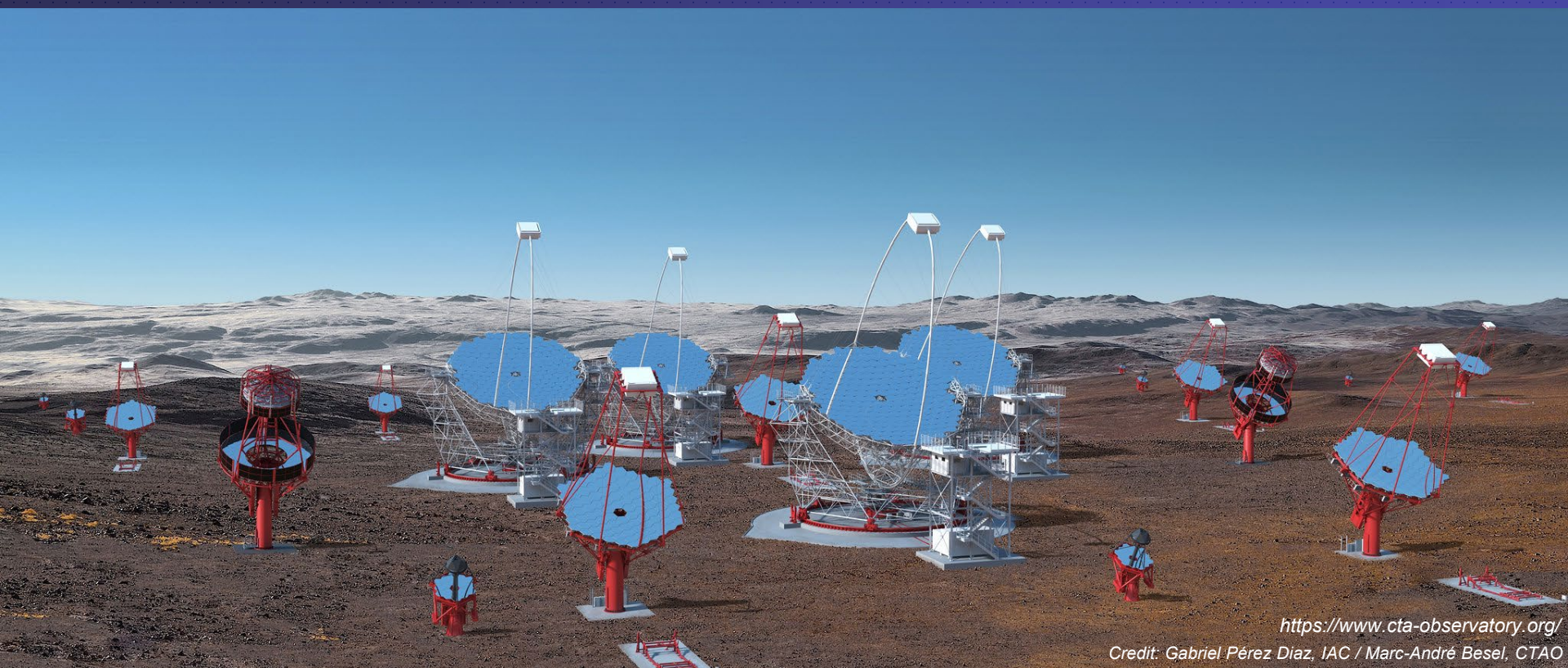


# 超高エネルギーガンマ線天文台CTA計画

窪 秀利（東大宇宙線研） 他CTA Consortium



<https://www.cta-observatory.org/>

Credit: Gabriel Pérez Díaz, IAC / Marc-André Besel, CTAO

- E01 窪秀利 (ICRR) 「超高エネルギーガンマ線天文台CTA計画」
- E02 山本常夏 (甲南大理) 「CTA大口径望遠鏡の焦点面検出器開発」
- E03 窪秀利 (ICRR) 「CTA大口径望遠鏡用読み出し回路の開発」
- E04 Daniel Mazin(ICRR)「CTA大口径望遠鏡LST-1運用, LST2-4建設」
- E05 Daniela Hadasch(ICRR)「CTA北サイトのオンサイトデータセンター運用とアップグレード」
- E06 齋藤隆之 (ICRR) 「CTA大口径望遠鏡のためのSiPMモジュール開発3」
- E07 Ievgen Vovk (ICRR) 「CTA-LST望遠鏡制御システム開発」
- E08 野田浩司 (千葉大) 「CTA大口径望遠鏡 光学系と電源系の保守・運用」
- E09 井岡邦仁 (京大基研)「CTA-Japan 物理研究」
- E10 武石隆治 (ICRR) 「CTA大口径望遠鏡のデータ解析手法の確立と初期観測」
- E11 田島宏康 (名大ISEE)「CTA小型望遠鏡用カメラの開発」
- E12 大石理子 (ICRR) 「CTAモンテカルロシミュレーション」
- E13 櫛田淳子 (東海大理) 「大口径大気チェレンコフ望遠鏡を用いたニュートリノ放射源天体の探索」
- 
- E17 Marcel Strzys (ICRR) 「CTAバックグラウンド再構成ツール開発」
- F01 手嶋政廣 (MPP)  
国際枠 「CTA 大口径望遠鏡分割鏡・カメラ窓の高性能化へ向けての開発研究」

CTA

- E15 窪秀利 (ICRR) 「MAGIC望遠鏡を用いた高エネルギーガンマ線天体の研究」 MAGIC

研究会のE14(吉田龍生)とE16(林航平)を除き、

計16件 査定額857万円(その他物件費198万円+旅費659万円)  
ラパルマ+柏 旅費

25か国  
>1500名



CTA-Japan 126名

東大  
宇宙線研

浅野勝晃, 阿部正太郎, 栗井恭輔, 糸川拓海, 猪目祐介, 笛吹一樹, 大石理子, 大岡秀行, 大谷恵生, 窪秀利, 齋藤隆之, 武石隆治, 手嶋政廣, バクスター・ジョシュア・稜, 橋山和明, 吉越貴紀, Daniela Hadasch, Daniel Mazin, Marcel Strzys, levgen Vovk, Paul K. H. Yeung

青山大 大林花織, 佐藤優理, 田中周太, 山崎了, 吉田篤正  
茨城大 片桐秀明, 佐藤寛太, 柳田昭平, 吉田龍生  
宇宙研 林克洋  
大阪大 井上芳幸, 松本浩典, Ellis Owen

(以下共同研究員) 稲田知大, 岡知彦, 櫻井駿介, 高田順平, 野崎誠也, 広谷幸一, 深見哲志, 村瀬孔大, K.S.Cheng, Xiaohong Cui, Timur Dzhatdov, David C.Y. Hui, Albert K.H. Kong, Pratik Majumdar, Thomas P. H. Tam, Wenwu Tian, Lihong Wan

神奈川大 辻直美  
北里大 村石浩  
岐阜大 佐野栄俊  
京大基研 井岡邦仁, 石崎涉  
京大理 鶴剛, 寺内健太, 李兆衡  
熊本大 高橋慶太郎  
KEK素核研 田中真伸

東大理  
都立大  
東北大  
徳島大  
富山大  
名大理  
名大ISEE

大平豊, 戸谷友則, 馬場彩  
川中宣太, 藤田裕  
當真賢二  
折戸玲子  
廣島 渚  
立原研悟, 早川貴敬, 福井康雄, 山本宏昭  
奥村暁, 重谷優斗, 河原崎琉, 高橋光成, 田島宏康, BANG SUNGHYUN

甲南大 井上剛志, 鈴木寛大, 田中孝明, 千川道幸, 溝手雅也, 山本常夏

广大先理工

今澤遼, 榎木大修, 木坂将大, 須田祐介, 高橋弘充, 深沢泰司

国立天文台 郡和範  
埼玉大 勝田哲, 清本拓人, 立石大, 寺田幸功

广大宇宙科学センター 水野恒史

宮崎大  
山形大

森浩二  
郡司修一, 坂本貫太, 門叶冬樹, 中森健之

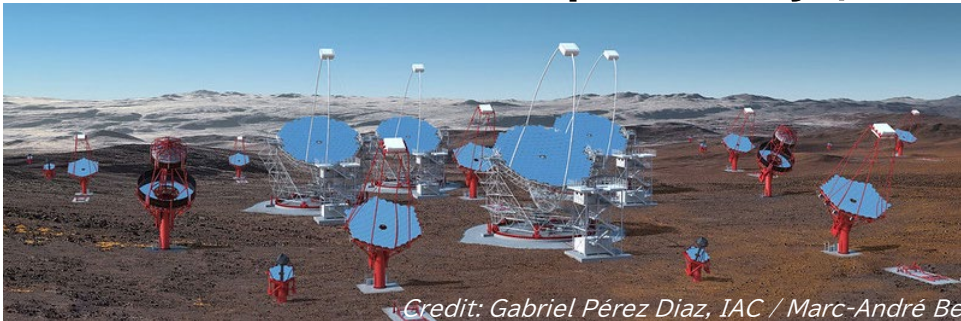
仙台大専 加賀谷美佳, 林航平  
千葉大 井上進, 小林志鳳, 野田浩司  
東海大 阿部和希, 韓天舒, 櫛田淳子, 佐々誠司, 高橋菜月, 西嶋恭司, 姚屹

山梨学院大  
理研  
立教大  
早稲田大

内藤統也, 原敏  
長瀧重博, 榊直人, 澤田真理, Maxim Barkov, Gilles Ferrand, Haoning He, Donald Warren  
内山泰伸, 林田将明  
片岡淳



## Cherenkov Telescope Array (CTA)



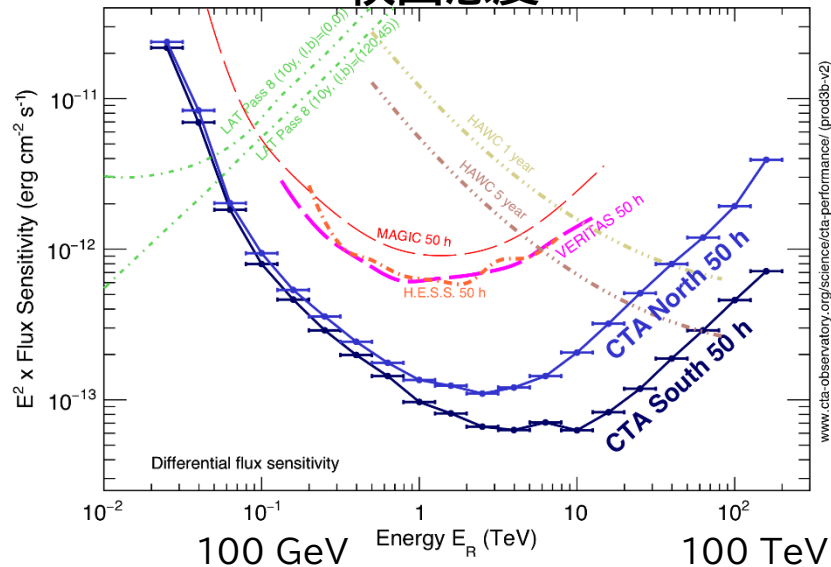
従来の望遠鏡より

- ◆ **一桁高い感度**  
短時間**4-5桁**高い感度(対Fermi-LAT)
- ◆ **一桁広い帯域**(20 GeV-300 TeV)
- ◆ **角度分解能~2倍**(2分角@10TeV)

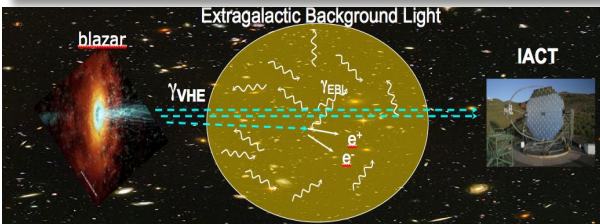
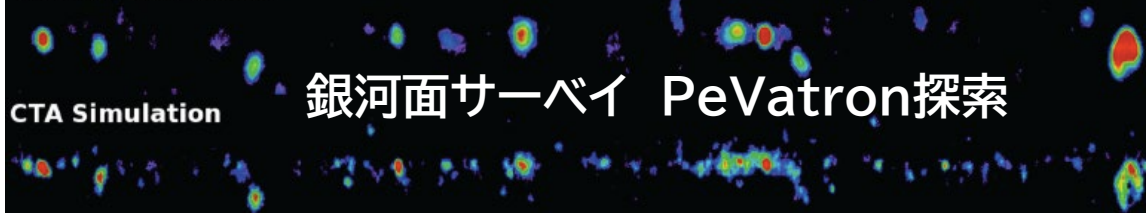


- 検出天体 **274個**(現在)  
TeVCatカタログ  
⇒ **1000個以上**
- 最遠  $z=1.1$ (GRB201216C)  
⇒  $z \sim 4$

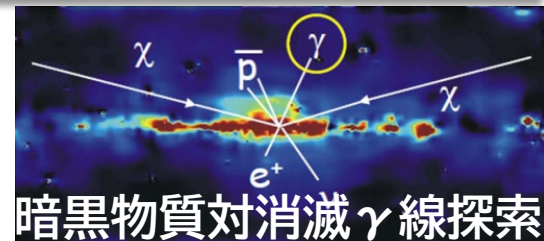
## 検出感度



H.E.S.S. Simulation



赤外・可視背景放射 → 宇宙の星形成史

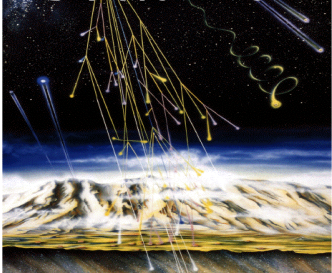


ローレンツ不変性検証

• 特集号 *Astroparticle Physics*, 43 (2013)1-356

• Key Science Project (開始10年の4割) 検討書 arXiv:1709.07997 4

宇宙線起源



ブラックホール  
物理・ジェット  
形成





**LST**×(北4+南4)  
**23 m**口径  
20 GeV - 3 TeV  
FOV=4.5°

**MST**×(北15+南25)  
**11.5 m/9.7 m**口径  
80 GeV - 50 TeV  
FOV=7.5~7.7°

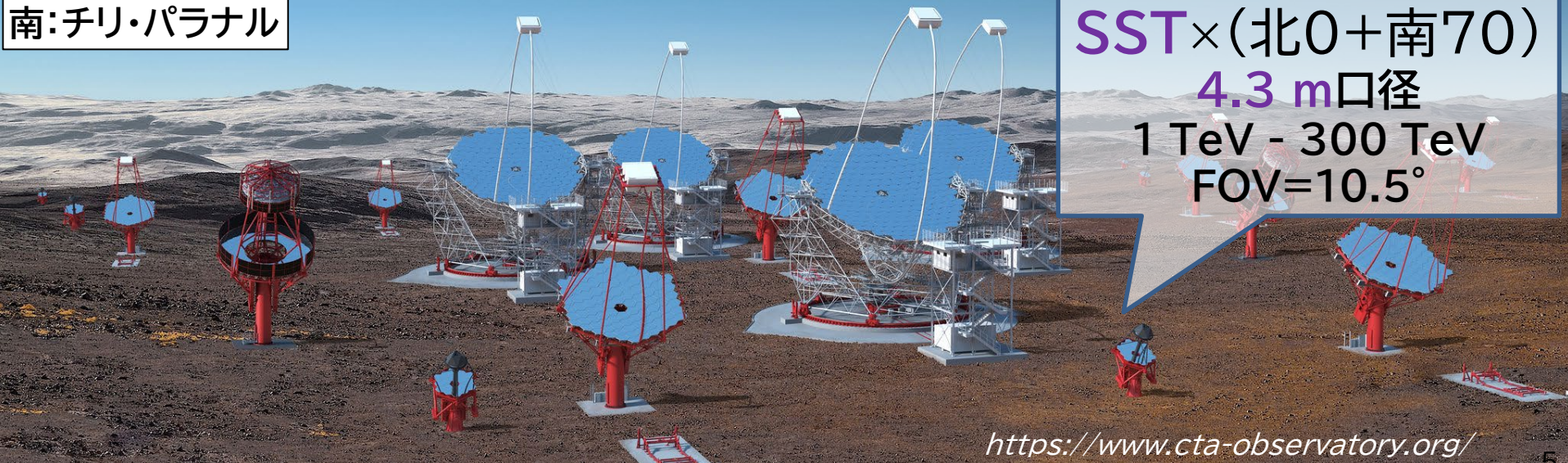
2016年~北サイト建設  
2022年~南サイト建設  
2029年 北アレイ完成  
2029年 南アレイ完成  
運用期間 >20年間

完成予想図

北:スペイン・ラ パルマ島



南:チリ・パラナル



**SST**×(北0+南70)  
**4.3 m**口径  
1 TeV - 300 TeV  
FOV=10.5°

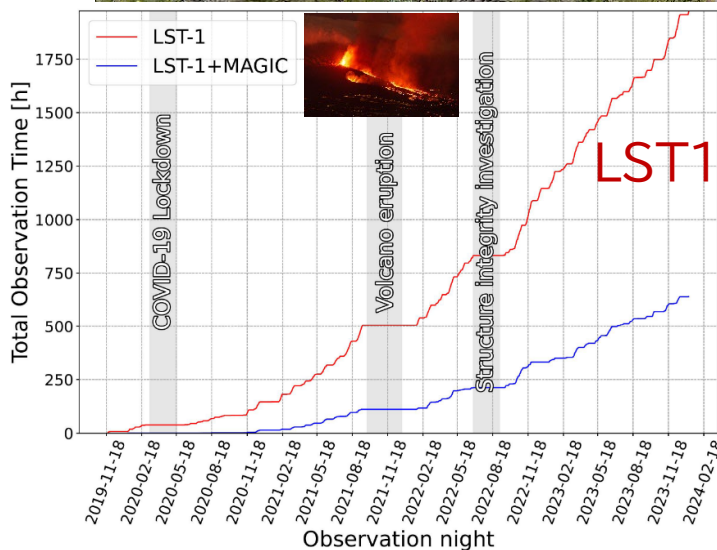


# 大口径望遠鏡(LST)初号基@スペイン・ラパルマ島

ロケ・ムチャチョス 天文台(ORM) @2200m



積算時間数



科学観測 2020年1月から1800時間以上

スペイン外からのリモート運用  
(2021年1月~2022年12月)

【観測結果は、次の武石講演】

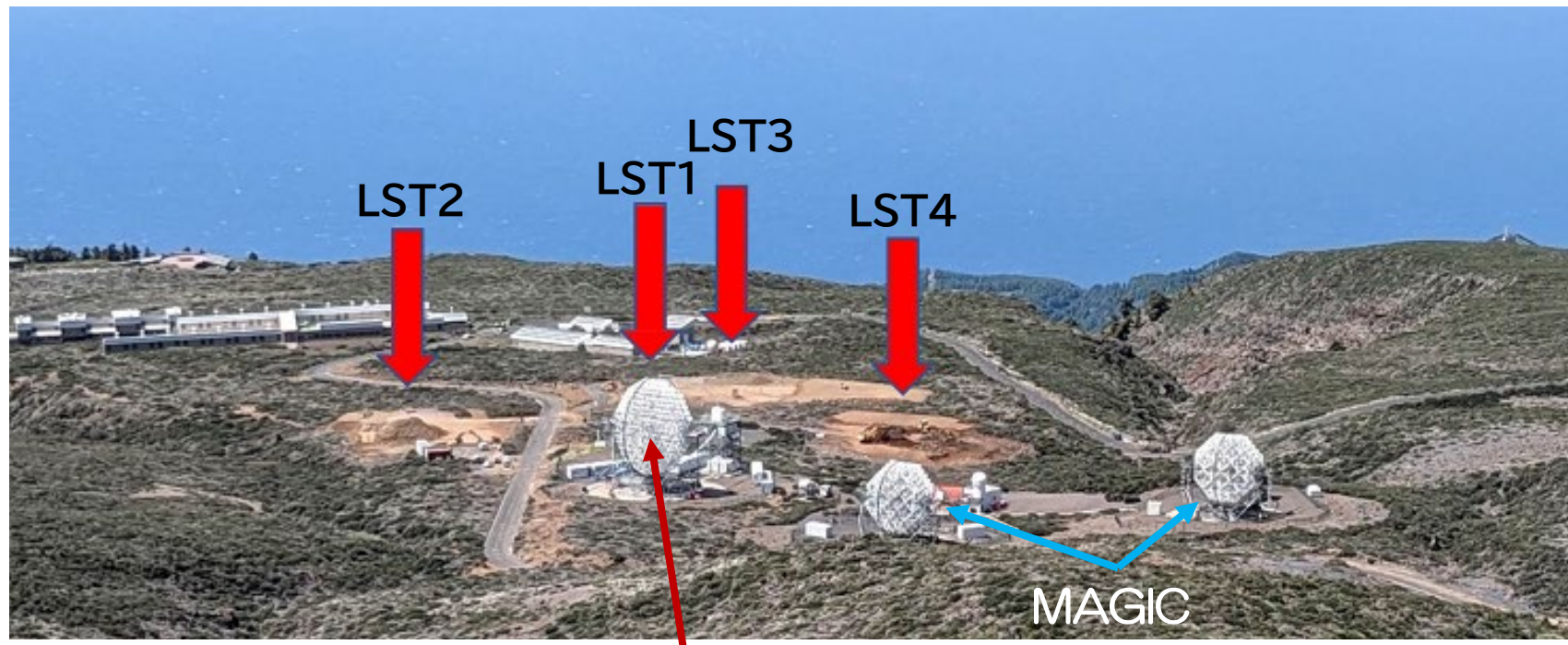
LST1単独

LST1と  
MAGIC  
同時観測  
(3割)

# LST 2-4号基@ラパルマ 建設状況

- 2022年11月 基礎工事開始

Mazin(ICRR)





# LST 2-4号基@ラパルマ 建設状況

昨年6月

LST-4 construction site



LST-4 construction site



LST-3 construction site



LST-2 construction site





# LST 2-4号基@ラパルマ 建設状況



昨年11月





# LST 2-4号基@ラパルマ 建設状況

先週

LST-4

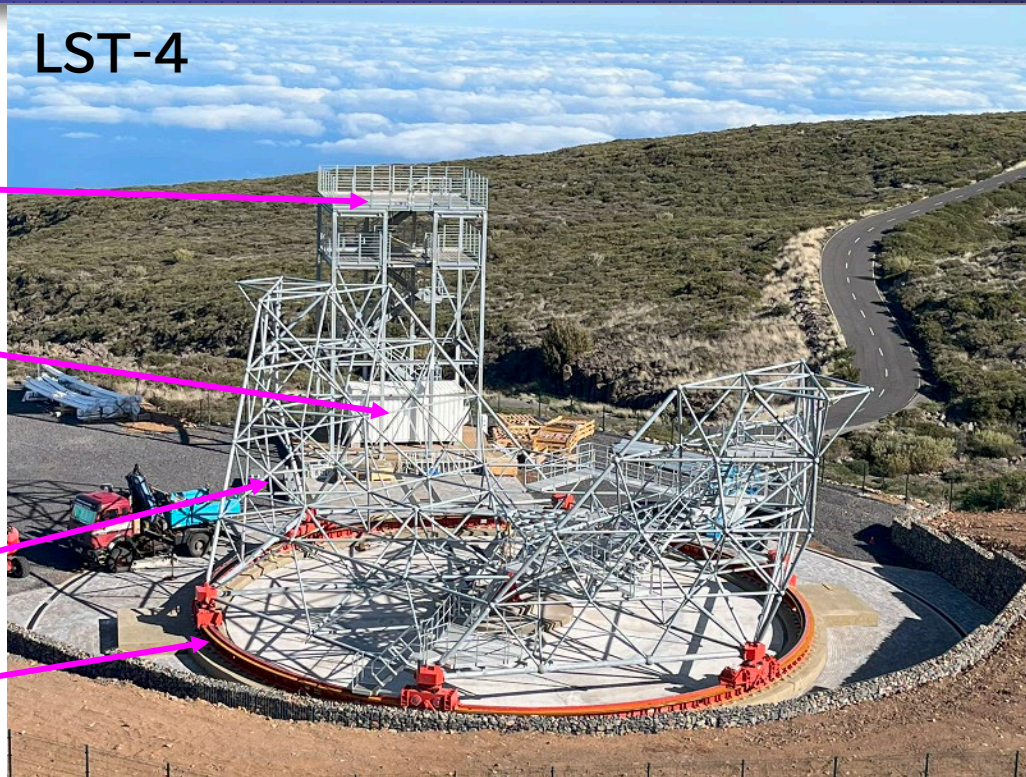
Mazin(ICRR)

カメラアクセスタワー  
(高さ13m)

フライホイール収納庫  
(望遠鏡高速駆動電源)  
180度/20秒

望遠鏡構造体下部

望遠鏡回転レール



LST-3



LST-2





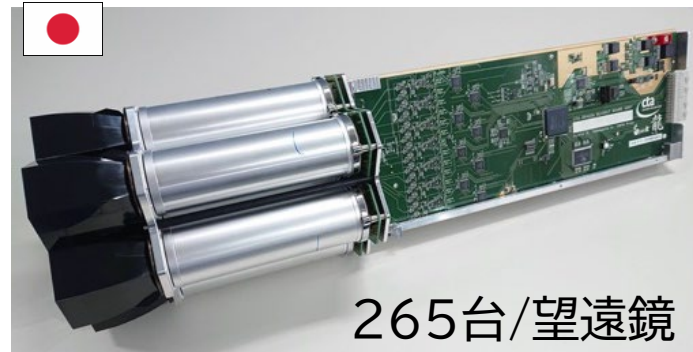
# LST 2-4号基 準備状況:カメラ・光学系

LST-2@テネリフェ島

全系試験中   

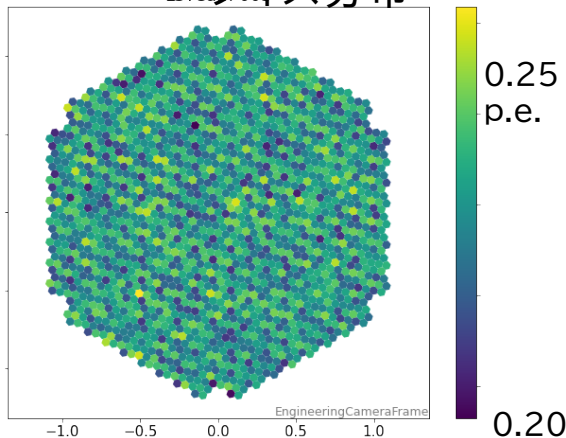
山本(甲南大)、窪(ICRR)

PMT 7本+GHz波形記録回路



265台/望遠鏡

ノイズ分布



LST-3@テネリフェ島

全系試験中

LST-4@テネリフェ島

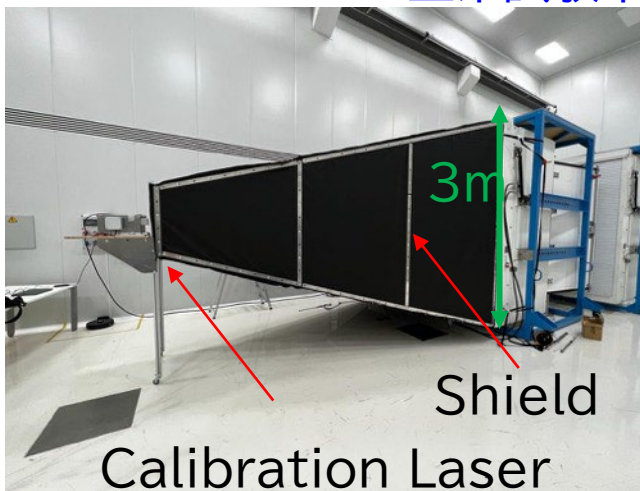
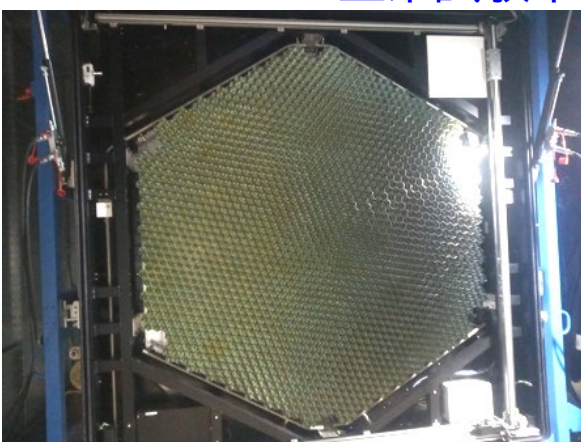
全系試験中

分割鏡 3台分630枚

野田(千葉大)



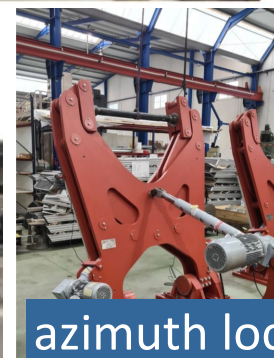
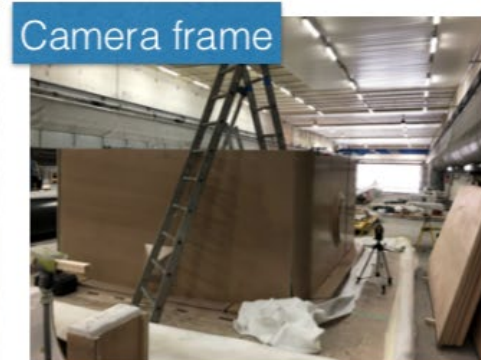
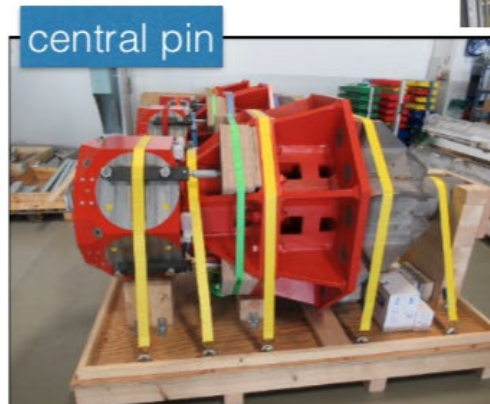
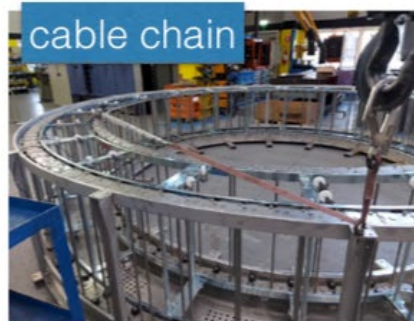
@ラパルマ倉庫



望遠鏡へ取付予定:分割鏡 2024~2025年度、カメラ 2025年度



# LST 2-4号基 準備状況:外国グループ担当

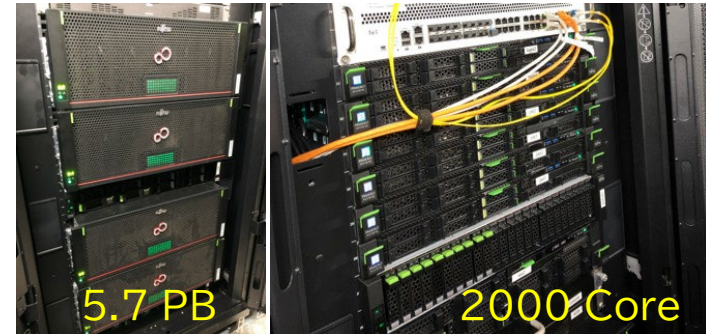


2-4号基 現地建設並行⇒2025年度完成⇒LST 4基アレイによる観測



## Commissioning and Upgrade

- Array Control and Data Acquisition (ACADA) System to be integrated to the LST-1 computing system.
  - First integration tests and commissioning successfully done in FY2023.
  - LST IT experts (ICRR) and ACADA experts worked onsite together for successful integration. Servers were prepared in advance remotely from ICRR.
- IT center is being prepared to connect these three new telescopes (LST2-4) to the network and all necessary subsystems to control and steer the telescopes.
  - Each telescope will be equipped with 2 high-performance servers with 32 cores, 256 GB memory and 3TB disk space each located in dedicated containers (Drive containers). Offers for these machines have been requested.
  - Control and Management networks were getting extended to these Drive containers for regular operations.
- Organization of hardware spare parts to keep the IT cluster running after end of lifetime of certain machines.



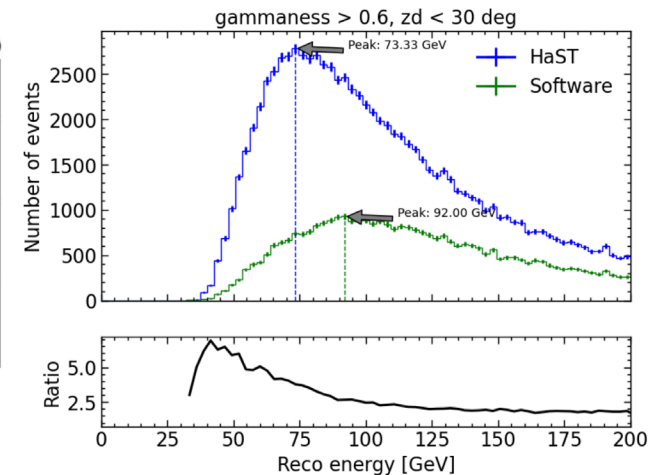
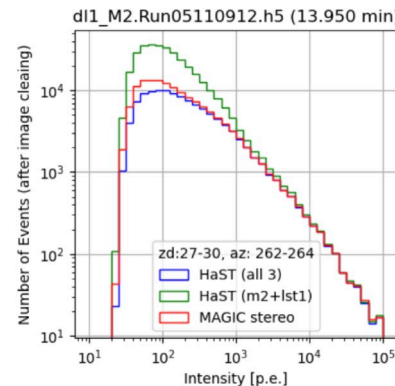
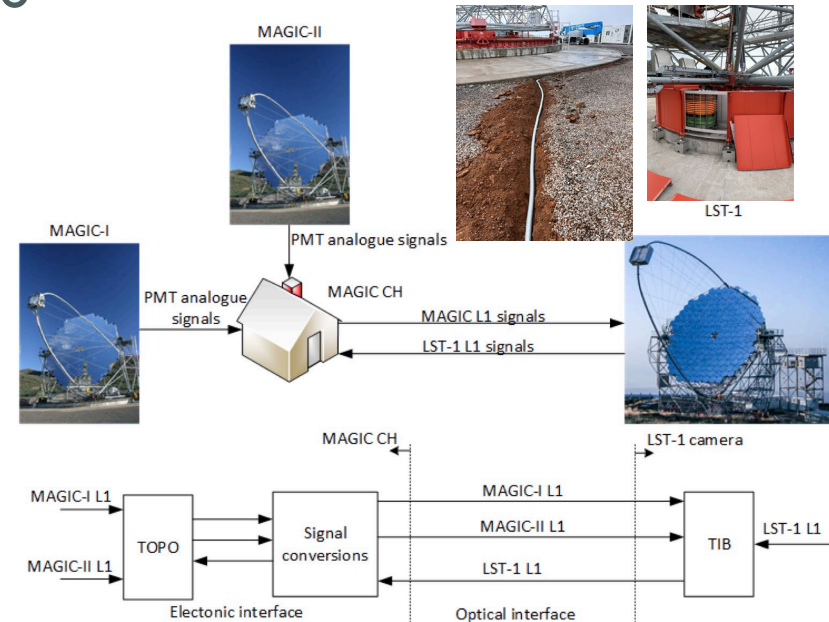
- We have developed a novel hardware stereo trigger system between LST-1 and MAGIC, which is capable of **handling events triggered by any-two out of the three telescopes**
- The system contributes to **lowering the energy threshold**, further **improving the sensitivity** of the IACT system

Important update from last year

A new hardware Stereo Trigger between MAGIC and LST

First Observation with the Hardware Stereo Trigger

- Test Observation conducted on Crab Nebula (Nov, Dec. 2023)
- Data analysis performed with dedicated pipeline



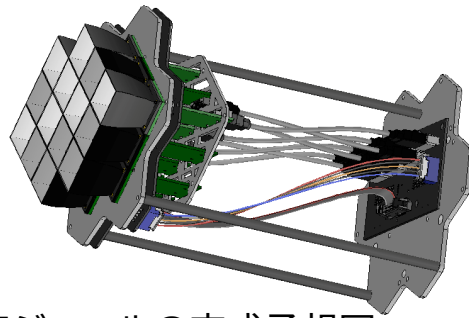
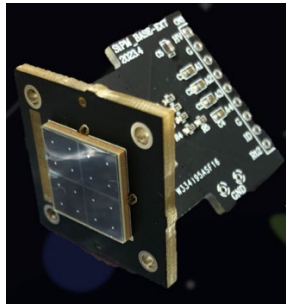
**Confirmed Triggering**

**Lowering the energy threshold !**



## 目的:

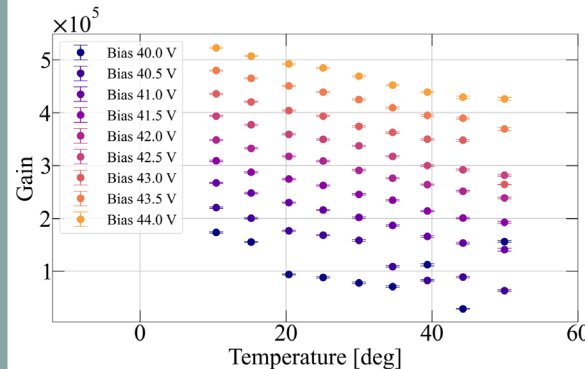
- 感度向上のため、カメラの画素数をあげ、センサーをSiPMにすることを検討
- 現行のPMTモジュールと**交換可能なSiPMモジュール**を開発し、SiPMの性能を現場で確認する
- 今年度の課題は、**ゲインの温度補償回路**の開発と、**波形整形回路**の開発



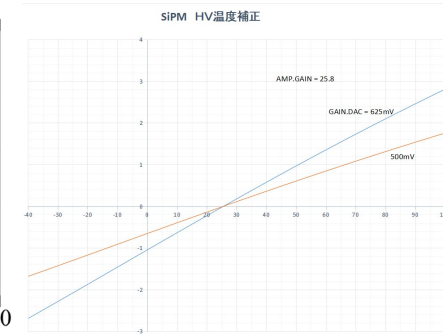
テスト用読出基板 モジュールの完成予想図

## ゲインの温度補償

- $\sim 1\%/deg$  の温度依存性
- サーミスターを組み込んだブリッジ回路でバイアス電圧を補正
- 実機による検証は進行中



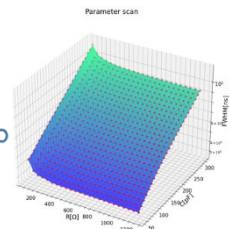
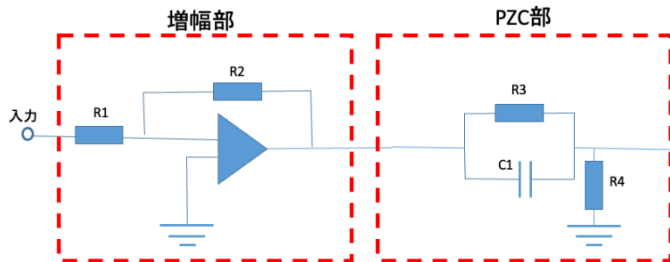
バイアス電圧を変化させた時のゲインの温度依存性



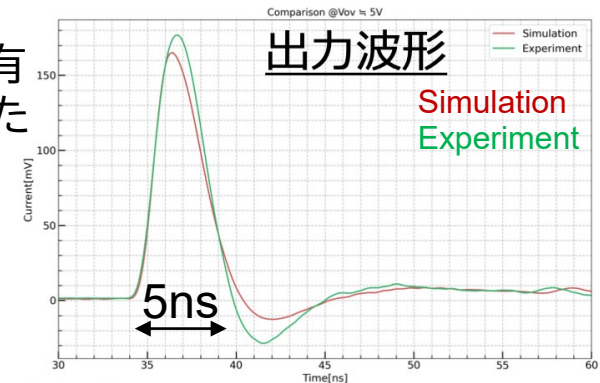
バイアス電圧の温度変化

## 波形整形回路

- 信号を増幅しつつ、パルス幅(FWHM)を3ns程度に狭める必要有
- 回路シミュレーションにより最適な回路を決定し、実機で検証した



R3,C1とパルス幅の関係 (シミュレーション)



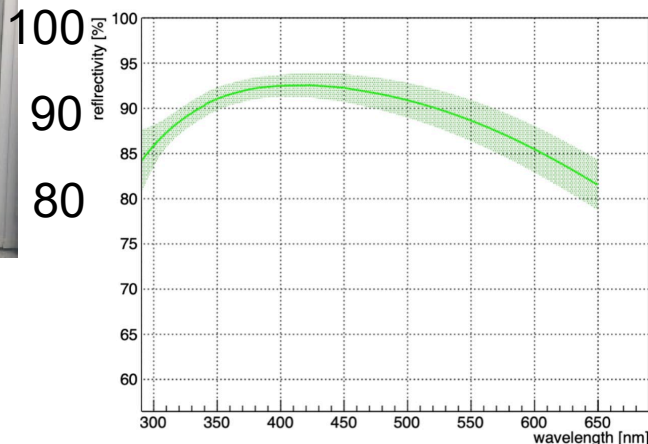
## 出力波形

# LST分割鏡の7層コーティング開発

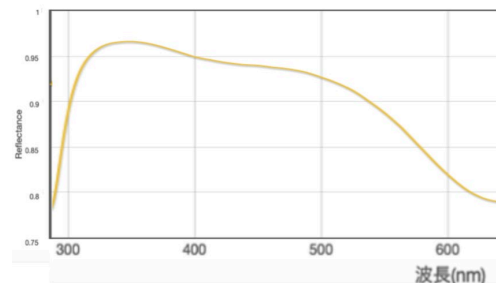
- LST-1の分割鏡:5層(Cr, Al, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>)の表面コーティングにより高い反射率・耐候性
- 7層(Cr, Al, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>)の表面コーティングの開発開始
  - 反射率の向上:望遠鏡の感度・エネルギー閾値の性能向上
  - 耐候性の強化:鏡の保守・交換作業を減らし、コストダウン
- 20年以上の運用で高い反射率を維持することを狙う



5層の膜厚での  
反射率(LST-1)

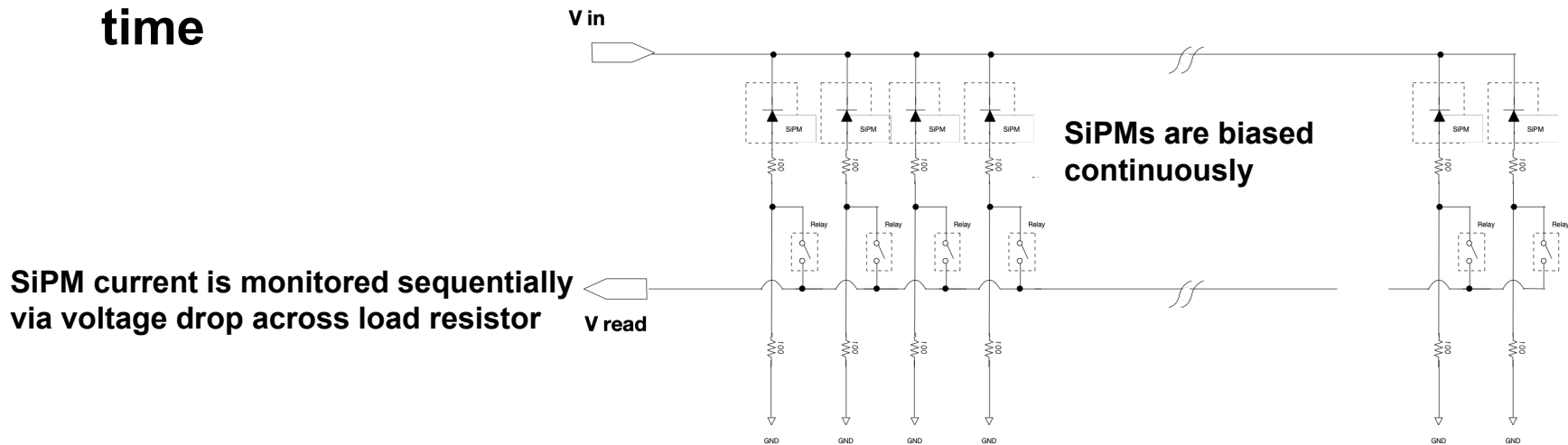


7層の膜厚で  
予想される反射率(シミュレーション)

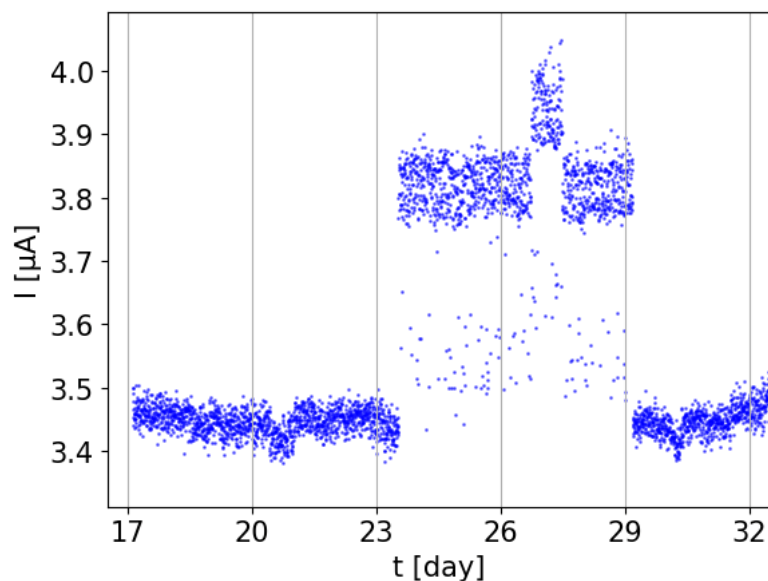




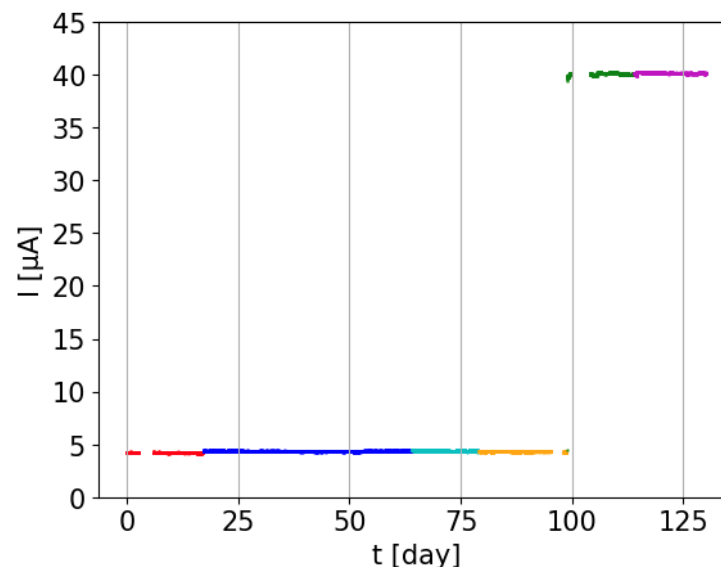
- ❖ **Small-sized telescope started production of the first telescope**
  - ❖ **Nagoya group is in charge of SiPM for SST camera.**
    - ❖ **50 SiPM modules (1600 channels) were delivered to Nagoya**
  - ❖ **Nagoya group prepared accelerated lifetime measurements**
    - ❖ **Thermal cycle (-20 to +80 °C, 30 min, 100 cycles)**
    - ❖ **High temperature + high humidity (+60 °C, RH 90%, 1000 hours)**
    - ❖ **High current (by bright background light)**
    - ❖ **Several modules (~200 channels) can be tested at the same time**



- ❖ **Dark current of 64 channels of SiPMs is measured for more than 3 months**
  - ❖ **10 out of 64 SiPMs show multi-modal behavior (~10% jump of dark current, this is also negligible)**
  - ❖ **One SiPM suffered ×10 dark current increase after 100 days**
    - ◆ **This probably does not originate from SiPM since it shows resistor-like V-I property**
      - **Dark pulse measurement is underway to verify this hypothesis**



CTA Small-sized Telescope





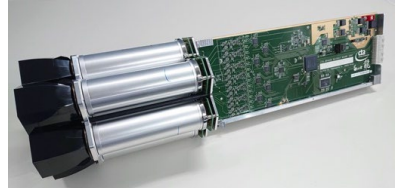
# CTA南サイト@チリ・パラナル



Credit: Marc-André Besel, CTAO / ESO



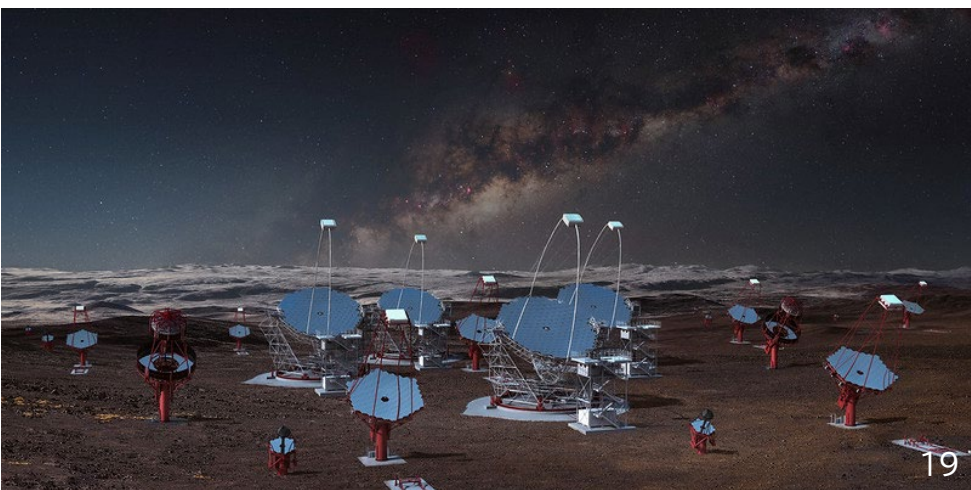
- ### LST 5-6号基
- ・望遠鏡全体入札中 (イタリアグループ)
  - ・日本グループ技術協力



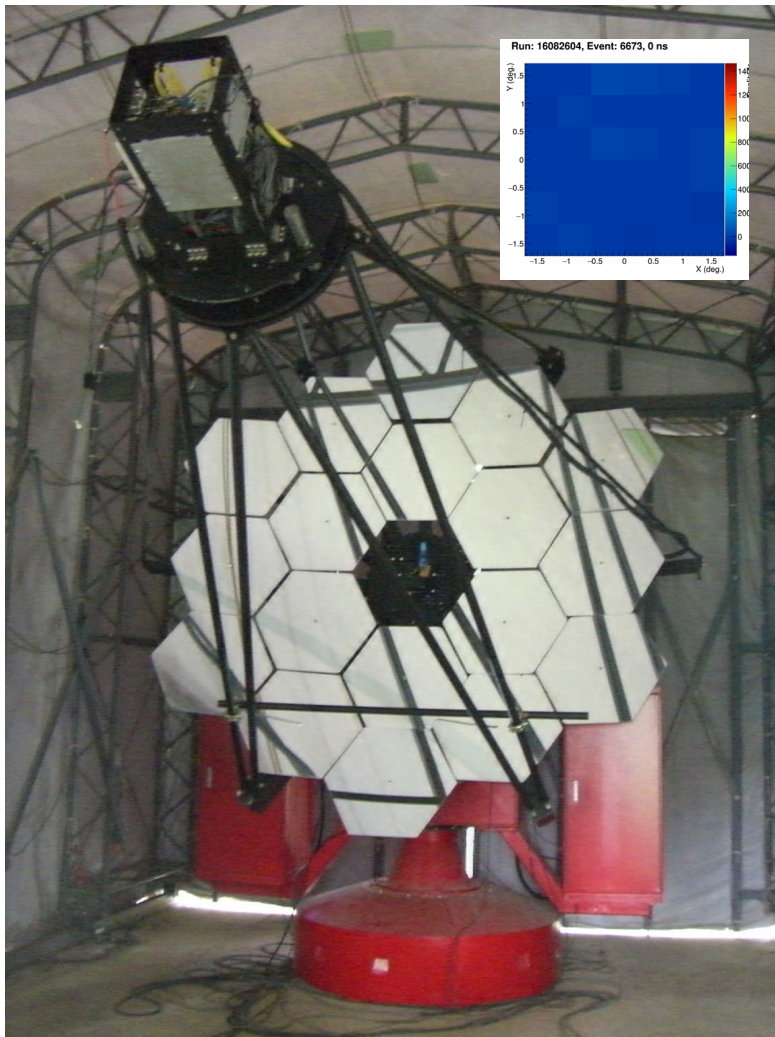
北LSTカメラのモジュールをコピー



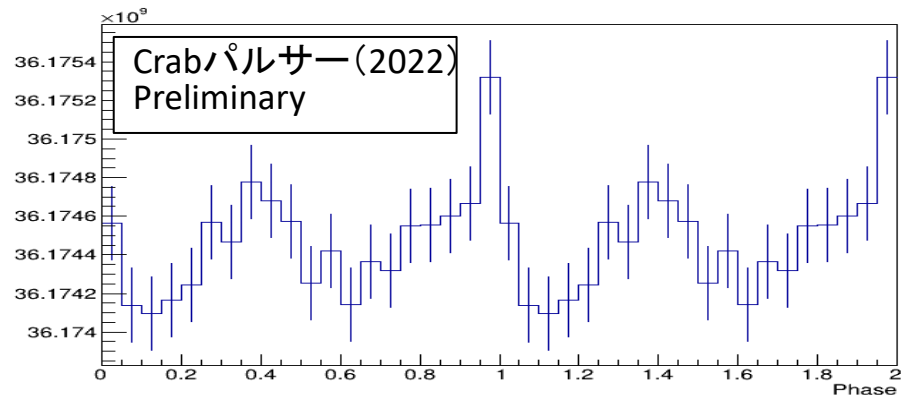
2022年、公道からCTAサイトへの道路建設



# 明野観測所における 小型大気チェレンコフ望遠鏡R&D



- 明野観測所施設利用(C1)
  - 代表者: 吉越貴紀(東大宇宙線研)
  - 2023年度査定額: 13万円
- 国内唯一の大気チェレンコフ望遠鏡
  - 口径3 m、Davies-Cotton光学系
  - 各種R & Dを支援。
- 最近の活動:
  - Crabパルサーの可視光観測(2022年1月、約12時間)、パルスを検出
  - 望遠鏡のエンコーダーが故障、修理のための調査中





- CTA北サイトの大口径望遠鏡LST初号基
  - 2020年から科学観測中(次の武石講演)
  - MAGICとのステレオハードウェアトリガー開始
- CTA北サイトLST 2-4号基
  - 望遠鏡構造体組み上げ中  
⇒2025年度に完成、4基アレイによる観測
- CTA南サイト
  - LST 2基建設入札中(イタリアグループ)
    - 日本グループ技術協力(カメラ)
- SST初号基カメラ製作中: SiPM加速寿命試験、暗電流長期測定
- LST 分割鏡7層表面コーティング開発
- LST SiPMモジュール開発: ゲイン温度補償回路、波形整形回路

