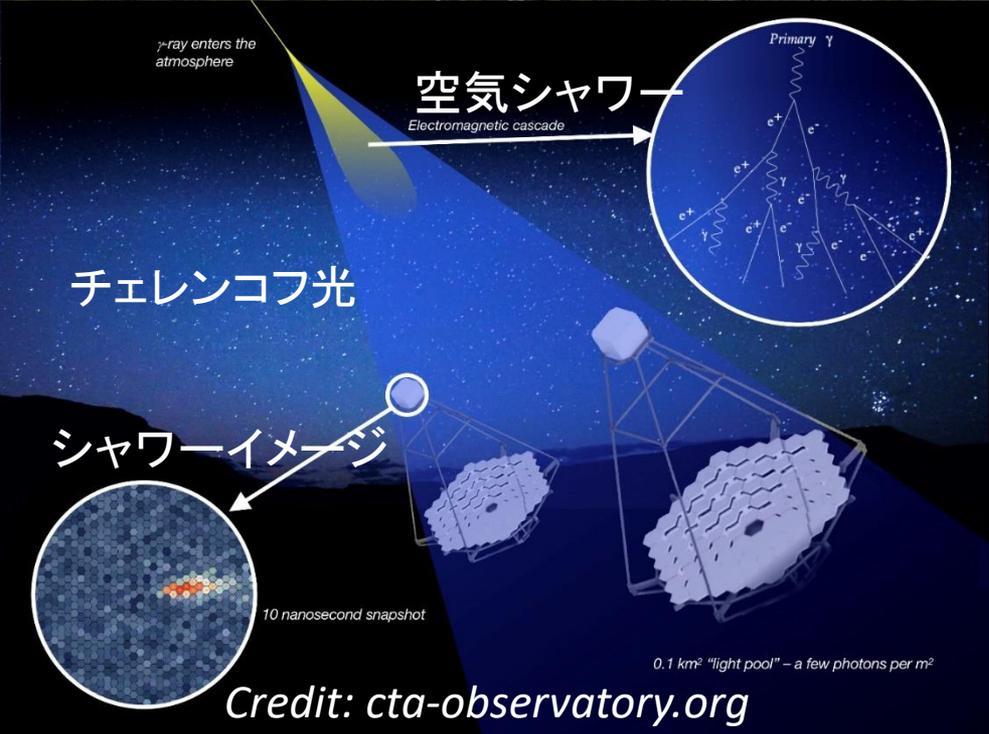


# CTA大口径望遠鏡初号機に おける波形サンプリング時間 幅較正および2-4号機用 カメラの組立・品質管理

野上優人, 片桐秀明, 鈴木萌, 吉田龍生(茨城大), 阿部日向, 稲田知大, 猪目祐介, 岩村由樹, 大石理子, 大岡秀行, 大谷恵生, 岡崎奈緒, 小林志鳳, 齋藤隆之, 榊直人, 櫻井駿介, 高橋満里, 高橋光成, Daniela Hadasch, Daniel Mazin, 手嶋政廣, 野田浩司, 野村亮介, 深見哲志, 吉越貴紀(東大宇宙線研), 今川要, 岡知彦, 梶原侑貴, 窪秀利, 野崎誠也, 増田周(京都大), Anatolii Zenin, 奥村暁(名古屋大), 折戸玲子(徳島大), 緒方智之, 櫛田淳子, 生天目康之, 西嶋恭司, 原田善規, 古田智也(東海大), 郡司修一, 門叶冬樹, 中森健之(山形大), 佐々木寅旭, 砂田裕志, 立石大, 寺田幸功, 永吉勤(埼玉大), 田中真伸(KEK 素核研), 川村孔明, 川島翔太郎, 塚本友祐, 田村謙治, 町支勇貴, 山本常夏(甲南大), Antonios Dettlaff(マックスプランク物理), 千川道幸, 藤原千賀己(近畿大),  
他CTA-Japan consortium, 池野正弘(KEK 素核研, Open-it)

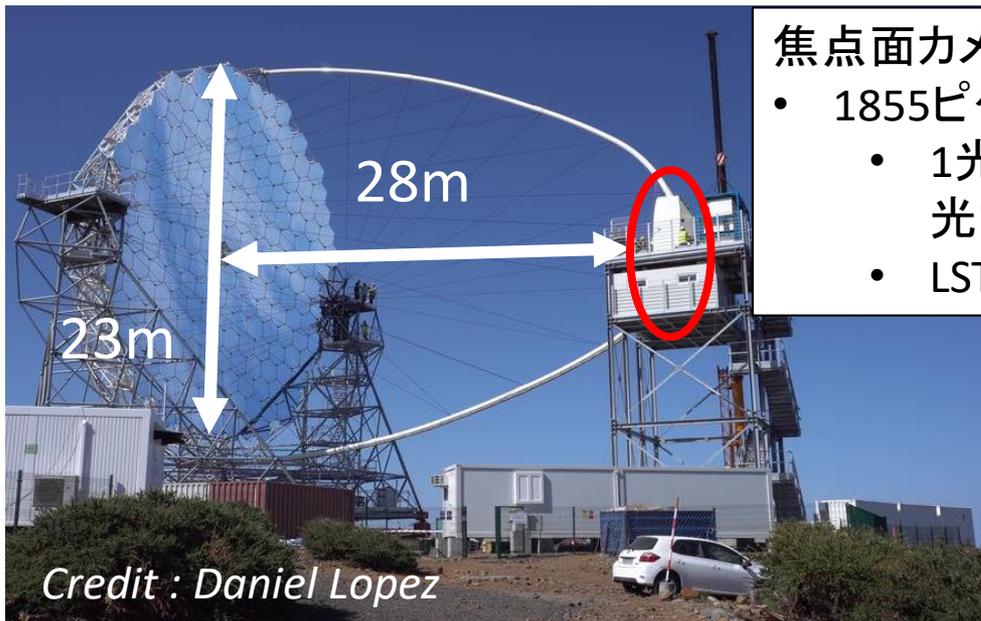
# Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画



- 口径の異なる3種類の大気チェレンコフ望遠鏡をスペイン領 ラ・パルマ島とチリパラナルに合計で約100台を設置することで、20 GeVから300 TeVのガンマ線を観測する。

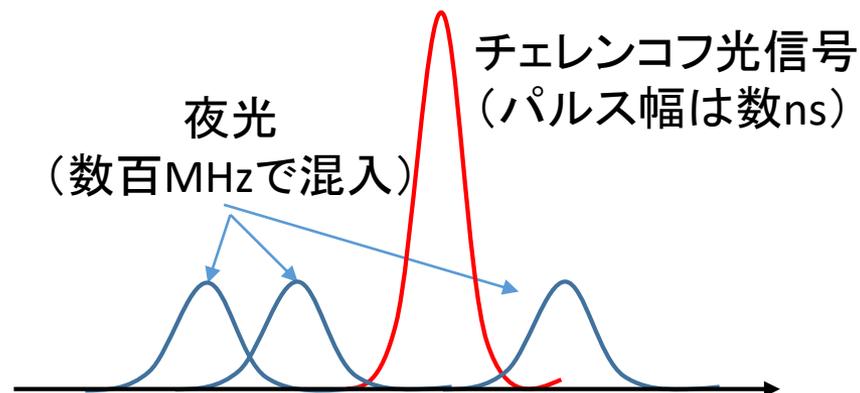
- 高エネルギーガンマ線が大気に突入することにより空気シャワーが生じる。
- 空気シャワーで生成された荷電粒子が大気中の光速を超える速度で走ることによってチェレンコフ光が放射される。
- 反射鏡でチェレンコフ光を焦点面のカメラに集光し波形読み出し。
- シャワーイメージと総光量よりガンマ線の到来方向とエネルギーを推定する。

# CTA 大口径望遠鏡 (LST)



## 焦点面カメラ

- 1855ピクセルから成る
  - 1光検出器モジュールあたり光電子増倍管×7個
  - LST1台あたり265モジュール



- 要求仕様
  - エネルギー領域: 20 GeV-3 TeV
  - 視野: 4.5度
  - 夜光の影響を抑えるためにGHzサンプリング可能な読み出し回路
  - 電荷分解能は0.2 – 1000 p.e.で5%以下
    - 電荷分解能を上げることで、ガンマ線のエネルギー推定等の精度が向上
- 2018年秋に1台目の建設が完了し、現在は科学運用に向けて調整中

# 本発表で報告する研究の目的

1. LST読み出し回路のサンプリング時間幅の揺らぎを較正  
→ 電荷分解能を要求仕様である5%以下に抑える。
2. LST2-4号機に必要な光検出器モジュールは795個  
→ 量産されたモジュール~1000個分の光電子増倍管、波形読み出し回路の組立て  
→ 組み立てたモジュールのうち要求性能を満たすものを選別

$$\sigma_Q/Q = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{ENF}^2 Q + \sigma_g^2 Q^2 + \sigma_s^2 / Q^2}$$

$\sigma_0^2$ : 夜光込みの電磁ノイズ揺らぎ

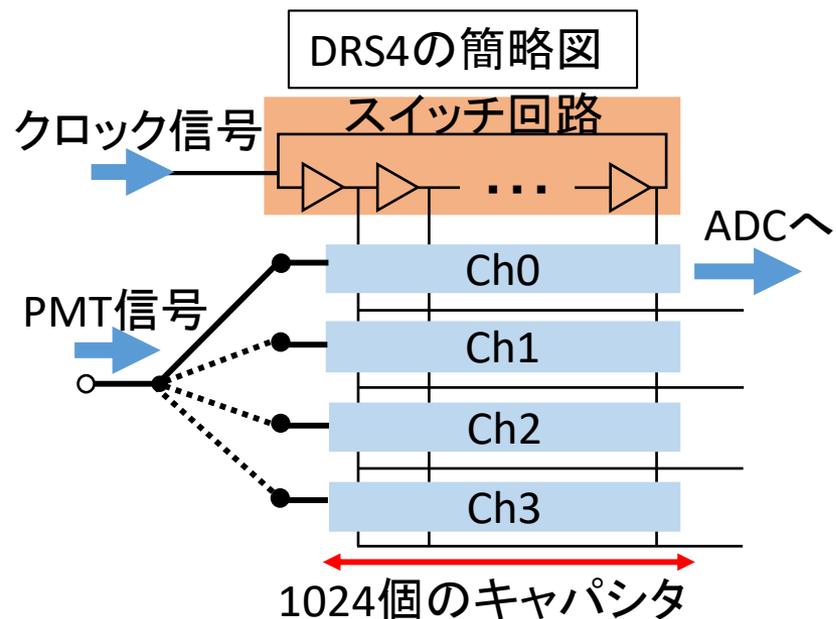
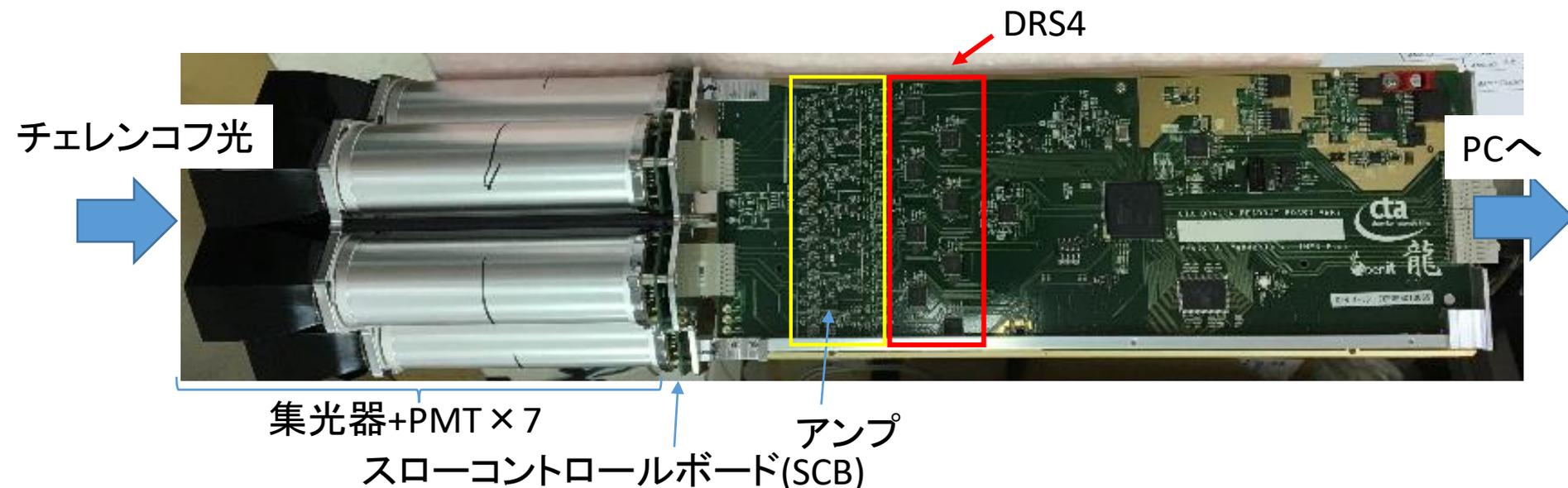
$$\sigma_{ENF} = 1 + ENF$$

( $ENF$ : Excess Noise Factor)

$\sigma_g$ : PMTゲインの揺らぎ

$\sigma_s$ : サンプリング時間幅由来の揺らぎ

# LSTの光検出器モジュール



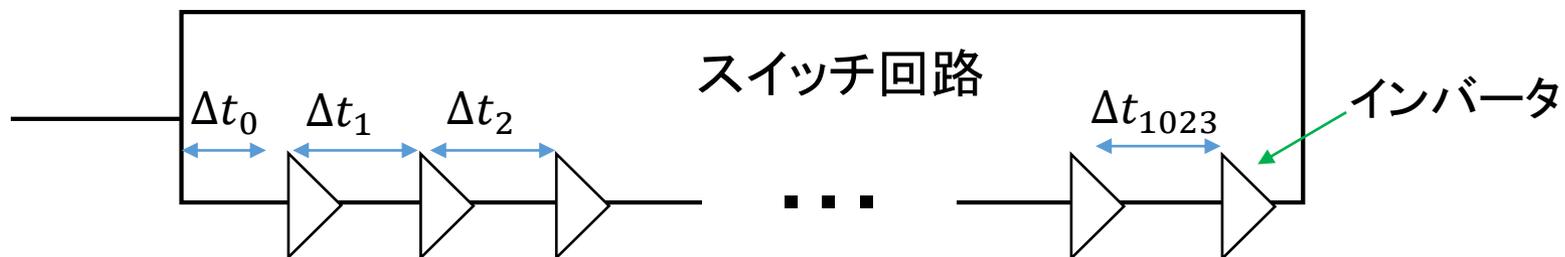
## アンプ

- 異なる増幅率によりPMTからの信号を2系統に分割(以降は高/低ゲイン系統と表記)  
→0.2 – 1000 p.e.のダイナミックレンジを確保

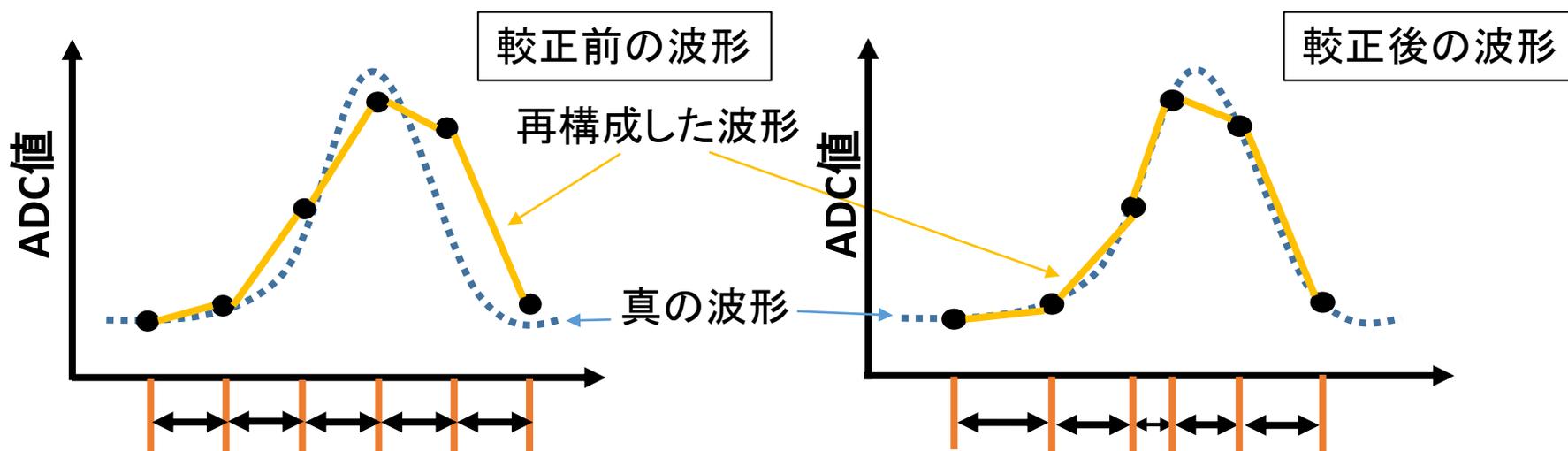
## Domino Ring Sampler 4 (DRS4)

- アナログメモリ(低消費電力)
- 1GHzでサンプリング
- 入力信号に対しての~4usメモリ深さ
- サンプリング時間幅に揺らぎが存在

# サンプリング時間幅の揺らぎ



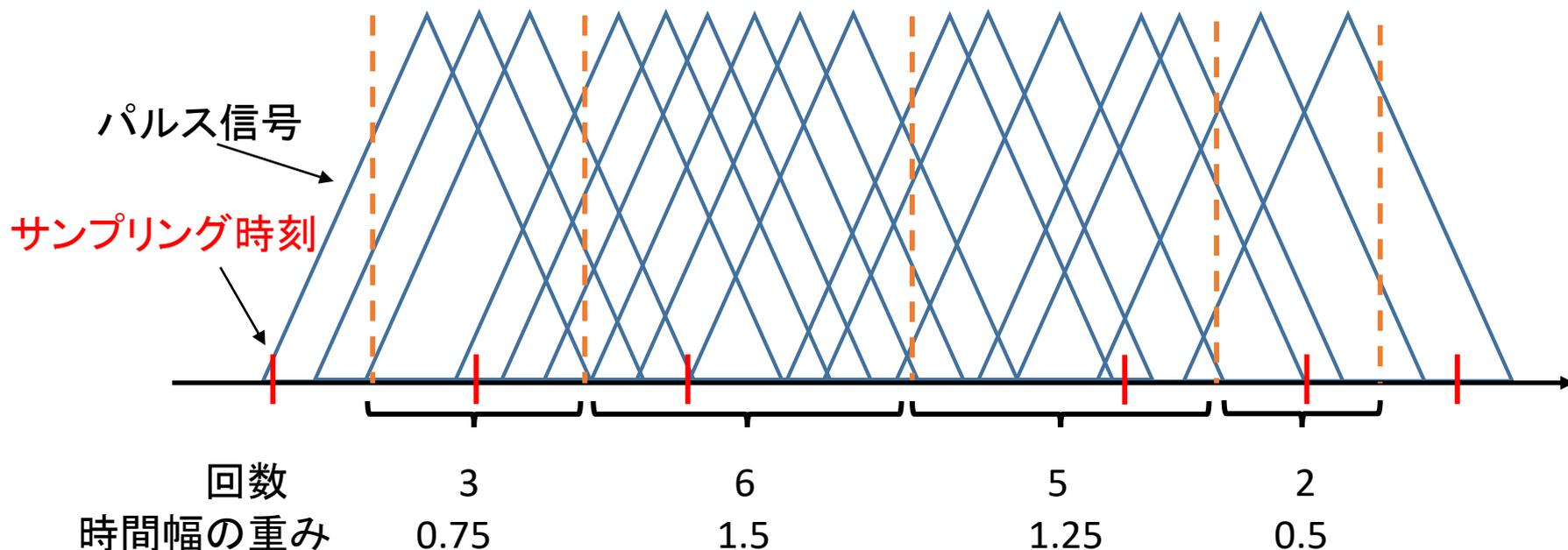
- DRS4の波形サンプリングは1024個のインバータで制御
  - $\Delta t_i \neq \Delta t_j$  ( $\Delta t_i$ : サンプリング時間幅)



- 等間隔として再構成すると波形が歪み、電荷量の推定を誤りガンマ線源の位置やガンマ線のエネルギーの推定に影響が出てしまう。  
→サンプリング時間幅の揺らぎに対する補正が必要

# サンプリング時間幅の較正方法

- テストパルスを読み出し回路へランダムに～100万発入力
- DRS4の各キャパシタでパルスのピークを捉えた回数で重みづけ
  - サンプリング時間幅が広いとピークを捉える回数が多くなる



$$\Delta w_i = \frac{n_i}{N_{total}} \times N_{cap}$$

$\Delta w_i$ : 時間幅の重み

$N_{total}$ : 総パルス数

$n_i$ : キャパシタでのパルス数

$N_{cap}$ : キャパシタ数 [/1ch]

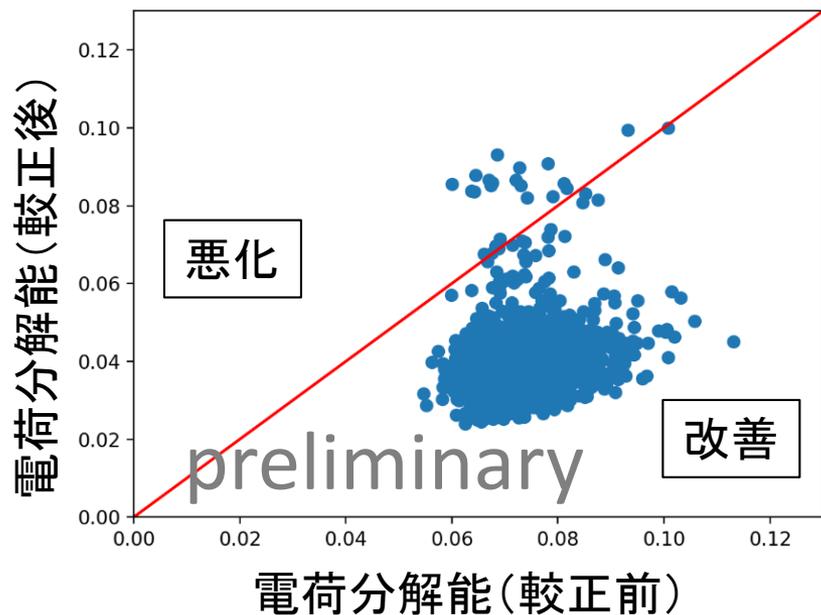
# 較正結果

- 時間幅較正の前後で電荷分解能を比較すると、
  - 高ゲイン系統: 平均で7.8% ( $\pm 8.4$ )  $\rightarrow$  **4.4%** ( $\pm 7.6$ )  
(50 p.e.相当の波高値の擬似パルスを使用)
  - 低ゲイン系統: 平均で5.5% ( $\pm 0.6$ )  $\rightarrow$  **3.2%** ( $\pm 0.7$ )  
(500 p.e.相当の波高値の擬似パルスを使用)

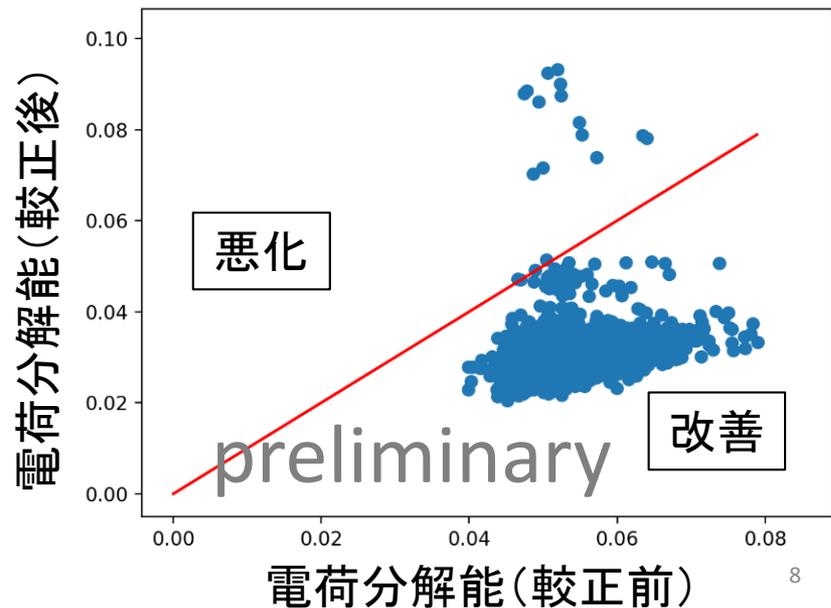
**$\rightarrow$  要求仕様である電荷分解能5%以下を満たしている！**

(低い電荷ではポアソン統計による揺らぎが大きいため各系統で分解能に差ができてしまう)

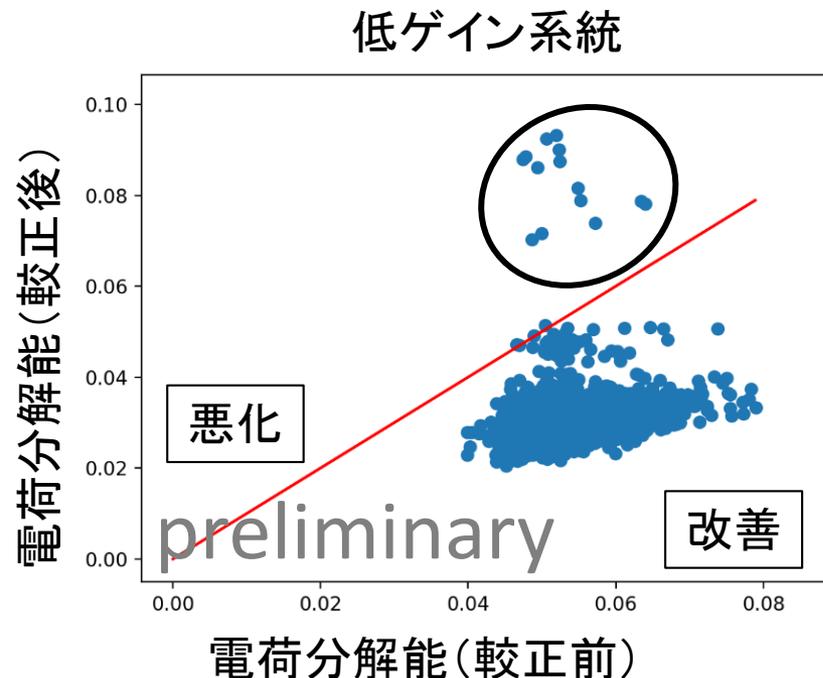
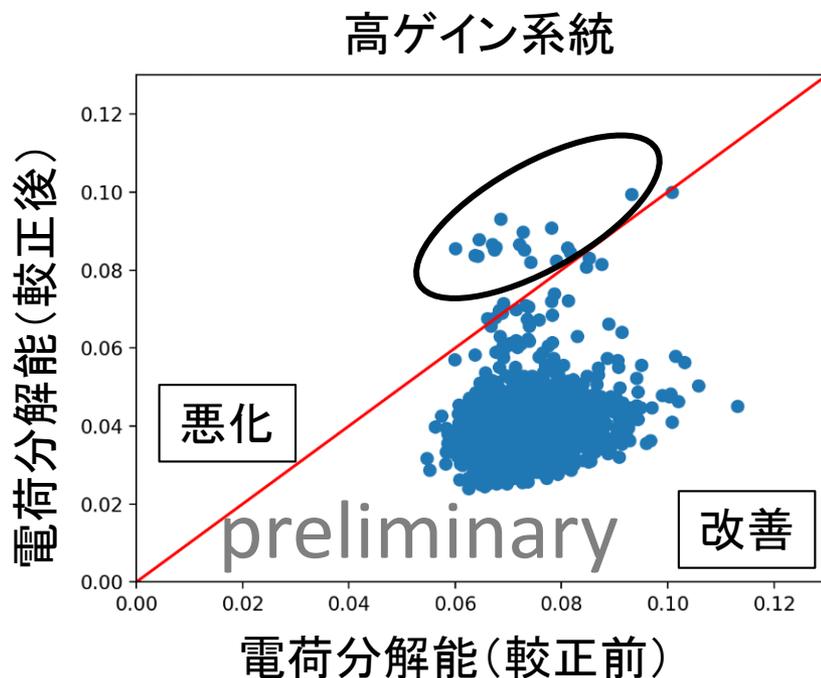
高ゲイン系統



低ゲイン系統 (赤線: 傾き1の直線)



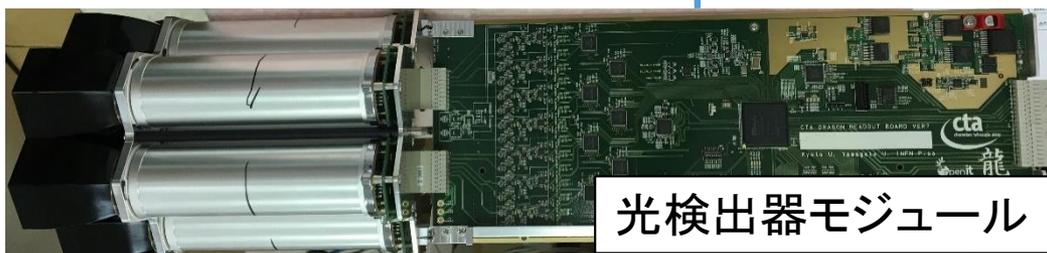
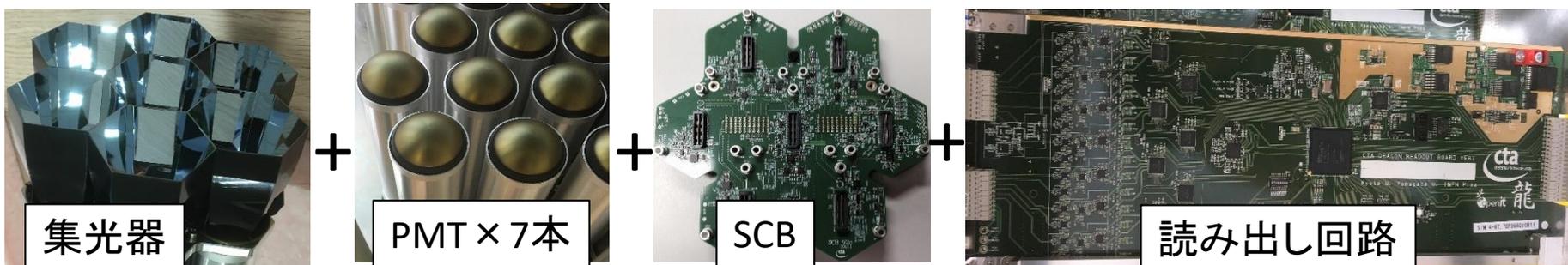
# 較正結果



- 一部のピクセル(黒丸)では、時間幅の較正後に分解能が悪化している。
  - 原因については現在調査中。
- 今回の較正はLSTの天体観測データの解析に組み込んでいる最中。
- 今後は他の光量についても要求仕様を満たすか検証が必要。

# LST 2-4号機用の光検出器モジュールの組立と品質管理

- 2-4号機用の光検出器モジュールの組立て・品質管理を~1000個分行う予定。
- 光検出器モジュールは集光器、光電子増倍管、スローコントロールボード (SCB)、読み出し回路から成る。



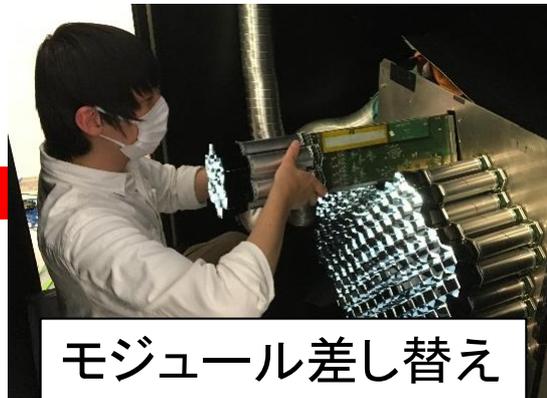
- 2-4号機に必要な分である795モジュールの組立てが完了！  
(219モジュールは日本にて組立て済み)



# カメラモジュールの性能評価

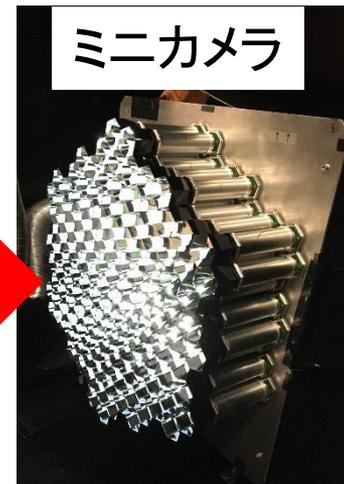
- 19カメラモジュール単位(ミニカメラ)で以下の項目を測定。
  - 1光電子測定
  - 多光電子測定
  - HV-Gain curve
  - パルス幅測定
  - Linearity
  - アフターパルス
- これまでに420モジュールの測定が完了し、うち基準を満たしたのは386モジュール、つまりLST1台分以上のカメラはOK！
  - 残ったモジュールの測定及び基準を満たさなかったモジュールのデバッグについては来年度以降実施

暗箱



モジュール差し替え

ミニカメラ



# まとめ

1. LSTの信号読み出し回路に用いているGHz波形サンプリング素子DRS4には時間幅の揺らぎが存在し電荷分解能に影響を与える。  
→ LST初号機において、～100万発のテストパルスを用いて時間幅の揺らぎを補正  
→ 50 p.e. 及び 500 p.e. において、較正によってほぼすべてのピクセルで電荷分解能が要求仕様を満たした。
  - 較正後に一部のピクセルで分解能が悪化した原因は調査中。
  - LSTの天体観測データの解析に組み込んでいる最中
2. LST2-4号機用光検出器モジュールの組立・品質管理  
→ 1000モジュール(2-4号機分以上)の組立では完了！  
→ LST1台分のモジュールは基準を満たしていた。
  - 未測定のコモジュール及び基準を満たなかったモジュールのデバッグは来年度以降実施
  - 2022年度までにLST2-4号機は建設完了予定