

VP正样振动实验Calo+CsI结果分析

振动实验Calo+CsI结果分析报告

1. 实验目的

振动实验旨在模拟空间探测器在运载发射段所经历的力学环境，通过在 X、Y、Z 三个相互正交方向上依次施加规定量级的振动激励，对探测器载荷及其读出电子学系统在机械应力作用下的结构完整性、连接可靠性与性能稳定性进行系统性评估。

与热循环试验考察温度应力下的参数漂移不同，振动试验关注的是机械应力是否会引起**不可恢复的物理损伤或性能退化**，典型失效模式包括：探测器单元与读出电子学之间的连接松动或脱焊、信号线/光纤断裂、APD 或前端器件机械损伤、结构件位移导致的光耦合变化等。这些损伤通常表现为振后某些通道失效、台基突变、增益跳变或宇宙线响应消失。

本次实验同时考察 VLAST-P 电磁量能器（Calorimeter，简称 Calo）以及径迹探测器中的 CsI 探测层（简称径迹 CsI）在三轴振动前后的工作状态变化。评估方式以**振前联调基准与各轴振动后测试结果的横向对比**为核心，对以下两类关键参数进行比对分析：

- 科学数据类参数：包括基线（Pedestal）刻度、电子学增益线性刻度，以及宇宙线最小电离粒子（MIP）响应谱形与峰位；
- 非科学数据类参数：包括前端电子学（FEE）的电源电流传感器输出及温度传感器测量值。

通过对振前与各轴振动后各项测试结果的纵向趋势分析，综合评判系统是否存在与机械应力相关的通道失效、参数突变、台基/增益漂移或宇宙线响应异常等现象，从而判断载荷是否通过相应级别的力学环境考核。

2. 实验内容

本次振动实验按 ECAL/CsI 载荷相应级别的振动试验要求开展，对载荷依次在 Z、X、Y 三个方向上施加振动激励。试验过程中，载荷在每个方向振动完成后开展专项性能测试与状态确认，并将测试结果与振前联调基准进行对比。

测试流程依时间顺序如下：在正式振动前开展两次测试前联调，建立各读出链路的台基、增益及工作状态基准；随后依次完成 Z 轴、X 轴、Y 轴振动，并在每个方向振动结束后采集一组完整的科学数据（基线、刻度、宇宙线）及遥测数据。

每个测试点采集的内容包括：

- 基线模式：在无显著物理信号输入条件下采集各读出通道的台基分布，评估电子学本底输出水平与噪声状态；

- 刻度模式：向前端电子学注入幅度逐级可调的脉冲激励信号，记录各通道平均 ADC 计数随注入偏压的变化，拟合电子学增益线性响应；
- 宇宙线联调：采集宇宙线 MIP 信号，综合评估晶体单元发光、光电转换、APD 增益及读出链路的整体物理响应；
- 遥测监测：记录 FEE 电源电流与温度测点数据，确认电子学工作状态的连续性。

通过比较振前基准与三轴振动后各项参数的一致性，识别由机械应力引起的潜在异常或不可恢复损伤。

3. 实验设置与数据筛选

本次实验中，Calo 的 APD 高压设置为：

模块	APD 高压设置	说明
Calo	351.5 V（主份） / 352.0 V（备份）	比推荐 APD 电压均值降低 3 V

在宇宙线数据分析中，为了降低多晶体击中、斜入射宇宙线以及 shower 事件对单通道响应分析的影响，优先筛选**只击中一个晶体单元的事件**，即 single-hit event。

该类事件更适合用于分析单元响应、MIP 峰位和通道稳定性，有助于判断各晶体单元在温度变化过程中的相对变化趋势。

径迹Csl的APD高压设为：357.5V，为室温下的推荐工作电压，没有对宇宙线进行特别的筛选

4. 科学与遥测数据分析

数据采集时间

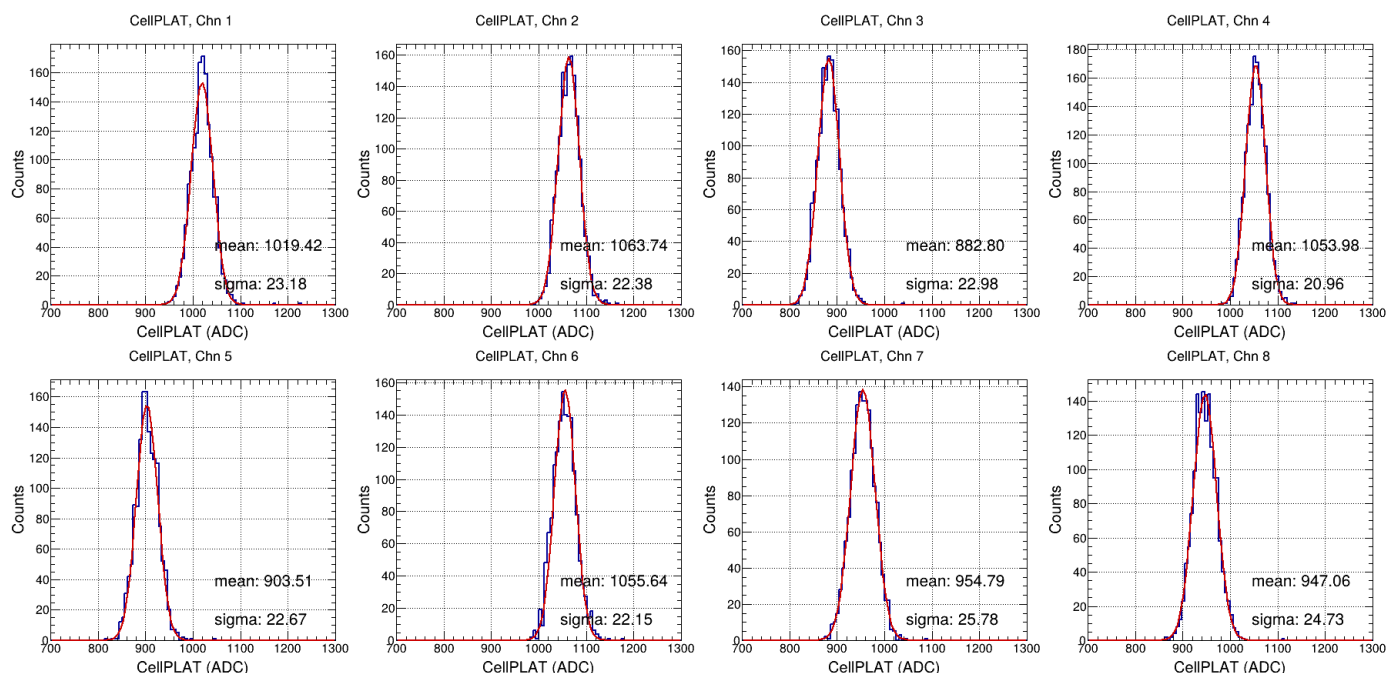
- 第一次测试前联调 2026/04/13 17:10
- 第二次测试前联调 2026/04/14 11:36
- Z轴振动后 2026/04/14 15:34
- X轴振动后 2026/04/14 19:05
- Y轴振动后 2026/04/14 21:00

径迹Csl三次振动后结果

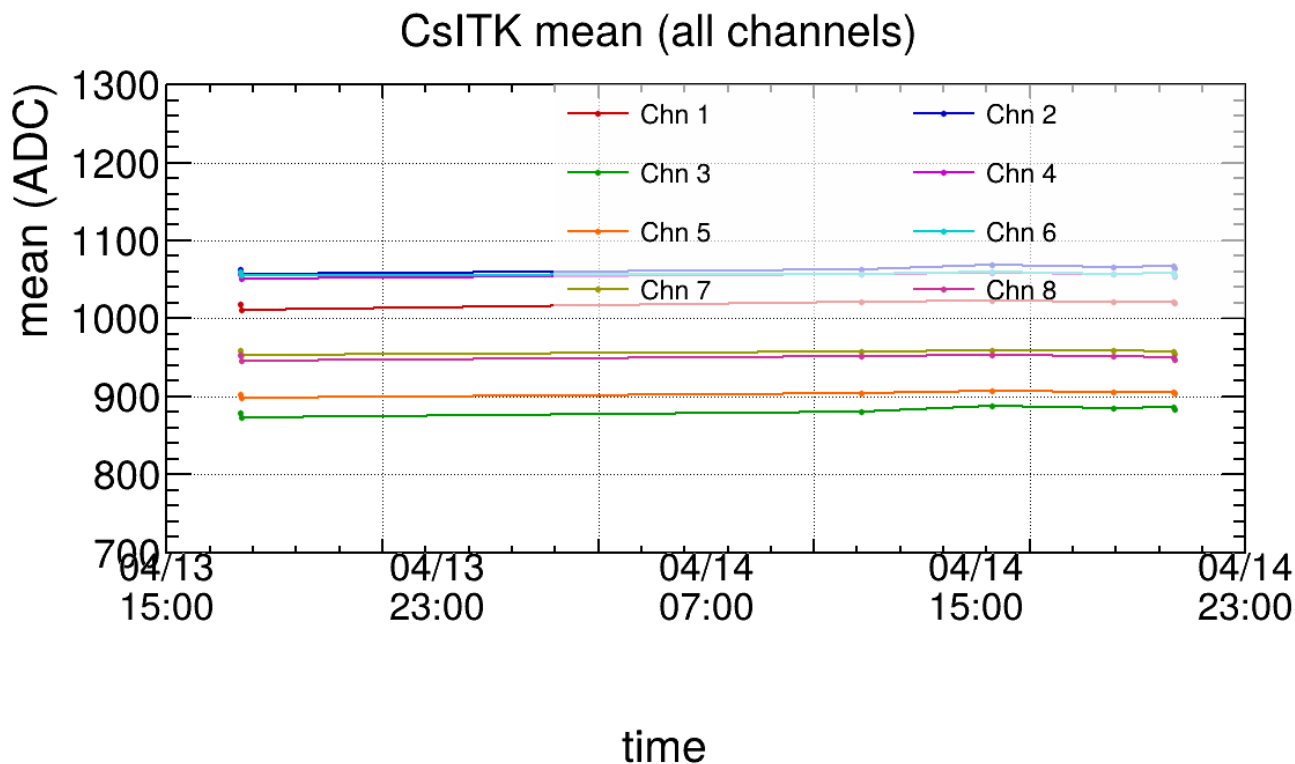
径迹 Csl 探测层共包含 4×2 排列的 8 个读出单元，由对应前端电子学板（FEE2）完成信号读出，配置 3 个电源电流传感器与 4 个温度传感器。

基线模式

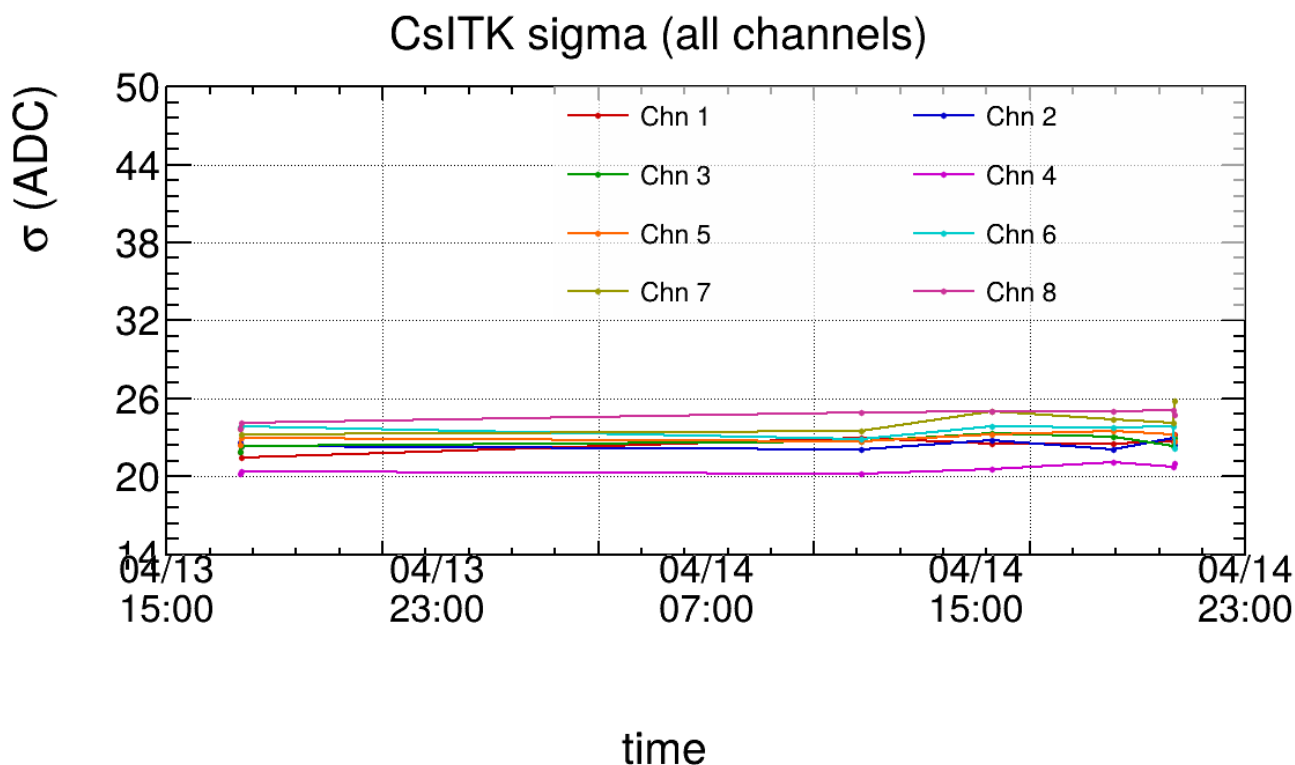
下图展示了振前及三轴振动后径迹 Csl 各晶体单元的台基分布（CellPLAT_4×2），以及各单元台基均值（mean）与拟合宽度（ σ ）随测试时间点的叠加对比。



从台基分布 (CellPLAT_4×2) 来看, 8 个 Csl 单元均能正常读出, 各通道台基均呈清晰对称的单峰高斯结构, 红色高斯拟合曲线与数据点吻合良好, 无双峰、异常长尾或离散噪声峰, 表明读出链路未因机械应力出现结构性损伤。各通道台基均值分布在约 882.80–1063.74 ADC 之间 (Chn 1: 1019.42, Chn 2: 1063.74, Chn 3: 882.80, Chn 4: 1053.98, Chn 5: 903.51, Chn 6: 1055.64, Chn 7: 954.79, Chn 8: 947.06 ADC), 通道间存在固有的台基偏置, 属各通道前端电子学工作点与 ADC 基准的固有差异。高斯拟合 σ 集中在约 20.96–25.78 ADC 范围内, 各通道噪声水平相近, 未发现 σ 异常展宽的通道。



从台基均值 (mean) 随时间的叠加曲线来看, 覆盖 04/13 17:10 至 04/14 21:00 的两次振前联调与三轴振动后各时间点, 8 个通道均稳定保持在各自的台基水平, 振前两次联调结果高度重合, 验证了测量基准的重复性。三轴振动后各单元台基均值相对振前基准无阶跃式跳变, 仅个别通道 (如 Chn 3、Chn 6) 随时间存在约 10 ADC 量级的轻微缓变, 趋势平缓且非振动相关的突变, 判断为电子学慢漂移而非机械损伤, 整体无系统性单向漂移。

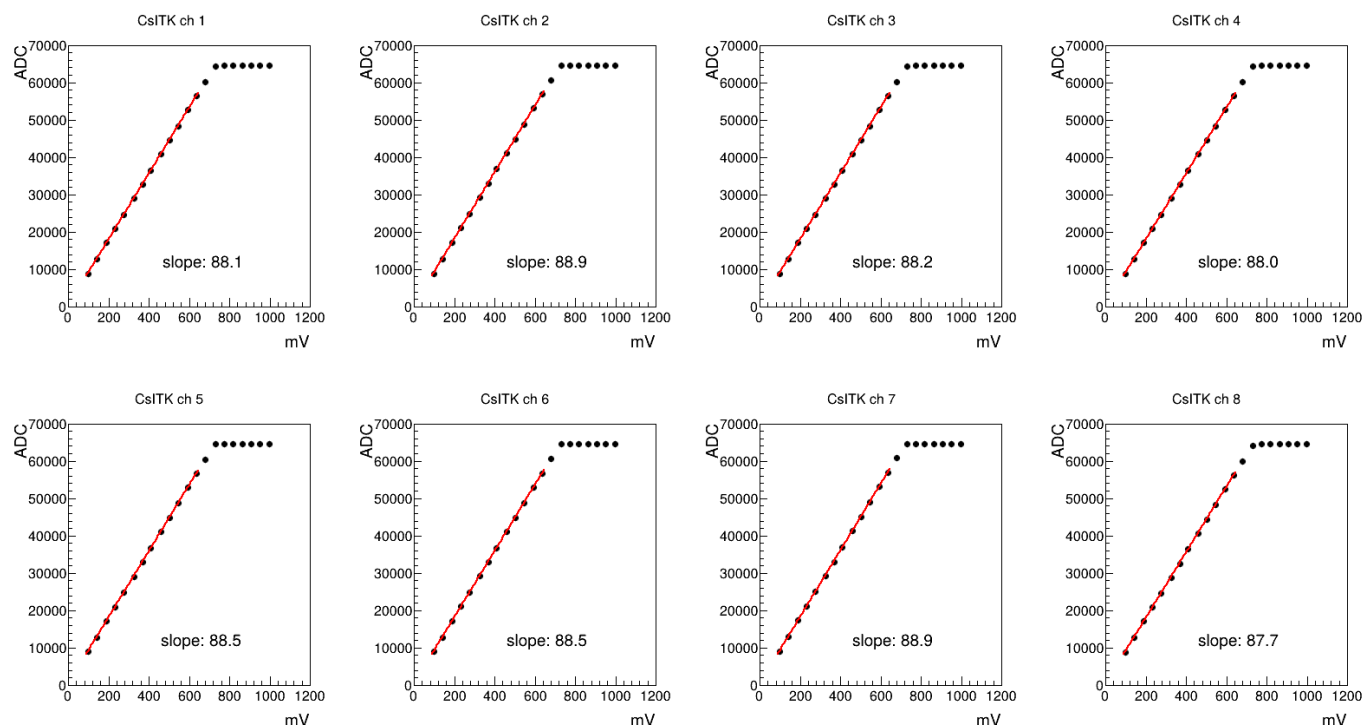


从拟合宽度 (σ) 随时间的叠加曲线来看，各通道 σ 在整个测试期间总体维持在约 20–26 ADC 范围内，与单次分布拟合结果一致。各通道噪声水平稳定，仅 Chn 7 在最后一个时间点出现约 26 ADC 的轻微抬升，幅度小且为偶散发布，不构成系统性异常；未发现 σ 异常展宽的通道，表明振动未引入额外噪声源（如接触不良或屏蔽劣化）。

综合判断，径迹 Csl 读出链路的台基在三轴振动前后表现出良好的稳定性，8 个通道全部正常读出，台基均值与 σ 均未出现与振动相关的突变或不可恢复漂移，未发现失效通道或噪声异常现象。

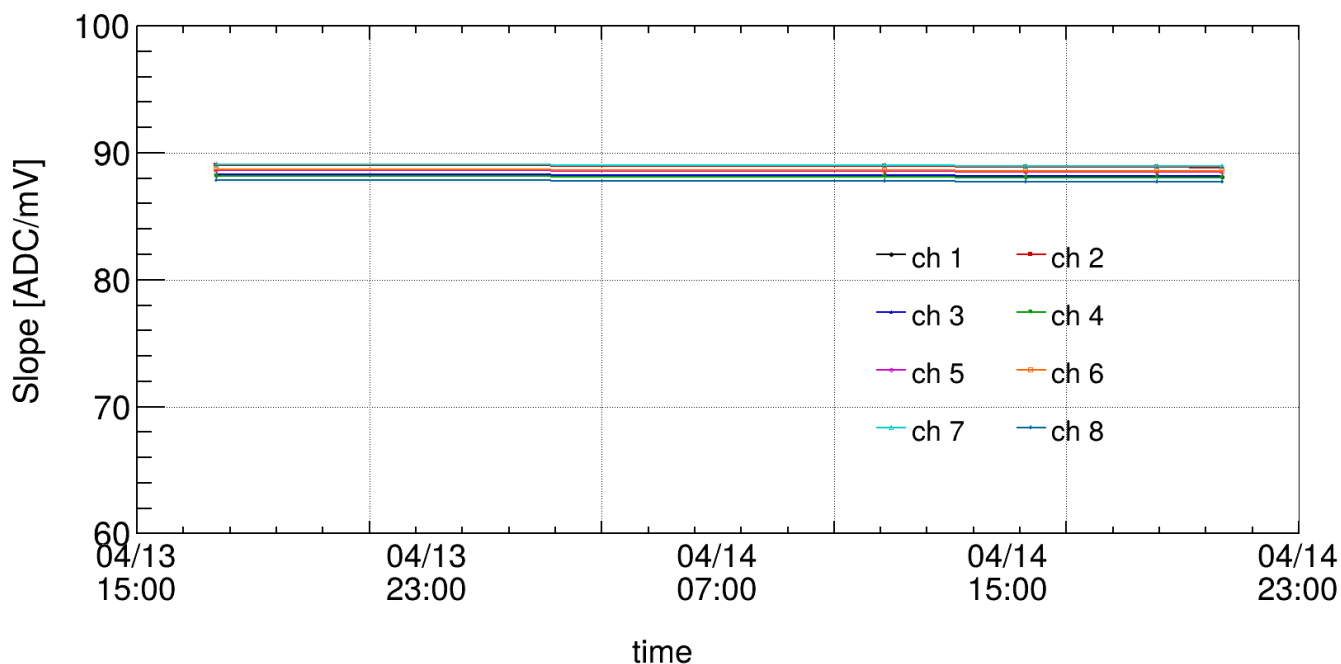
刻度模式

下图展示了径迹 Csl 各单元在振前及三轴振动后的电子学刻度响应曲线（calib_csl），以及拟合增益斜率随测试时间点的演化（csi_slope_timeseries_4x2）。



从刻度曲线 (calib_csl) 来看，各单元的 ADC 响应在低偏压段（约 0–650 mV）随注入偏压线性增长，红色线性拟合直线与数据点吻合良好；当偏压超过约 650–700 mV 后，ADC 计数趋于饱和，饱和平台约在 64000–65000 ADC，反映了模数转换器的量程上限。线性区间内各通道拟合斜率分布在约 87.7–88.9 ADC/mV 之间（Chn 1: 88.1, Chn 2: 88.9, Chn 3: 88.2, Chn 4: 88.0, Chn 5: 88.5, Chn 6: 88.5, Chn 7: 88.9, Chn 8: 87.7 ADC/mV），通道间一致性极好，斜率分散程度约 $\pm 0.7\%$ ，属正常的通道间增益差异。8 个通道均未出现线性度异常或增益跳变。

CsITK calibration slope (channels 1–8)

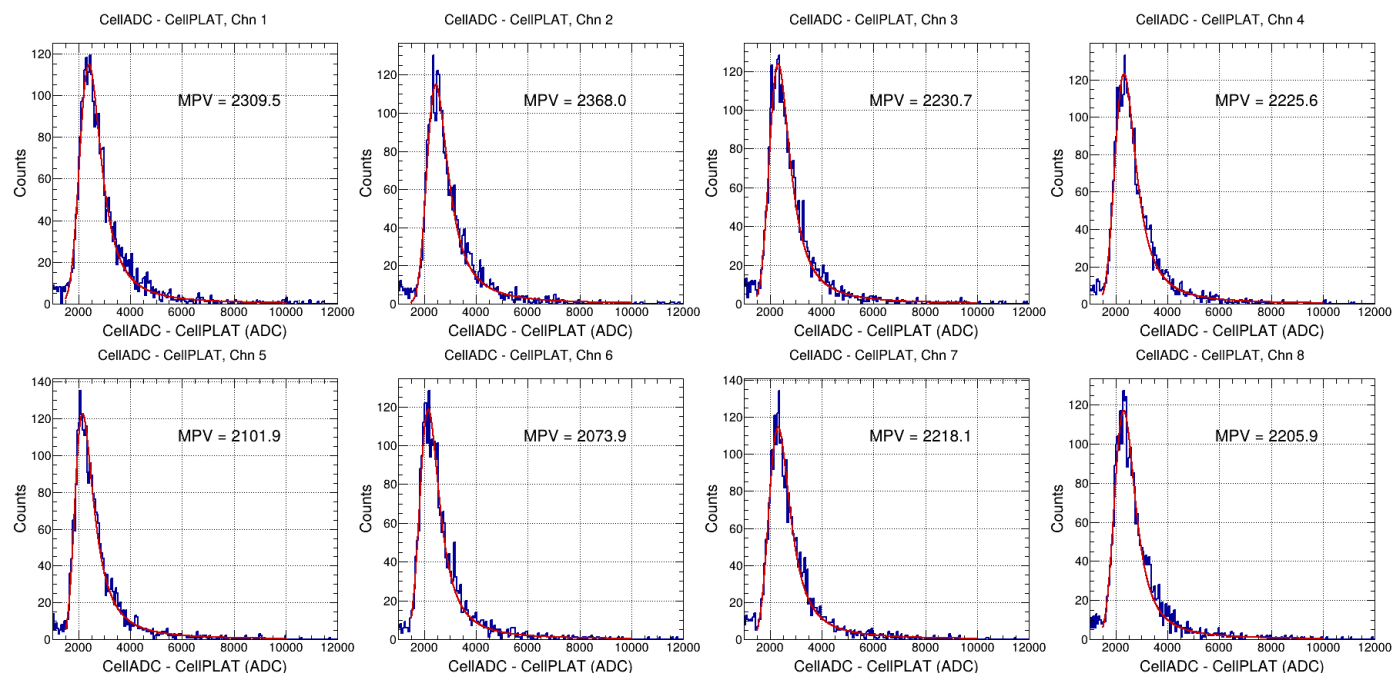


从斜率时序曲线 (csi_slope_timeseries_4×2) 来看，8 个单元的增益斜率在振前两次联调与三轴振动后各时间点之间高度一致，所有曲线在约 87.7–88.9 ADC/mV 的窄带内近乎水平，振前振后无任何台阶式变化，未发现增益跳变或线性度劣化现象。

综合判断，径迹 CsI 读出链路的电子学增益线性特性在三轴振动前后稳定可靠，各通道增益系数一致性良好，未发现异常通道。

宇宙线联调

受测试窗口时间限制，本次宇宙线数据采集时长较短，且仅在三轴振动完成后采集，未建立振前的宇宙线基准，因此该部分以振后谱形分析为主，主要用于确认各晶体单元的物理探测链路在经历三轴振动后是否仍能正常工作，暂不进行振前/振后 MIP 峰位的定量漂移比对。



上图给出了振动后径迹 CsI 各晶体单元的宇宙线响应谱（CellADC – CellPLAT，即已扣除台基后的单元能量沉积分布）。

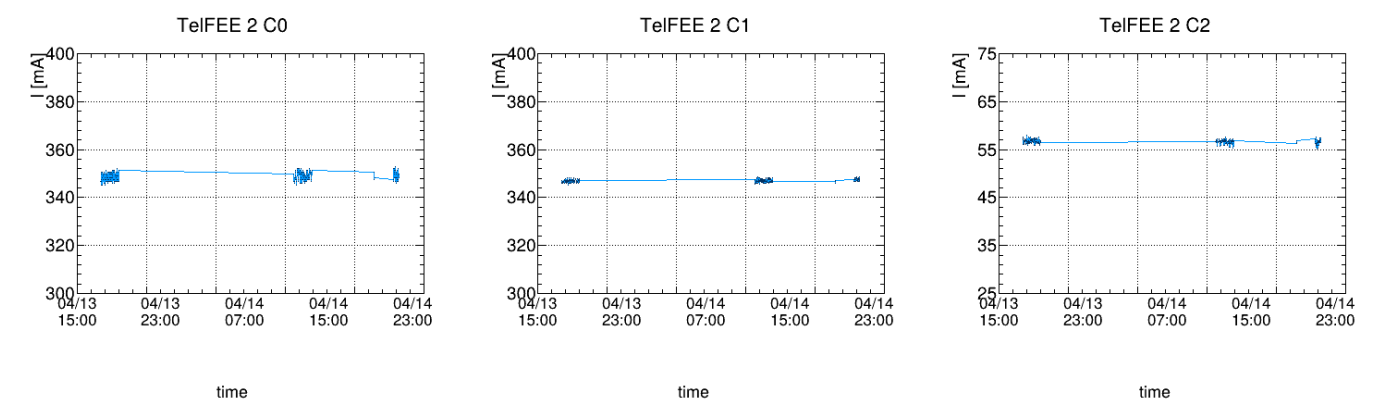
从谱形来看，8 个通道均呈现出清晰的最小电离粒子（MIP）特征峰：低能侧因触发阈值与台基扣除而快速截止，峰区附近计数迅速上升至极大，随后向高 ADC 侧拖出典型的朗道长尾，整体形貌符合带电粒子（宇宙线 μ 子）在薄 CsI 晶体层中电离能损的朗道分布特征。各通道采用朗道×高斯（Landau $\otimes$ Gaussian）函数进行拟合，红色拟合曲线与数据点在峰区及尾部均吻合良好，未见双峰、峰位缺失或谱形畸变等异常。

各单元拟合得到的 MIP 最概然值（MPV）分布在约 2073.9–2368.0 ADC 之间（Chn 1：2309.5，Chn 2：2368.0，Chn 3：2230.7，Chn 4：2225.6，Chn 5：2101.9，Chn 6：2073.9，Chn 7：2218.1，Chn 8：2205.9 ADC），8 个通道均值约 2217 ADC，通道间峰位的峰峰差约 294 ADC（相对均值约 $\pm 6.6\%$ ）。该分散水平属各晶体单元光产额、光收集效率、APD 增益及读出链路增益差异的固有结果，处于合理范围，未见某一通道 MPV 显著偏离整体或响应明显缺失的情况。

综合判断，振动后径迹 CsI 全部 8 个晶体单元均能正常采集到宇宙线 MIP 信号，谱形清晰、可由朗道×高斯函数良好描述，MPV 峰位通道间一致性良好，表明从晶体发光、光电转换、APD 倍增到前端读出的整体物理探测链路在三轴振动后保持完好，未出现因机械应力导致的探测单元失效或响应异常。需要说明的是，由于缺乏振前宇宙线基准，本节结论侧重于确认探测链路振后功能完整性；MIP 峰位的绝对稳定性与定量漂移评估有待后续在更长曝光、含振前基准的条件下进一步开展。

遥测数据

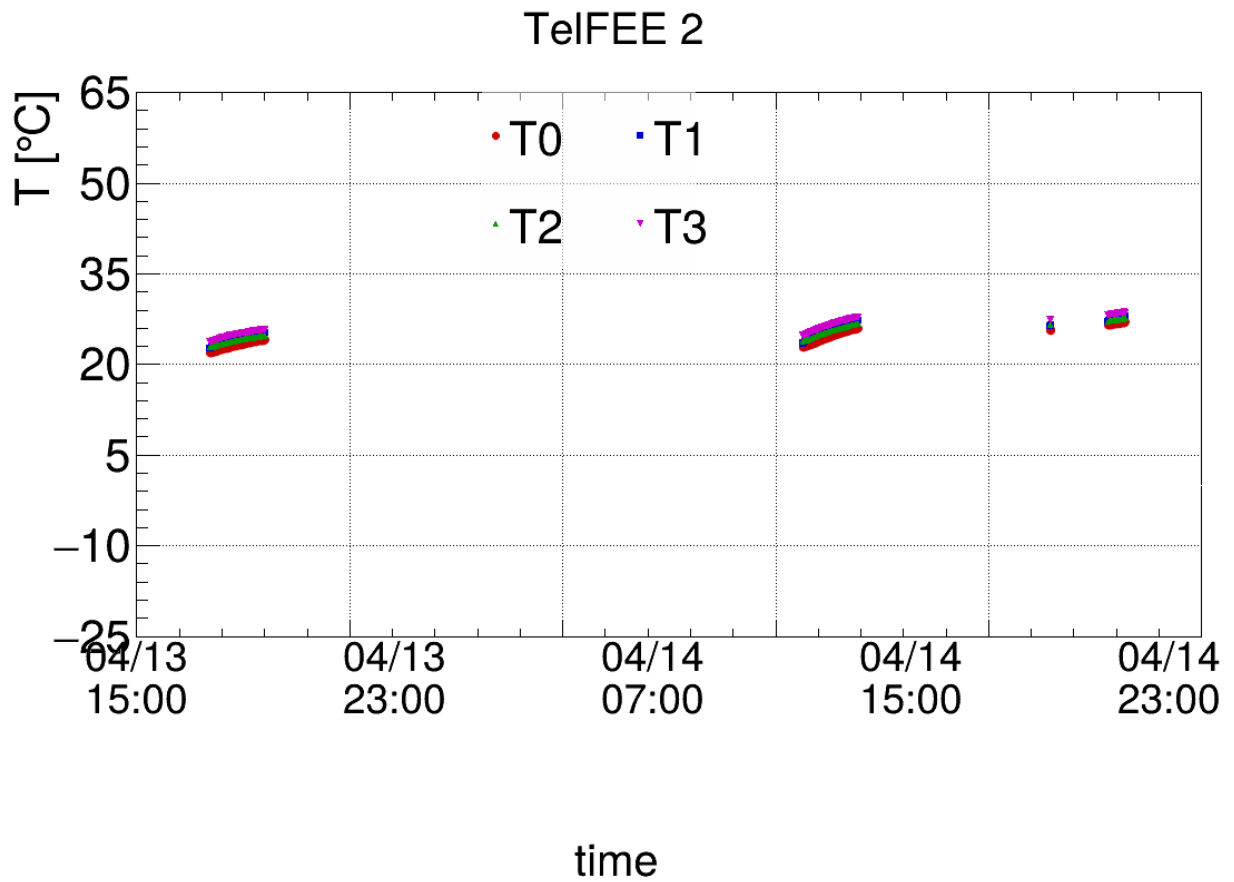
需要说明的是，在地检板（地面检测设备）测试模式下，FEE2 的遥测参数仅在宇宙线数据采集期间随科学数据一并下传，因此遥测曲线在时间上呈分段分布，对应各次宇宙线联调的采集时段，其余时间点（如纯基线、刻度采集或振动台操作期间）无遥测数据。这种分段特征属测试模式所致，并非数据缺失或链路异常。



电流数据：径迹 Csl 的 FEE2 配置 3 个电源电流传感器（C0、C1、C2），分别对应不同电源轨的供电电流。从电流时序曲线来看，覆盖 04/13 至 04/14 各采集时段，三路电流均稳定保持在各自的基准水平：C0 约 350 mA、C1 约 347 mA、C2 约 56 mA，各路电流在整个测试期间无阶跃式跳变或趋势性漂移，各采集段之间的读数高度重合。

其中数据点密集的几簇对应宇宙线采集时段内的连续监测，段内电流波动幅度极小（约数 mA 量级），属正常的工作电流抖动。三轴振动前后电流水平一致，未出现因连接松动、短路或器件损伤导致的电流异常上升或下降，表明 FEE2 各电源轨供电状态在振动后保持稳定。

- 温度数据：共四个温度传感器



温度数据：FEE2 配置 4 个温度传感器（T0–T3），分布于前端电子学板的不同测点。从温度时序曲线来看，4 路测点温度在各采集时段均处于约 21–28 °C 的常温区间，4 个传感器读数彼此接近、变化趋势一致，反映板上温度分布均匀。各采集段内温度呈轻微上行（约数°C量级的缓升），与电子学上电工作后的自然温升相符；段与段之间温度回落至相近的起始水平，整体无异常高温或失控现象。温度始终维持在径迹探测器的正常工作温区内，未观测到与振动相关的温度突变。

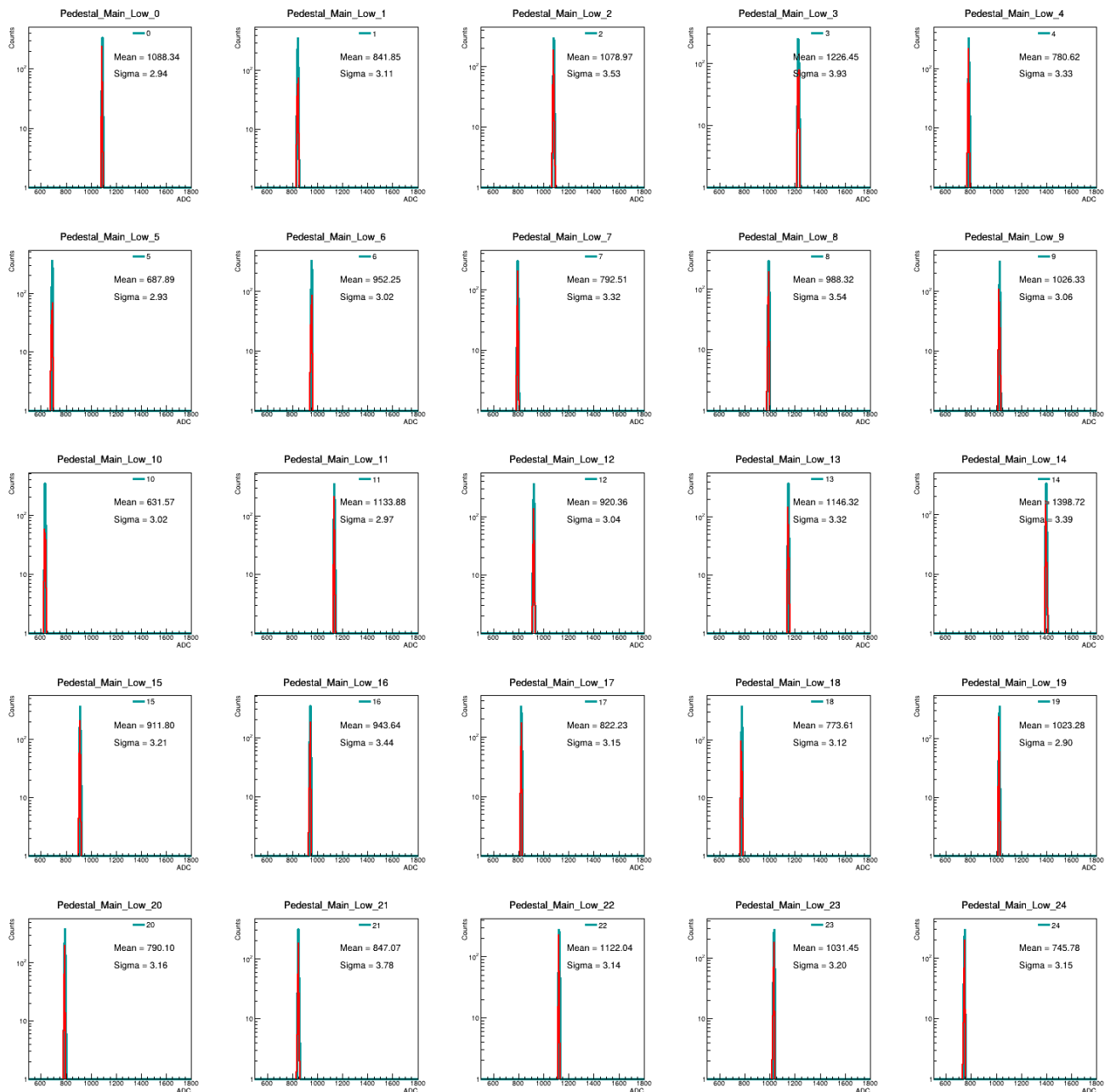
综合判断，FEE2 的电流与温度遥测在三轴振动前后均表现正常，各电源轨电流稳定、板上温度处于合理工作区间，进一步佐证了振动后径迹 Csl 读出电子学工作状态的连续性与可靠性。

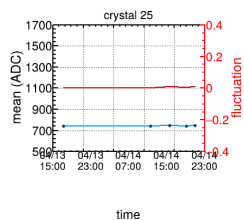
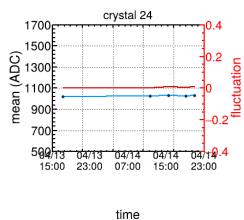
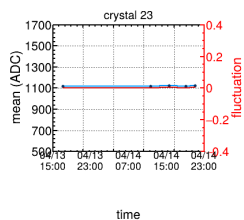
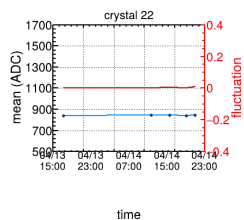
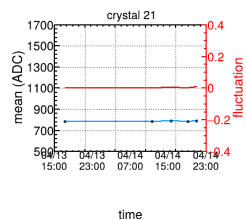
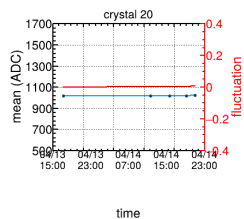
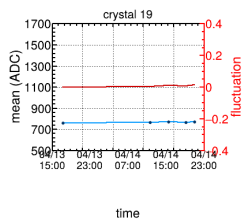
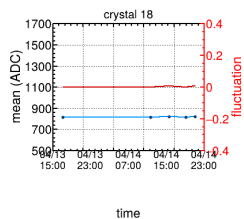
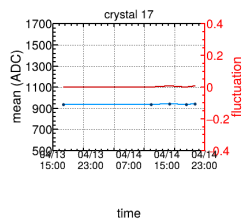
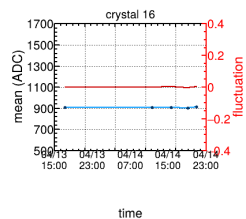
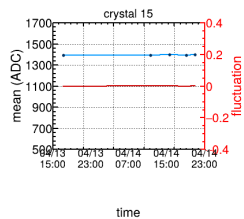
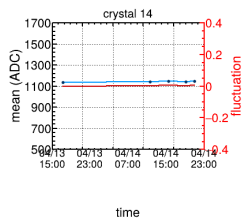
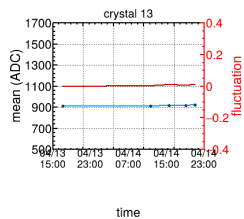
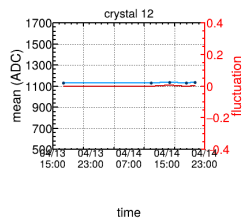
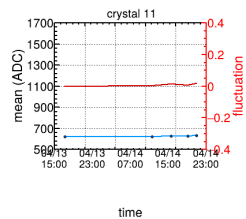
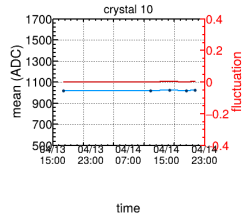
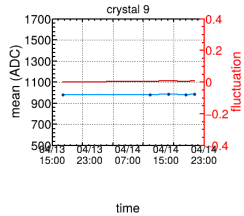
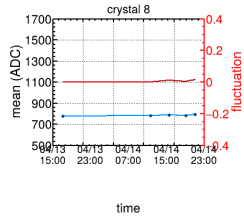
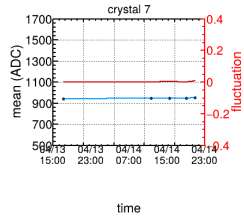
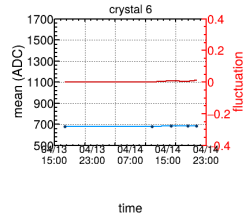
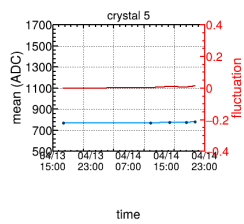
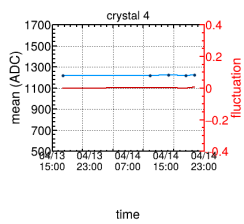
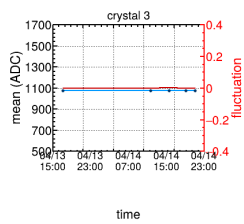
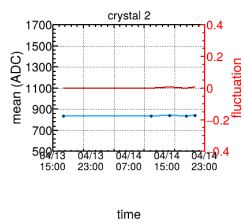
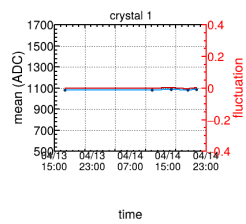
量能器三次振动后结果

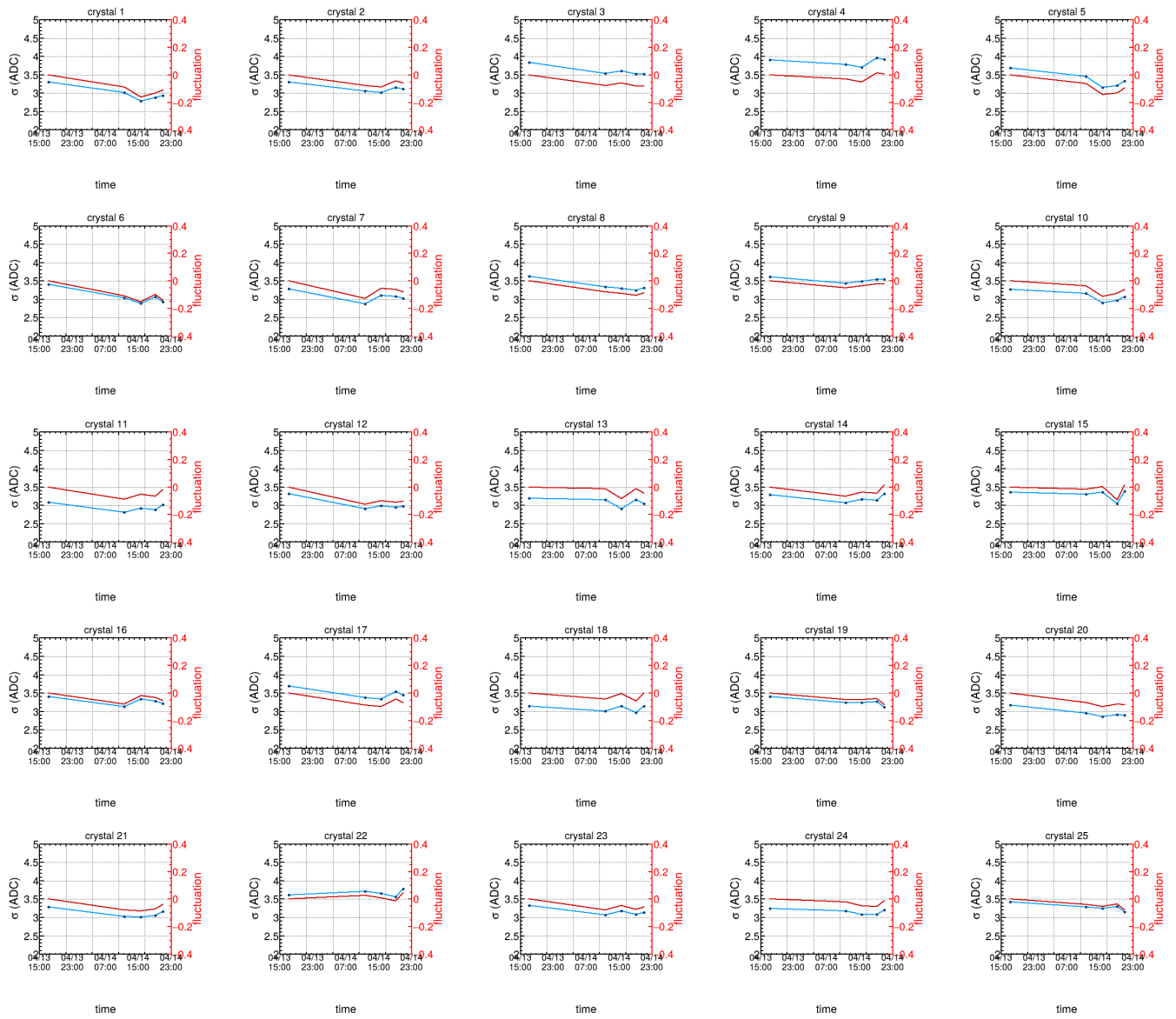
基线模式

量能器为 6×6 共 36 根 Csl(Tl) 晶体，每根晶体配置主份（Main）/备份（Back）两路读出，每路又分高增益（High）、低增益（Low）双通道，故基线共有主份低增益、主份高增益、备份低增益、备份高增益四组配置，分别给出台基分布及其均值（mean）、拟合宽度（ σ ）随测试时间点的叠加对比。

- 主份低增益 (Main Low)

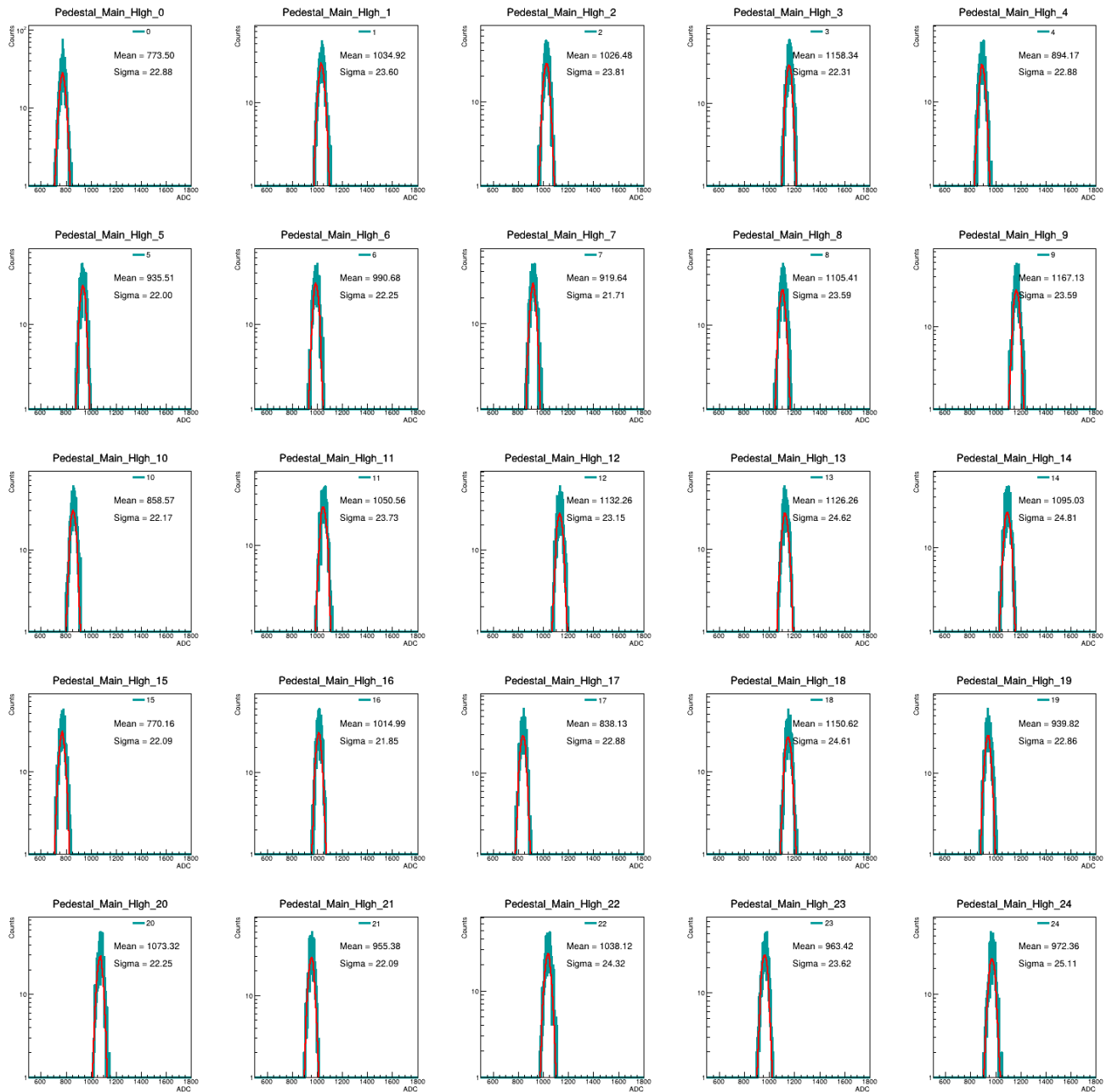


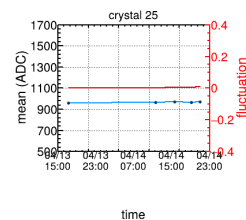
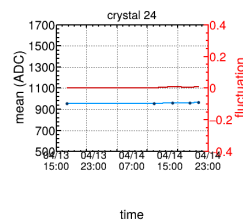
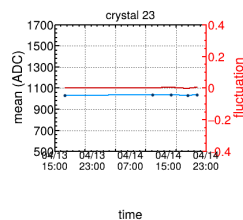
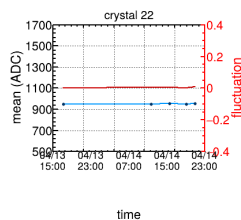
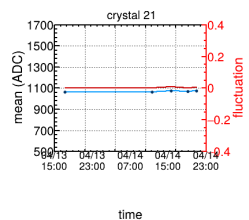
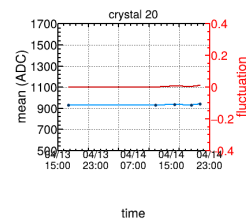
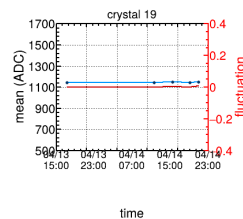
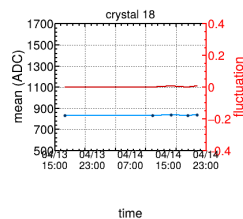
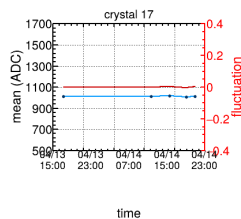
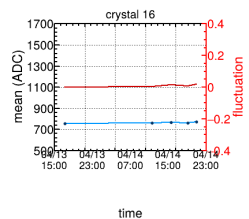
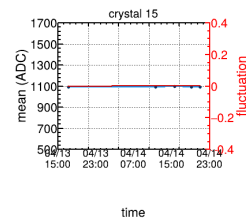
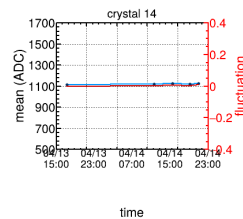
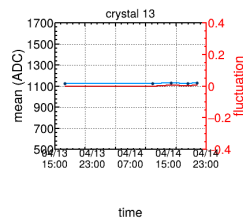
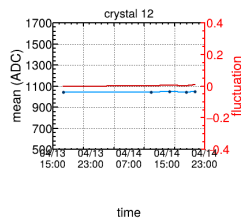
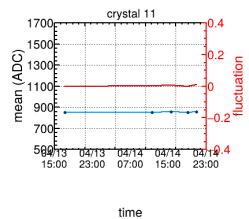
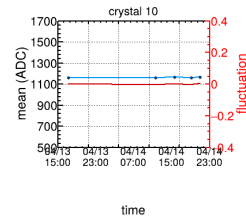
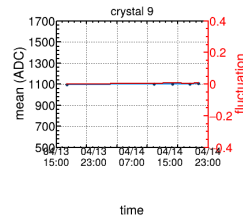
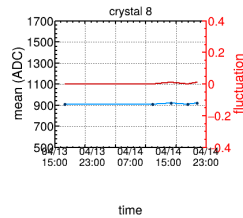
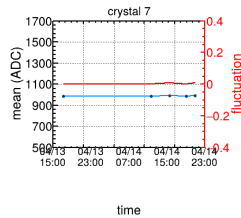
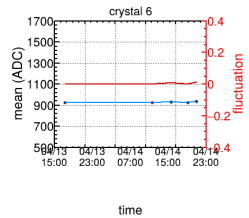
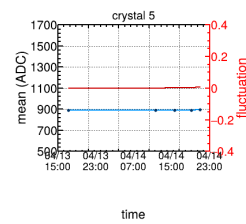
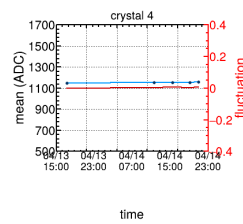
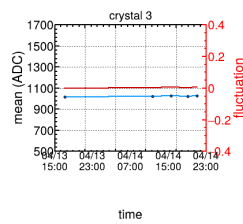
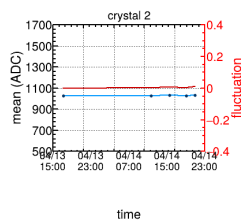
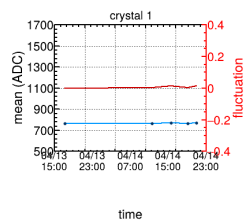


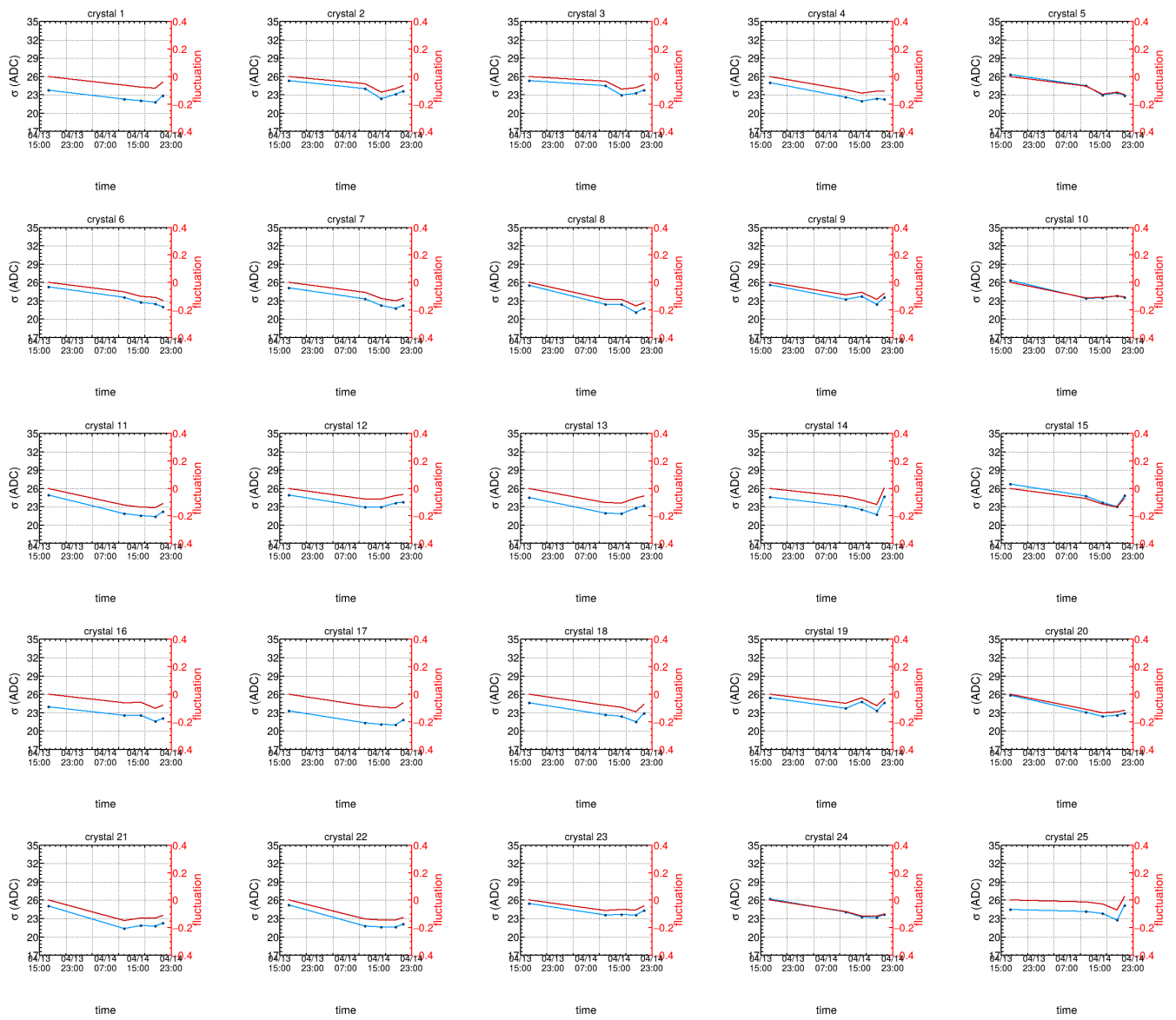


从台基分布 (Plat_ped_ml) 来看，各晶体单元台基均呈清晰、对称的单峰高斯结构，红色高斯拟合曲线与数据点吻合良好，无双峰、长尾或离散噪声峰。各通道台基均值因前端电子学工作点与 ADC 基准差异而分布在约 630–1400 ADC 的较宽区间（如 Chn 10 约 631.57 ADC 为最低，Chn 14 约 1398.72 ADC 为最高），属各通道固有偏置。低增益通道的高斯拟合 σ 集中在约 2.9–3.9 ADC 的窄范围内，各通道本底噪声水平相近，未见 σ 异常展宽的通道。从均值 (ml_mean) 随时间的叠加曲线看，覆盖 04/13 至 04/14 各时间点，各晶体台基均值稳定保持在各自水平，振前两次联调高度重合，三轴振动后无阶跃式跳变，相对涨落（红色曲线）保持在零附近；从 σ (ml_sigma) 时序看，各通道 σ 始终维持在约 3 ADC 量级，仅个别通道呈现数 ADC 以内的轻微缓变，趋势平缓、非振动相关突变。

- 主份高增益 (Main High)

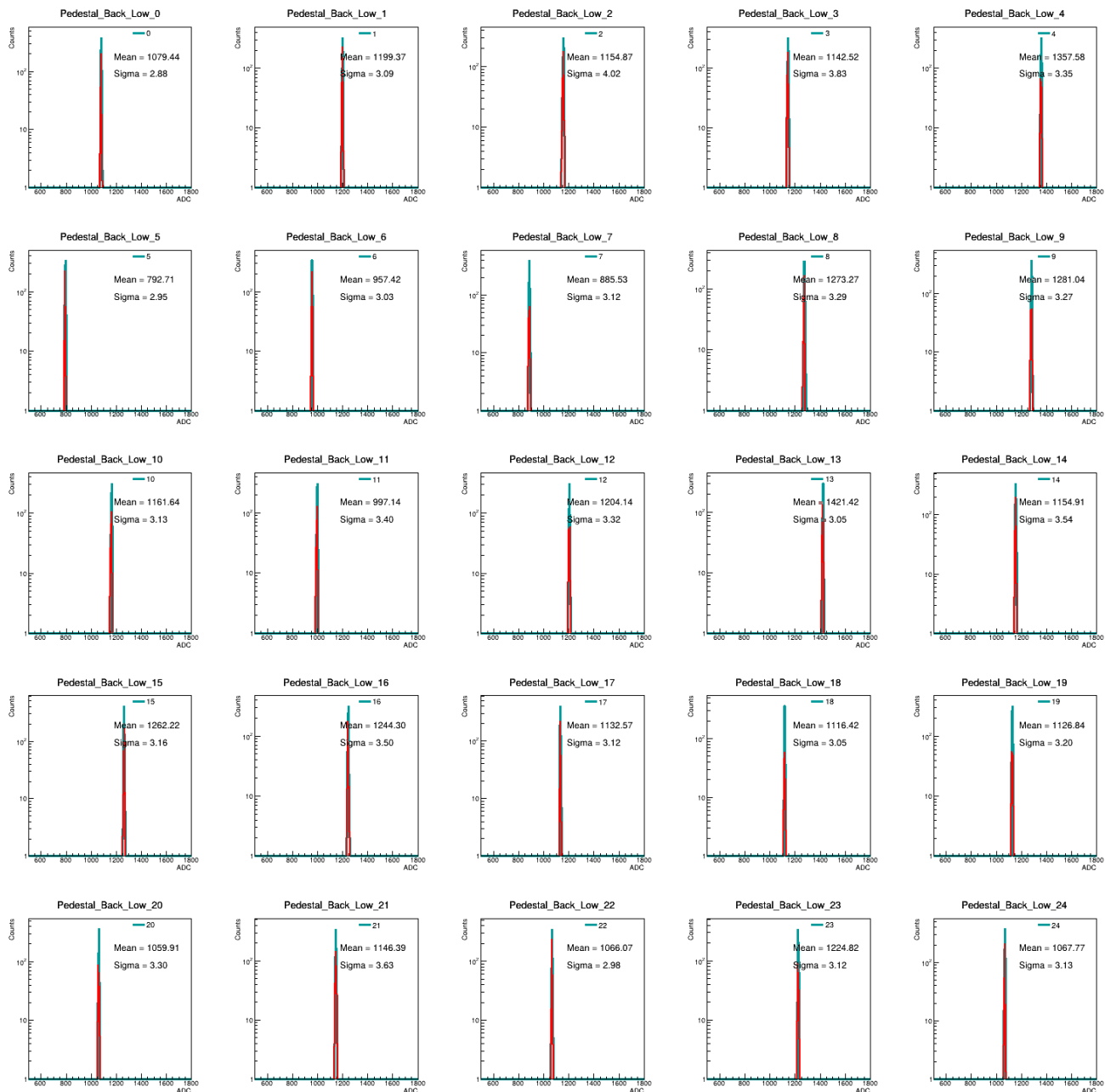


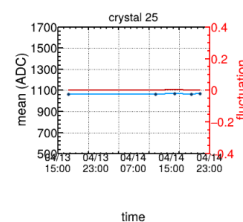
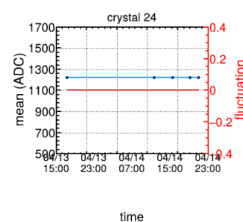
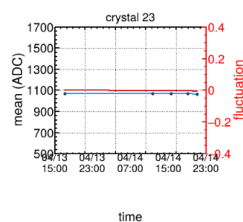
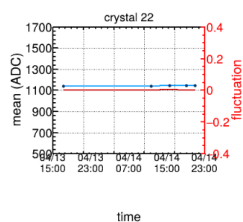
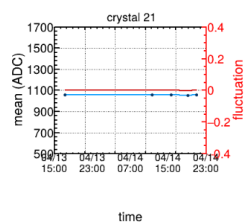
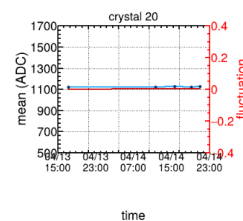
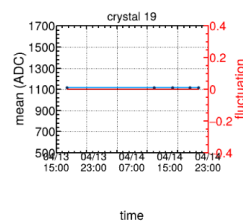
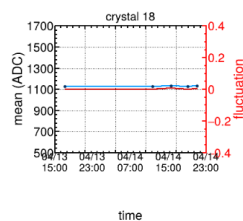
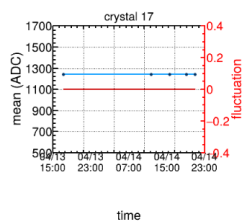
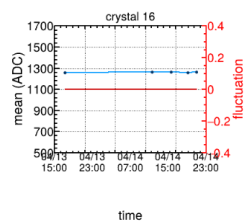
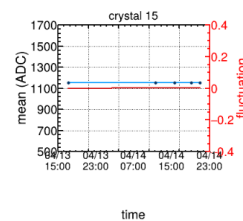
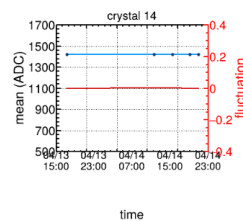
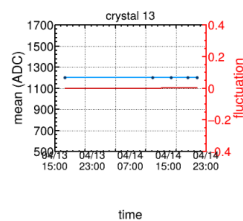
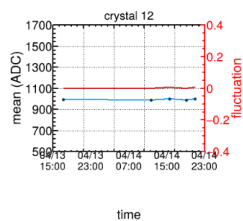
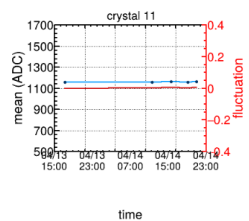
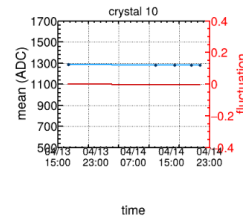
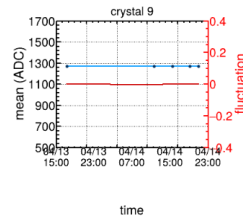
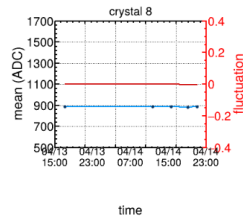
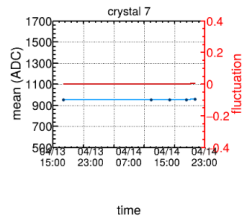
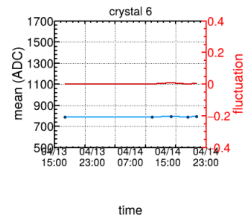
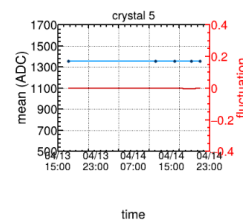
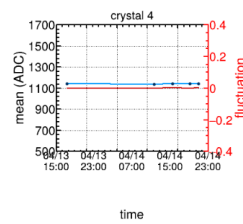
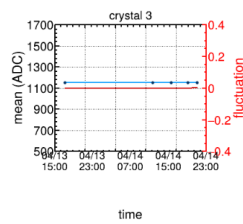
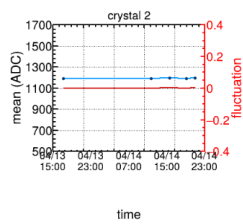
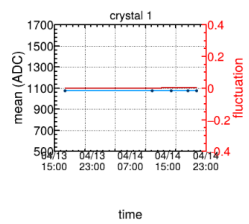


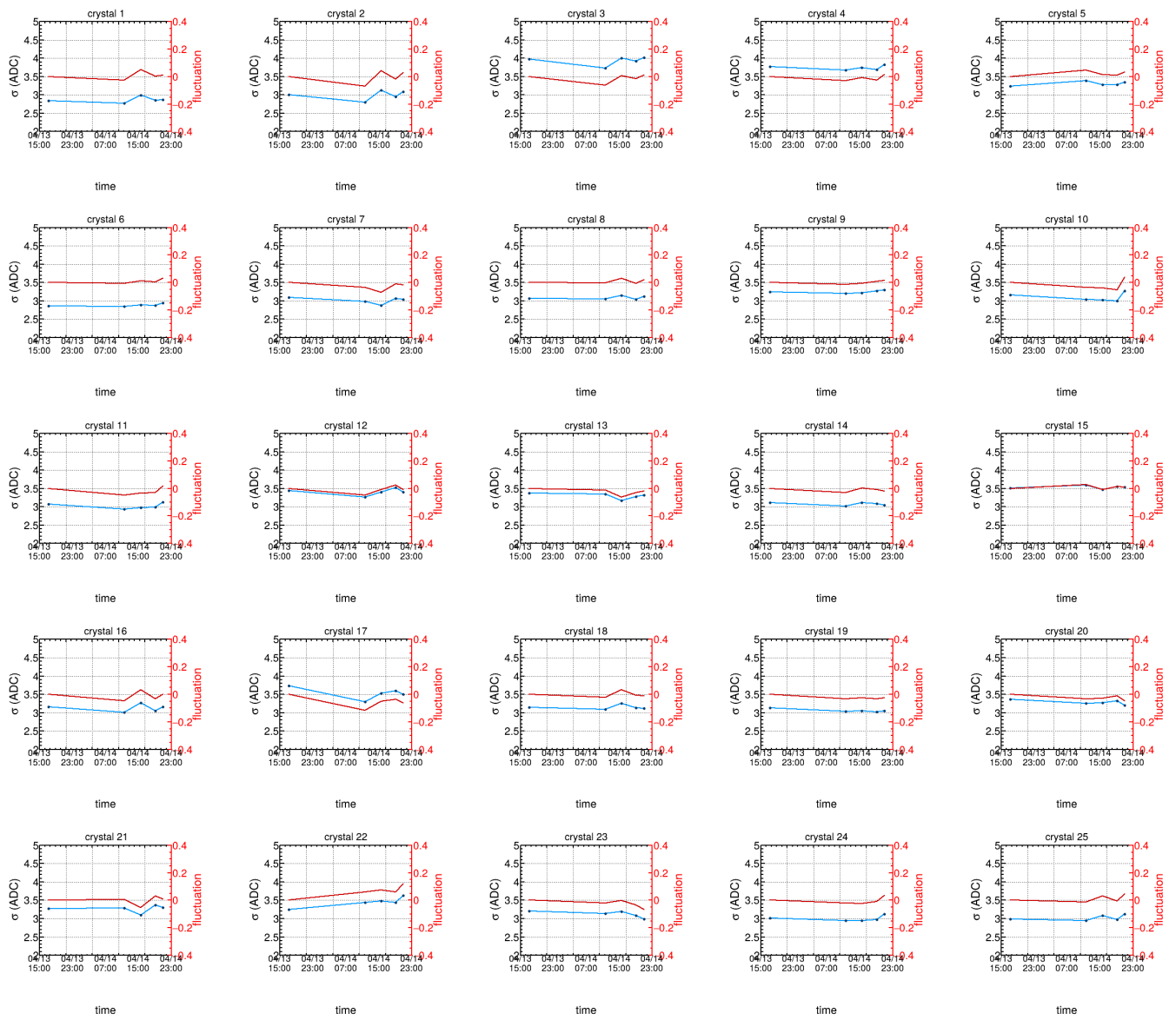


从台基分布 (Plat_ped_mh) 来看，各单元台基同样为单峰高斯结构，拟合良好，无畸变。高增益通道因放大倍数较高，其台基拟合 σ 处于约 21–25 ADC 范围（如约 21.7–25.1 ADC），绝对噪声宽度大于低增益通道，符合高增益读出链路的预期，各通道间一致性良好。台基均值分布在约 770–1170 ADC 之间，为各通道固有偏置。从均值 (mh_mean) 叠加曲线看，各晶体台基均值在振前振后高度一致，无阶跃跳变；从 σ (mh_sigma) 时序看，部分通道 σ 在测试期间呈现自约 26 ADC 向约 22–23 ADC 的轻微下行趋势，各时间点之间过渡平滑、无台阶式突变，判断为电子学上电后随工作温度变化的慢漂移（与遥测温度的缓升相符），而非机械应力引入的噪声变化，整体未见异常展宽或失效通道。

- 备份低增益 (Back Low)

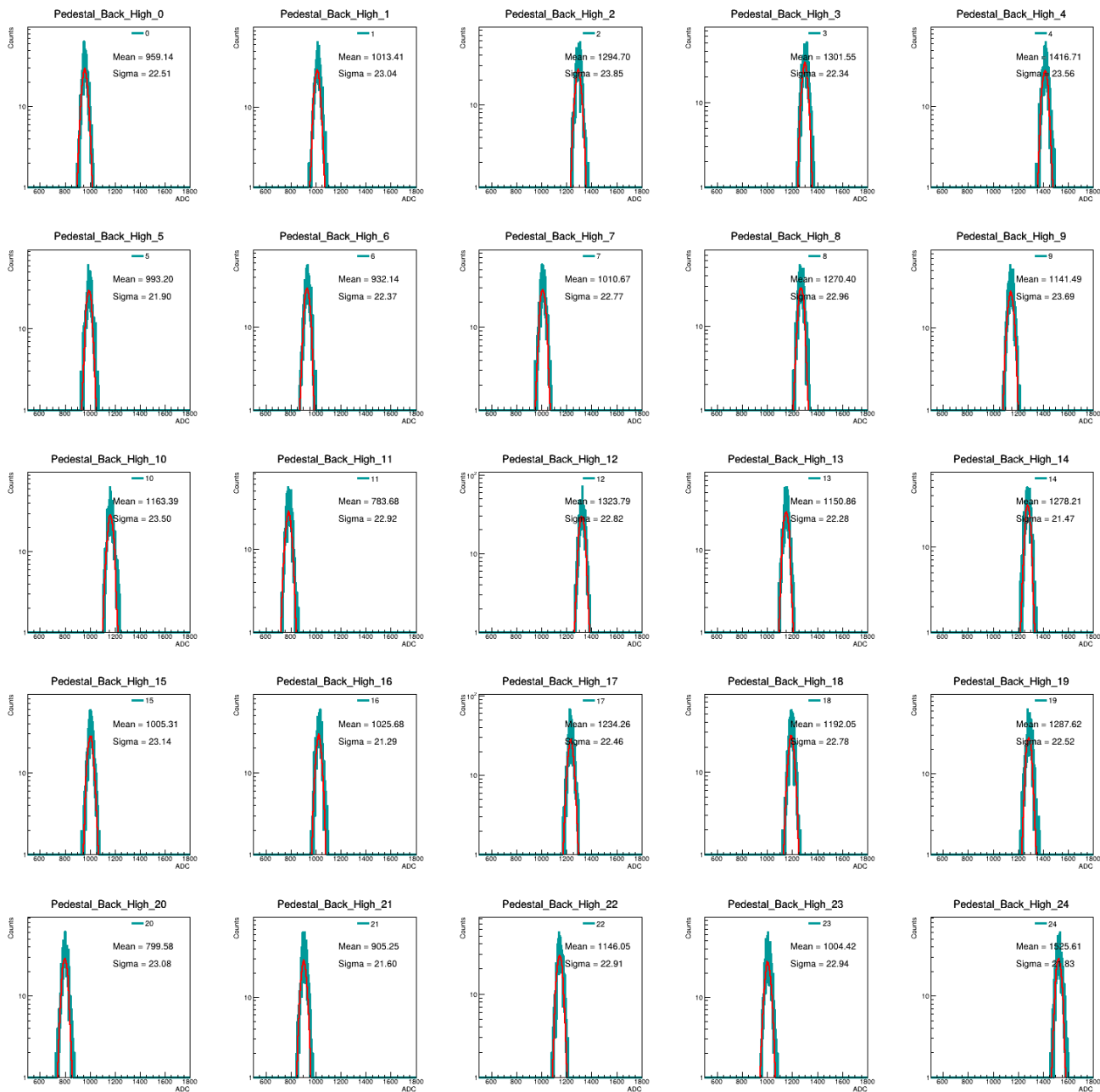


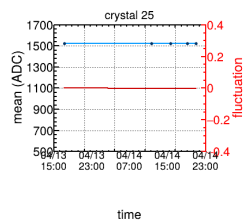
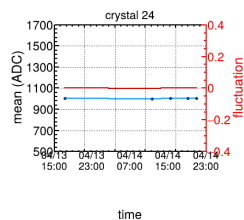
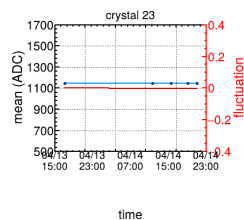
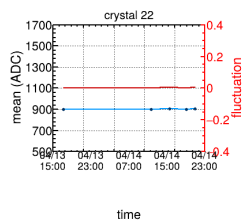
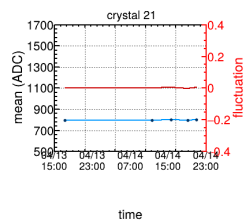
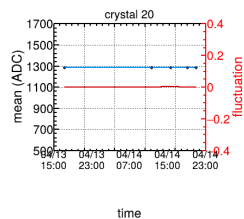
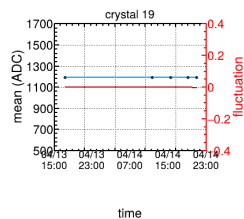
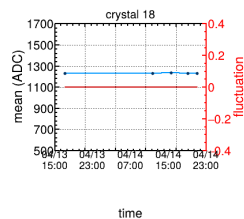
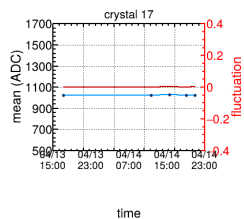
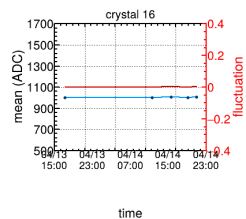
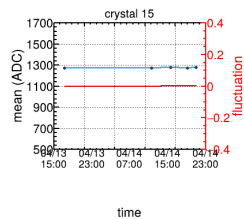
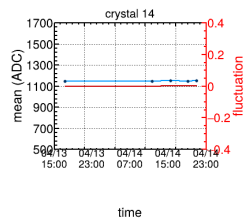
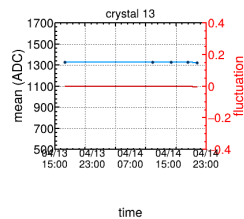
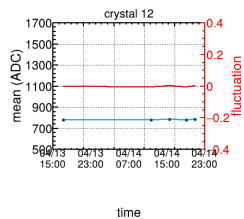
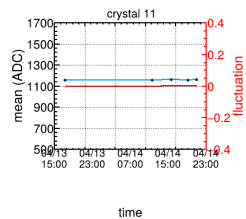
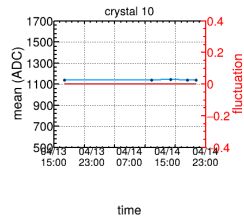
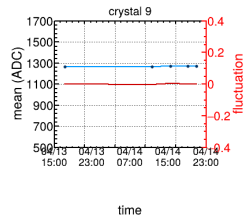
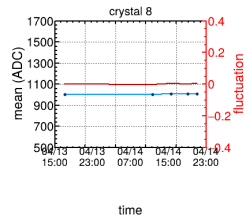
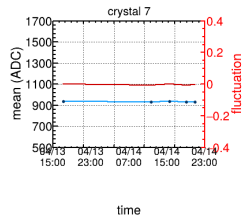
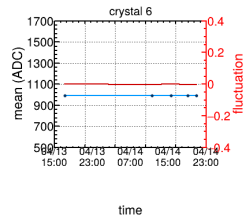
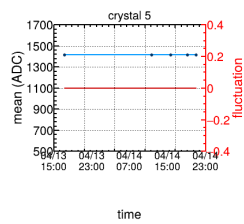
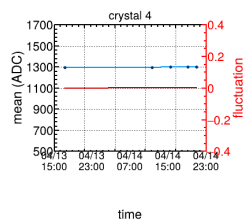
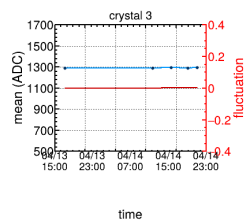
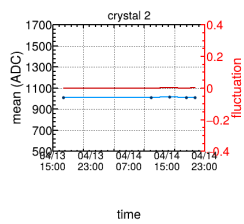
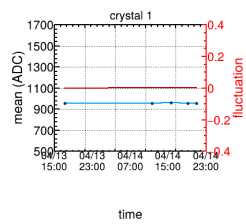


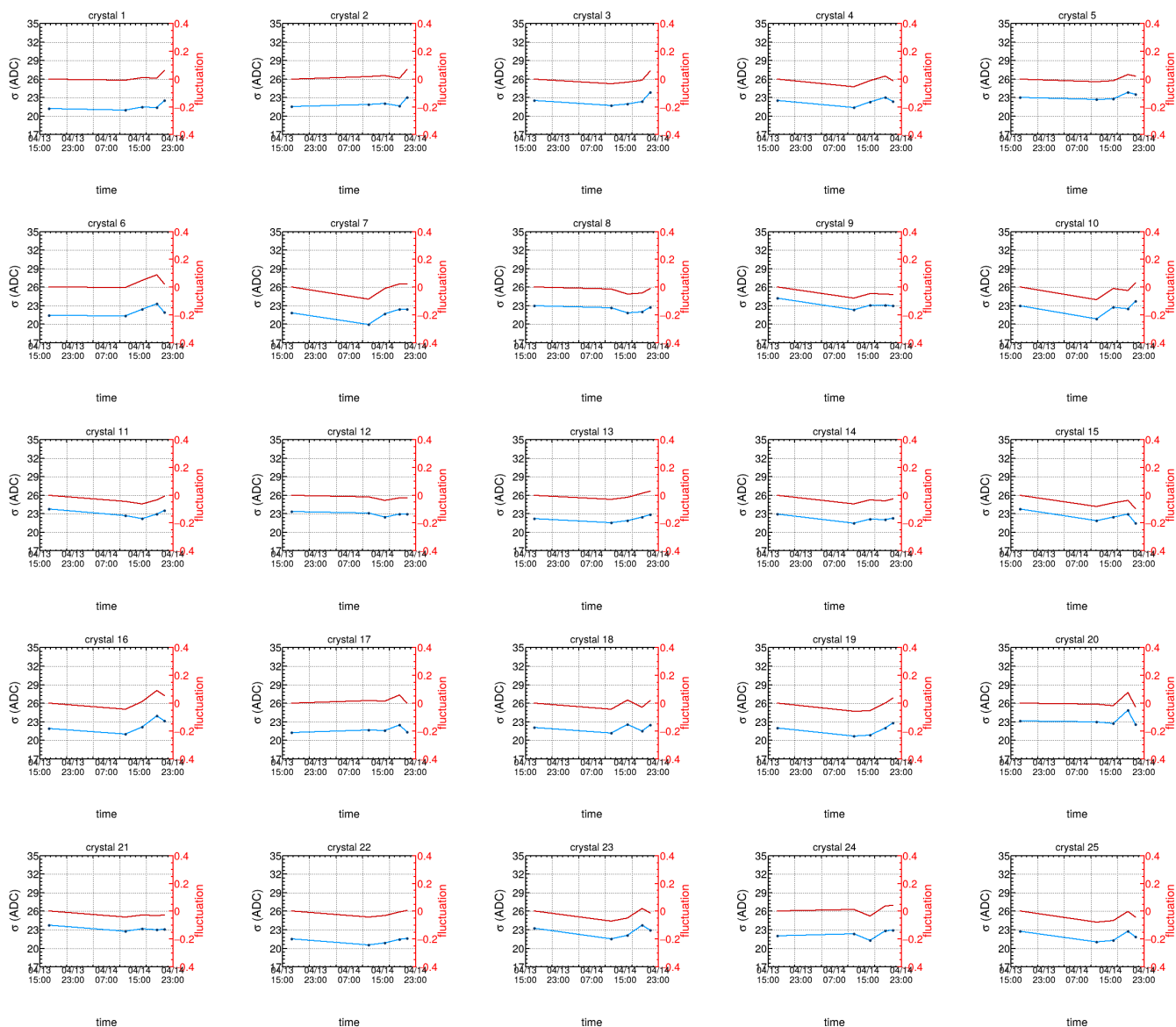


从台基分布 (Plat_ped_bl) 来看, 备份低增益各通道台基为清晰对称的单峰高斯结构, 拟合良好。台基均值分布在约 790–1420 ADC 之间, σ 集中在约 2.9–4.0 ADC 的窄范围内, 与主份低增益的本底水平相当。从均值 (bl_mean) 与 σ (bl_sigma) 的时序叠加曲线看, 各晶体台基均值在三轴振动前后稳定保持, 无跳变与系统性单向漂移, σ 维持在约 3 ADC 量级, 趋势平缓, 未发现噪声异常通道。

- 备份高增益 (Back High)





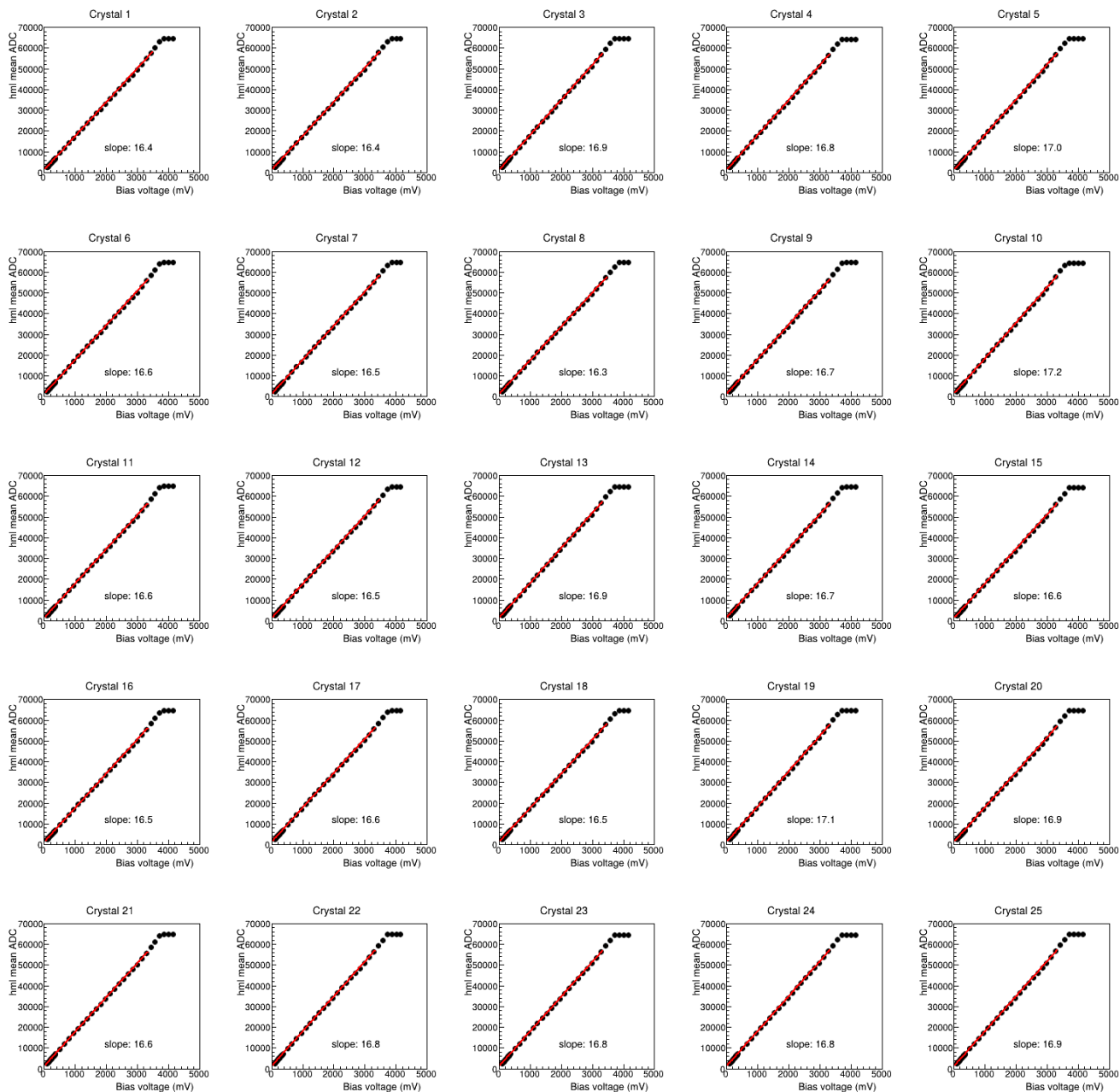


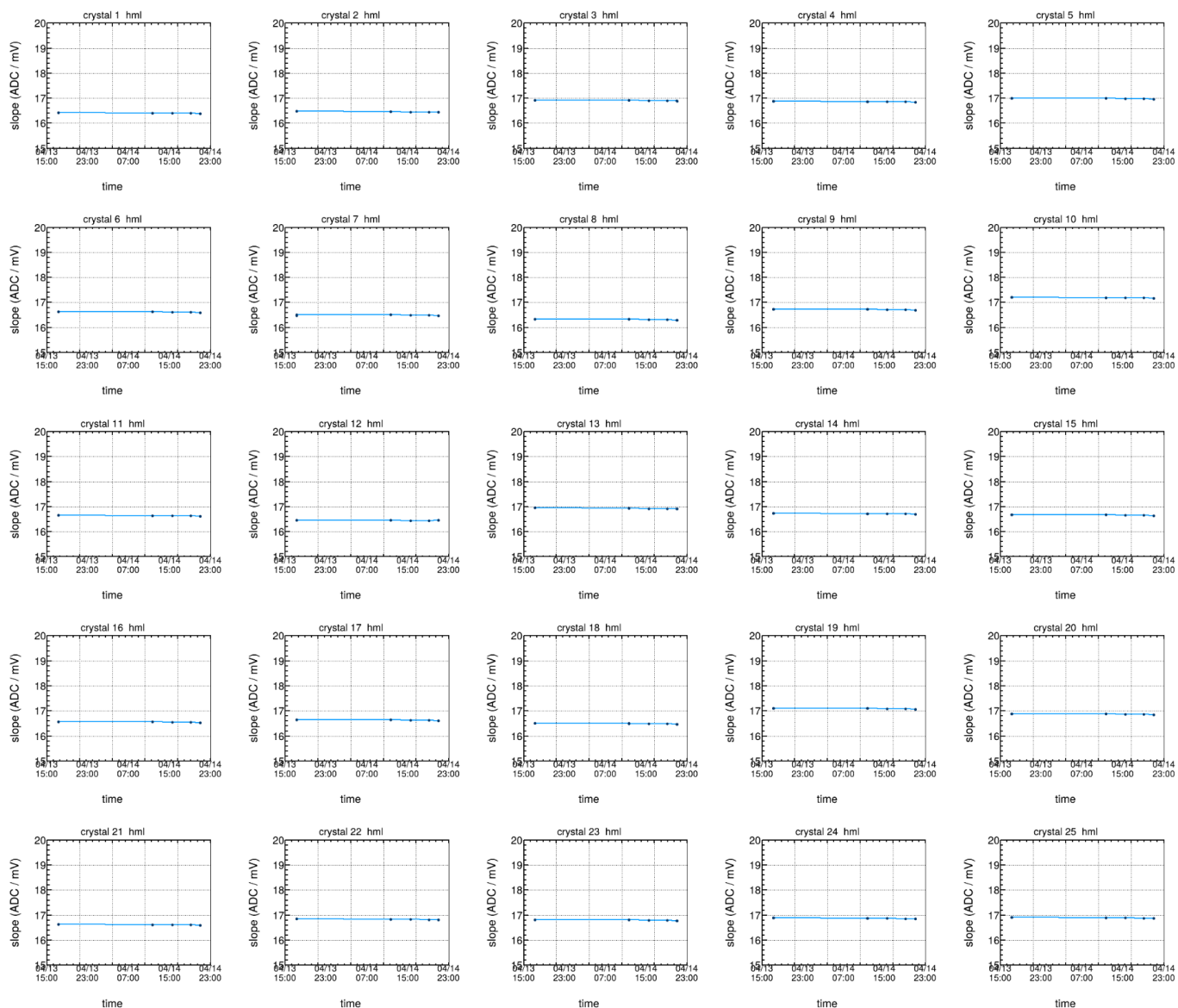
从台基分布 (Plat_ped_bh) 来看，备份高增益各通道台基同为单峰高斯结构，拟合曲线与数据吻合良好，无双峰或畸变。 σ 处于约 21–24 ADC 范围，与主份高增益相当；台基均值分布较宽（约 780–1525 ADC），为各通道固有偏置。从均值 (bh_mean) 叠加曲线看，各晶体台基均值振前振后高度一致、无阶跃跳变；从 σ (bh_sigma) 时序看，与主份高增益类似，部分通道呈现数 ADC 量级的轻微缓降趋势，过渡平滑、无振动相关突变，判断为温度相关的电子学慢漂移。

综合主份/备份、高/低增益四组配置的台基分析，量能器各晶体单元在三轴振动前后均能正常读出，台基分布全部呈现良好的单峰高斯结构，未出现双峰、异常长尾或离散噪声峰；低增益通道 σ 约 3 ADC、高增益通道 σ 约 22–25 ADC，均处于各自的合理本底水平。各通道台基均值在振前振后高度一致，无阶跃式跳变或系统性单向漂移；高增益通道 σ 在测试期间出现的轻微下行趋势平缓且与温度缓升相符，属电子学慢漂移而非机械损伤。未发现失效通道、台基突变或噪声异常现象，表明量能器读出链路（含主备双路、高低双增益）的台基特性在三轴振动后保持稳定可靠。

刻度模式

- 主份低增益

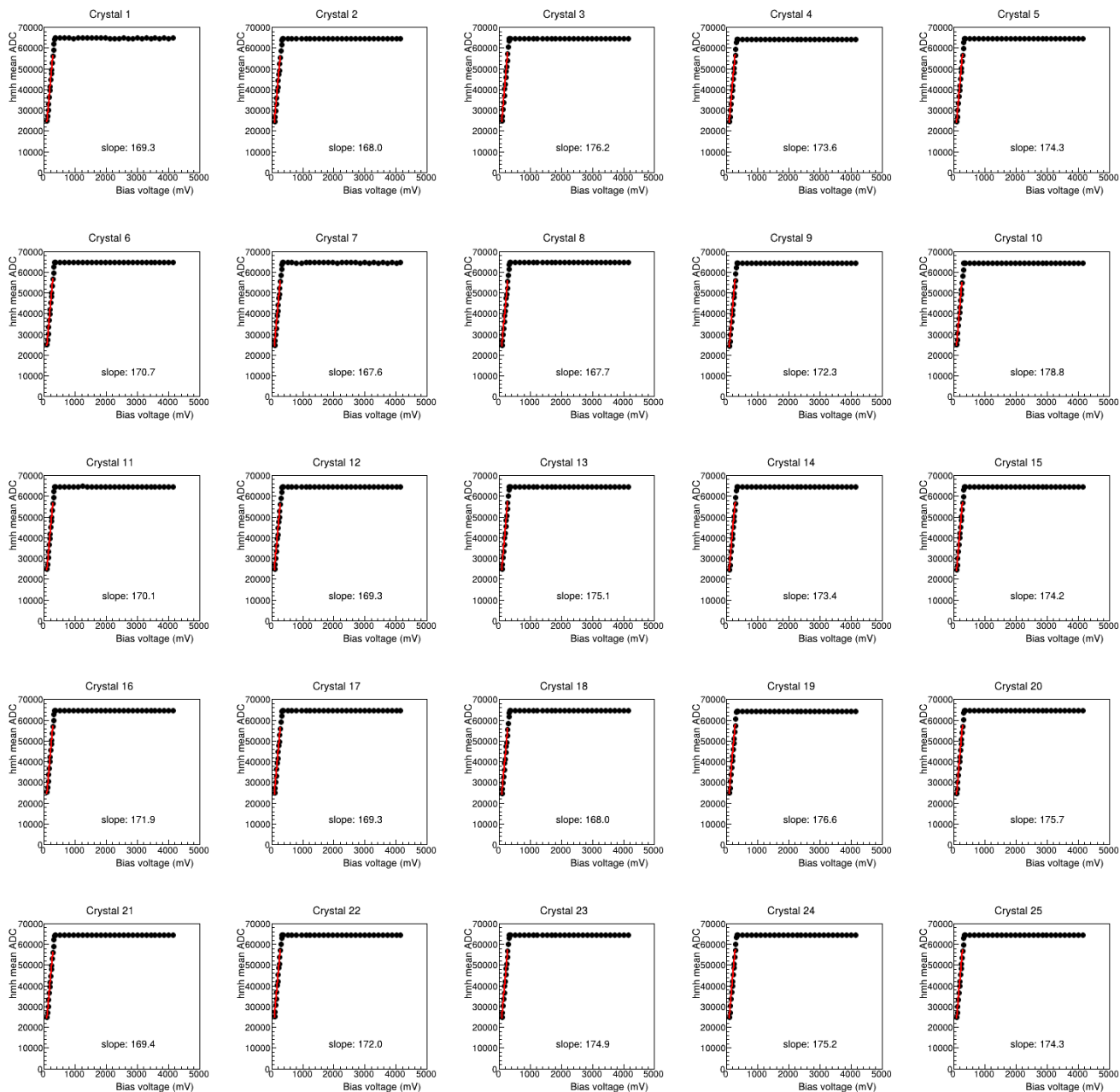


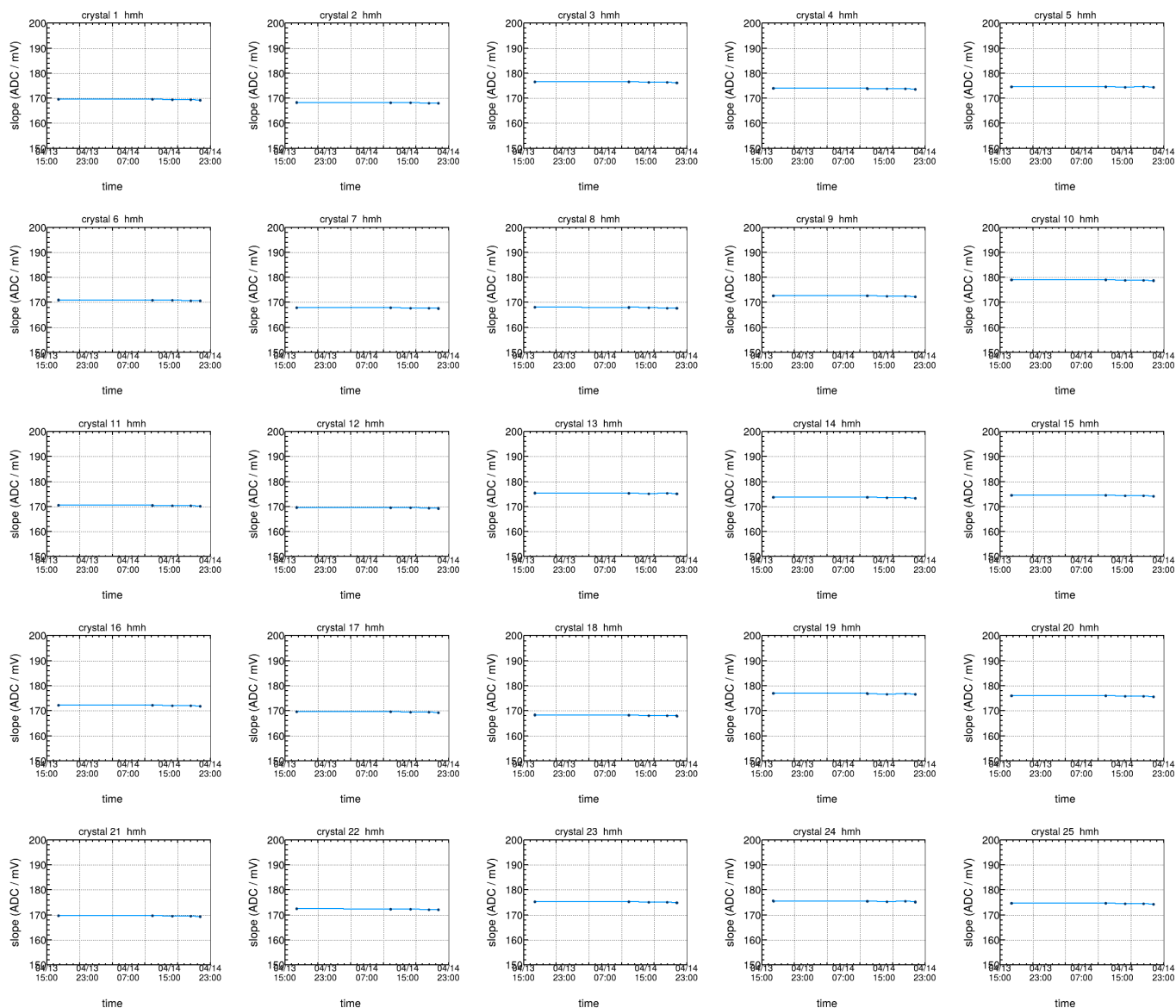


从刻度曲线 (calib_trend_hml) 来看，各晶体单元的 ADC 响应在低偏压段随注入偏压 (Bias voltage) 线性增长，红色线性拟合直线与数据点吻合良好；当偏压超过约 3500–4000 mV 后，ADC 计数趋于饱和，饱和平台约在 64000–65000 ADC，反映了 ADC 的量程上限。线性区间内各通道拟合斜率分布在约 16.3–17.2 ADC/mV 之间，通道间一致性良好。

从斜率时序曲线 (hml_slope) 来看，各单元增益斜率在振前两次联调与三轴振动后各时间点之间高度一致，所有曲线在各自约 16.4–17.2 ADC/mV 的水平上近乎平直，振前振后无台阶式变化，未发现增益跳变或线性度劣化。

- 主份高增益

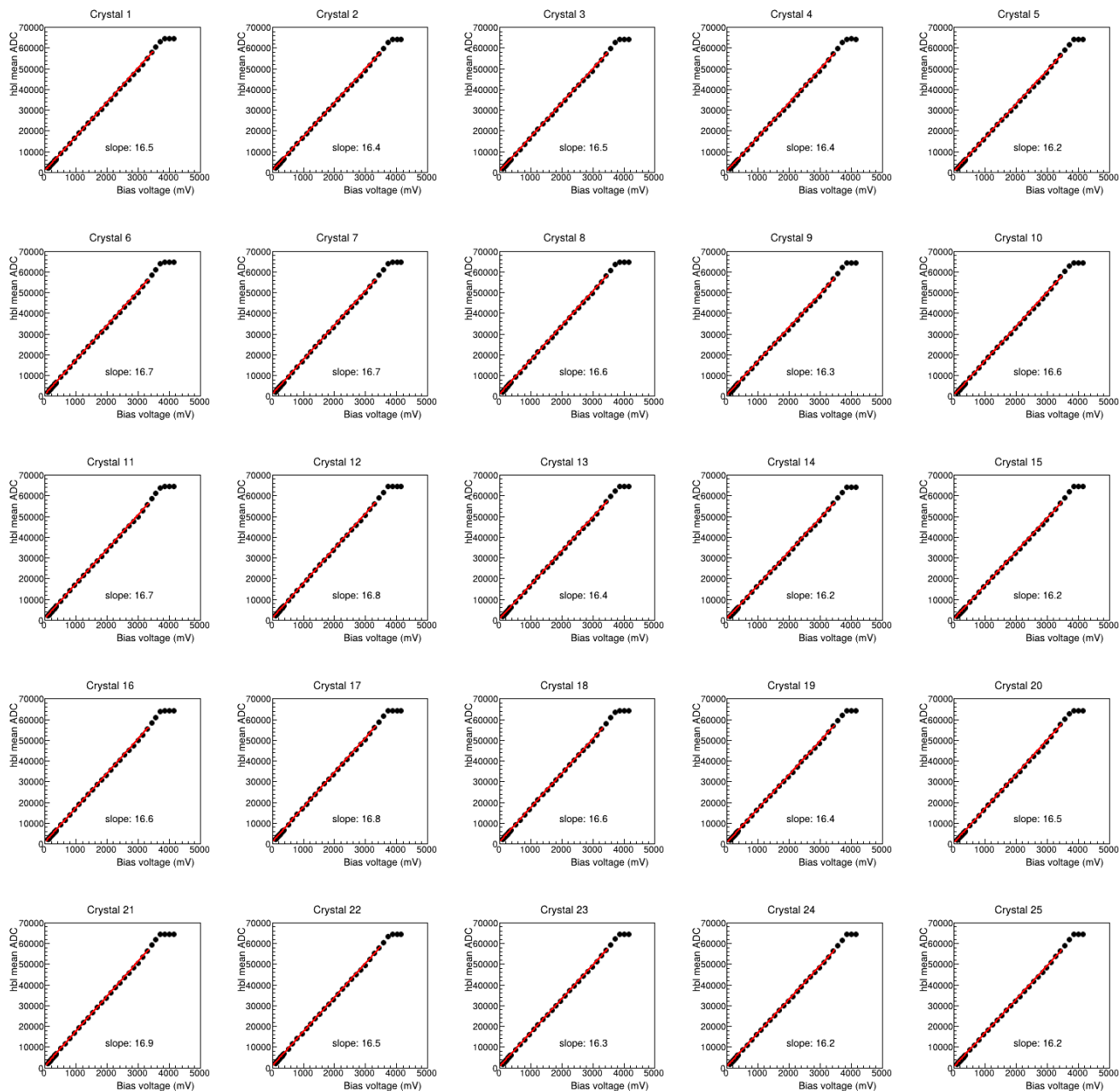


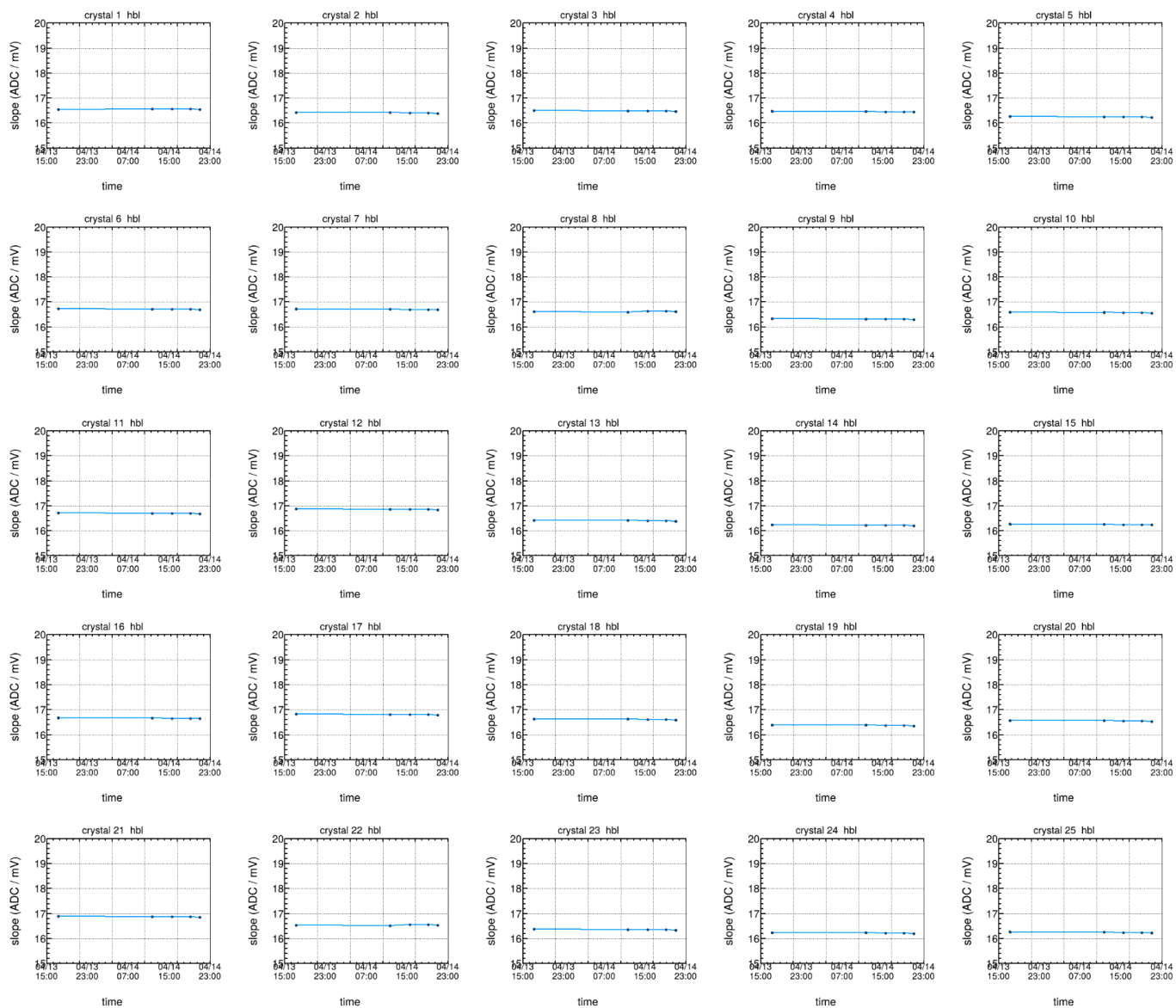


从刻度曲线（calib_trend_hmh）来看，高增益通道因放大倍数高，ADC 响应在很低的偏压（约数百 mV）内即快速上升并迅速进入约 64000–65000 ADC 的饱和平台，线性段陡峭，红色拟合直线与线性区数据点吻合良好。各通道拟合斜率分布在约 167.6–178.8 ADC/mV 之间，约为低增益通道的 10 倍，符合高低增益双通道的设计比例，通道间一致性良好。

从斜率时序曲线（hmh_slope）来看，各单元高增益斜率在振前振后各时间点高度一致，曲线在各自约 168–179 ADC/mV 水平上平直，无阶跃跳变或线性度劣化。

• 备份低增益

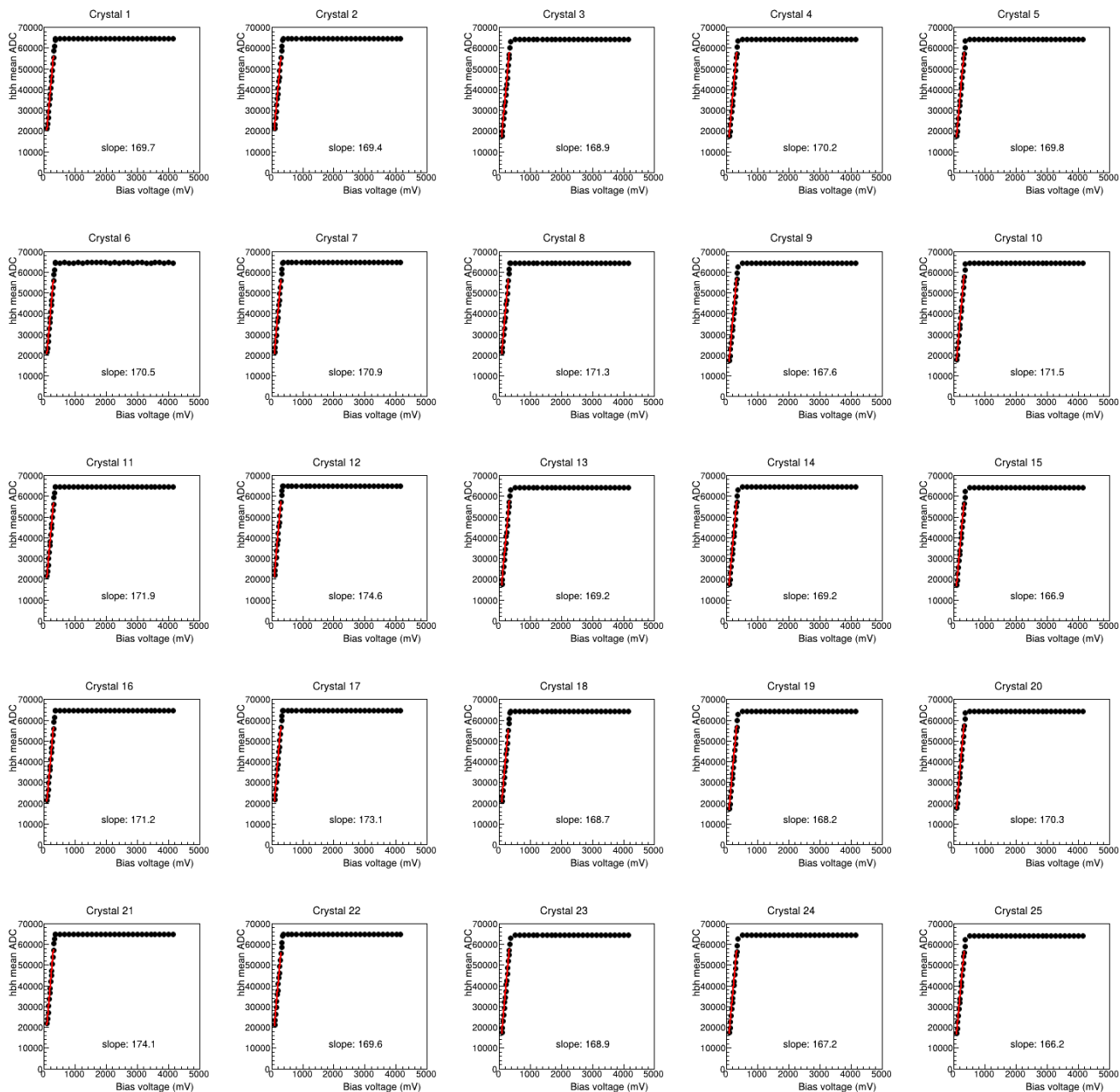


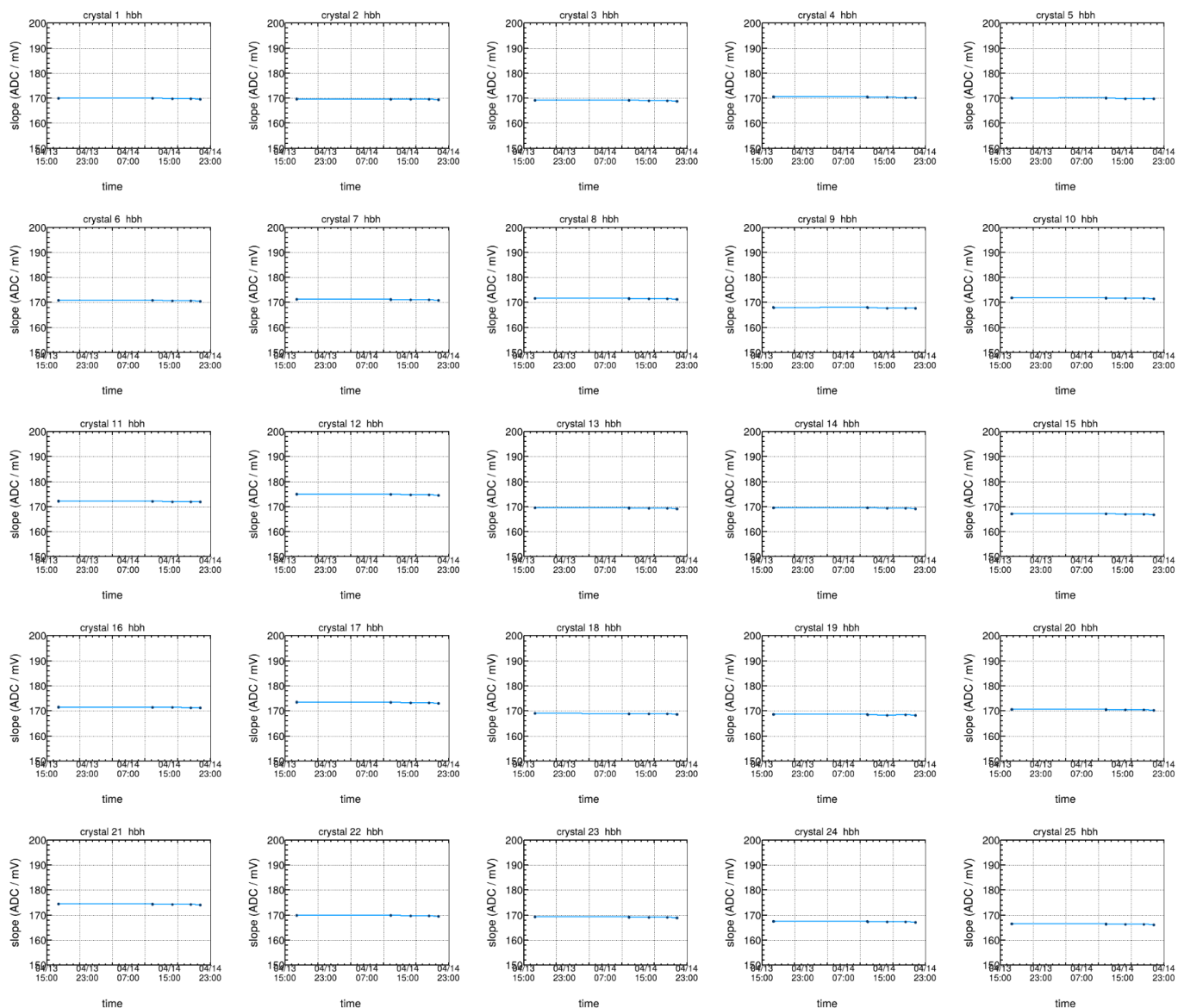


从刻度曲线（calib_trend_hbl）来看，备份低增益各通道 ADC 响应同样在低偏压段线性增长、高偏压段饱和于约 64000–65000 ADC，拟合良好。线性区斜率分布在约 16.2–16.9 ADC/mV 之间，与主份低增益水平相当、一致性良好。

从斜率时序曲线（hbl_slope）来看，各单元斜率在振前振后高度一致，曲线平直，未见增益跳变或线性度异常。

• 备份高增益





从刻度曲线（calib_trend_hbh）来看，备份高增益各通道呈现与主份高增益一致的陡峭线性段加饱和平台特征，拟合良好。线性区斜率分布在约 166.2–174.6 ADC/mV 之间，约为备份低增益的 10 倍，与主份高增益水平相当。

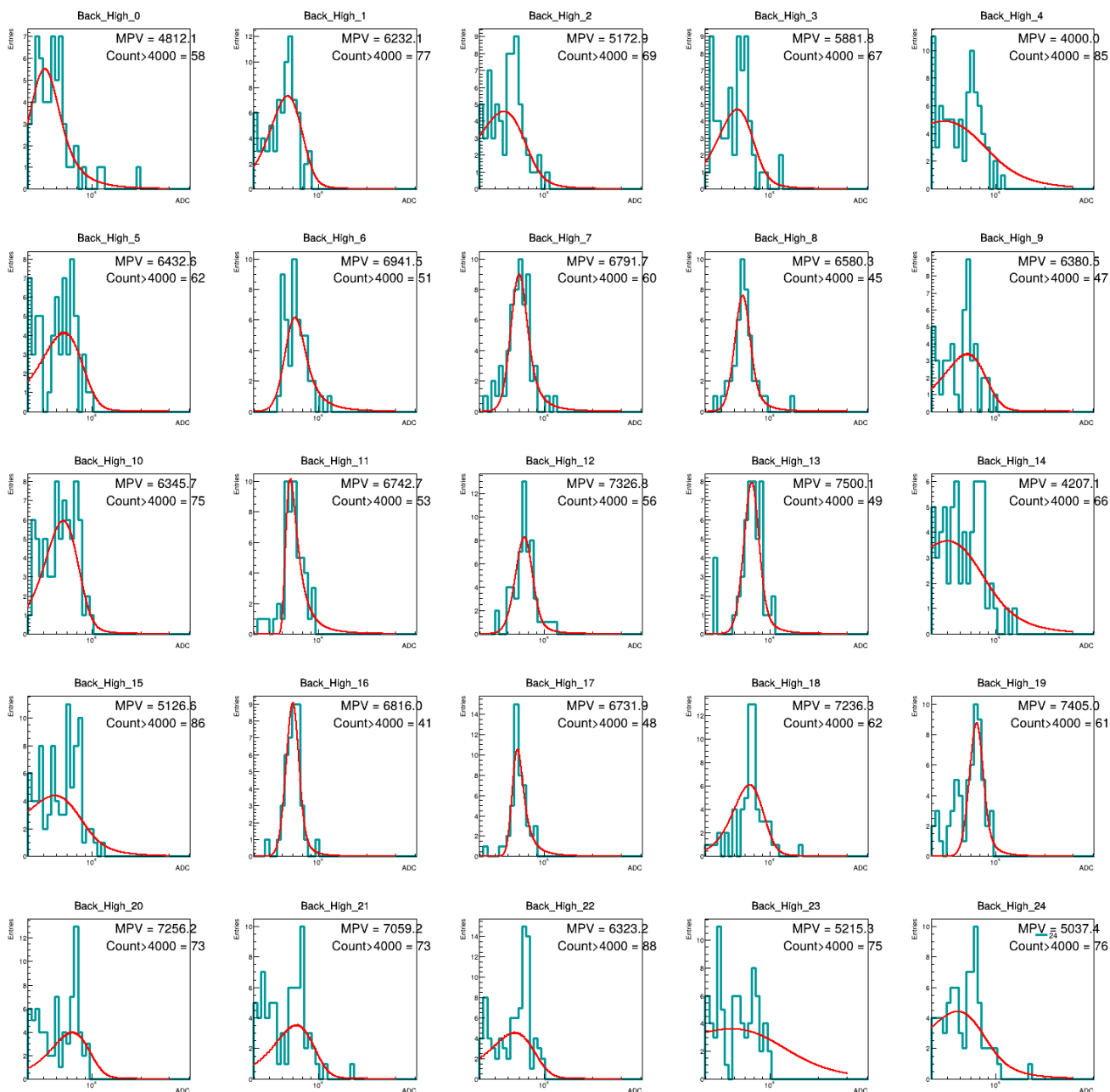
从斜率时序曲线（hbh_slope）来看，各单元斜率在振前振后各时间点高度一致，曲线平直，无台阶式变化或线性度劣化。

综合主份/备份、高/低增益四组配置的电子学刻度分析，量能器各晶体单元的刻度响应在三轴振动前后均表现出良好的线性度与饱和特征：低增益通道斜率约 16–17 ADC/mV、高增益通道斜率约 167–179 ADC/mV，高低增益比约 10 倍，符合大动态范围双通道读出的设计预期。各通道增益斜率在振前两次联调与三轴振动后各时间点之间高度一致，未发现任何台阶式增益跳变或线性度劣化现象，表明量能器读出电子学（含主备双路、高低双增益）的增益特性在三轴振动后稳定可靠，无异常通道。

宇宙线联调

受测试窗口限制，量能器宇宙线数据采集时长同样较短，且仅在三轴振动完成后采集，未建立振前基准，因此该部分以振后谱形分析为主，主要用于确认各晶体单元在经历三轴振动后整体物理探测链路是否仍正常工作，暂不进行振前/振后 MIP 峰位的定量漂移比对。量能器为 20 cm 长 CsI(Tl) 晶体，宇宙线 μ 子穿过单根晶体的 MIP 沉积能量约 120 MeV，对应较高的 ADC 输出，故选用高增益通道进行谱形分析。

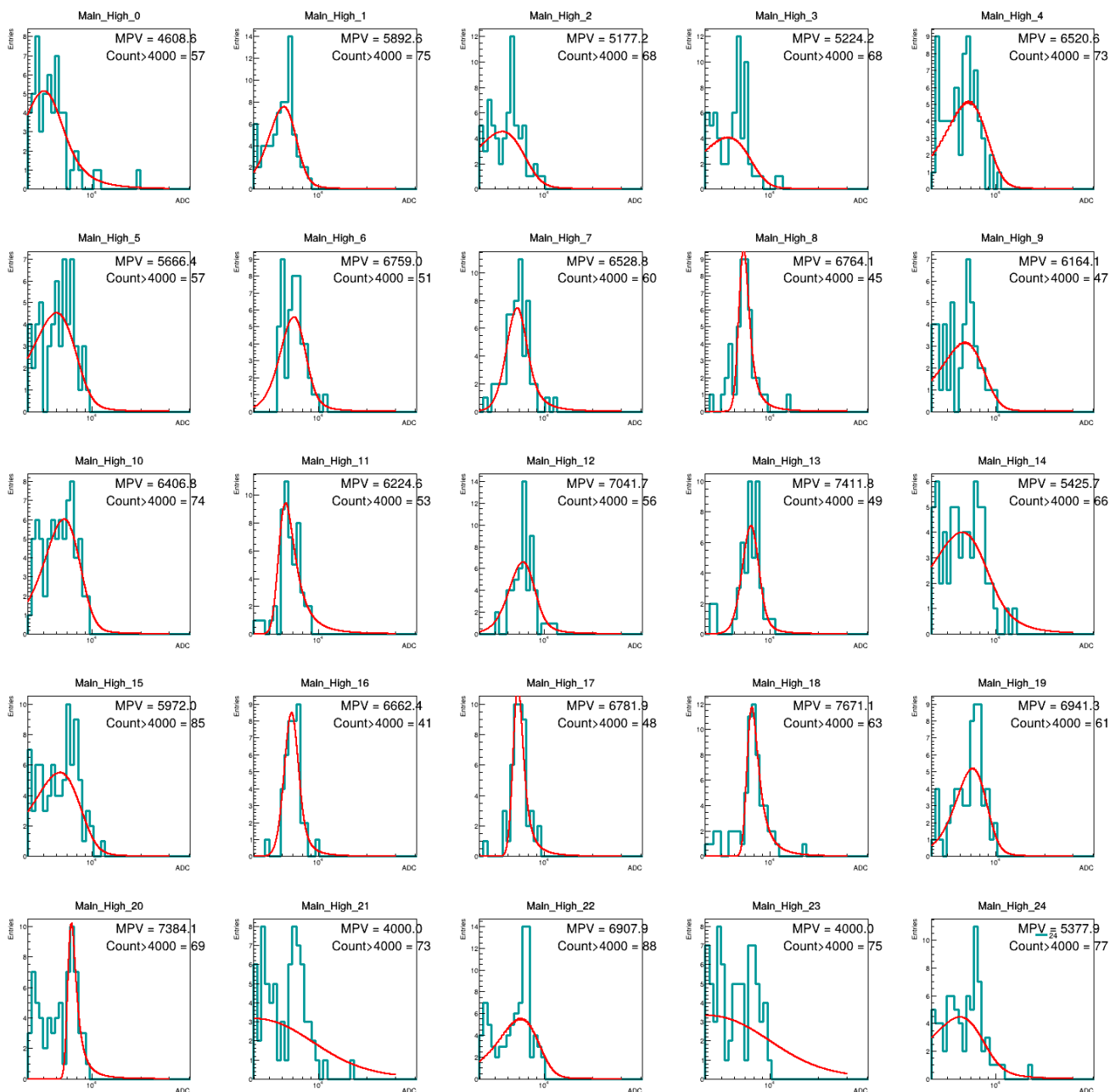
- 主份高增益



上图给出振动后量能器各晶体单元的宇宙线高增益响应谱（横轴为对数 ADC）。各通道可见明显的 MIP 特征峰，整体呈朗道形貌：低能侧上升、峰区附近达到极大、向高 ADC 侧拖出朗道长尾，红色朗道×高斯拟合曲线在峰区与数据吻合良好。各单元拟合 MPV 主要分布在约 4600–7700 ADC 区间，多数通道集中在约 6000–7400 ADC，通道间差异属各晶体光产额、光收集、APD 增益及读出增益的固有结果。

需要指出的是，个别通道（如 Main_High_21、Main_High_23）受本次采集统计量偏低、谱形较散影响，朗道拟合给出贴近下边界的 MPV（约 4000 ADC）并伴随较大不确定度，属低统计量下的拟合偏差，而非探测单元失效；从其谱形仍可见明确的 MIP 事件分布。各图中标注的 "Count>4000" 为相应阈值以上的事例计数，反映各通道均采集到一定数量的宇宙线事件。

• 备份高增益



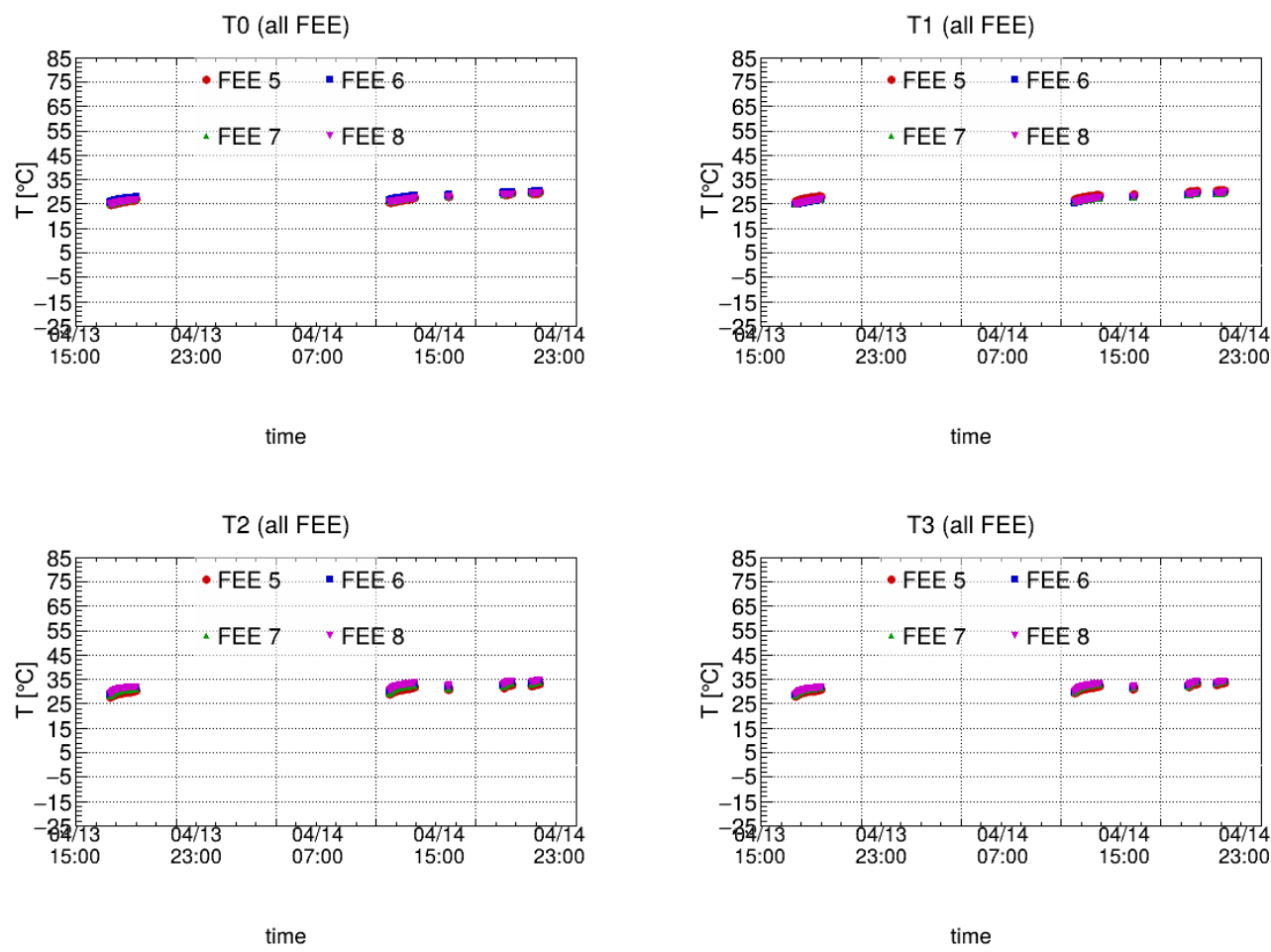
备份高增益各通道的宇宙线响应谱与主份高度相似，同样呈现清晰的朗道型 MIP 峰，拟合 MPV 分布在约 4000–7500 ADC 区间，多数通道集中在约 6000–7400 ADC，与主份高增益结果一致。少数低统计量通道（如 Back_High_4、Back_High_23）拟合 MPV 贴近下边界，原因与主份相同，属统计涨落导致的拟合偏差。主备两路在相同晶体上给出彼此接近的峰位，互为印证。

综合主份/备份高增益的宇宙线谱形，振动后量能器各晶体单元均能采集到宇宙线 MIP 信号，谱形整体呈典型朗道分布并可由朗道×高斯函数描述，MPV 多集中于约 6000–7400 ADC、主备结果一致，表明从晶体发光、光电转换、APD 倍增到前端读出的整体物理探测链路在三轴振动后保持完好，未出现探测单元失效或响应明显缺失的情况。个别通道贴近下边界的 MPV 系本次短采集低统计量所致的拟合偏差，需在后续更长曝光、含振前基准的条件下进一步定量评估 MIP 峰位的绝对稳定性。

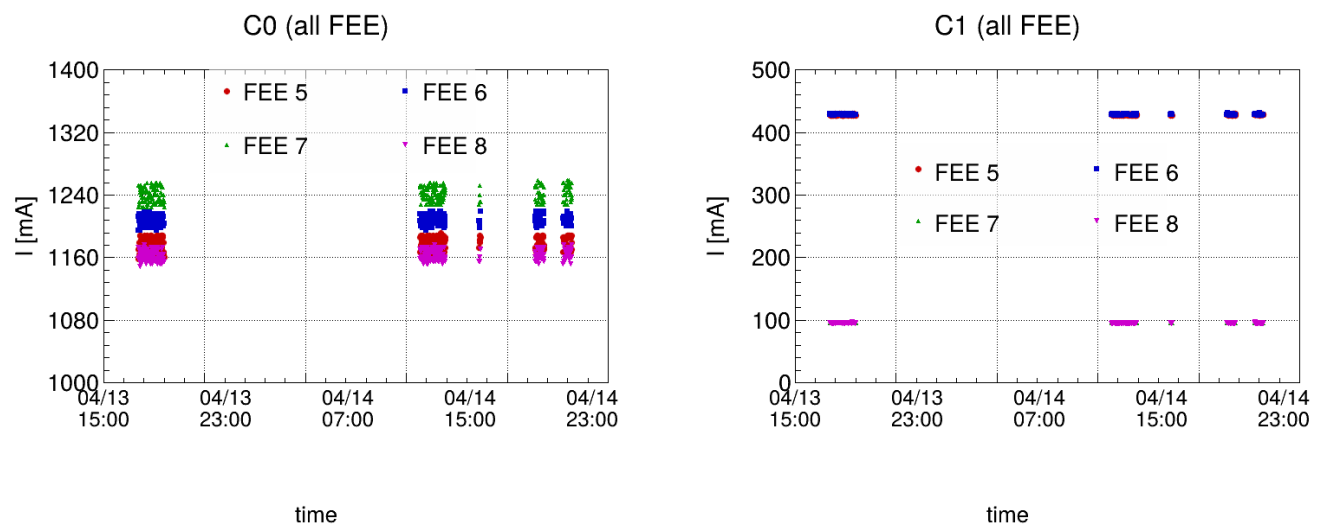
遥测数据

与径迹 CsI 类似，量能器的遥测参数在地检板测试模式下仅随宇宙线数据采集一并下传，故时序曲线呈分段分布，对应各次采集时段，属测试模式所致，非数据异常。量能器读出由多块 FEE（图中 FEE5–

FEE8) 承担, 各配置温度 (T0–T3) 与电流 (C0、C1) 遥测。



温度数据：从各温度测点（T0–T3，含 FEE5–FEE8）的时序曲线看，各 FEE 各测点温度在采集时段内处于约 25–35 °C 区间，四块 FEE 读数彼此接近、趋势一致；各采集段内温度呈轻微上行（数℃量级缓升），与电子学上电工作后的自然温升相符，段间回落至相近起始水平，无异常高温或失控。温度始终维持在量能器正常工作温区内，未见与振动相关的突变。



电流数据：从 C0、C1 两路电流（含 FEE5–FEE8）的时序看，C0 各 FEE 电流稳定保持在约 1160–1260 mA 区间（不同 FEE 因负载差异分层分布，FEE7 略高、FEE8 略低，符合各板固有差异），C1 呈

现两个稳定档位（约 430 mA 与约 95 mA，对应不同 FEE/电源轨配置）。各路电流在振前振后各采集段之间高度重合，段内仅有正常的工作电流抖动，无阶跃跳变或趋势性漂移，未出现因连接松动、短路或器件损伤导致的电流异常。

量能器各 FEE 的温度与电流遥测在三轴振动前后均正常，温度处于合理工作区间、各路电流稳定，进一步佐证了振动后量能器读出电子学工作状态的连续性与可靠性。

5. 实验结论

本报告对 VLAST-P 电磁量能器（Calo）及径迹探测器 Csl 探测层（径迹 Csl）在三轴（Z/X/Y）振动试验前后的工作状态进行了系统分析，以振前两次联调为基准、各轴振动后测试结果对比，涵盖电子学台基、刻度线性、宇宙线 MIP 响应及遥测工作状态四个方面。主要结论如下：

5.1 台基稳定性

径迹 Csl 的 8 个读出单元与量能器主份/备份、高/低增益四组配置下的全部晶体通道，在三轴振动后台基分布均呈清晰对称的单峰高斯结构，高斯拟合良好，未出现双峰、异常长尾或离散噪声峰。径迹 Csl 台基均值约 883–1064 ADC、 σ 约 21–26 ADC；量能器低增益通道 σ 约 3 ADC、高增益通道 σ 约 22–25 ADC，高低增益本底水平折算后相当，均处于各自合理范围。各通道台基均值在振前两次联调高度重合、三轴振动后无阶跃式跳变或系统性单向漂移，仅个别通道存在数 ADC 至 10 ADC 量级的轻微缓变（如径迹 Csl 的 Chn 3、Chn 6，以及量能器高增益通道 σ 的轻微下行），趋势平缓且与遥测温度缓升相符，判断为电子学慢漂移而非机械损伤。全部通道均正常读出，未发现失效通道或噪声异常展宽现象。

5.2 电子学刻度线性

径迹 Csl 与量能器各读出链路的刻度响应在振动前后均表现出良好的线性度与饱和特征：径迹 Csl 斜率约 87.7–88.9 ADC/mV（分散约 $\pm 0.7\%$ ）；量能器低增益约 16–17 ADC/mV、高增益约 167–179 ADC/mV，高低增益比约 10 倍，符合大动态范围双通道读出的设计预期；各链路高偏压段均正常饱和于约 64000–65000 ADC，对应 ADC 量程上限。各通道增益斜率在振前两次联调与三轴振动后各时间点之间高度一致，时序曲线平直，未发现任何台阶式增益跳变或线性度劣化，主份与备份两端增益特性匹配良好。

5.3 宇宙线 MIP 响应

径迹 Csl 全部 8 个单元及量能器主份/备份高增益通道在振动后均能采集到宇宙线 MIP 信号，谱形呈典型朗道分布并可由朗道 $\times$ 高斯函数良好描述。径迹 Csl 的 MPV 分布在约 2074–2368 ADC（均值约 2217 ADC，通道间分散约 $\pm 6.6\%$ ）；量能器高增益 MPV 多集中于约 6000–7400 ADC，主备份结果一致、互为印证。个别通道（径迹 Csl 无、量能器如 Main_High_21/23、Back_High_4/23）因本次短采集统计量偏低，拟合给出贴近下边界（约 4000 ADC）的 MPV 并伴较大不确定度，属低统计量下的拟合偏差而非探测单元失效，其谱形仍可见明确的 MIP 事件分布。整体物理探测链路（晶体发光—光电转换—APD 倍增—前端读出）在三轴振动后保持完好，未出现探测单元失效或响应明显缺失。需说明的是，本次宇宙线数据仅在三轴振动后采集、未建立振前基准，故该部分以振后功能完整性确认为主，MIP 峰位的绝对稳定性与定量漂移评估有待后续在更长曝光、含振前基准的条件下进一步开展。

5.4 遥测工作状态

地检板测试模式下，遥测参数仅随宇宙线采集一并下传，故时序呈分段分布，属测试模式所致而非数据异常。径迹 Csl 的 FEE2 三路电流稳定（C0 约 350 mA、C1 约 347 mA、C2 约 56 mA），4 个温度测点处于约 21–28 °C 常温区间；量能器 FEE5–FEE8 各温度测点处于约 25–35 °C 区间，C0 电流约 1160–1260 mA、C1 呈约 430 mA 与约 95 mA 两档。各路电流在振前振后各采集段之间高度重合，段内仅有正常工作抖动，温度均维持在正常工作温区内并随上电自然缓升，无突变或失控；未出现因连接松动、短路或器件损伤导致的电流异常，电子学工作状态连续可靠。

5.5 综合评价

VLAST-P 电磁量能器与径迹 Csl 探测层在三轴振动试验全程中，台基分布稳定、电子学刻度线性良好、宇宙线 MIP 响应完整、遥测工作状态正常，全部读出通道均功能完好；振前振后未观测到任何由机械应力引起的通道失效、台基突变、增益跳变或宇宙线响应缺失现象，所观察到的个别轻微缓变均可归因于电子学/温度相关的慢漂移而非机械损伤。综合各项分析结果，Calo 与径迹 Csl 载荷顺利通过本次三轴振动试验考核，满足相应级别力学环境试验要求。