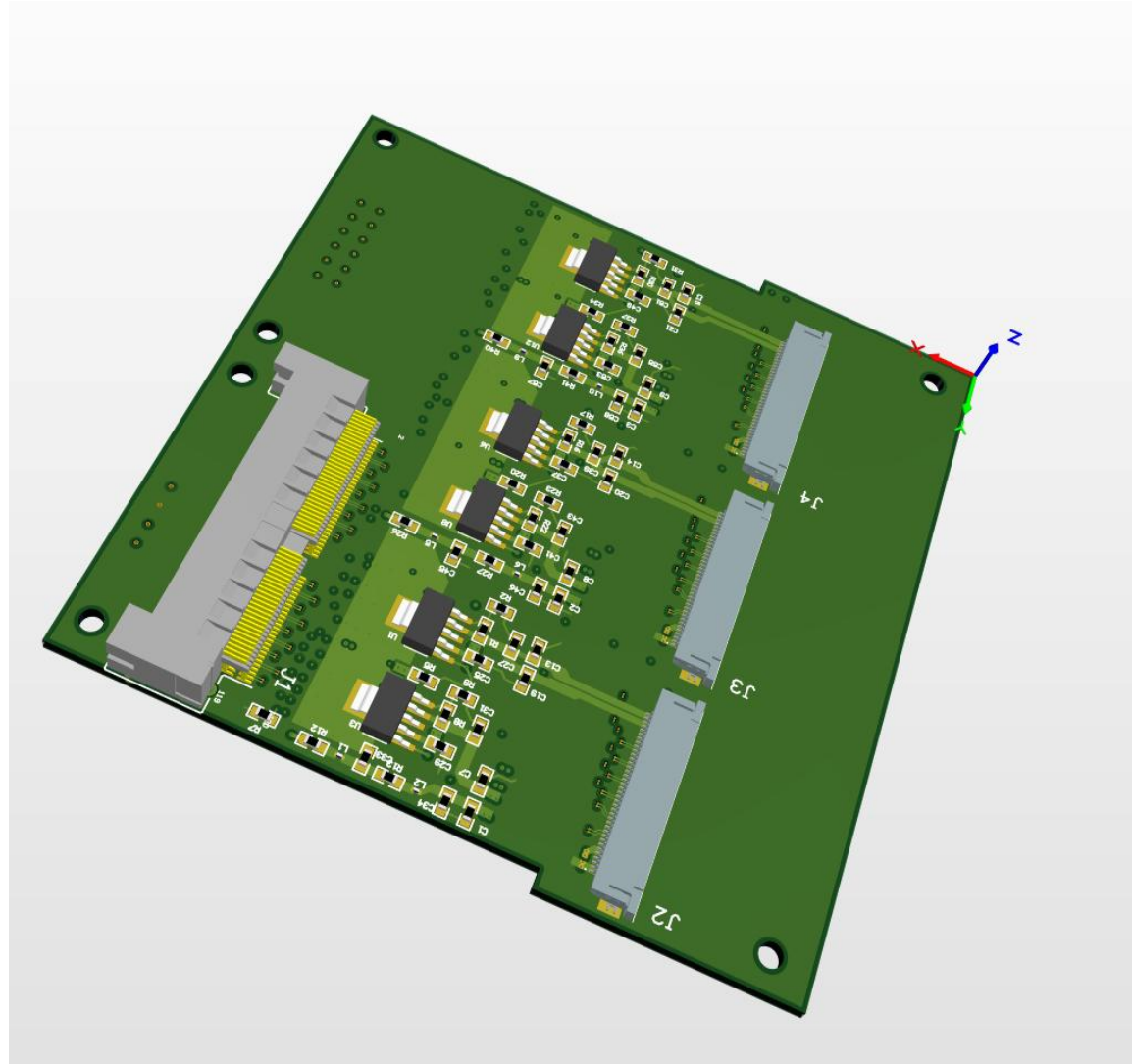
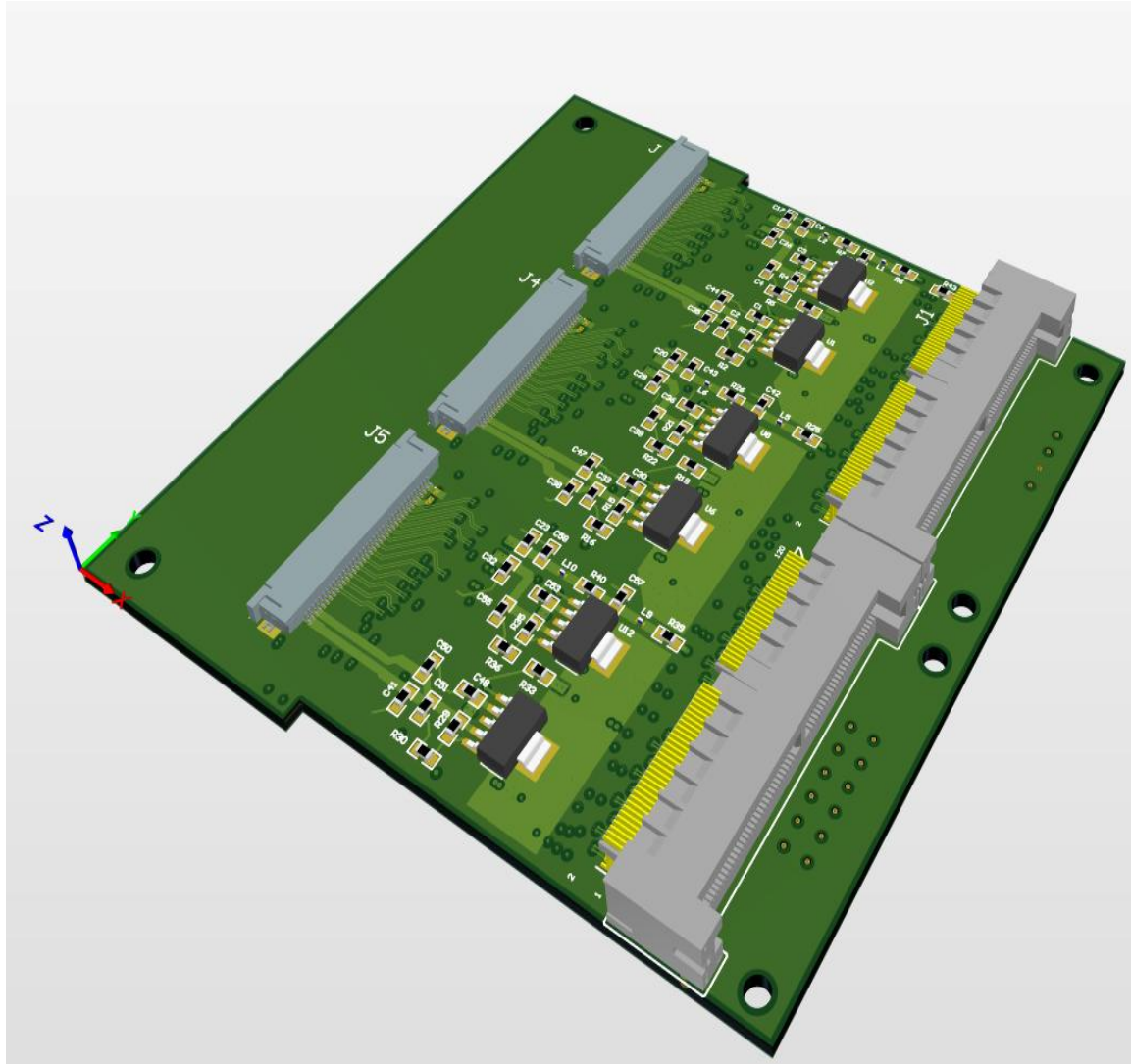


工程师在卑尔根大学进行转接板测试

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



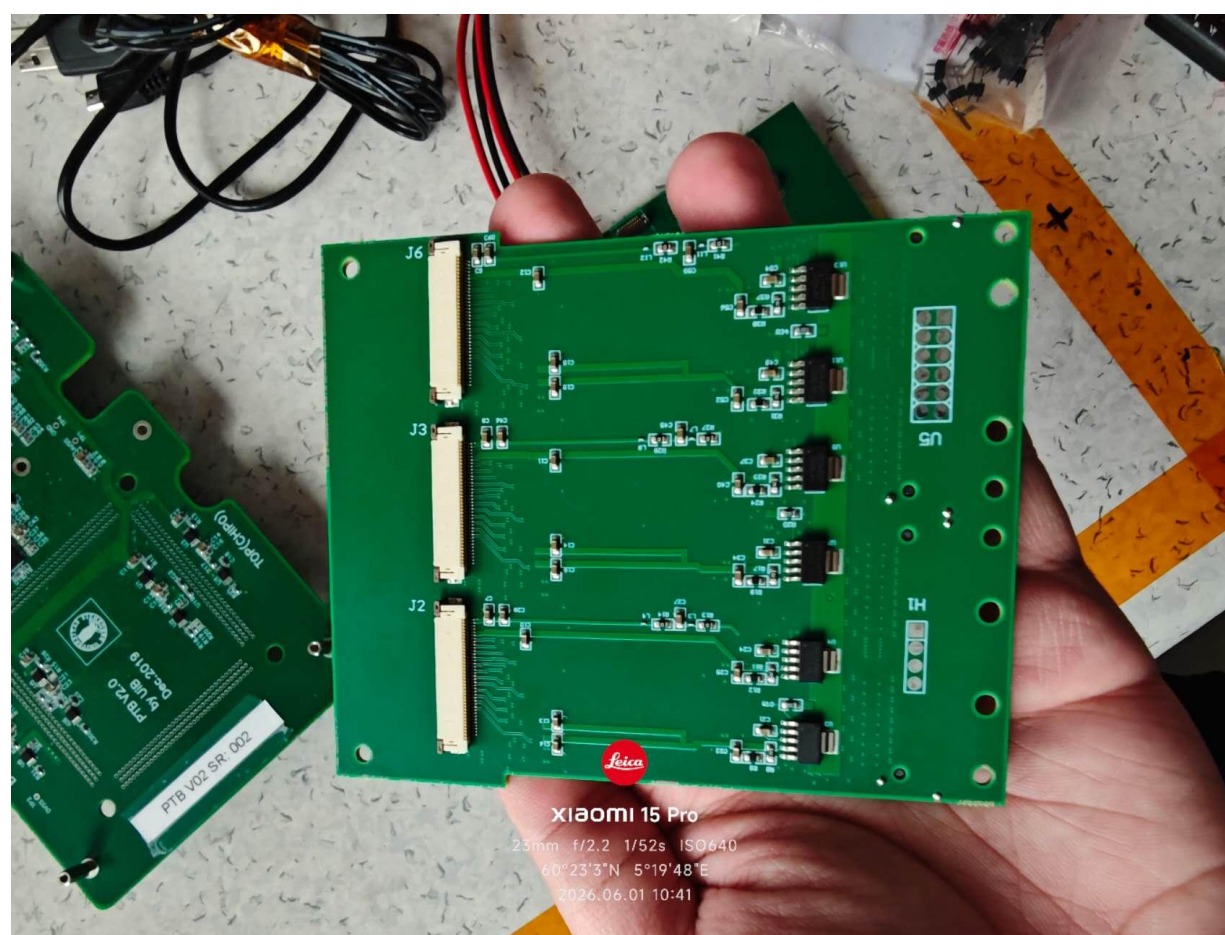
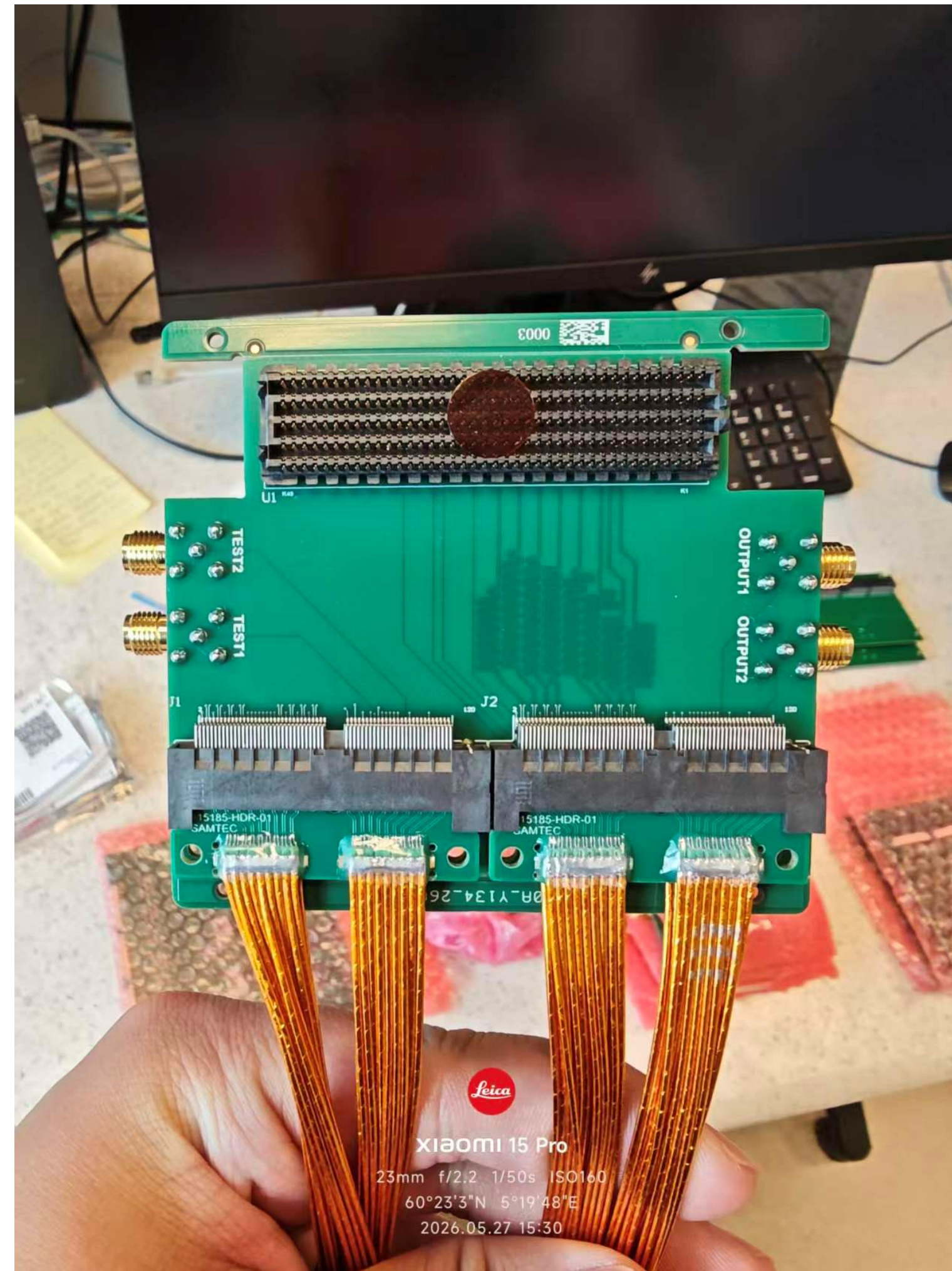
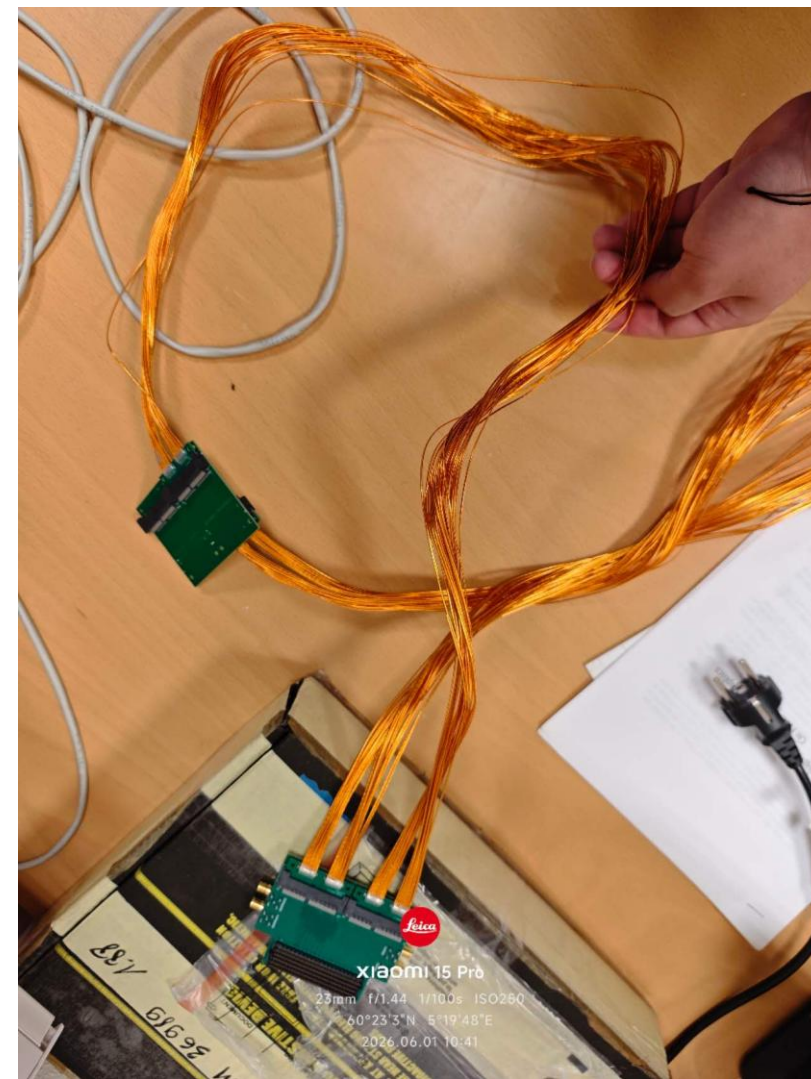
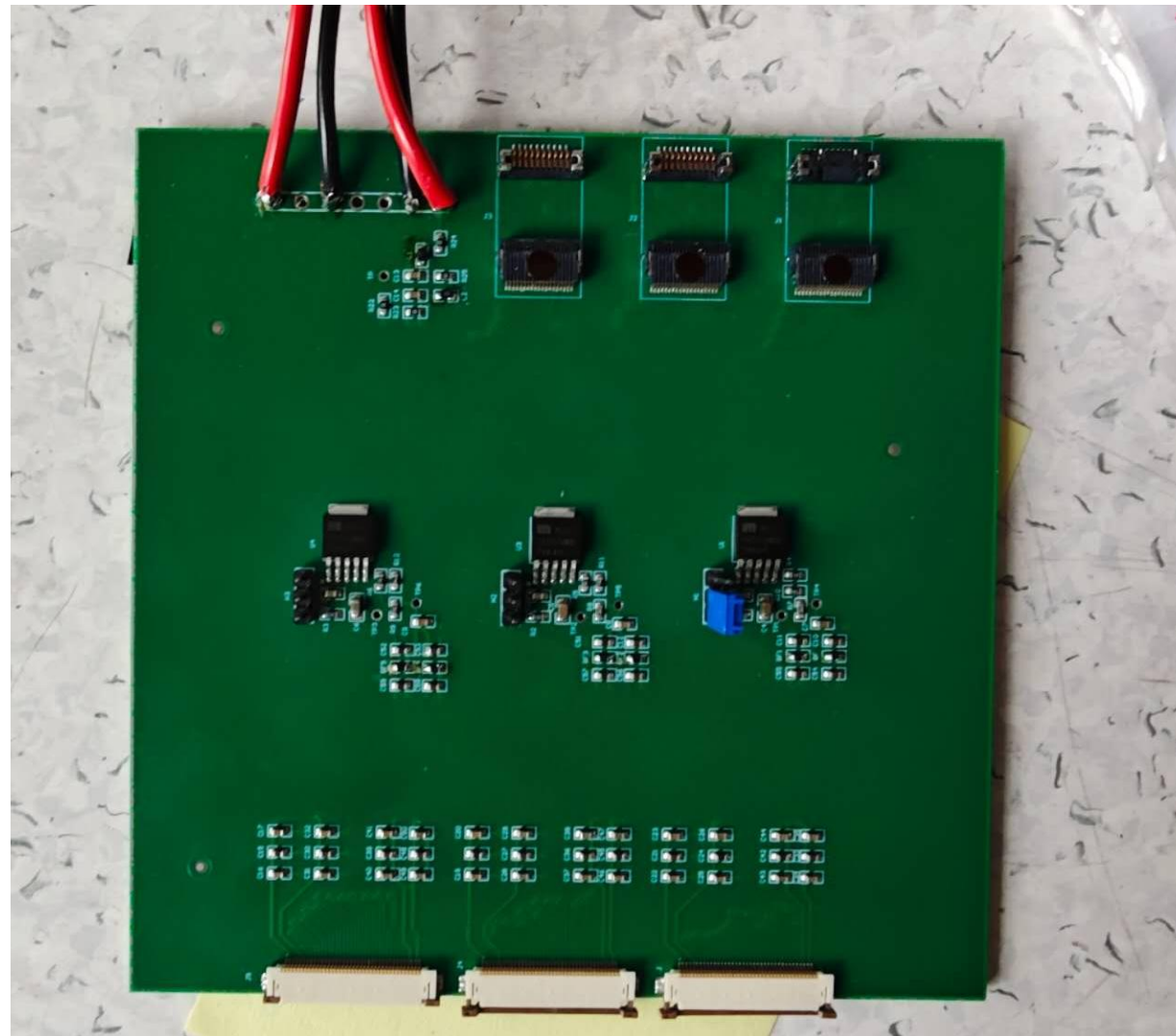
## • 转接板，集线板设计



- ITS2项目中，电源板到硅像素探测器线缆长度长，并且每个模块硅像素探测器数量多，距离远，因此远端的芯片偏压不稳定，工作存在问题
- FoCal硅像素模块转接板在靠近探测器的位置进行**二次稳压，保证硅像素探测器系统的稳定性**，针对两种不同的模块完成了内层外层两种设计
- 根据项目组机械设计以及抗辐照要求，目前转接板**已经改版了2次，已在国内完成生产原型板并于26年5月运至挪威**
- 出于探测器插拔方便考虑，增加了集线板设计，已完成设计，生产，26年5月-6月在挪威进行了测试

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL

## • 转接板，集线板实物图及测试

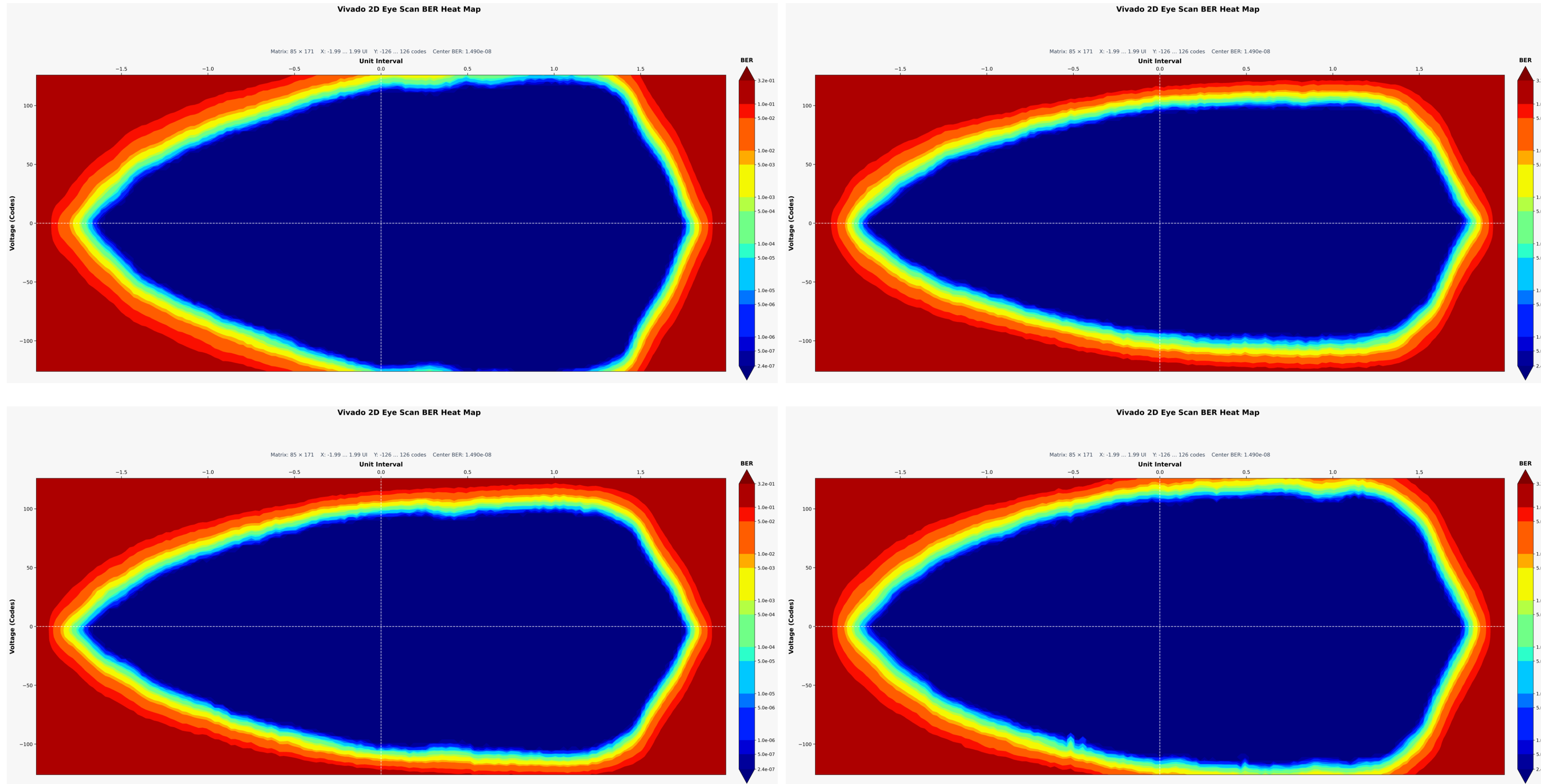


- 设计并生产了转接板，集线板，以及线缆测试板
- 已经进行了部分板的测试

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



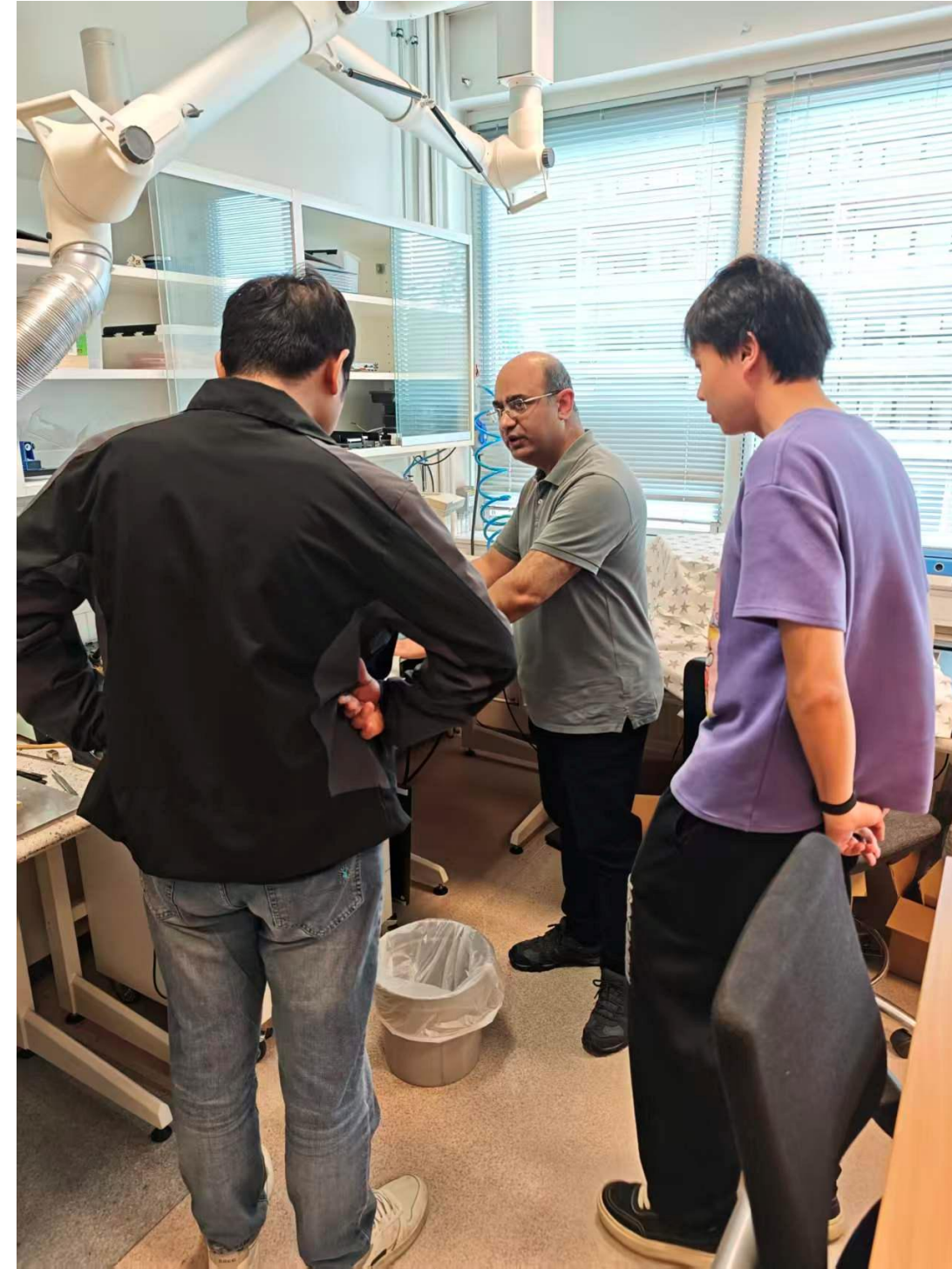
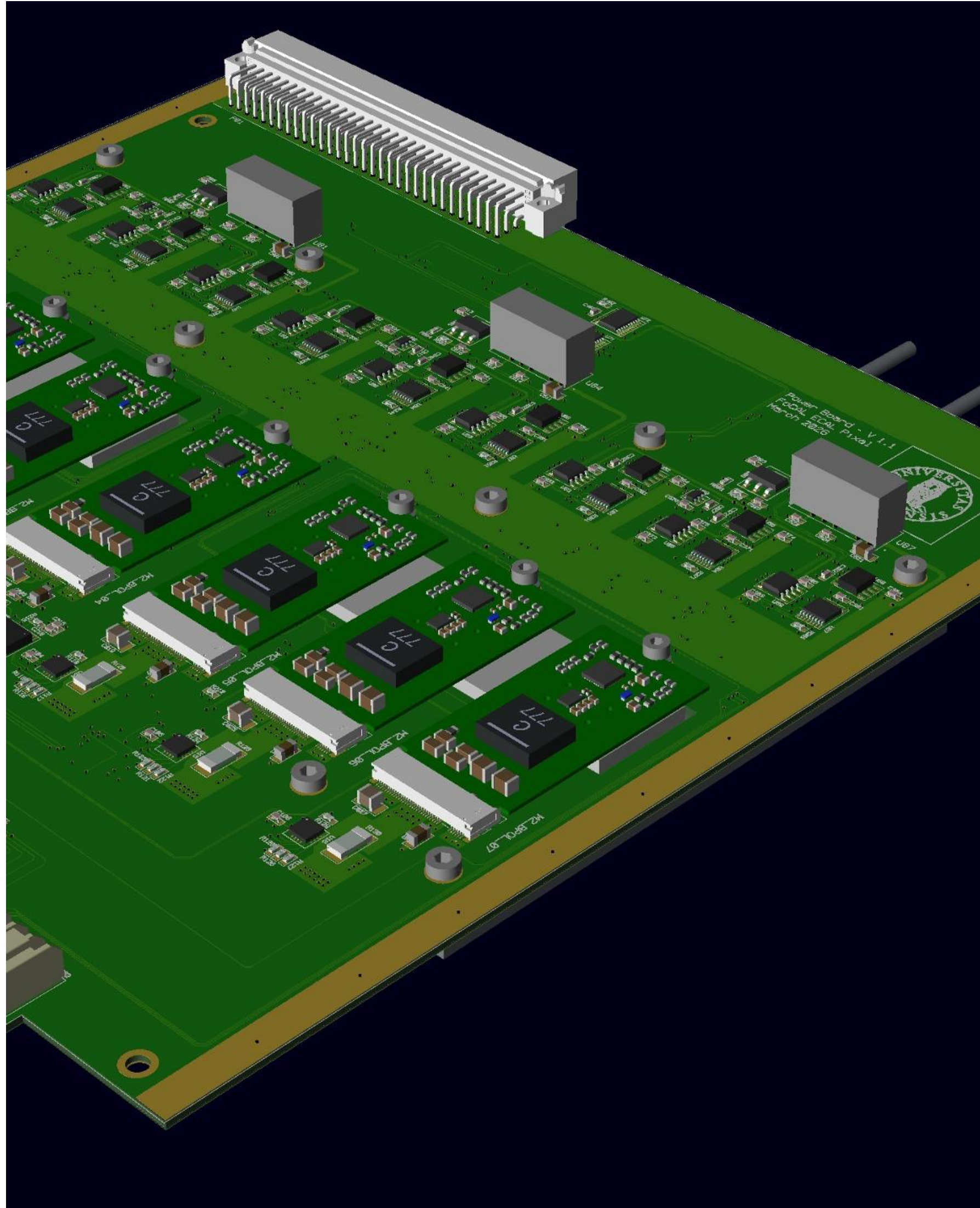
## • 转接板，集线板实物图及测试



➤ 生产了线缆测试回环板，进行了探测器信号传输线缆眼图测试

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL

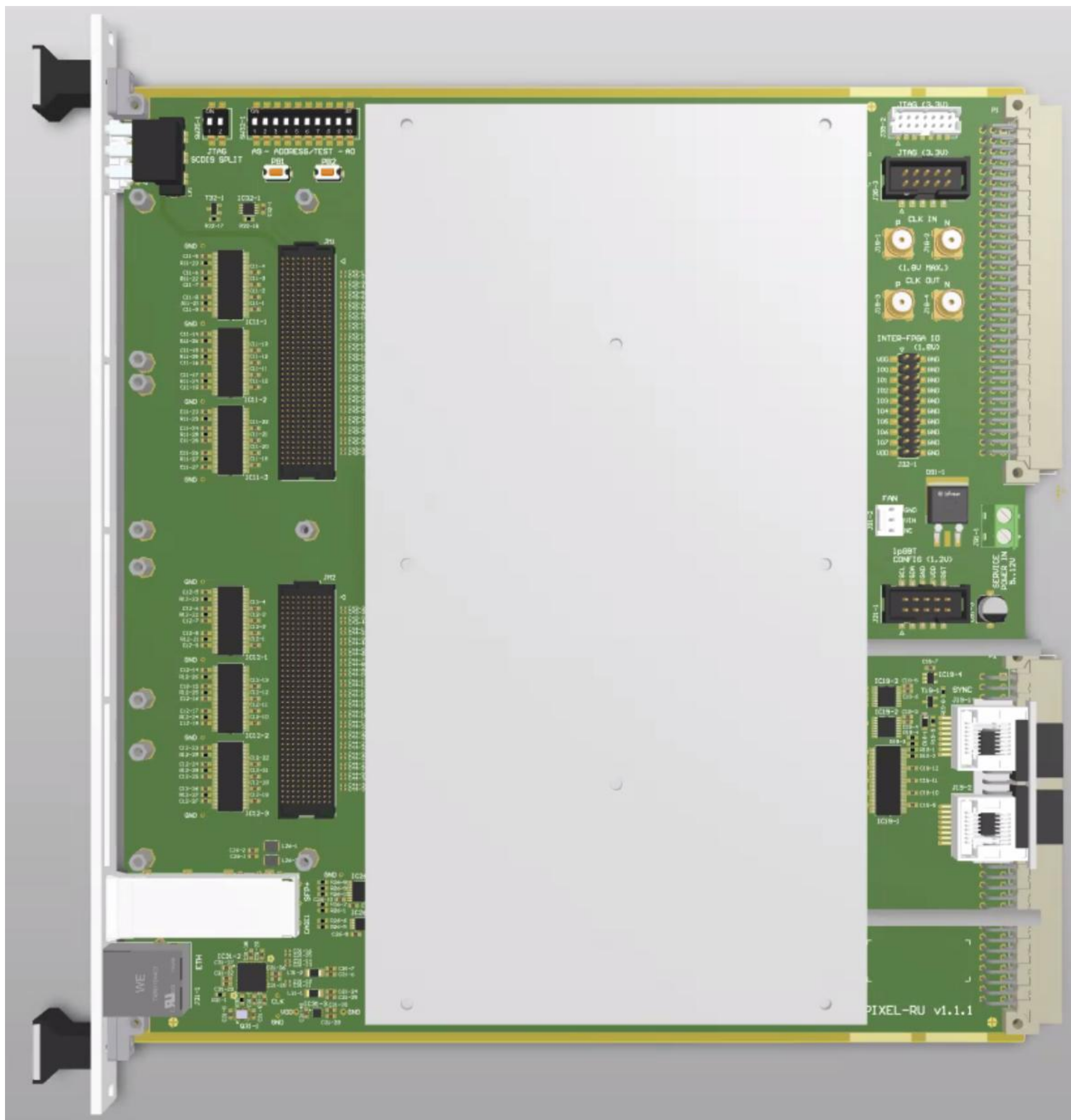
## • 电源板设计



- FoCal-E电源板为读出单元，转接板提供工作电压
- 工程师参与原理图以及PCB设计，目前设计完成，已完成生产，正在进行组装测试
- 在挪威生产了小批量原型，26年6月带回两块电源板，**在国内正在进行部分功能测试**

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL

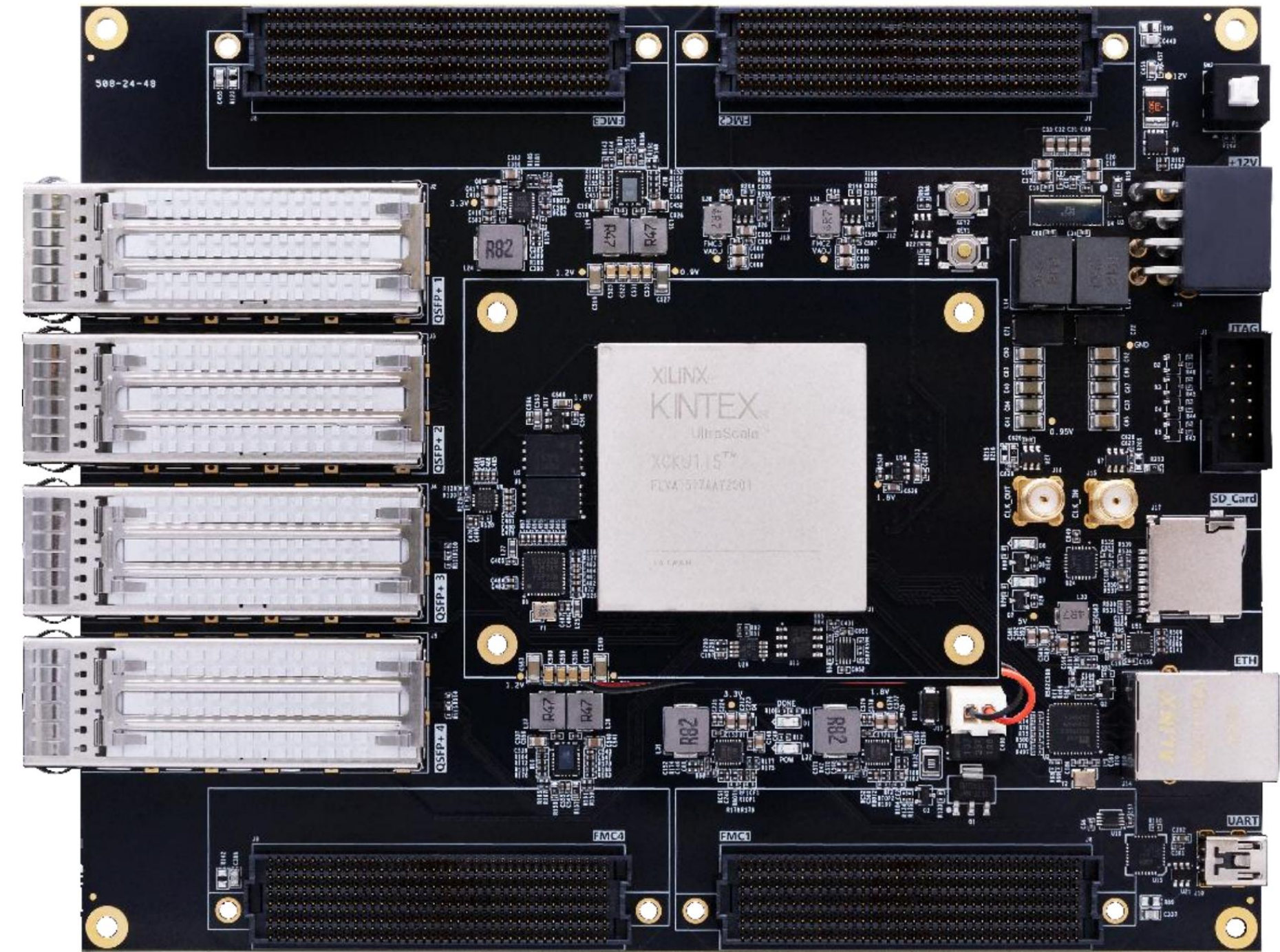
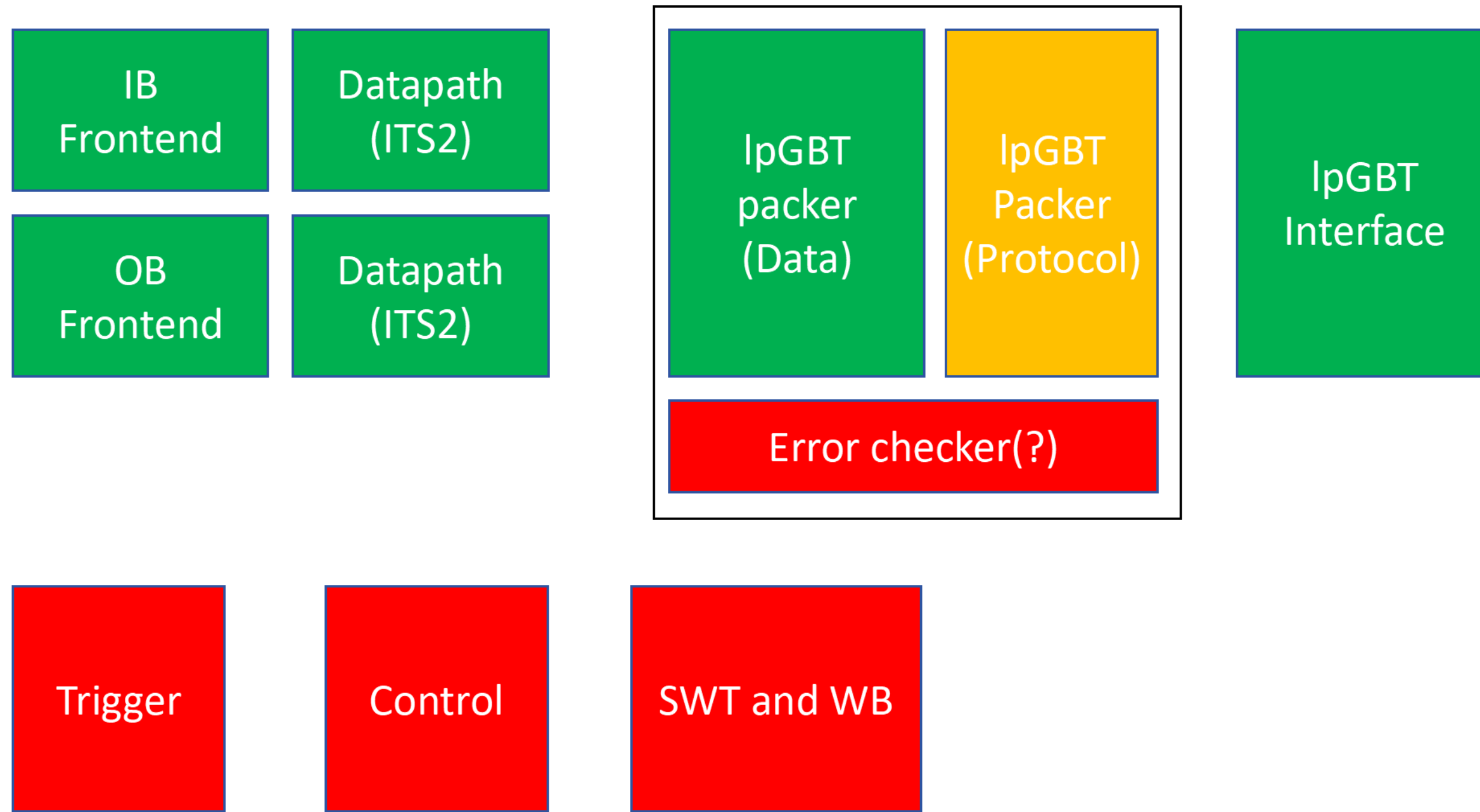
## • 读出单元设计



- 读出单元为硅像素层核心部件，读取硅像素数据，传送至通用读出单元，接收来自DCS的控制信号，配置硅像素芯片
- 完成了**FPGA功耗估计，资源估计，package 延迟估计**。参与器件选型，原理图设计，抗辐照测试计划指定等工作
- 目前新版PCB设计基本完成，正在等待生产

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL

## • 模块代码编写和测试

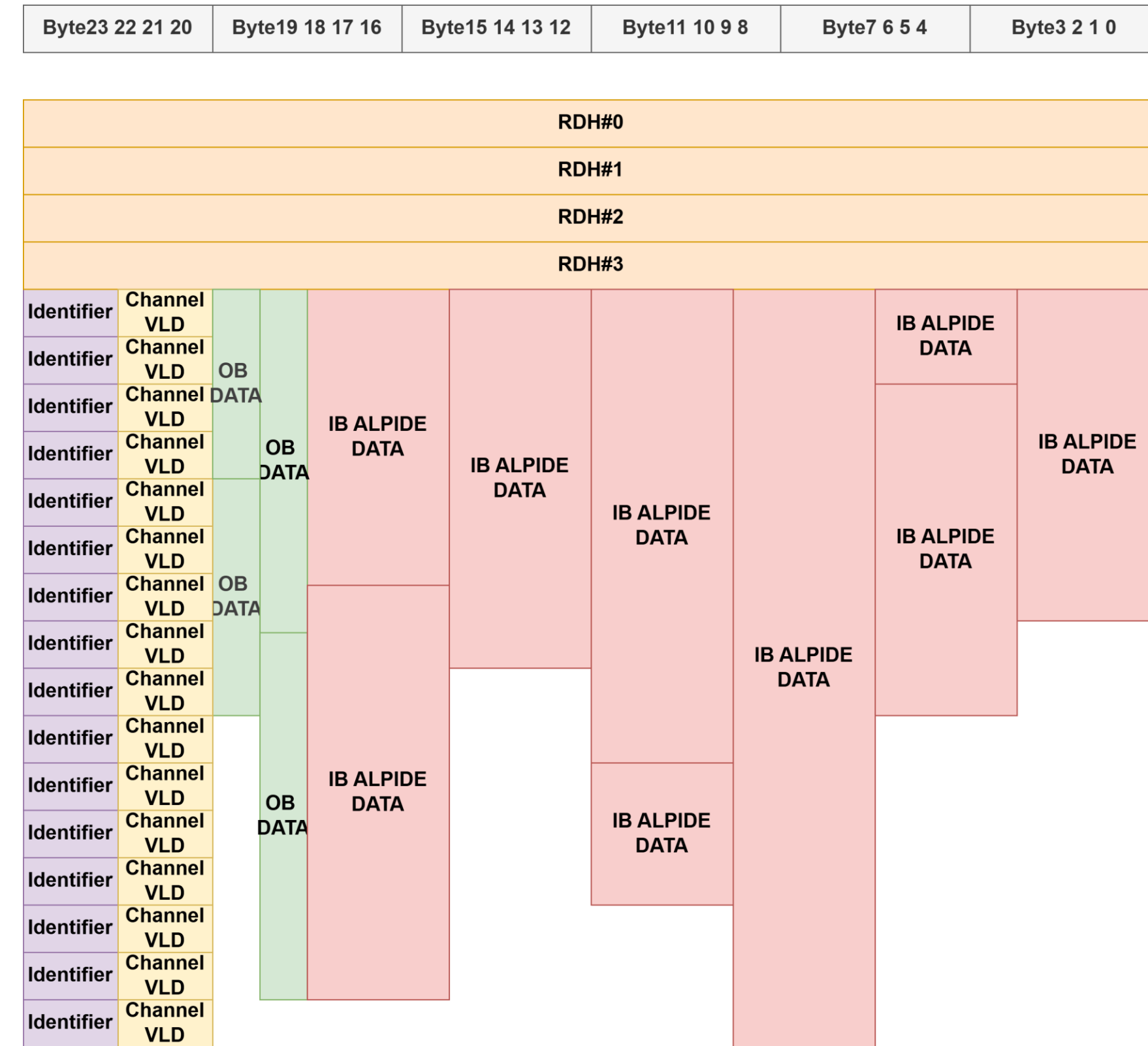
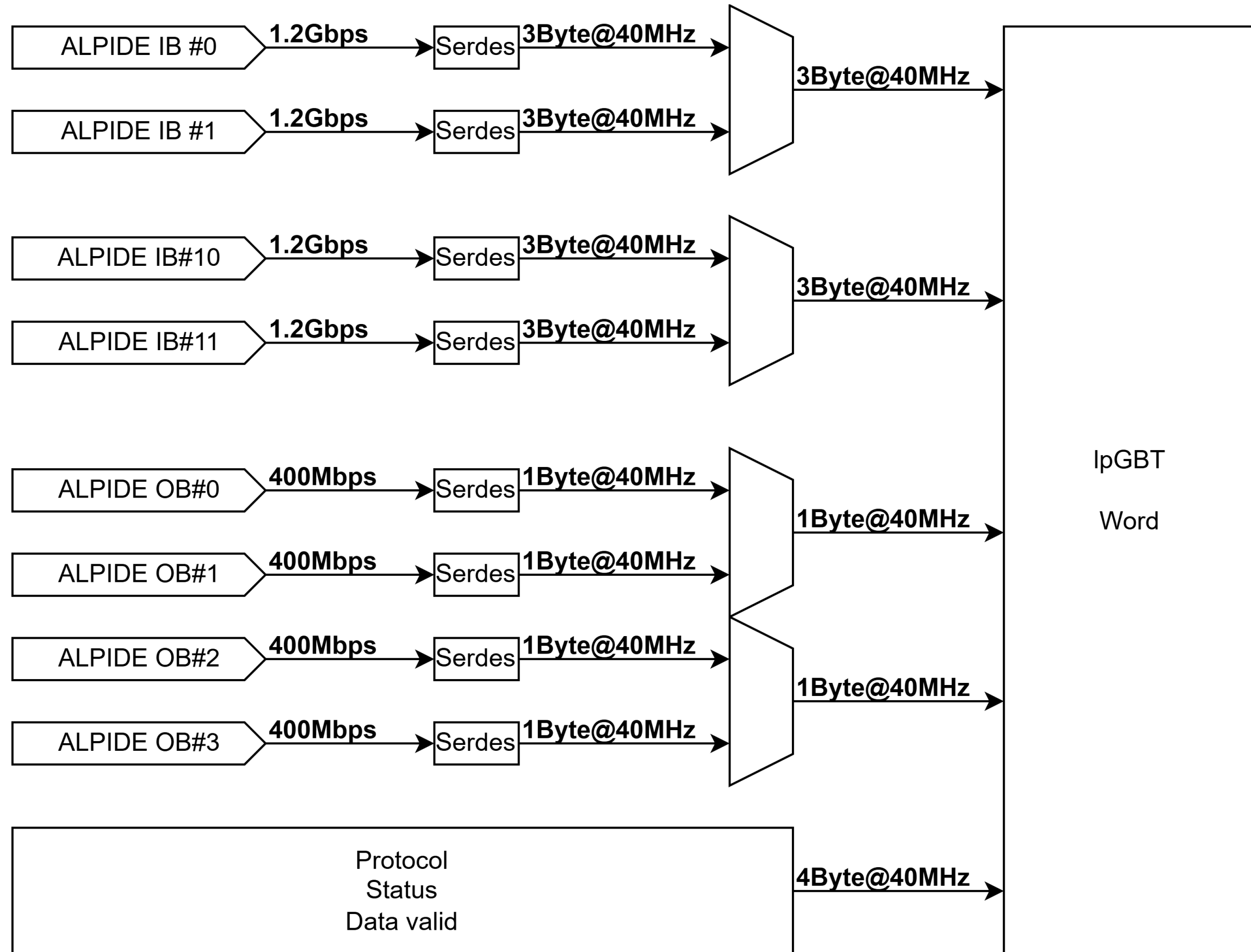


- 读出单元的数据接收前端，**数据通道和IpGBT打包器数据部分基本完成**，并进行了测试，IpGBT接口也完成并进行了测试
- 在国内采购了一块Xilinx KCU115 FPGA开发板进行固件开发测试
- 触发和控制模块编写工作正在进行

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



## • IpGBT上传数据协议制定

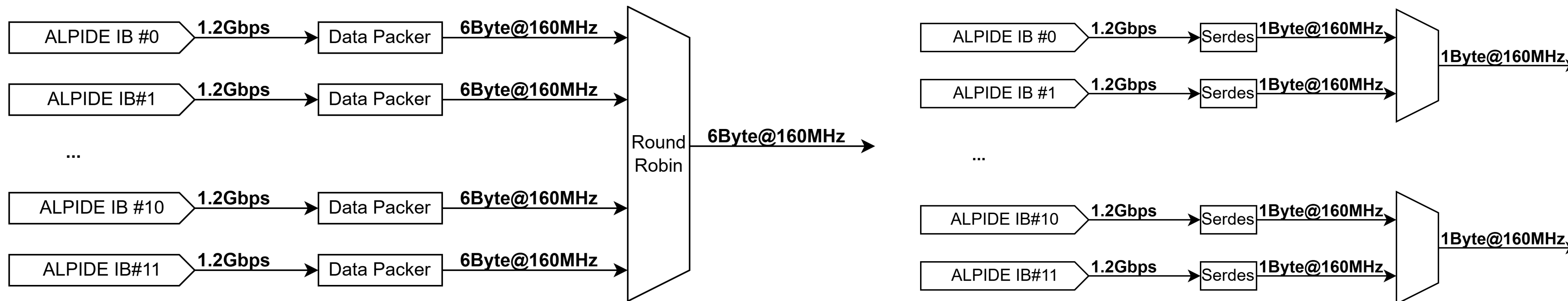


- 数据格式根据时间帧，心跳帧，CRU数据包分为三层
- 基本确定了最终数据协议和触发协议，与CRU专家达成一致

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



## • 数据传输模拟仿真



### Method:

- 12 IB ALPIDE as example, get data from Physics simulation
- Generate the package length of ALPIDE, Run 10000 trigger Poisson distribution around the mean speed

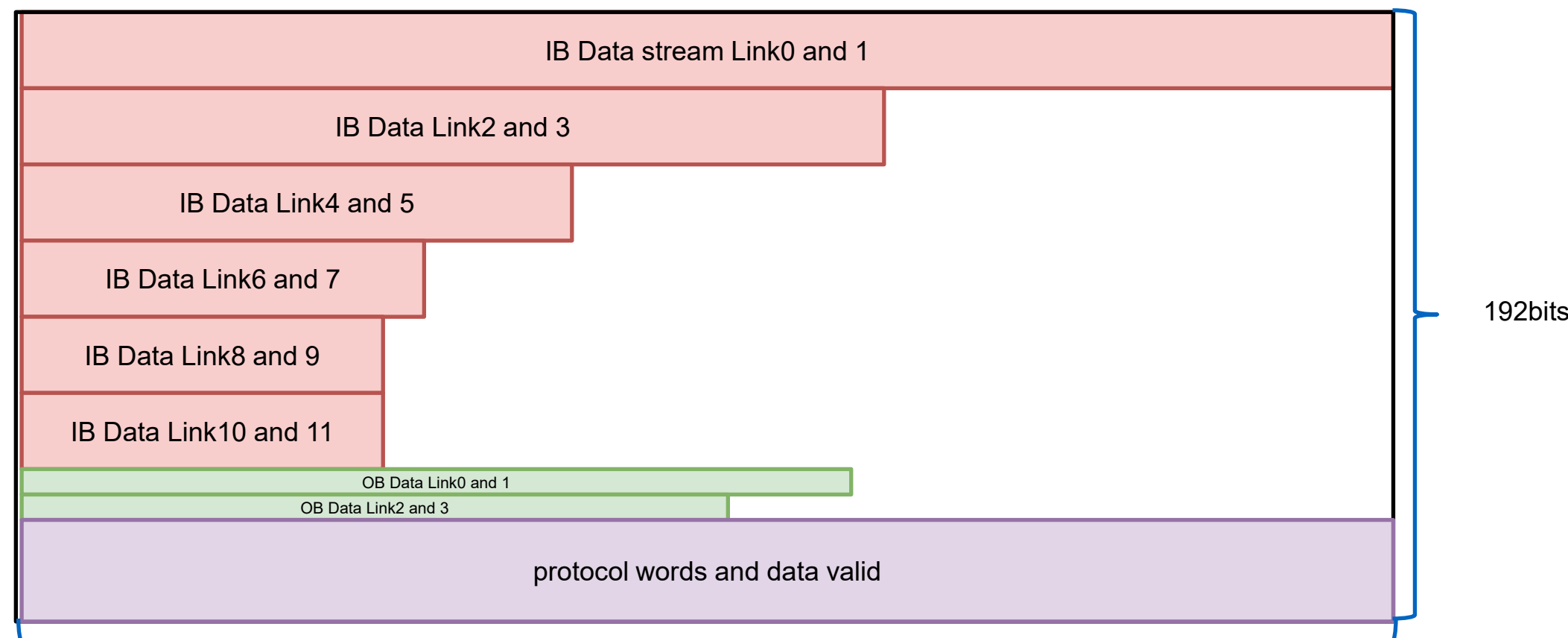
	Packing mode	Stream mode
Latency (bits*clock cycle)	2.904 Mbit-cycles	335.407 kbit-cycles
Memory needed(width*depth)	1455 bytes	265 bytes

- 使用物理模拟数据，进行了两种FPGA内数据传输方式的仿真
- 确定了低延迟传输方案-流式传输

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL

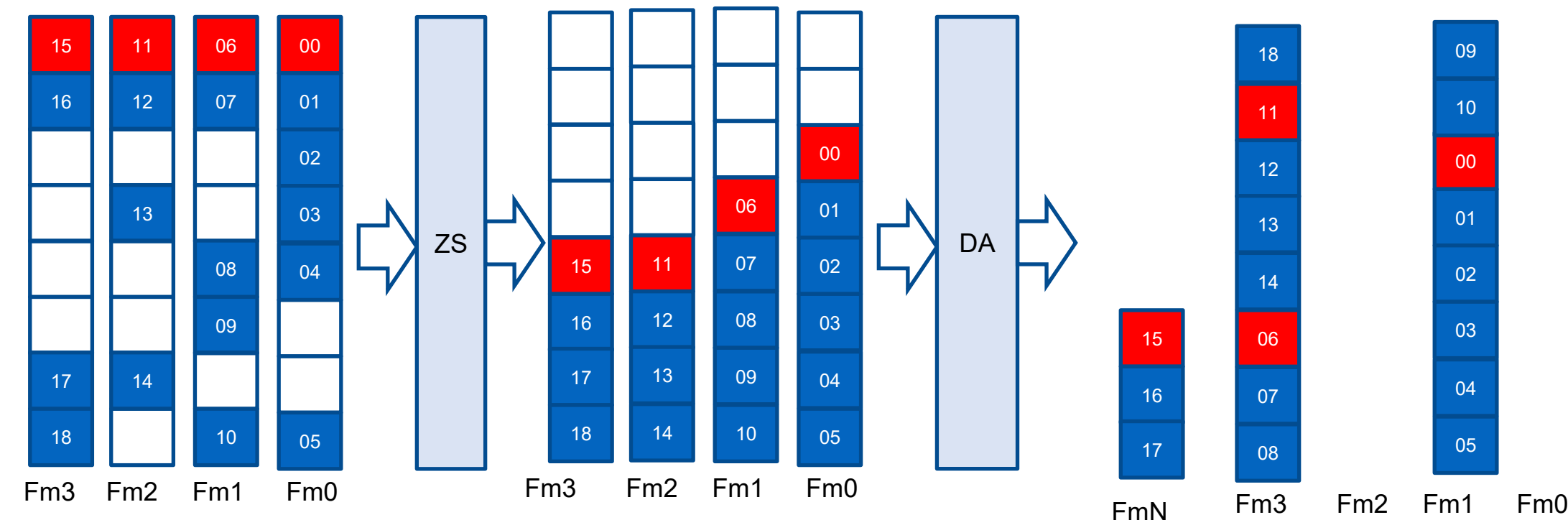


## • 数据去零压缩算法



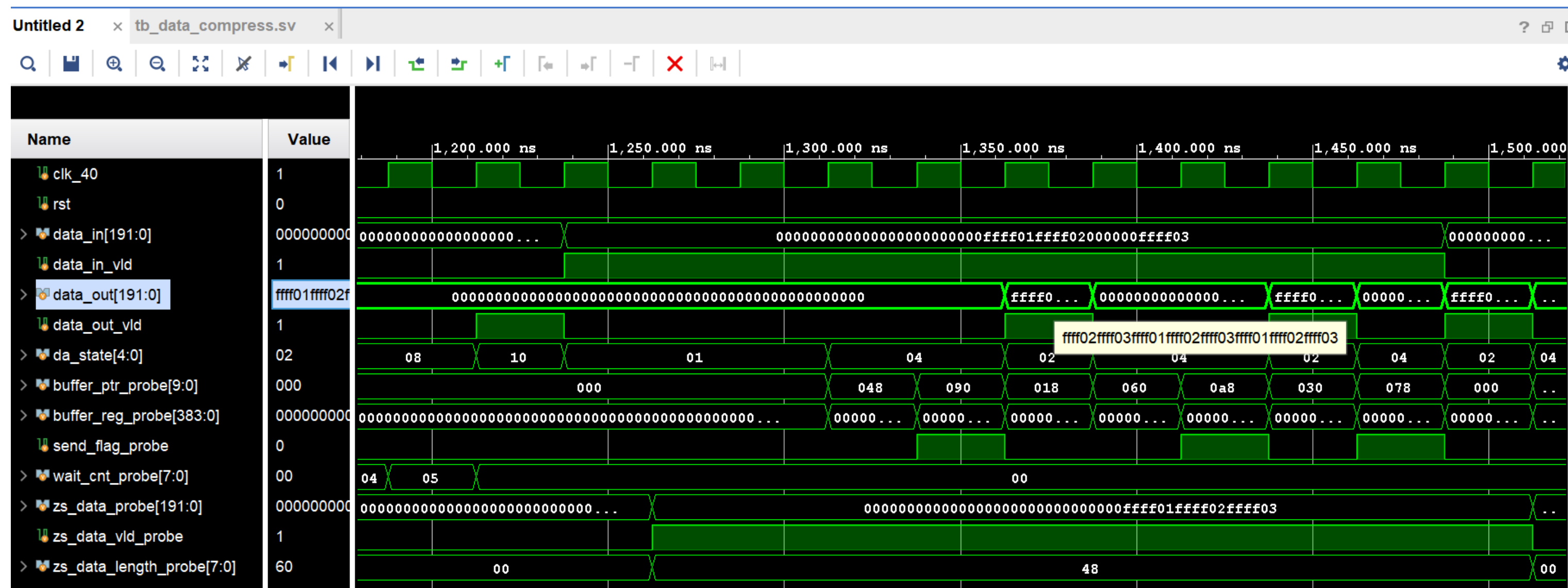
167 clock cycle @40MHz

Example:



can always be 8bit identifier + channel\_vld words

Will tell you:  
1.length of the packet  
2.in packet, which position belongs to which channel  
In a word, tell you how to decode it

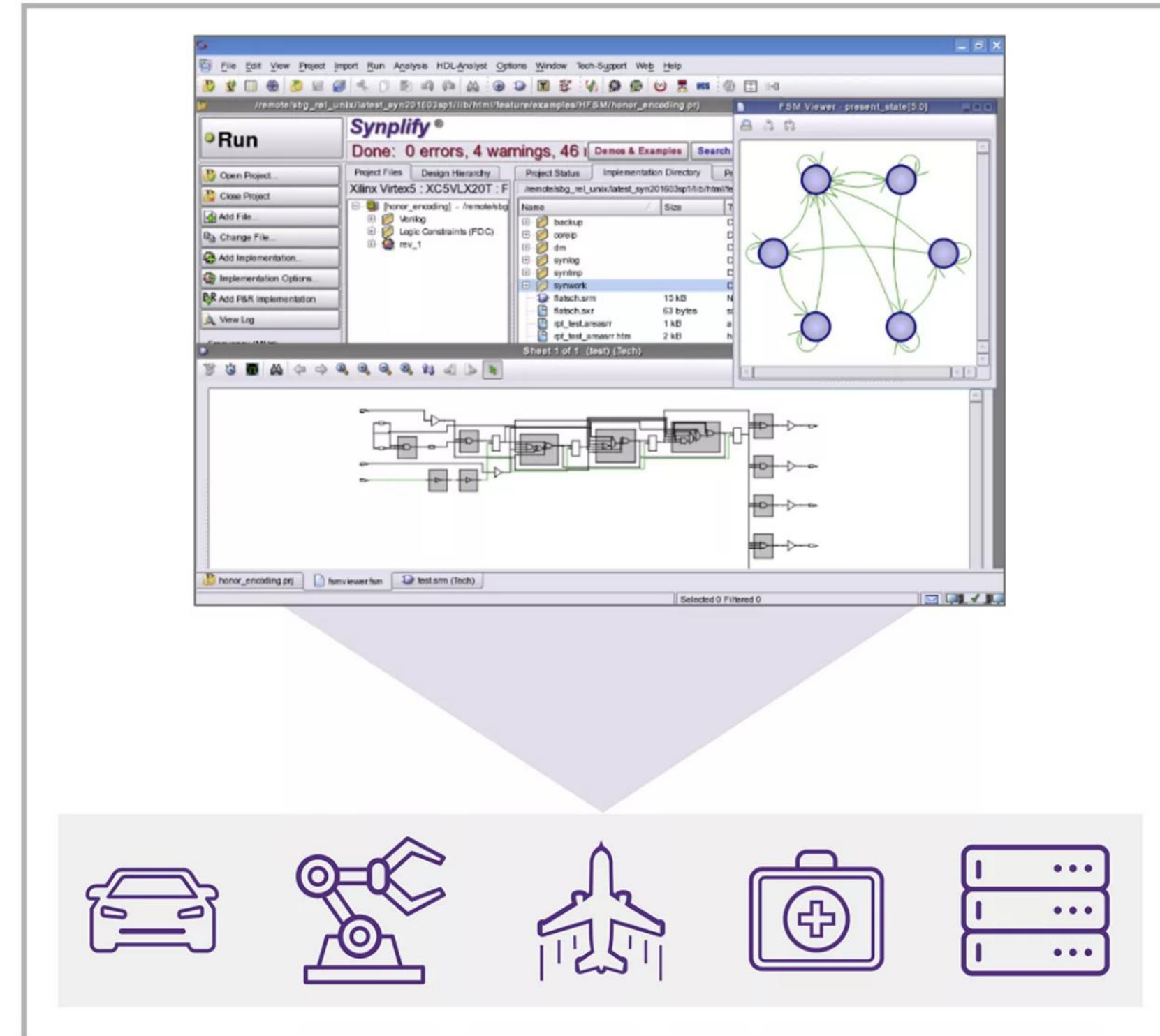
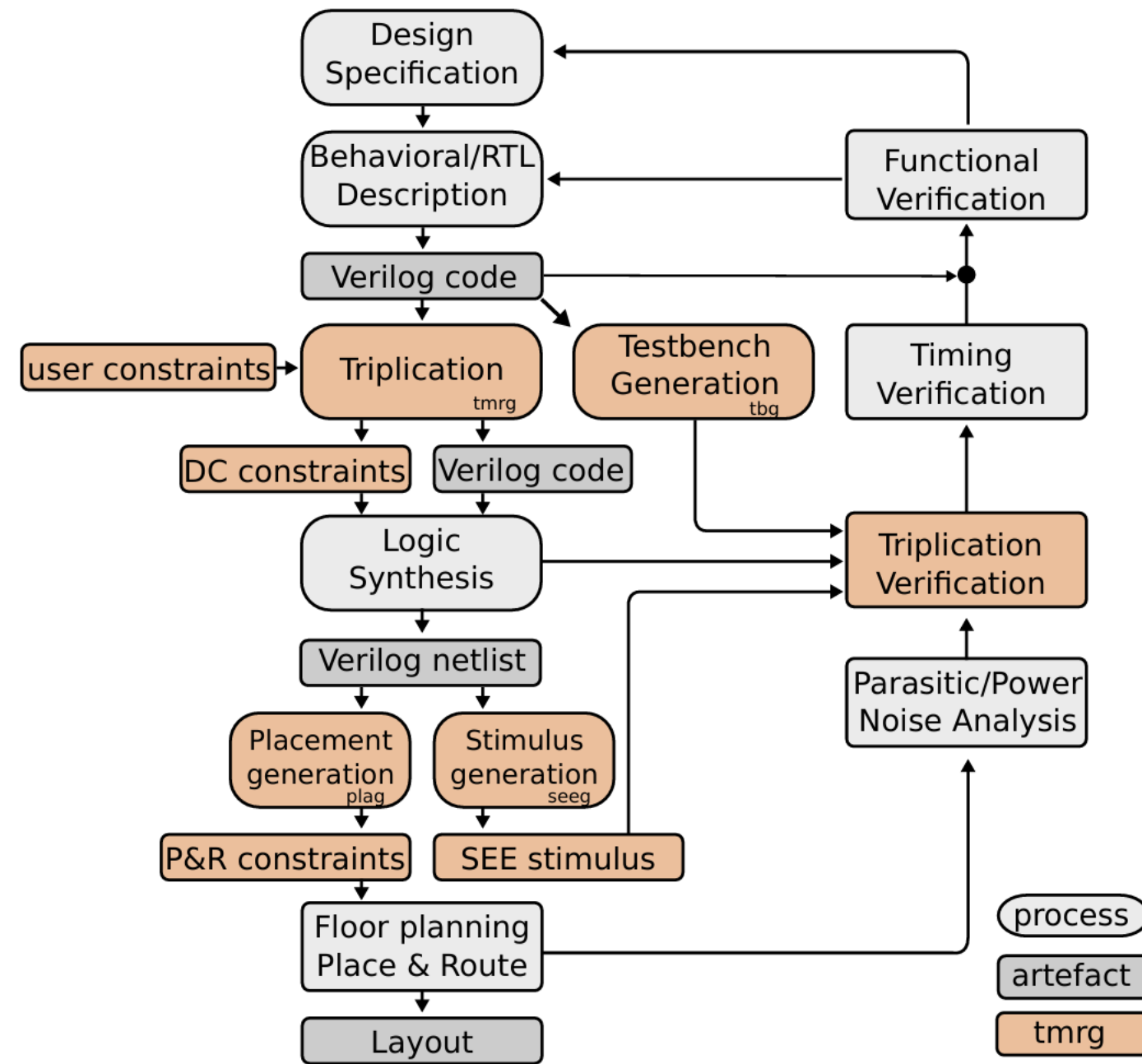


- 流式传输方案在低延迟的同时，给数据包中带来了大量的零数据
- 在CRU的FPGA内采用去零压缩算法解决这个问题

# 三、FoCal读出电子学研究进展-ECAL



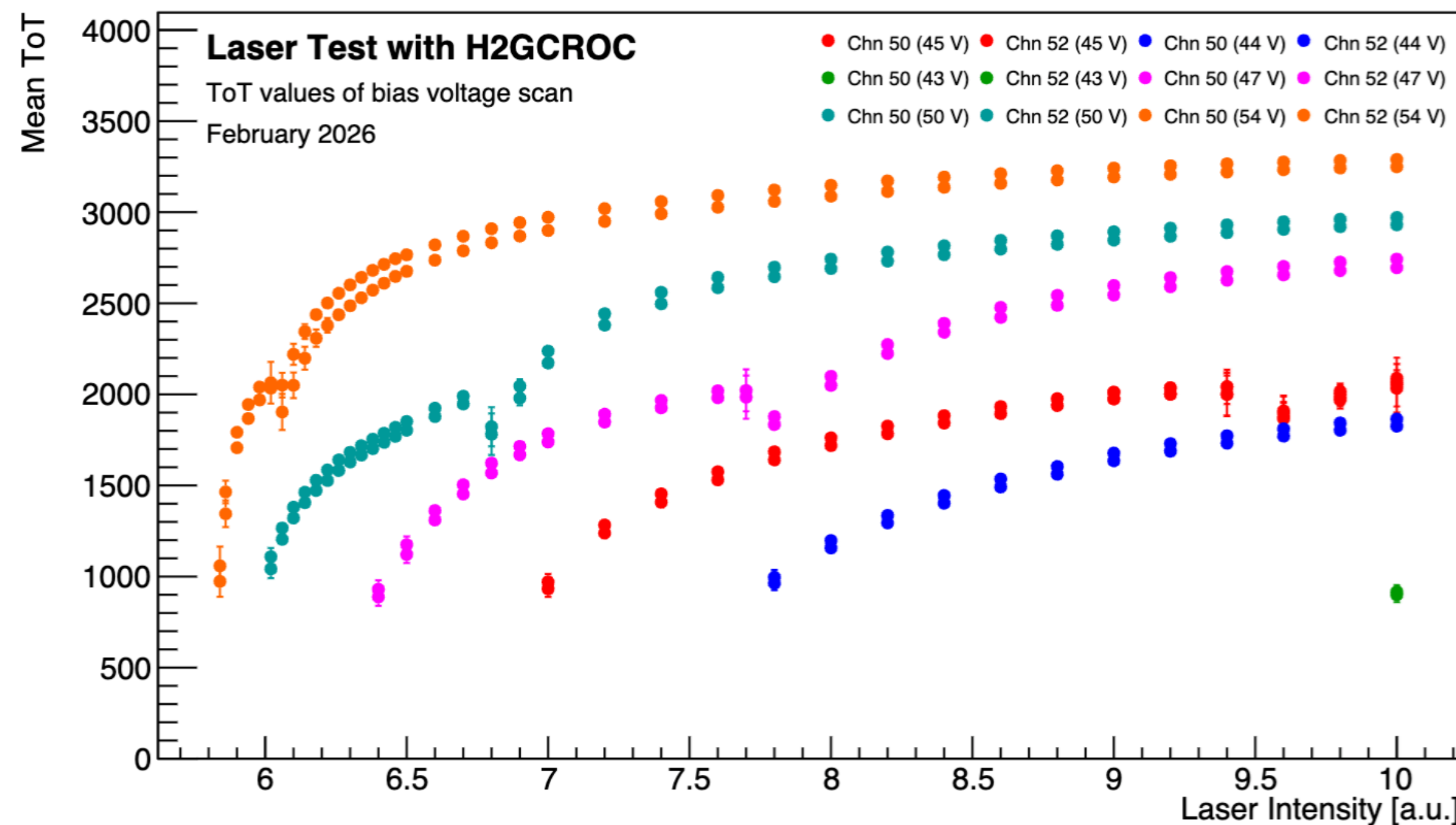
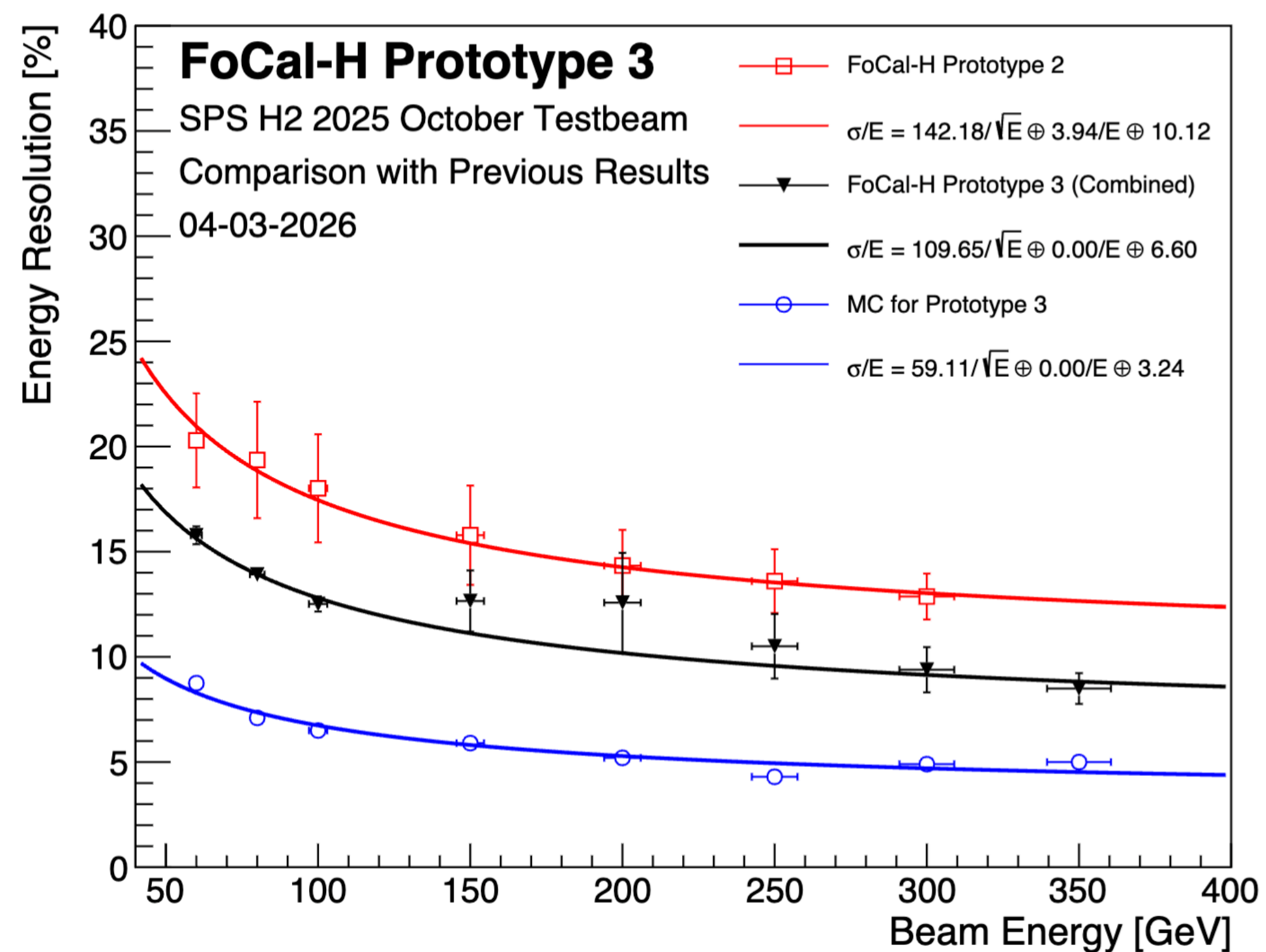
## • 固件抗辐射加固



➤ 抗辐射加固选择两种方式代码级加固和综合器加固

➤ 目前已尝试TMRG进行代码级加固测试，完成综合器加固测试，确定了TMR部署方式

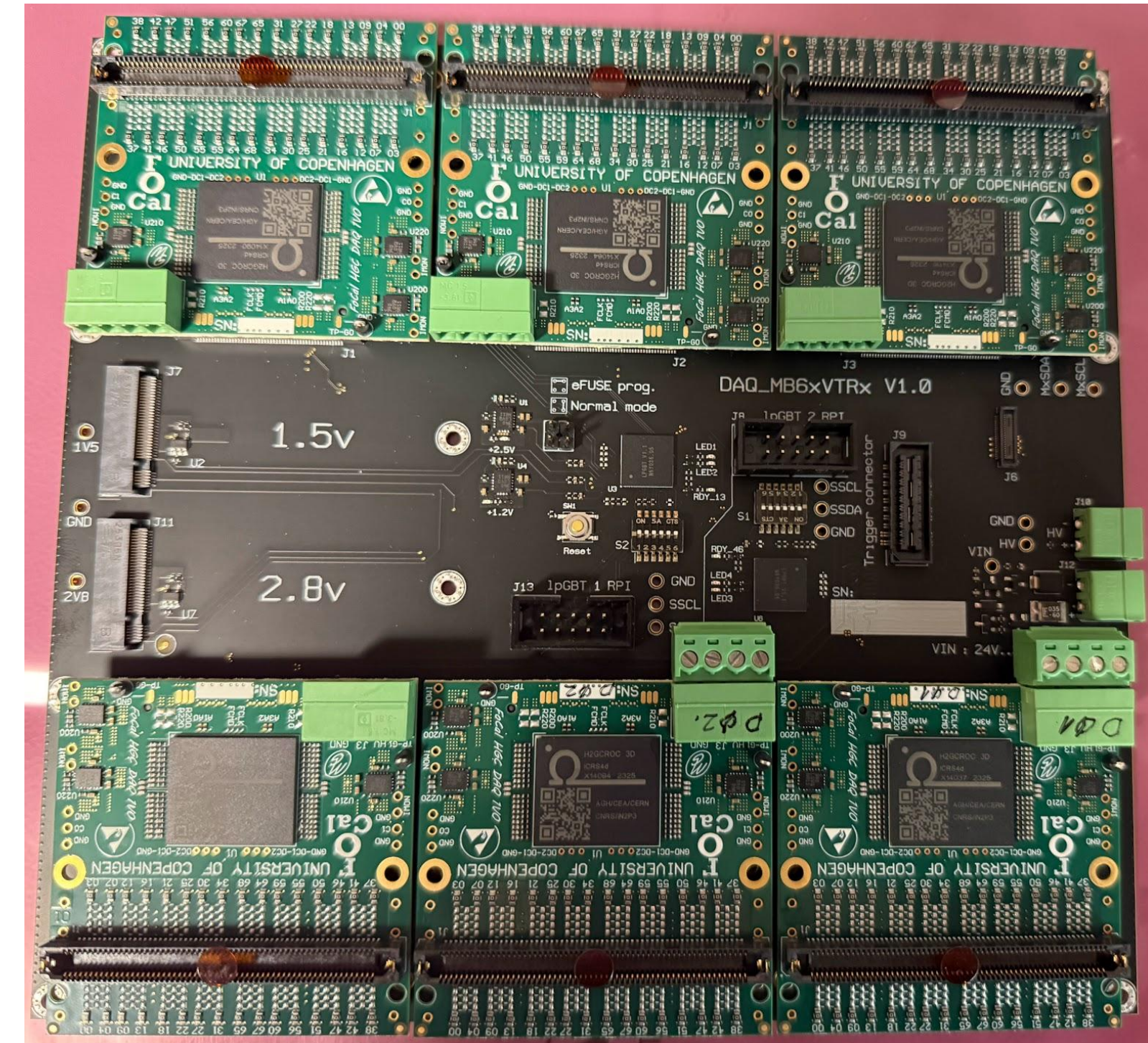
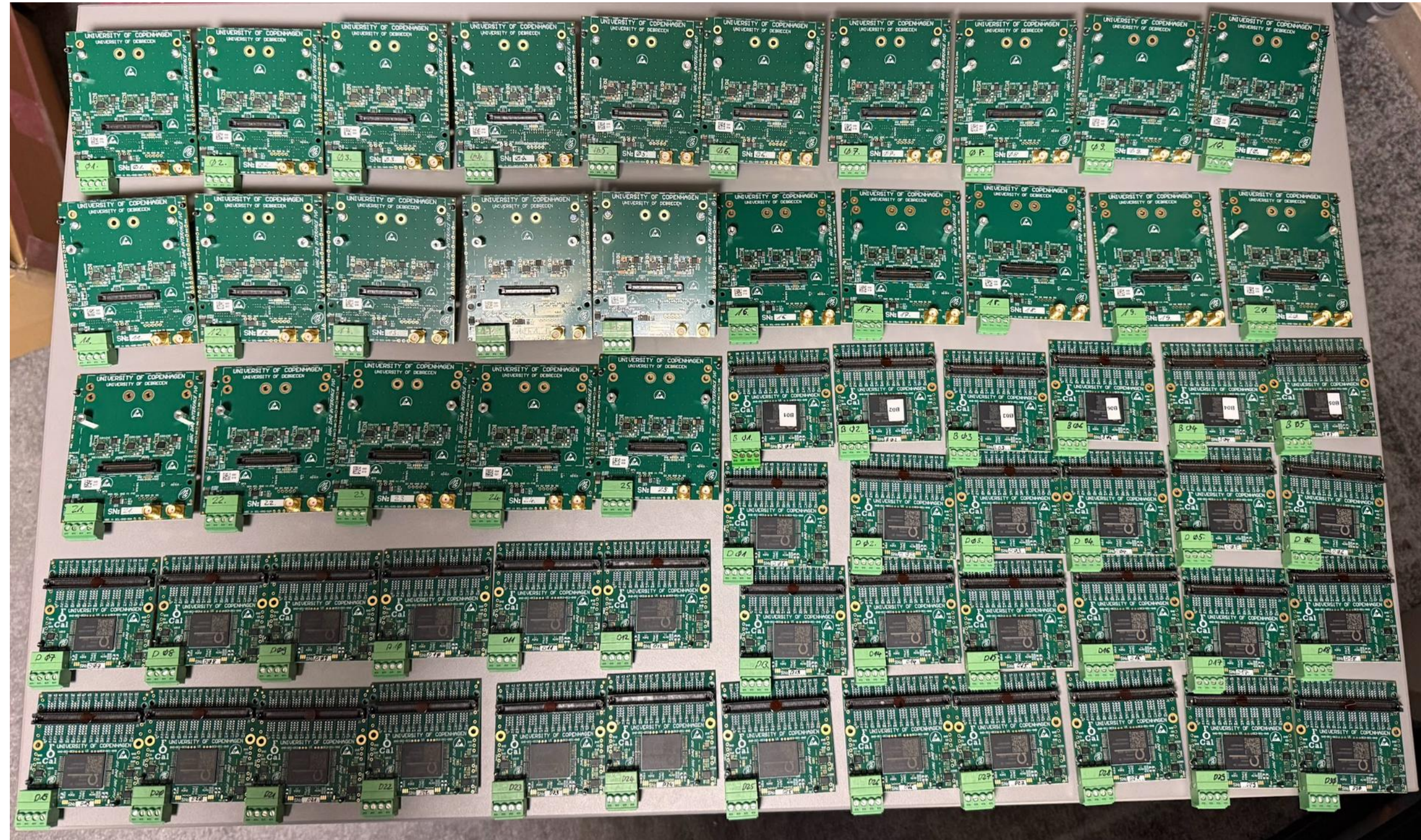
# 三、FoCal读出电子学研究进展-HCAL



➤ 基本完成了 2025 年 10 月束流测试数据分析，新的结构设计**大幅提升了 FoCal-H 的能量分辨率**，分辨率随机项从 142.18% 降低到了 109.65%，常数项也降低到了 6.60%，满足 TDR 需求。

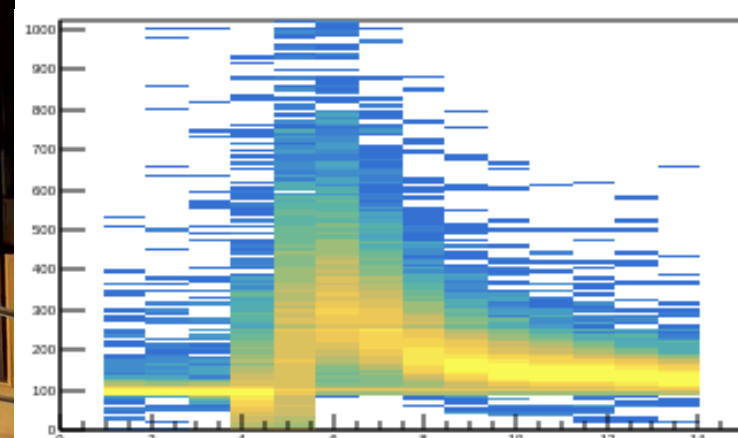
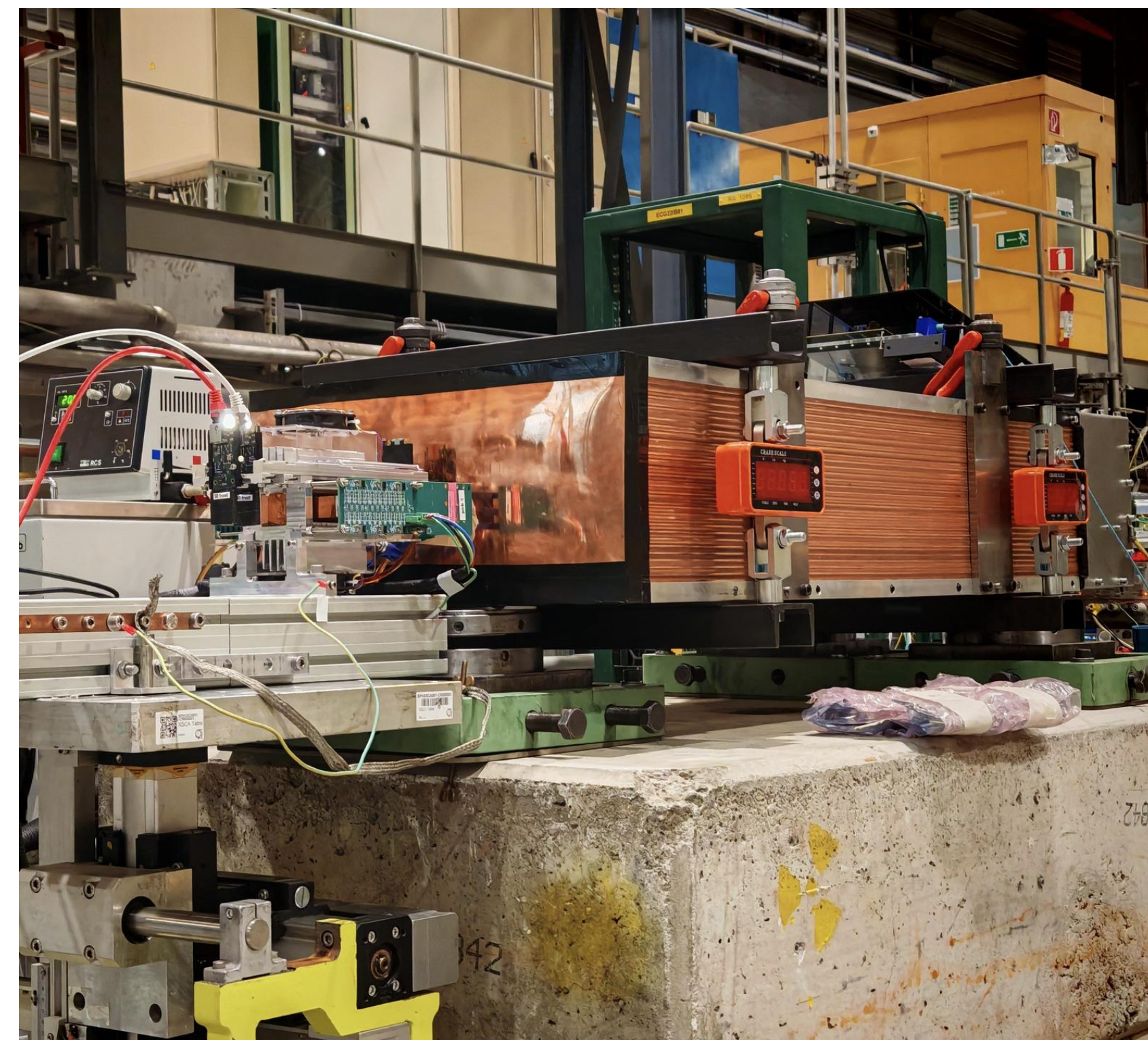
➤ 今年2月在 CERN 进行了电子学的激光测试，对不同 SiPM 偏压下的系统性能进行了表征。**验证了包括 ADC, ToT 测量线性的电子学系统性能。**

# 三、FoCal读出电子学研究进展-HCAL

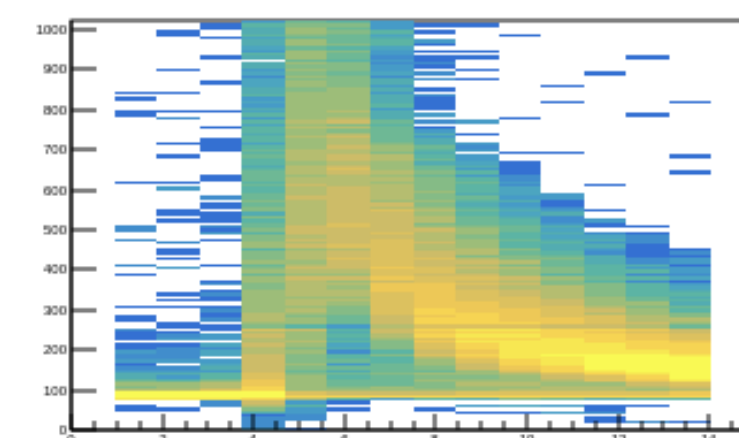


- 第一批前端电子学板卡，FMC 转接板以及其母板完成了生产，FoCal-H 共收到 16 块 H2GCROC3D，共计 1024 通道。母板板载两块 IpGBT ASIC 进行数据聚合，可以直接与后端电子学通信。
- 电子学测试已经展开

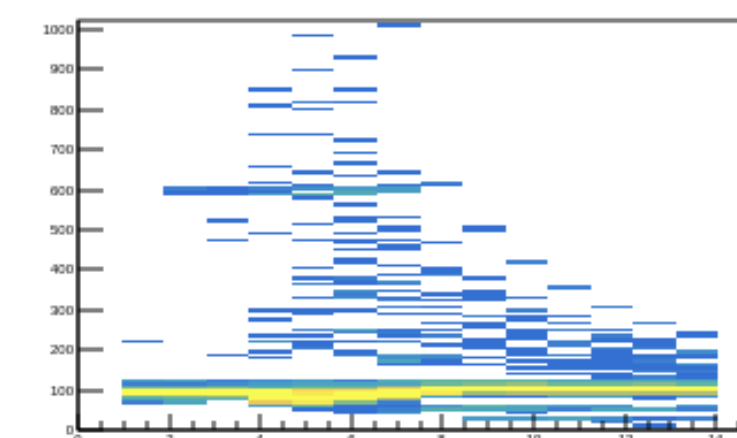
# 三、FoCal读出电子学研究进展-HCAL



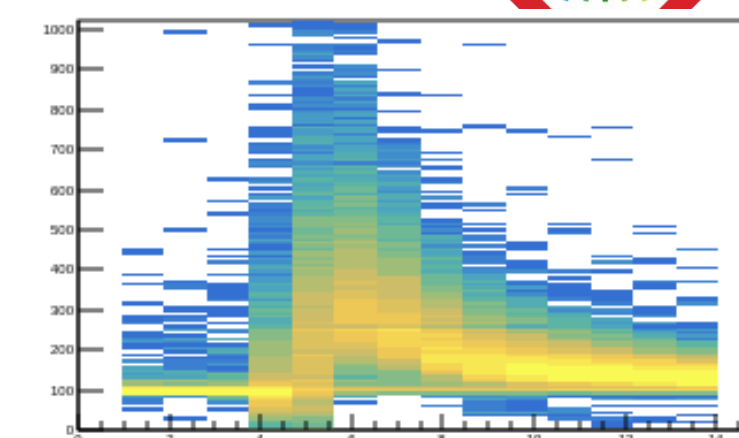
Channel 12 Machine Gun Tra. #



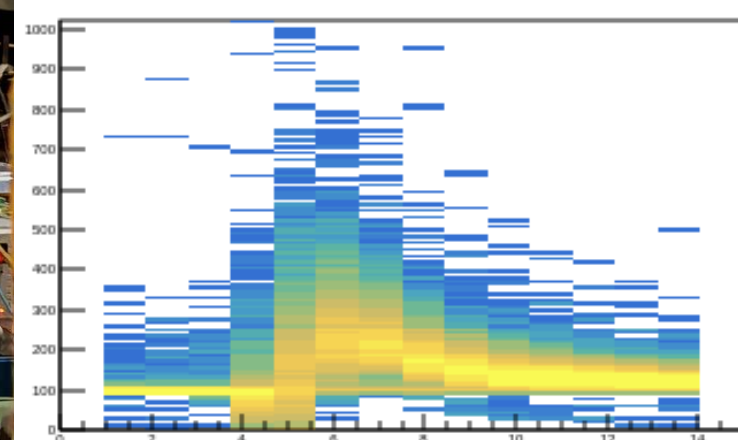
Channel 13 Machine Gun Tra. #



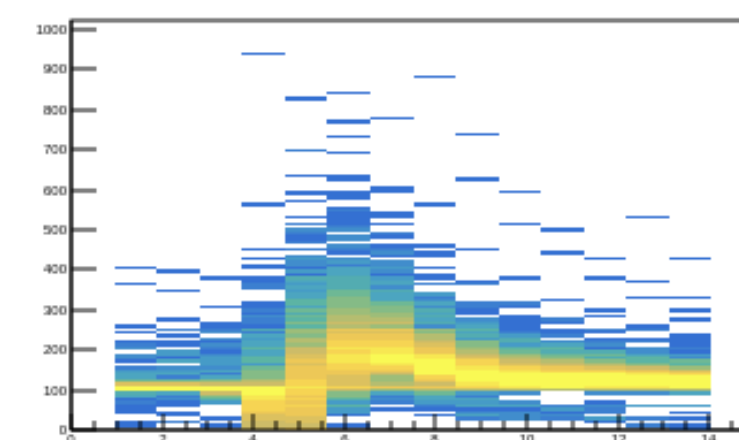
Channel 14 Machine Gun Tra. #



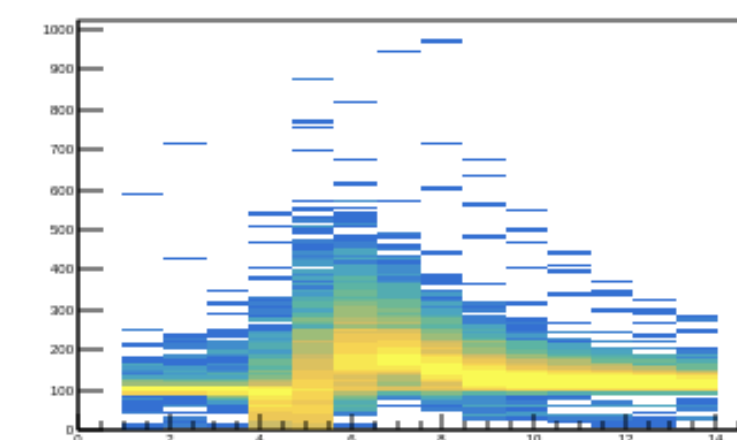
Channel 15 Machine Gun Tra. #



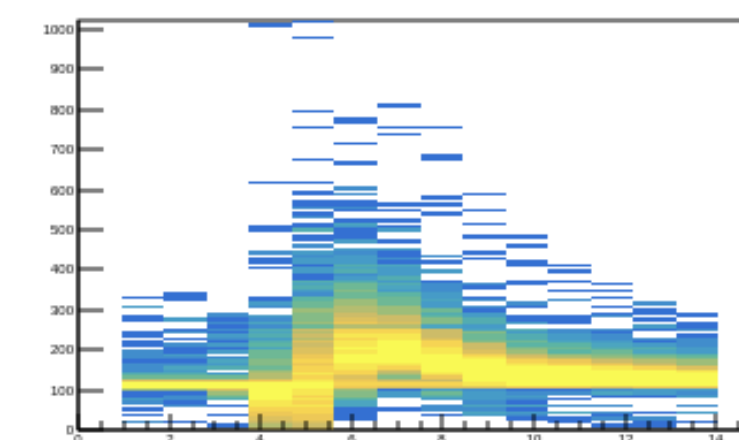
Channel 18 Machine Gun Tra. #



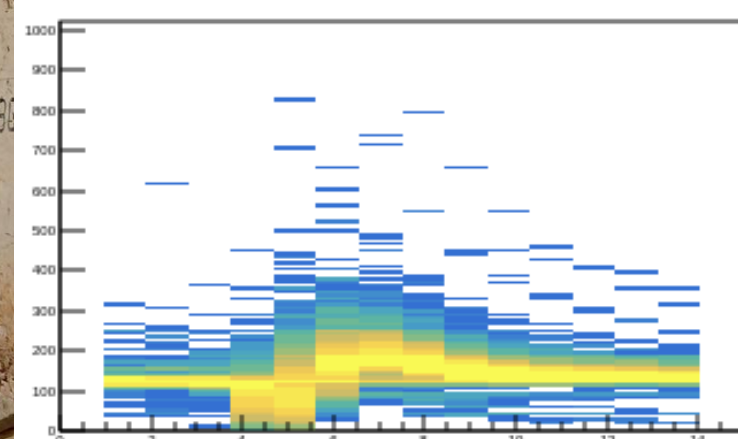
Channel 19 Machine Gun Tra. #



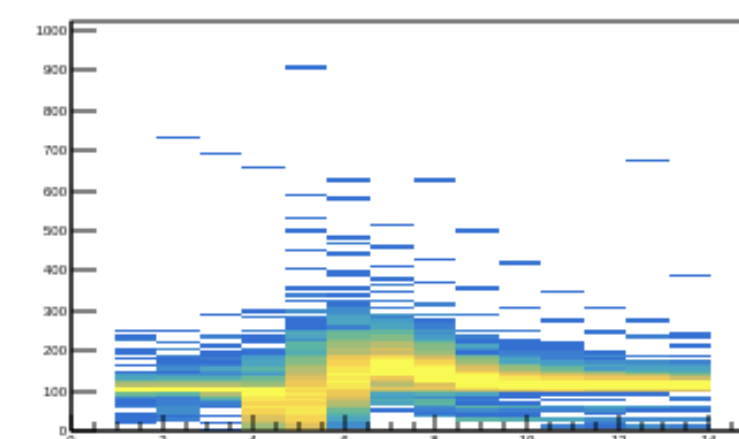
Channel 20 Machine Gun Tra. #



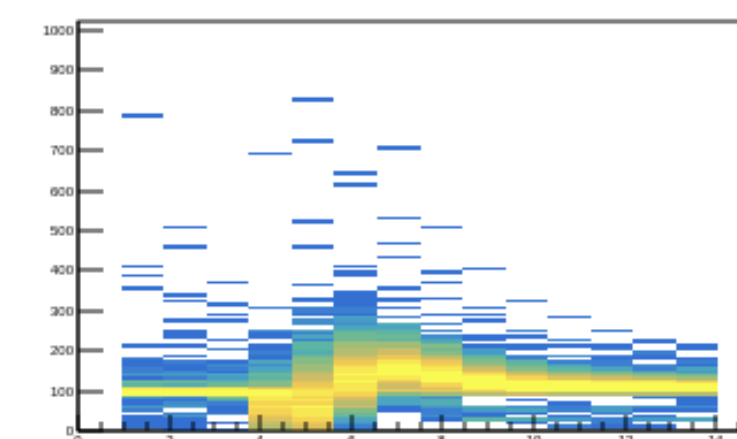
Channel 21 Machine Gun Tra. #



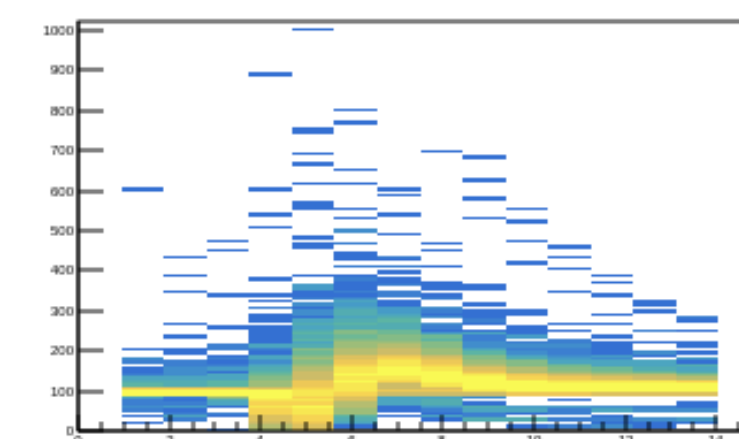
Machine Gun Tra. #



Machine Gun Tra. #



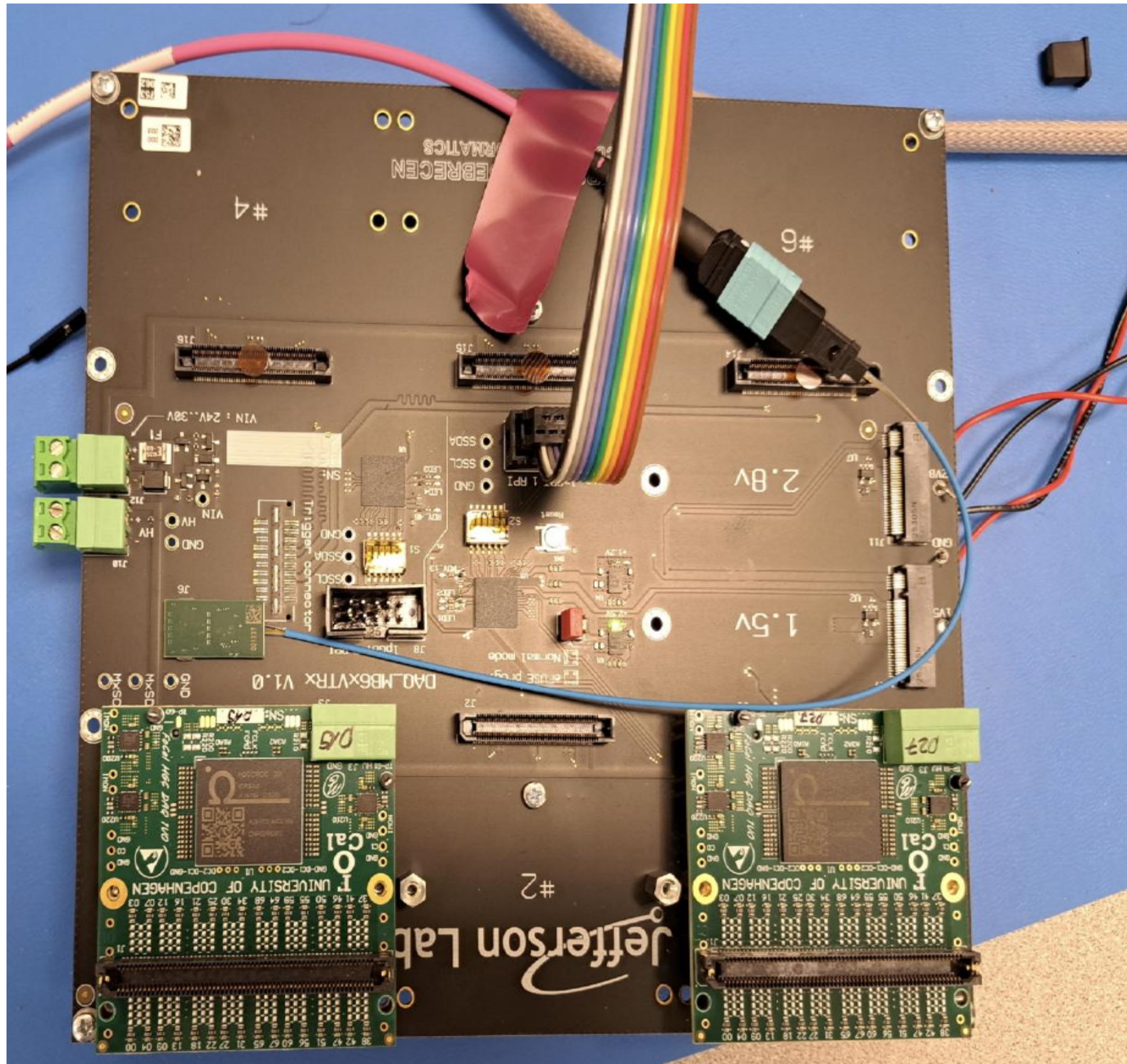
Machine Gun Tra. #



Machine Gun Tra. #

- 在 2026 年 4 月我们完成了 CERN SPS 的束流测试
- 优化了**探测器组装流程**，并对不同的前端电子学参数进行了对比测试
- 初步的分析结果表明优化设置下系统性能与以往的测试整体一致
- 优化后的设置**减小了电子学的饱和效应**，降低了测量的系统误差

# 三、FoCal读出电子学研究进展-HCAL



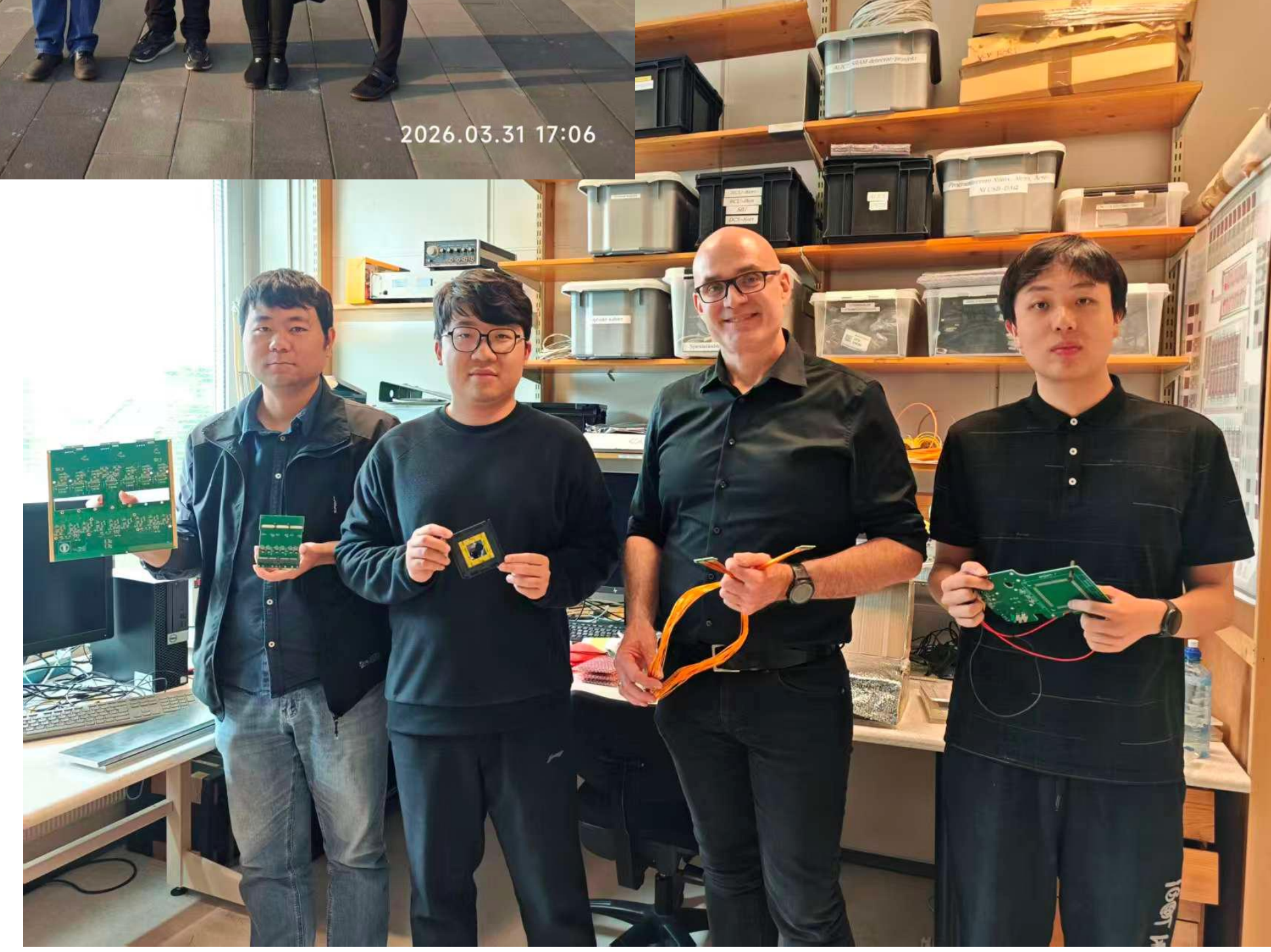
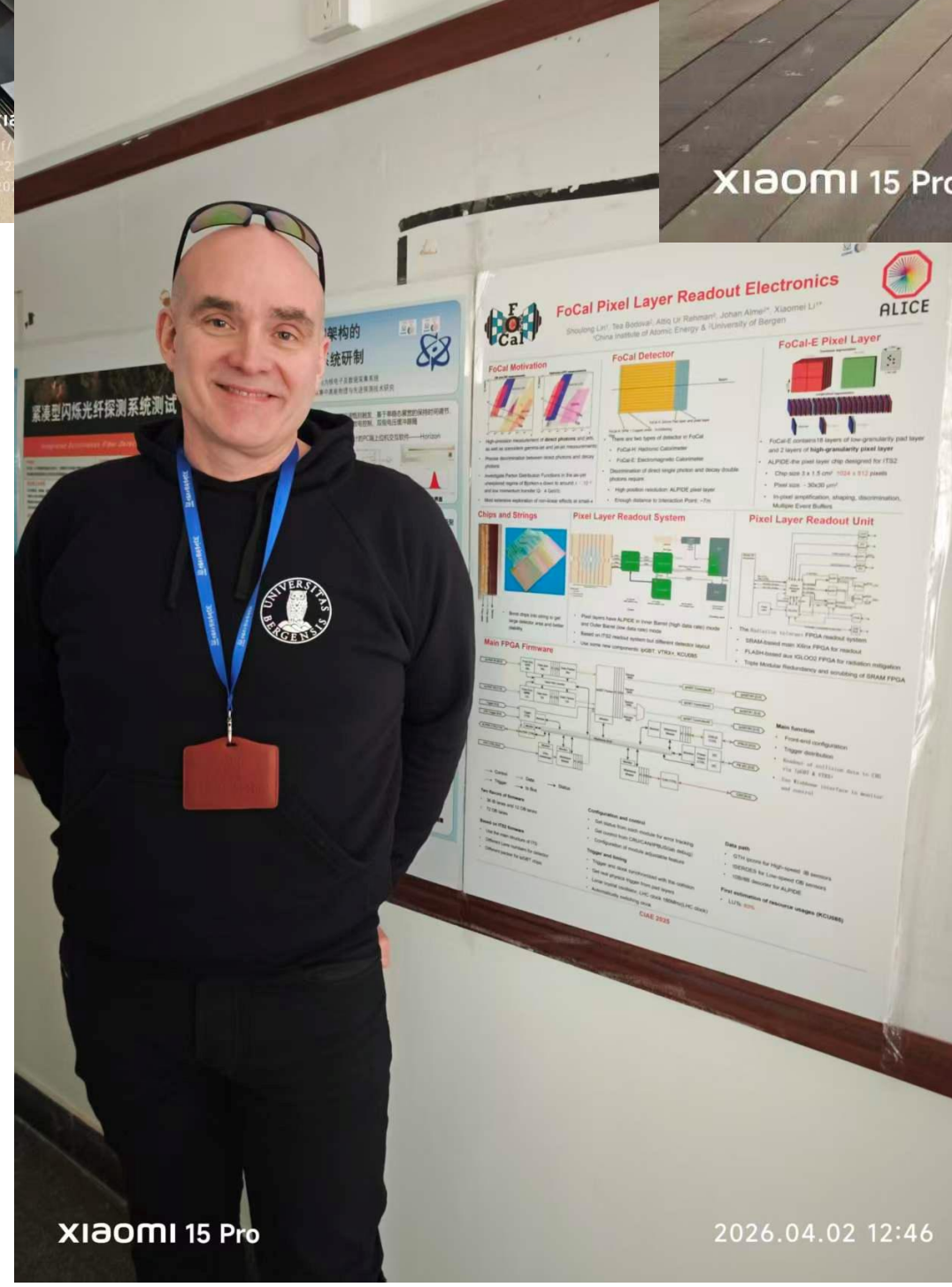
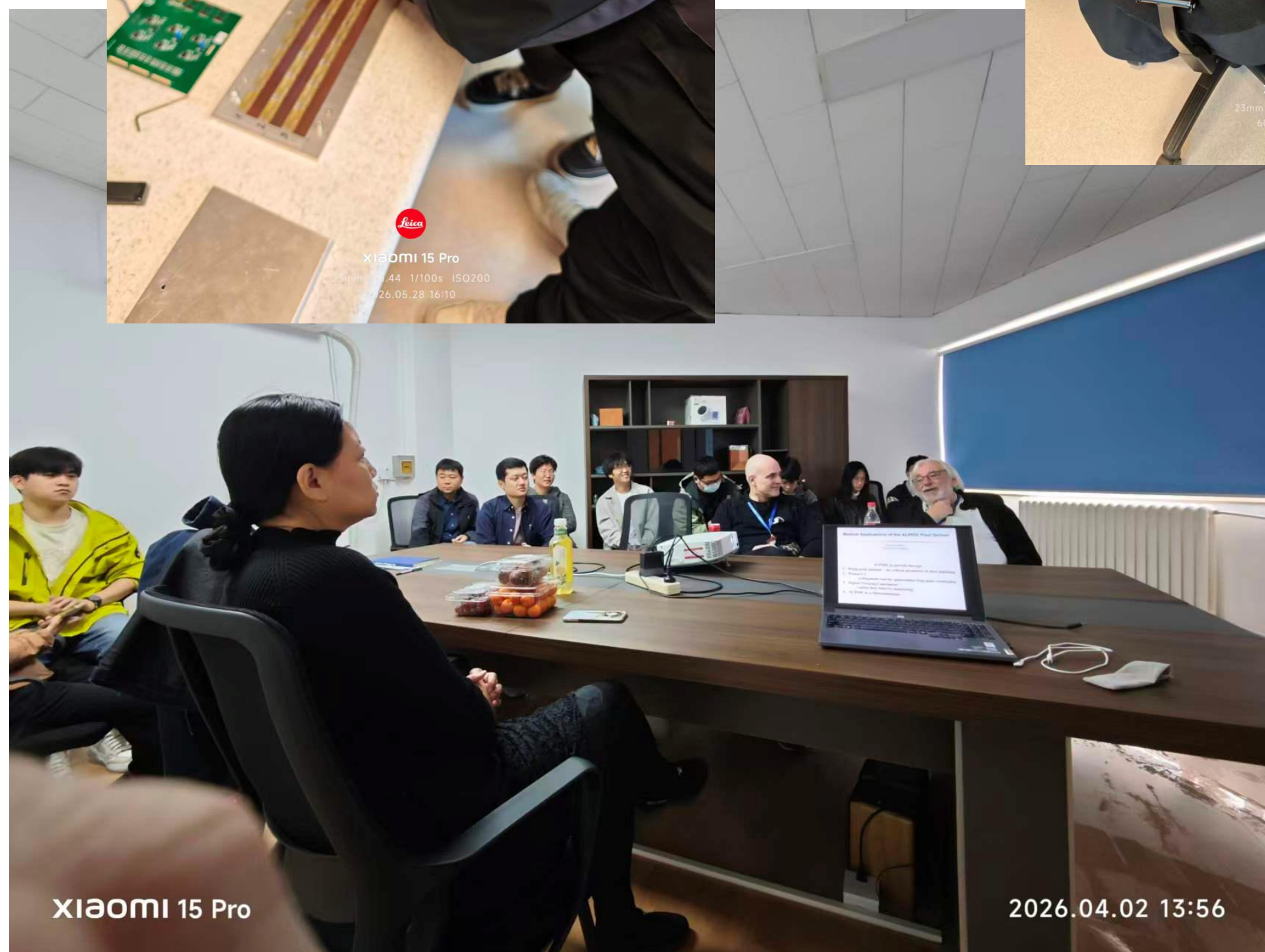
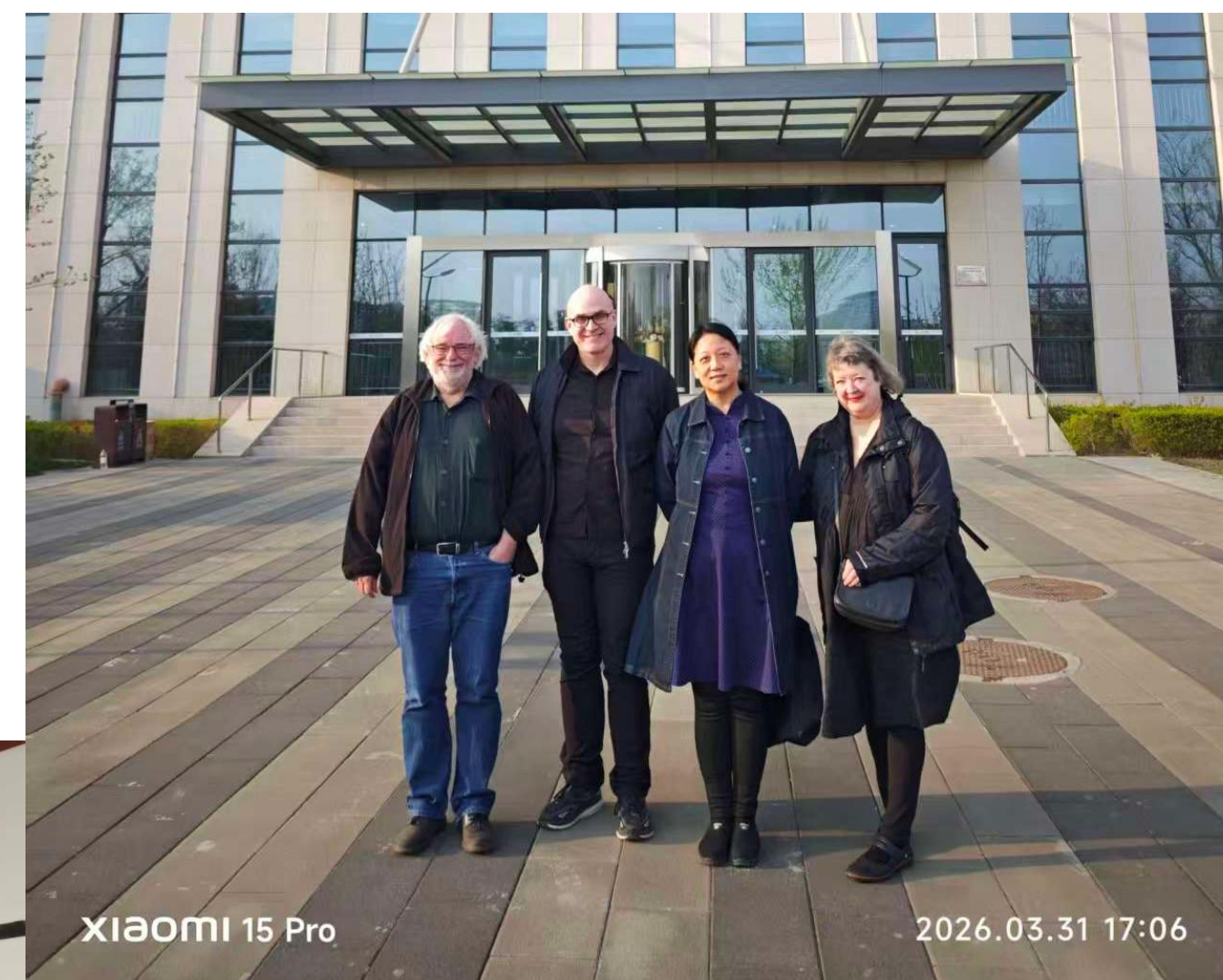
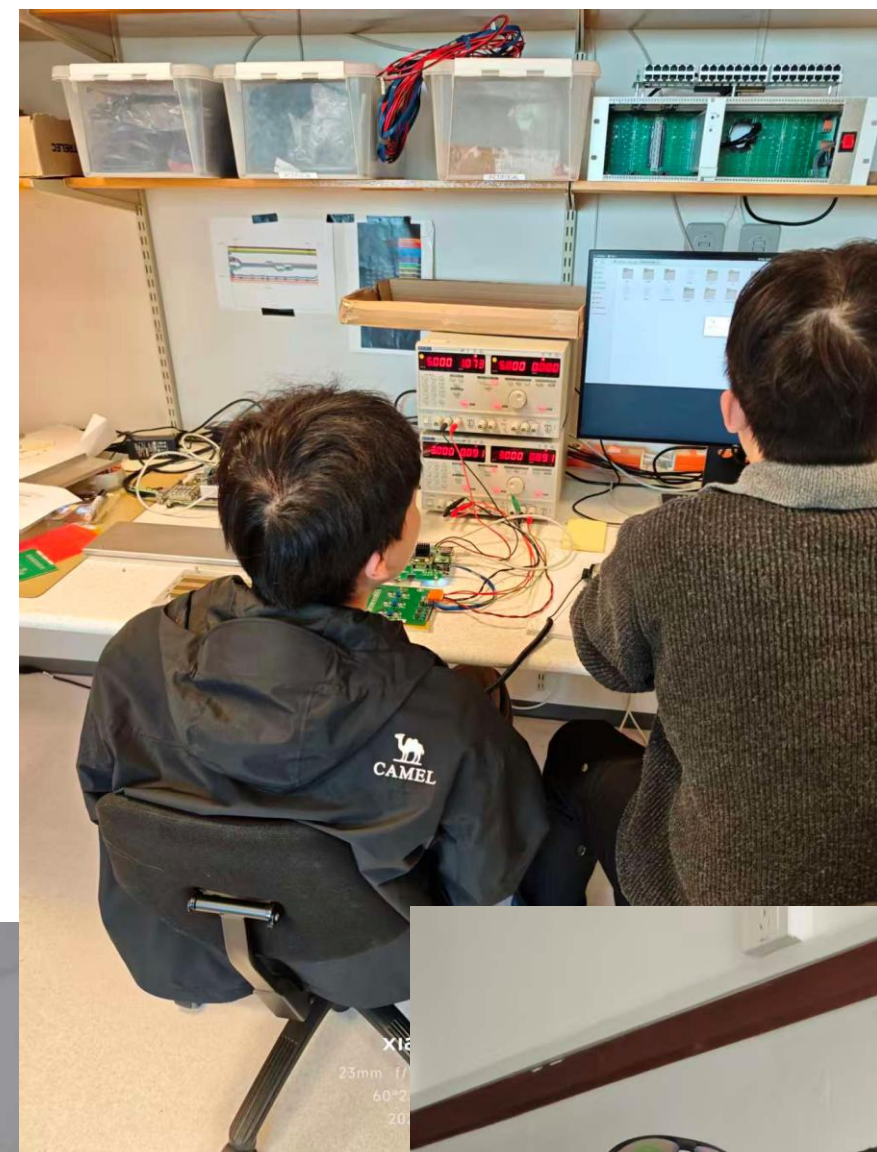
- FoCal-H 前端读出载板完成了原型的设计和**生产**
- 单块载板有 6 个 H2GCROC 子板槽位，通过两个 IpGBT 芯片进行数据聚合
- 优化了前端读出供电电路，前端噪声明显降低
- 硬件测试已经完成，个别接口设计需要修改
- CRU 的固件开发正在进行
- FLP 服务器校准软件正在适配
- O2 线上部分的接口和数据重建算法也在进行开发适配
- 计划在**7月的束流测试中对新的载板进行测试**

## 四、总结和计划



- **项目整体进展良好，中国组的硬件，固件和软件贡献在项目中发挥作用**
- **HCal 2025年10月，2026年4月已进行两次束流测试，测试结果分析工作基本完成。正在进行今年7月的束流测试准备工作**
- **ECAL转接板，电源板，集线板的原型PCB都已生产，已完成部分测试。读出单元PCB已最终确定**
- **ECAL电子学数据传输固件6月已更新一版，数据传输方案与CRU专家达成一致，目前正在正在进行仿真测试。**

# 四、总结和计划



➤合作更加紧密，交流更加频繁！



**谢谢!**