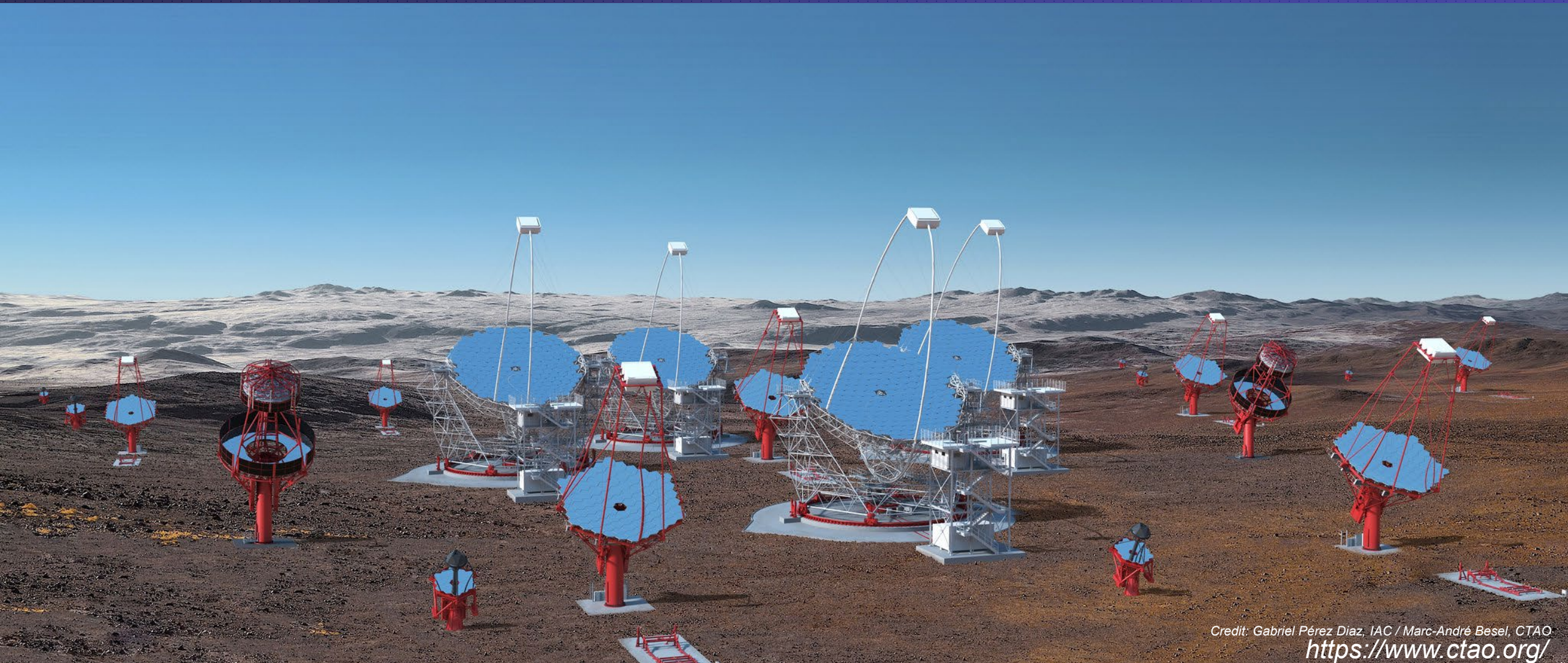


国際宇宙ガンマ線天文台CTAO



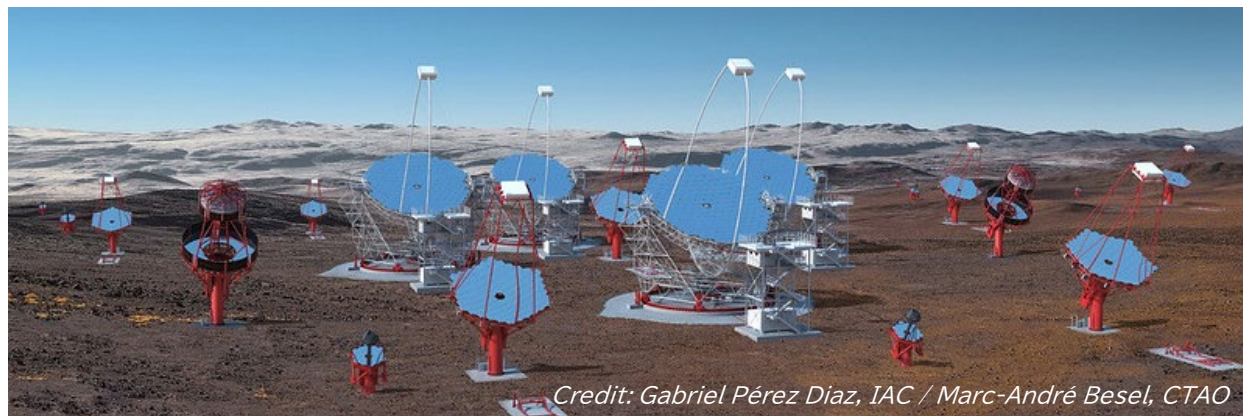
窪 秀利（東大宇宙線研）



Credit: Gabriel Pérez Díaz, IAC / Marc-André Besel, CTAO
<https://www.ctao.org/>

2024年度第一回CRCタウンミーティング 2025/3/10

Cherenkov Telescope Array Observatory(CTAO)



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

高エネルギー天体現象の解明



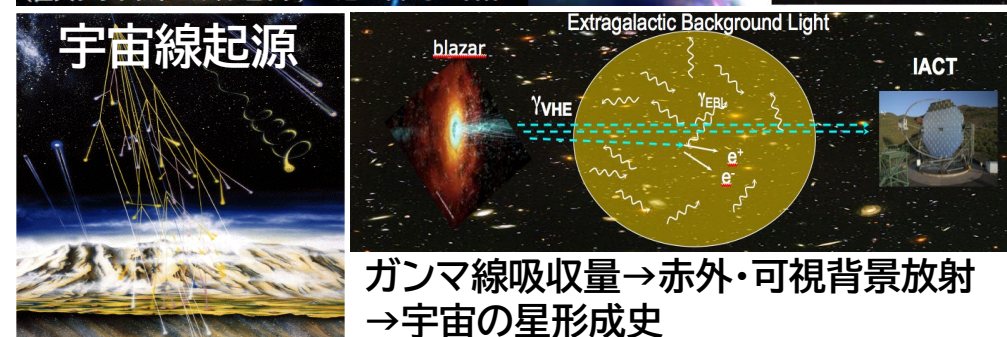
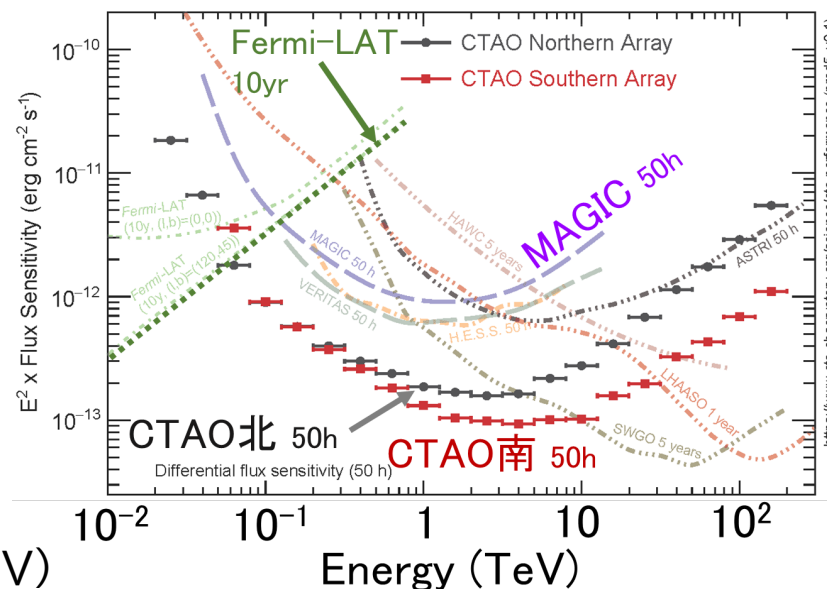
ガンマ線観測性能

現行チェレンコフ望遠鏡に比べて

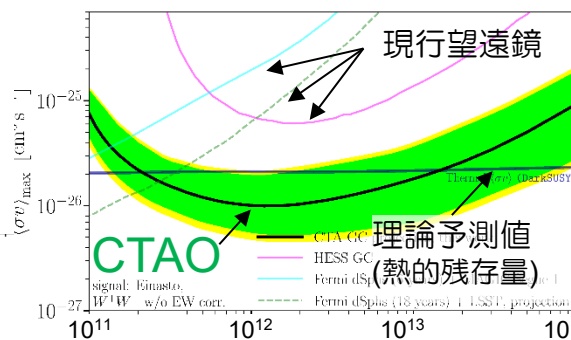
①検出感度 $\times 10$ 倍
[対Fermi-LAT]短時間感度
4-5桁高

②エネルギー範囲 $\times 10$ 倍
(20 GeV–300 TeV)

③角度分解能 $\times 2$ 倍
↓ (2分角@10TeV)



ガンマ線吸収量→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
- ALP探索
- 銀河間磁場測定

暗黒物質対消滅 γ 線探索感度

- “Science with the Cherenkov Telescope Array”
<https://doi.org/10.1142/10986>

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

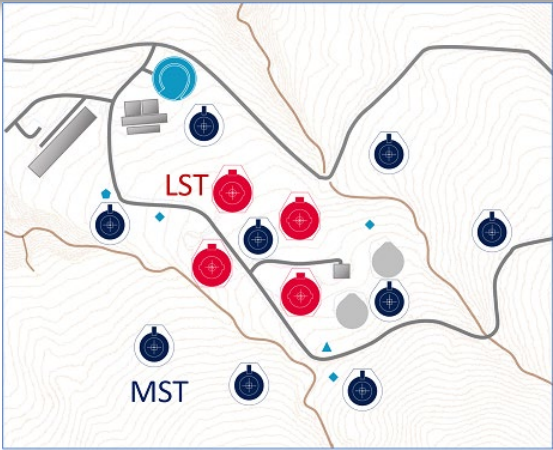
CTAO(Cherenkov Telescope Array Observatory)



北半球：スペイン・カナリア諸島ラパルマ島



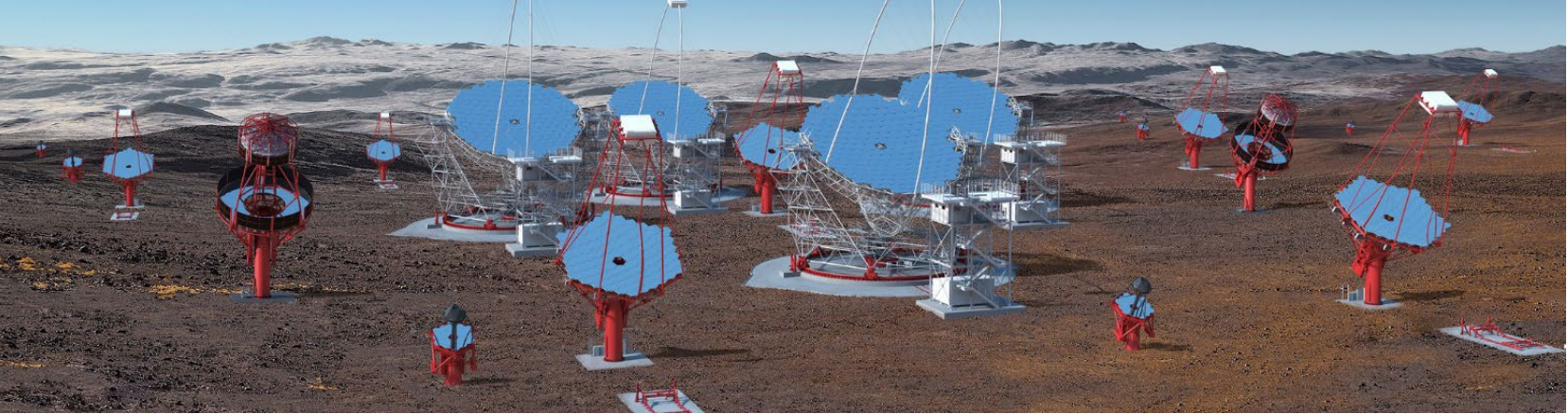
完成予想図



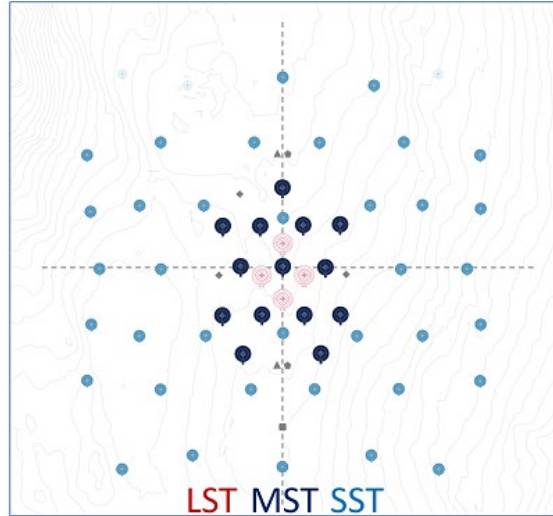
α 構成

400m

南半球：チリ・パラナル

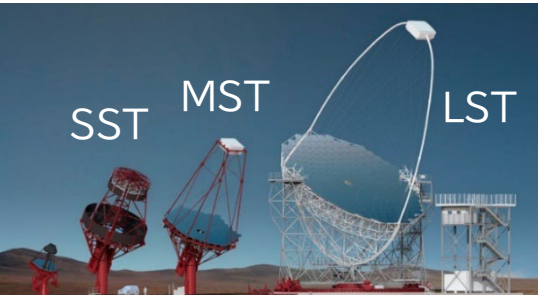
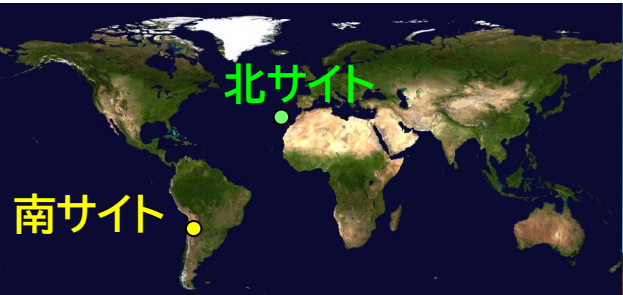


完成予想図



1500m

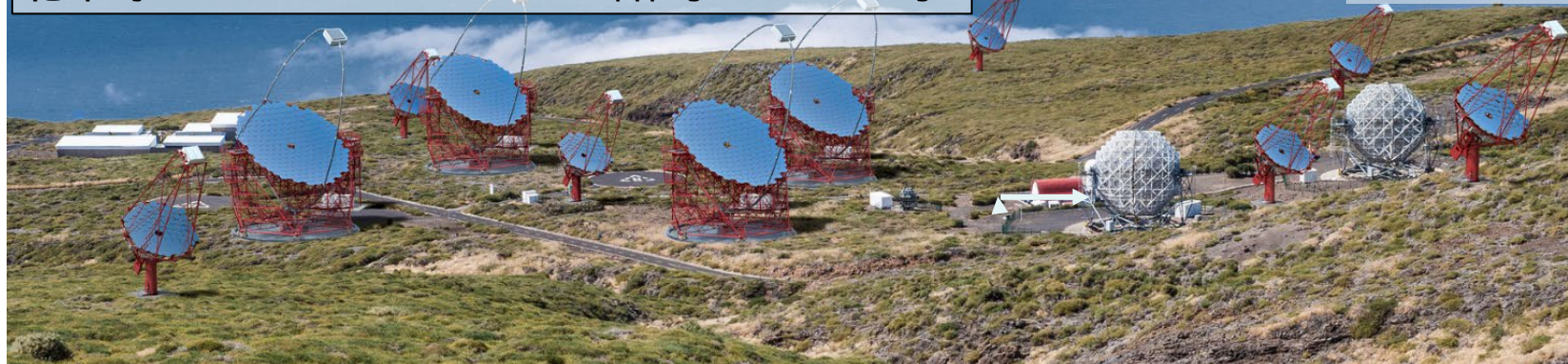
南北計
71台
(予算確保)
→118台



	口径	観測エネルギー	視野	台数(北)	台数(南)
LST	23m	0.02 - 3 TeV	4.3°	4	2→4
MST	11.5/9.7m	0.08 - 50 TeV	7.7°	9→15	14→25
SST	4.3m	1 - 300 TeV	8.8°	0	42→70

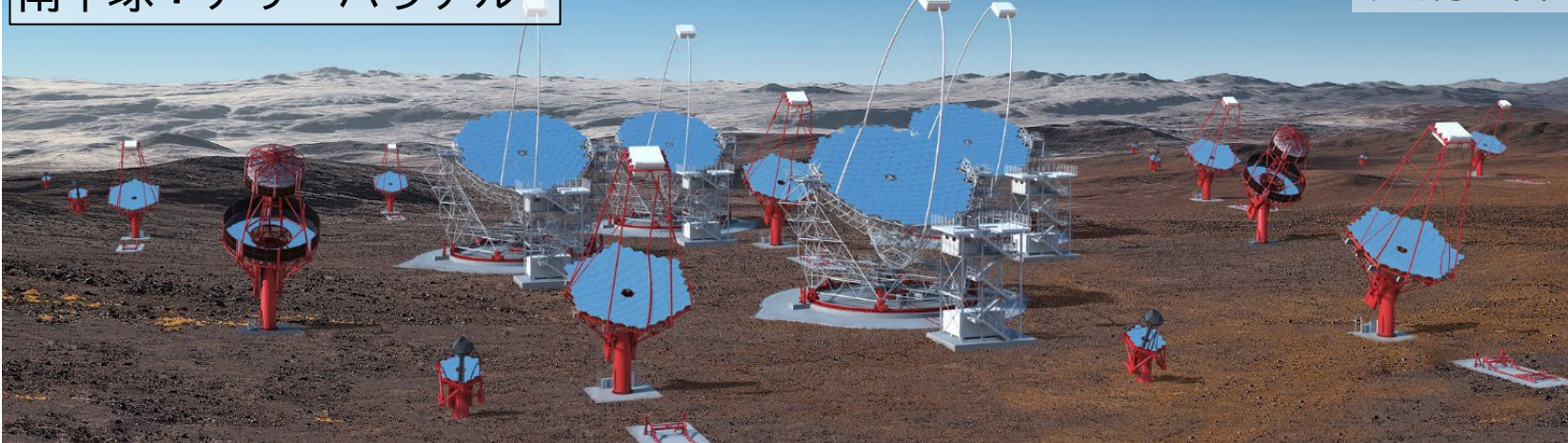
北半球：スペイン・カナリア諸島ラパルマ島

完成予想図



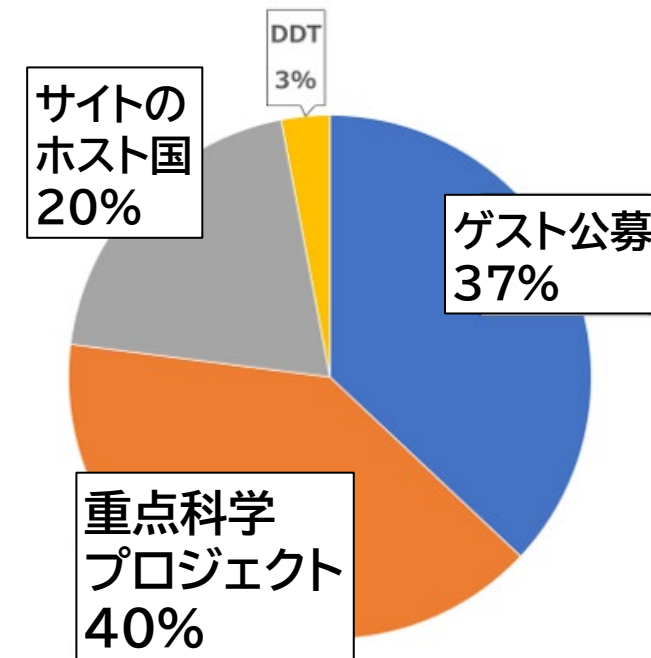
南半球：チリ・パラナル

完成予想図



公開天文台 20年以上運用

観測時間配分(10年積算)



観測1年後にアーカイブ公開



- 文科省「ロードマップ」2023
- 日本学術会議「未来の学術振興構想(2023)」
- 「マスタープラン」2020と2017(区分II), 2014(区分I)

25か国~220機関
>1500名



昨年 Spokesperson交代

Prof. Werner Hofmann ⇒ Prof. Masahiro Teshima

日本 127名

青山大	大林花織, 佐藤優理, 田中周太, 山崎了, 吉田篤正	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, 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, 戸村友宣, 野崎誠也, バクスター ジョシュア 稜, 橋山和明, 吉越貴紀, Y. Chai, D. Hadasch, D. Mazin, M. Strzys, I. Vovk, P. K. H. Yeung
茨城大	片桐秀明, 柳田昭平, 吉田龍生		
宇宙研	鈴木 寛大, 林克洋		
大阪大	井上芳幸, 藤原立樹, 松本浩典		共同研究員: 岡知彦, 櫻井駿介, 広谷幸一, 深見哲志, 村瀬孔大, K. S. Cheng, X. Cui, D. C. Y. Hui, A. K. Kong, P. Majumdar, J. Takata, T. P. H. Tam, W. Tian, L. Wan
神奈川大	辻直美		
北里大	村石浩	東北大	當真賢二, 石崎渉
岐阜大	佐野栄俊	徳島大	折戸玲子
九州大	稲田知大	名大理	立原研悟, 早川貴敬, 福井康雄, 山本宏昭
京大基研	井岡邦仁	名大ISEE	安藤大地, 奥村曉, 重谷優斗, 河原崎琉, 高橋光成, 田島宏康, S. Bang
京大理	鶴剛, 寺内健太, 李兆衡		
熊本大	高橋慶太郎	広大先理工	今澤遼, 榎木大修, 木坂将大, 須田祐介, 高橋弘充, 仲野悟帆, 橋爪大樹, 深沢泰司, A. Roy
KEK	田中真伸		
甲南大	井上剛志, 田中孝明, 千川道幸, 溝手雅也, 山本常夏	広大宇科セ	水野恒史
国立天文台	郡和範	宮崎大	森浩二
埼玉大	勝田哲, 清本拓人, 寺田幸功	山形大	郡司修一, 門叶冬樹, 中森健之
仙台高専	加賀谷美佳, 林航平	山梨学院大	内藤統也, 原敏
千葉大	井上進, 小林志鳳, 野田浩司	横浜国大	廣島渚
東海大	阿部和希, 韓 天舒, 櫛田淳子, 佐藤雄輝, 西嶋恭司, 姚屹	理研	長瀧重博, M. Barkov, G. Ferrand, H. He, E.R. Owen, D. Warren
東大理	大平豊, 立石大, 戸谷友則, 馬場彩	立教大	内山泰伸, 澤田真理, 林田将明
東京都立大	川中宣太, 藤田裕	早稲田大	片岡淳

CTAO ERIC設立(今年1月)

ERIC(European Research Infrastructure Consortium) 欧州研究基盤コンソーシアム



欧州連合EU法に基づく法人

- 全EU諸国で認められる法的能力
- 付加価値税および物品税の免除

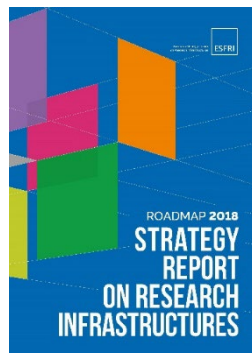
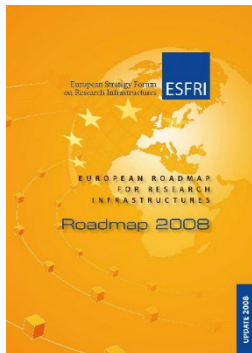
現在30個のERICがあり、宇宙関連では、The Joint Institute for VLBI ERIC (JIVE)、LOFAR(Low Frequency Array)に続いて、**CTAO-ERICが今年1月に設立**(本部@イタリア) ⇒ **建設加速**

- EU国ではない日本は、strategic partnerとしてCTAO-ERICに参加(メンバー8か国:Austria, Czech Republic, France, Germany, Italy, Poland, Slovenia, Spain, ESO。オブザーバー国:Switzerland)。
- 法人定款に、日本の建設費負担は約33M€(約1割)。運用費(約20M€/年)の約1割負担想定(定款記載なし)。

ESFRI(European Strategy Forum on Research Infrastructures)

CTAO

Project @RM2008 → Landmark @RM2018



[参考]宇宙関連@RM2021(最新)

□ Project (RM全体で22)

- Einstein Telescope
- European Solar Telescope
- KM3NeT 2.0

□ Landmark (RM全体で41)

- CTAO
- ELT
- SKAO

RM2026 2026/12公表予定

Astronet 天文学関連の欧州計画



Roadmap 2022-2035

最優先すべき
地上天文台として
CTAOを推薦

[参考]優先すべき衛星計画
LISA
Athena

CTAO大口徑望遠鏡(LST)

CTAO

23m大口徑望遠鏡(LST)初号基LST-1@ラパルマ島



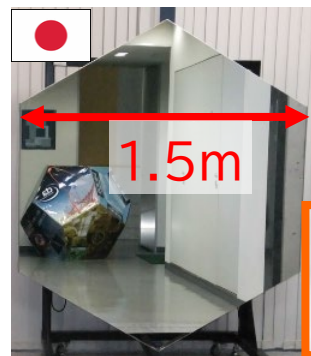
- 20 GeV(中小口径望遠鏡より遠方観測可) - 20 TeV以上
- 検出有効面積はFermi衛星LATの1万倍
- 高速回転20秒/180度 突発天体を捉える

LST Collaboration 11か国 約460名(論文著者数約330名)

日本グループ 鏡・カメラ 開発の中心的役割

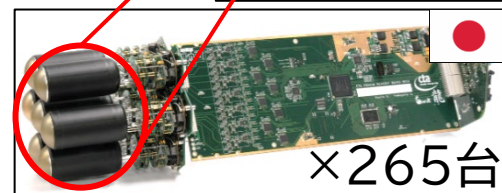
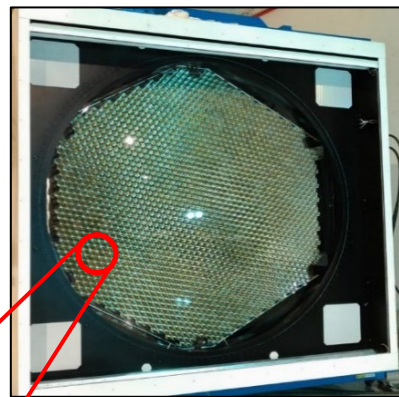
➤ 分割鏡

- 1.5m分割鏡 198枚
- アクチュエーター制御



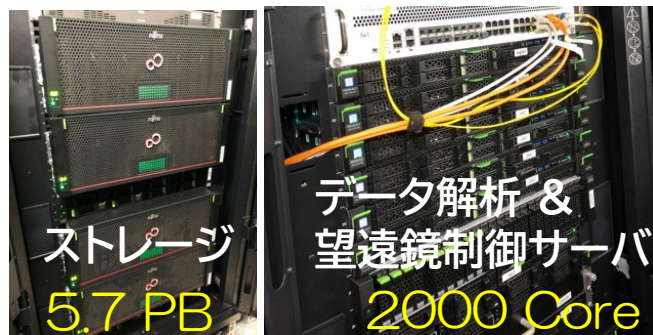
➤ 主焦点カメラ

- 視野 4.5度
- 光電子増倍管 1855本
- GHz波形記録回路



北サイト全体(LST+MST)の
オンサイト計算機 導入・運用

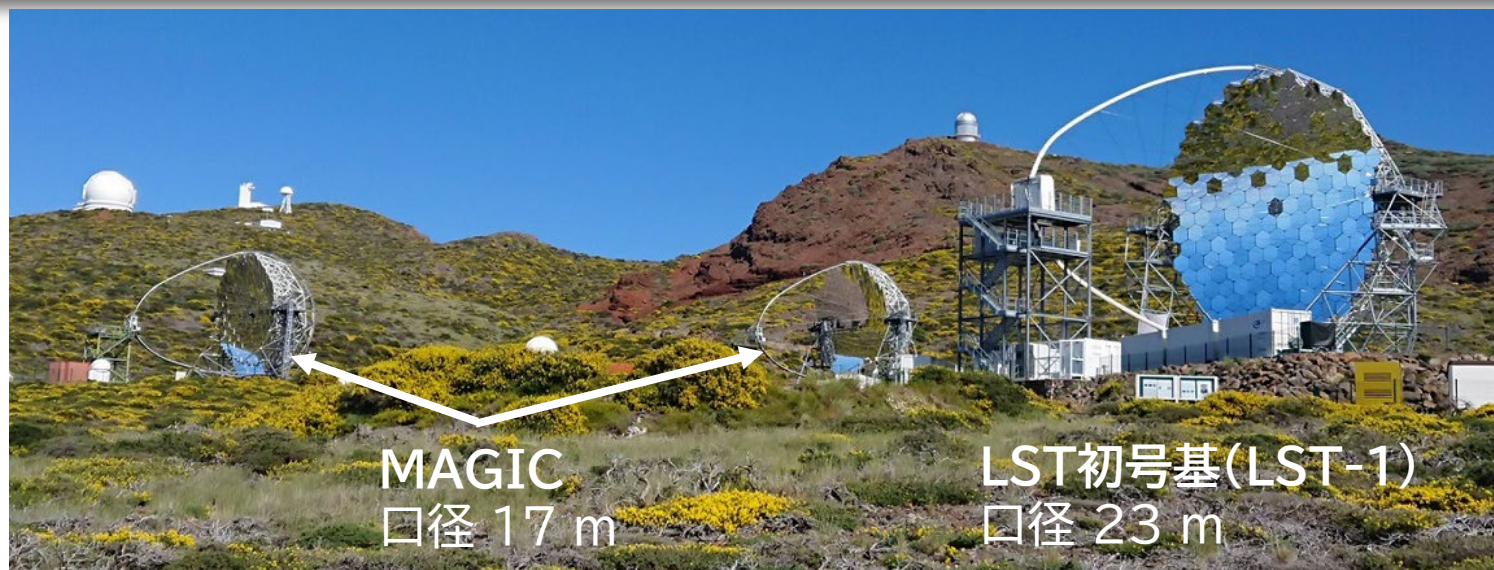
CTAO科学データ管理
センター@独DESY
昨年竣工



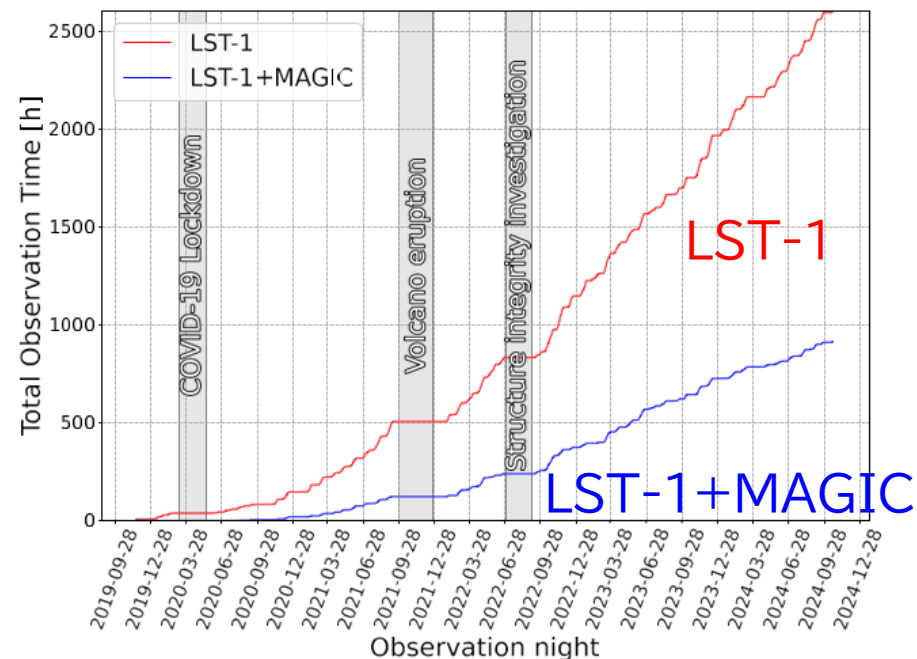
データ
転送
(予定)



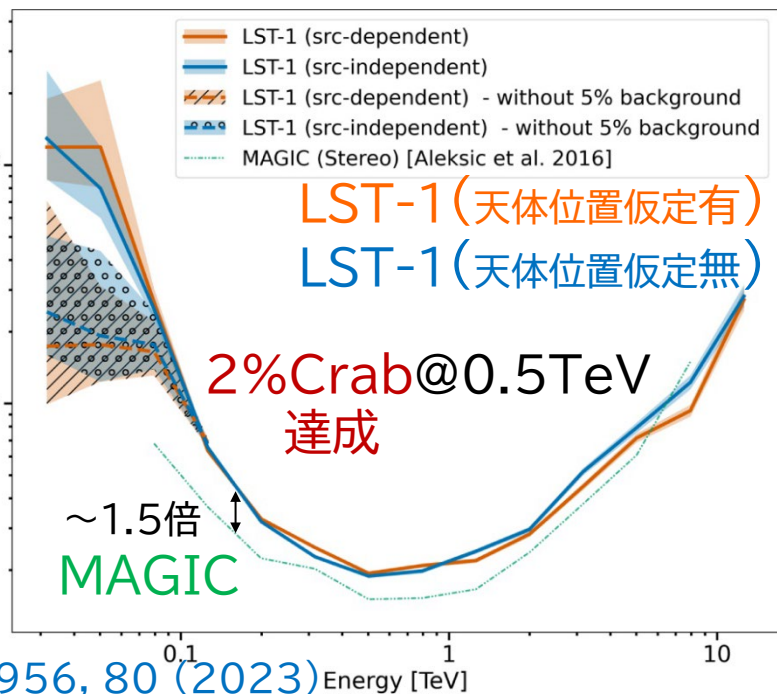
望遠鏡高速駆動用大電源システム(フライホイール)



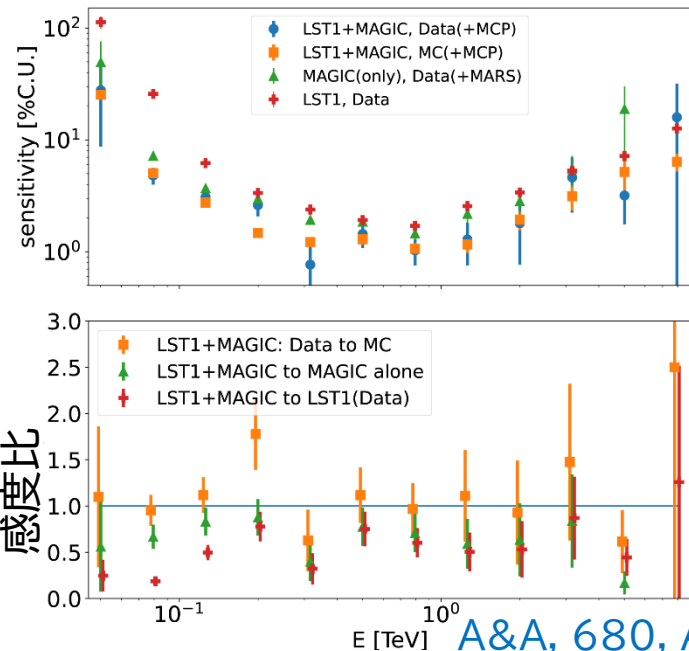
LST-1 2020年1月から科学観測
のべ観測時間 2700時間以上



微分検出感度 [%Crab nebula強度]



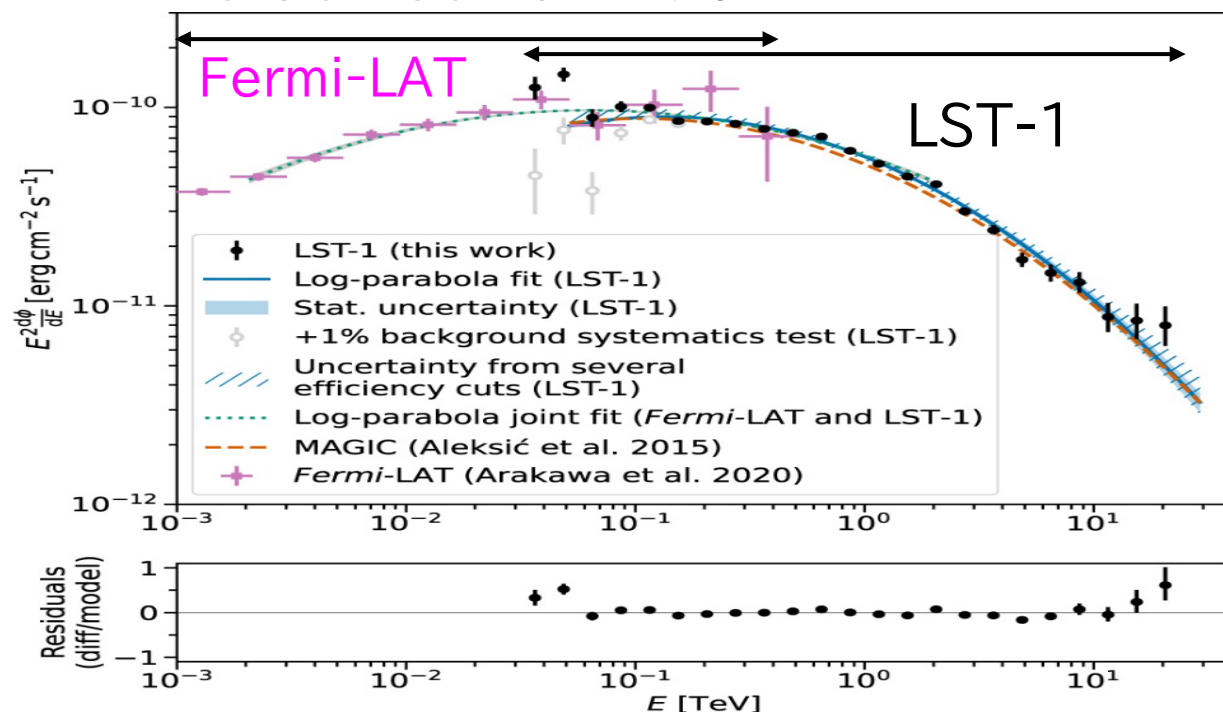
LST-1+MAGIC感度(天頂角<30°)



- 3-4割の時間 MAGICと同時観測
(現在:ソフトウェアトリガー、
ハードウェアトリガー開発中)
- 観測提案募集 年1回
(LSTとMAGIC合同の提案採択委員会)

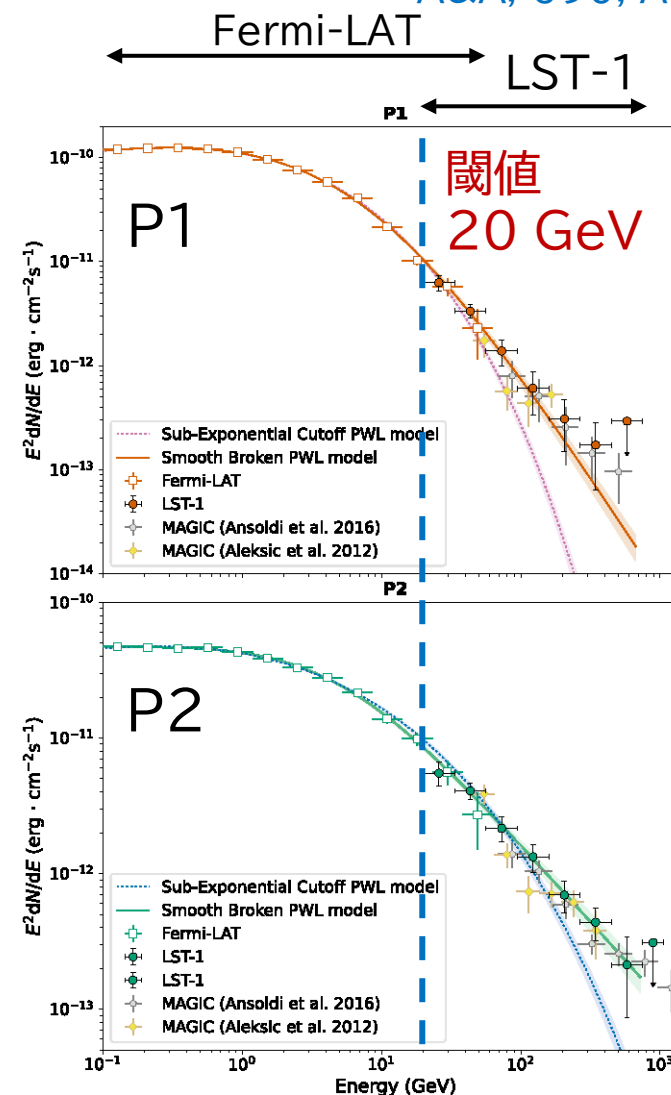
LST-1観測: Crab nebula/pulsar

Crab nebulaスペクトル *ApJ*, 956, 80 (2023)

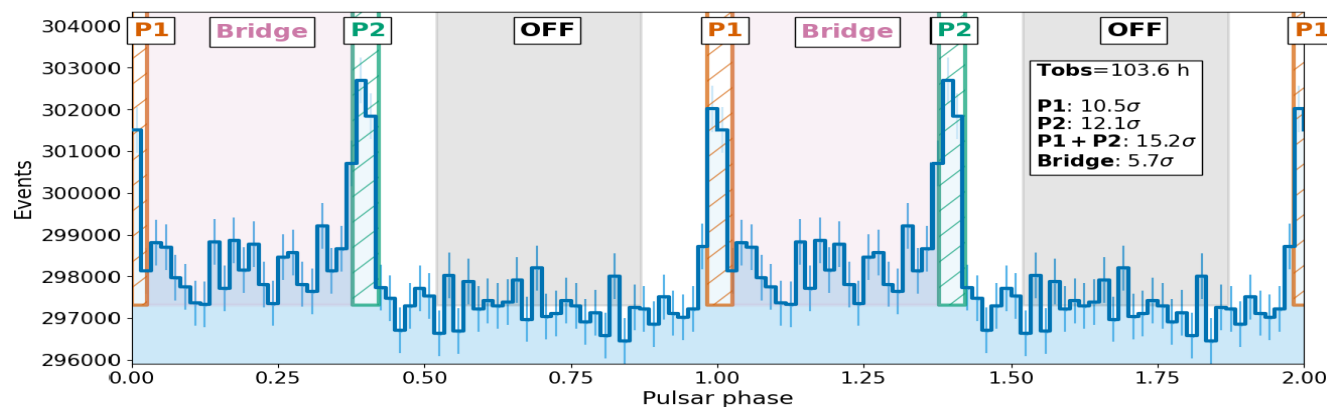


Crab pulsarスペクトル

A&A, 690, A167 (2024)



Crab pulsarパルス波形



Fermiとスムーズに接続

LST-1観測: Geminga Pulsar、銀河中心領域

Geminga Pulsar

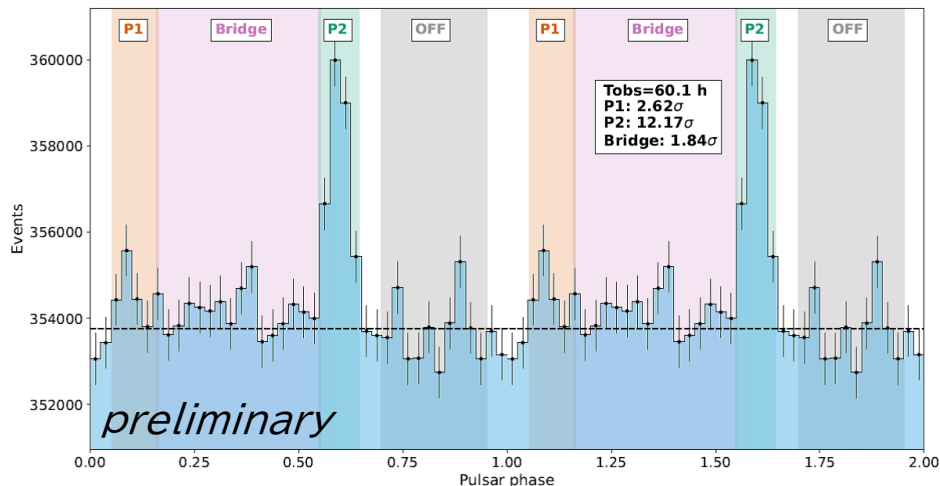
【論文投稿中】

2022/12~2024/3 60時間

12.2 σ

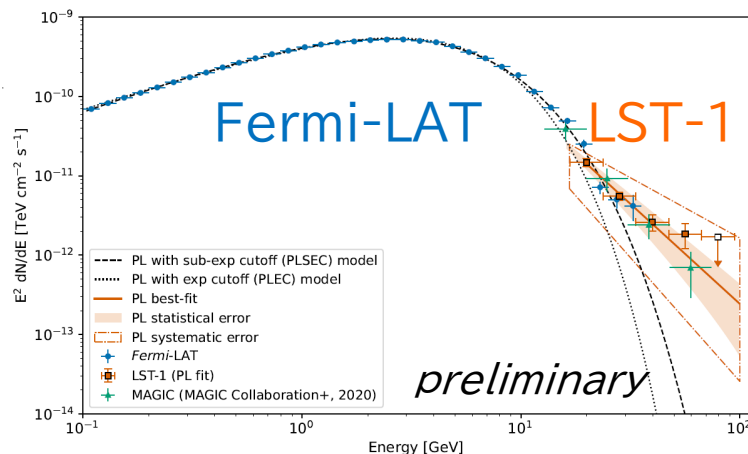
2.6 σ

E>15GeV



c.f., MAGIC望遠鏡 6.3 σ (80時間)

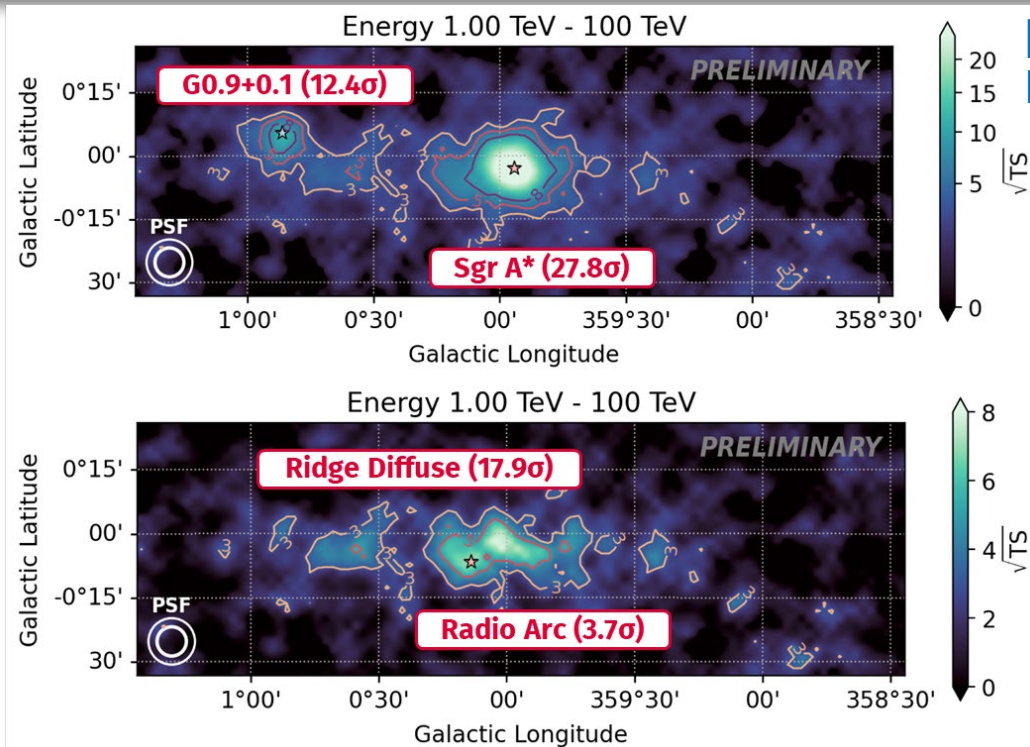
⇒ LST-1 1/4以下の時間で到達



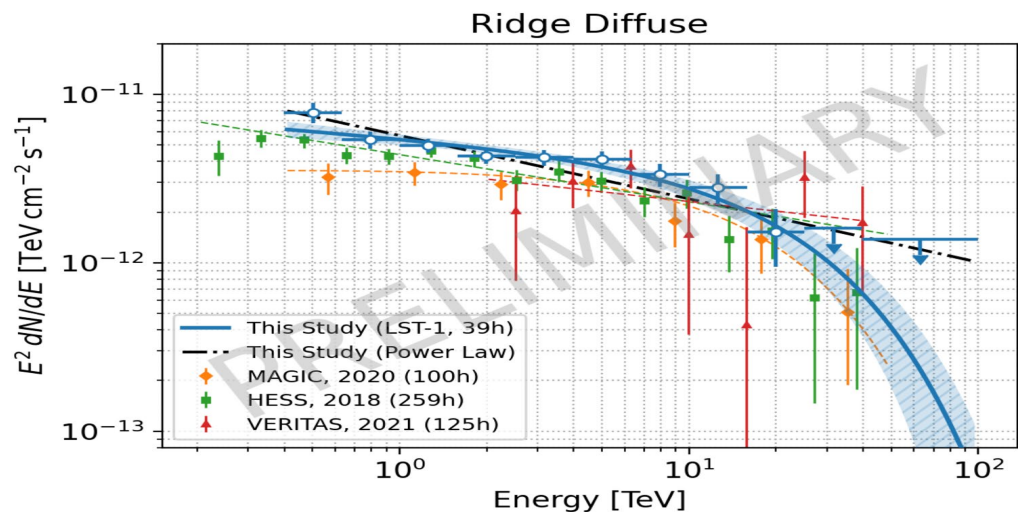
Power law
 $\Gamma = 4.5 \pm 0.4_{stat}$

TS Map

Sgr A* & G0.9+0.1
subtracted



阿部D論
明日講演



拡散放射の
カットオフ
E~24 TeV
(2.8 σ)

LST-1観測:再帰新星RS Oph

【論文投稿中】



RS Ophiuchi

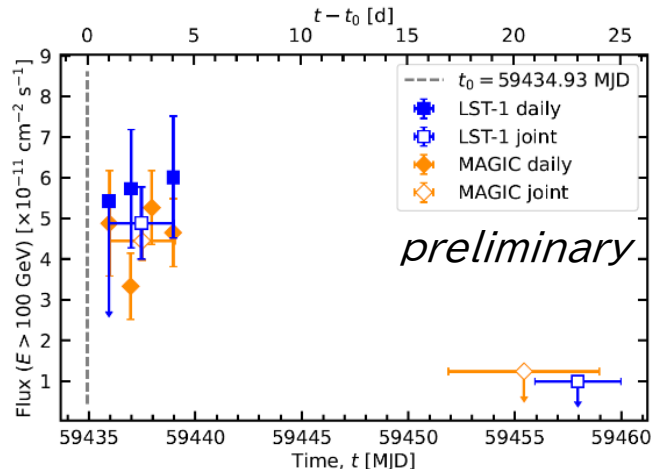
- 爆発周期:約15年
- 2021年8月8日 Fermi-LATで検出
- 8月9日～ H.E.S.S., MAGIC, LST-1で検出

VHE γ 領域で新星初検出

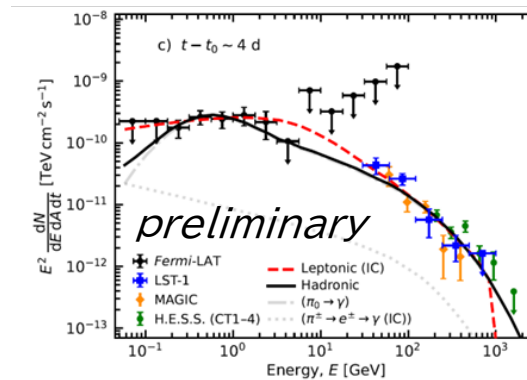
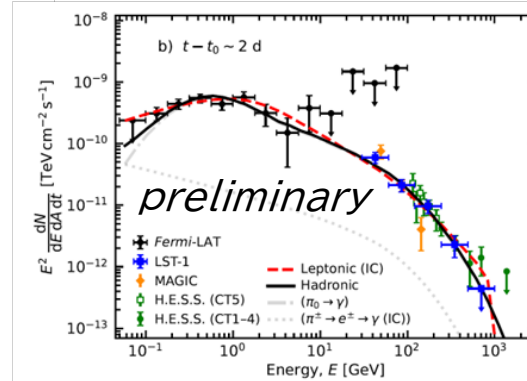
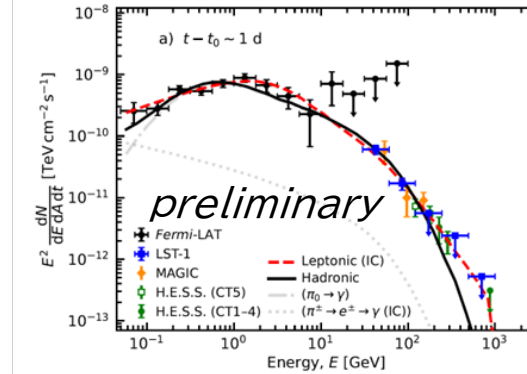
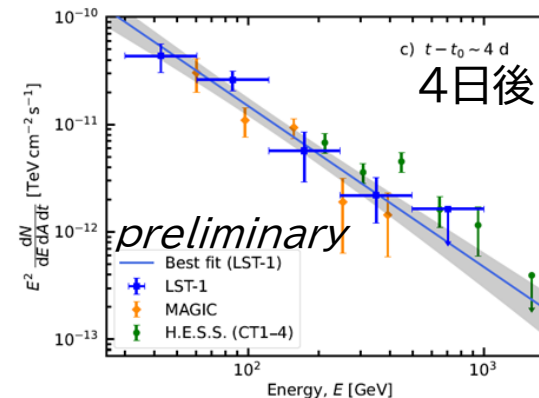
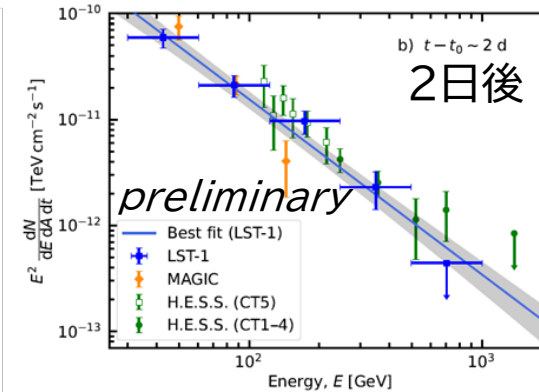
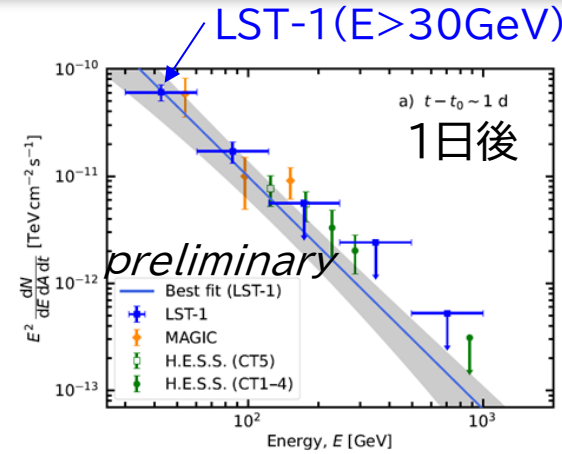
LST-1観測

8月9～15日、29日～9月2日

- 8/9 (3.2σ), 10 (2.8σ), 12 (5.5σ)
- 計 6.6σ 検出



爆発経過日数



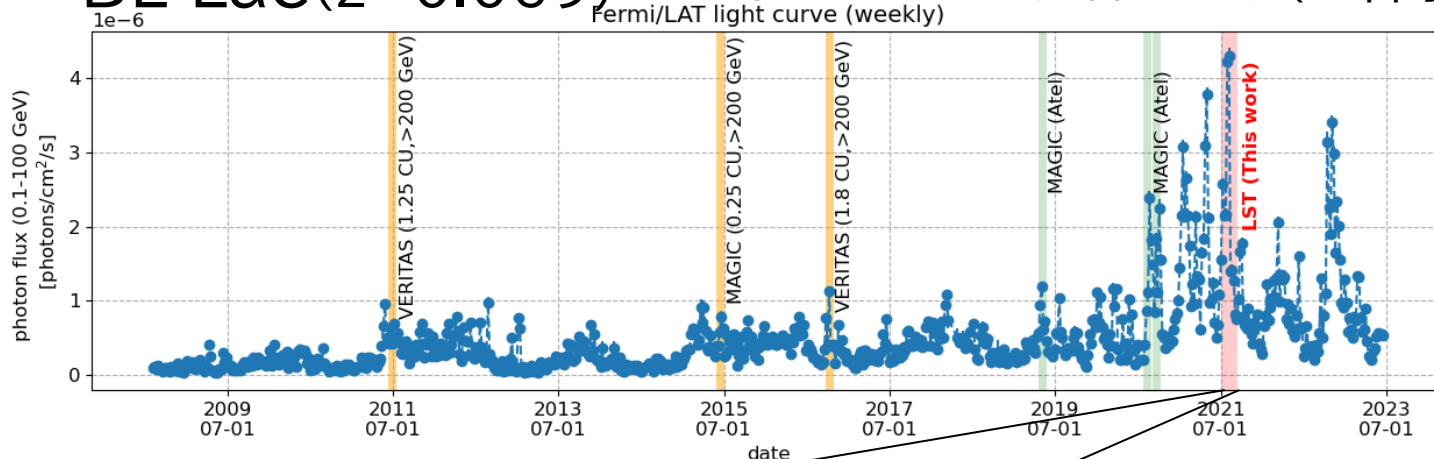
スペクトル
カットオフ
エネルギー
(0.26 ± 0.08)

↓

(1.6 ± 0.6) TeV
陽子起源を示唆

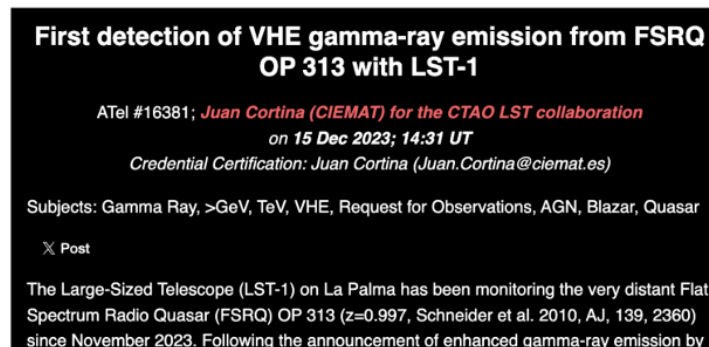
LST-1観測: Blazar (BL Lac, OP313)

BL Lac ($z=0.069$) Fermi-LATのライトカーブ(4年間)

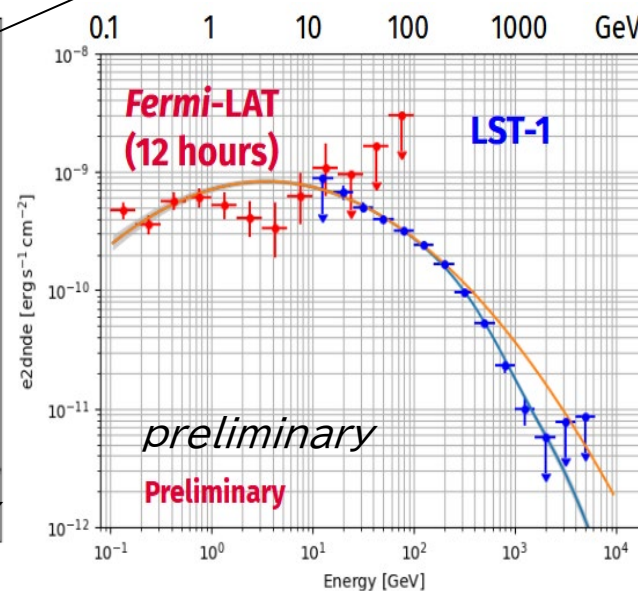
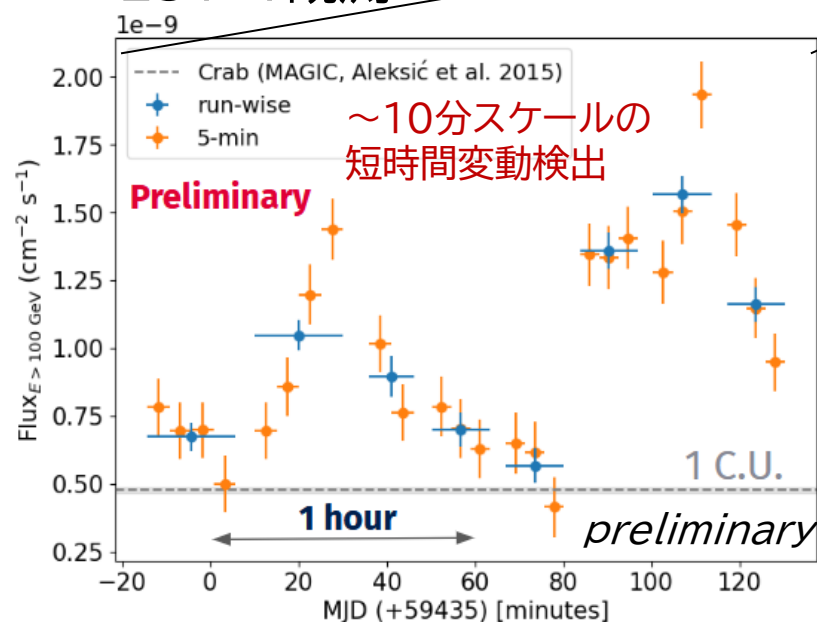


OP313 ($z=0.997$)

LST-1で初検出 2023/12 速報 Atel#16381



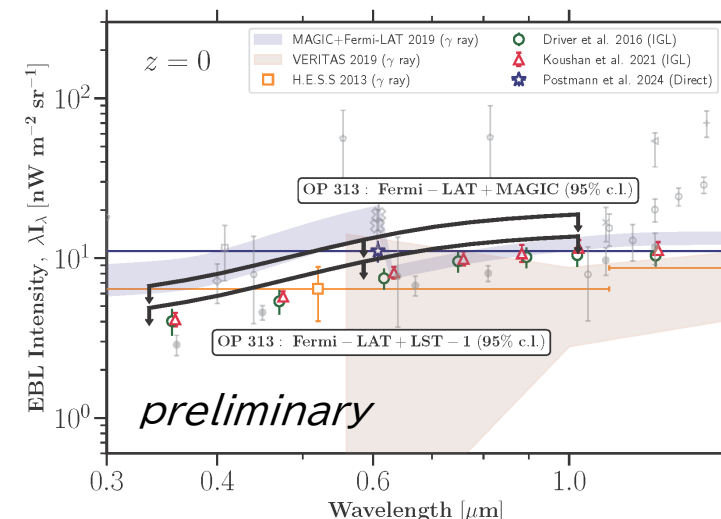
LST-1観測



⇒速報 Atel#14783

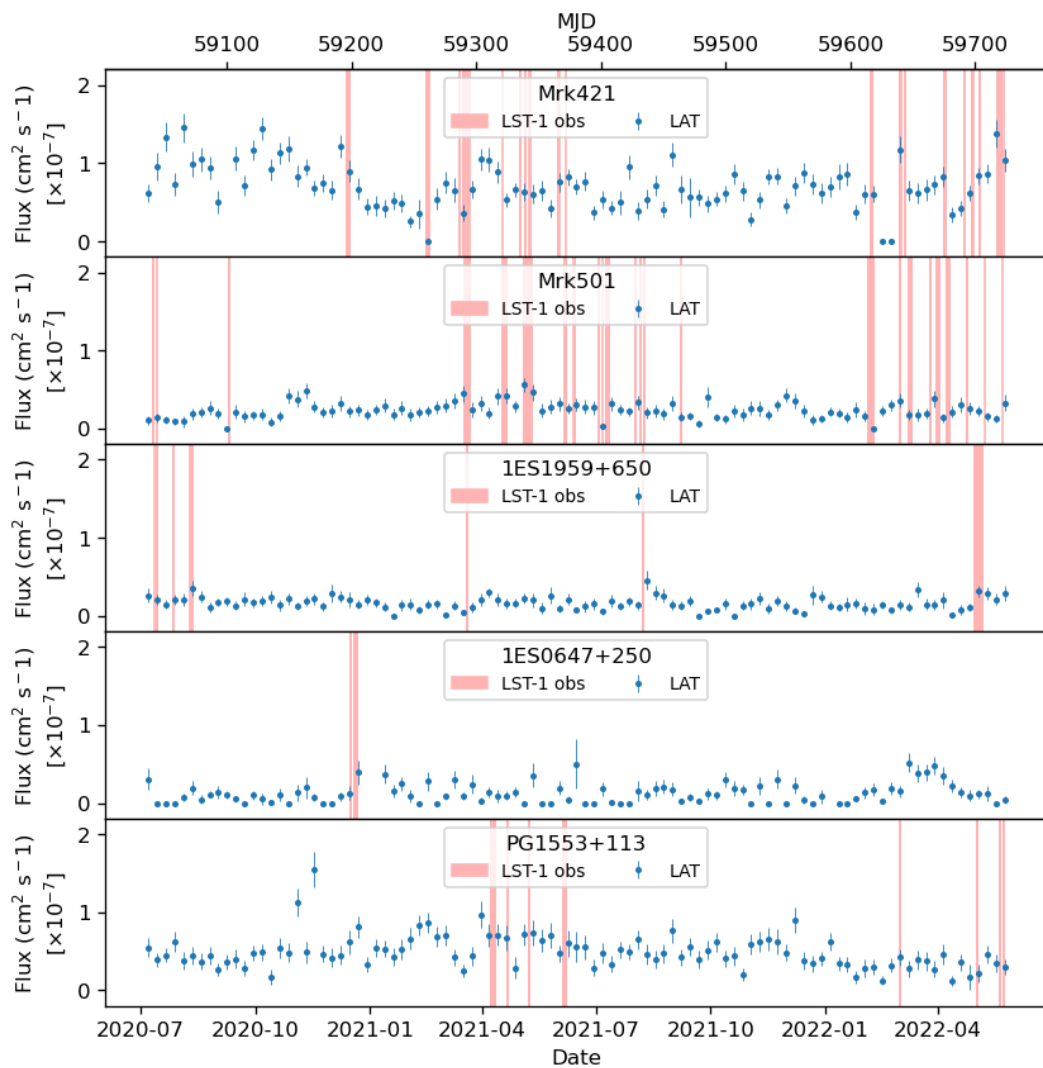
VHE γ 領域で

- 最遠AGN
 - GRB201216Cに次いで2番目遠方天体
- ⇒可視赤外背景放射制限



Fermi-LATのライトカーブ 2020/7~2022/5

帯:LSTと同時観測 150時間以上



Mrk421
($z=0.031$) 53σ

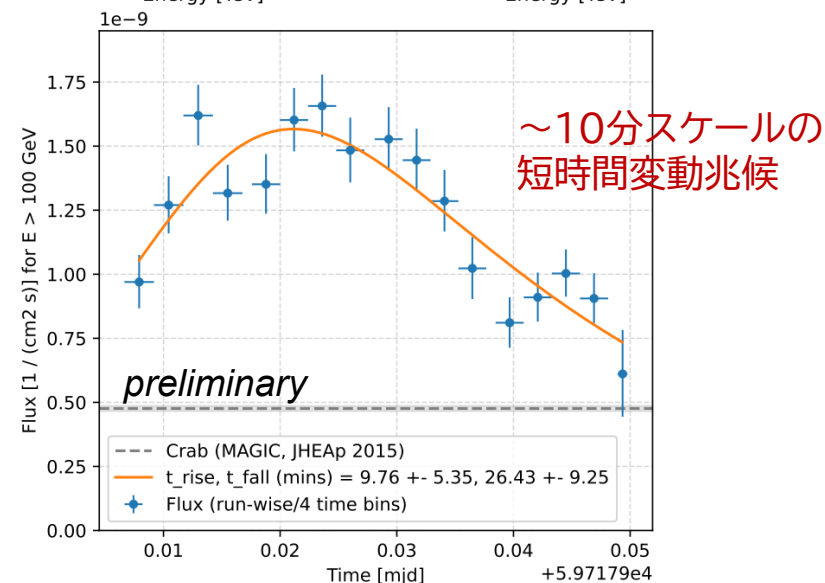
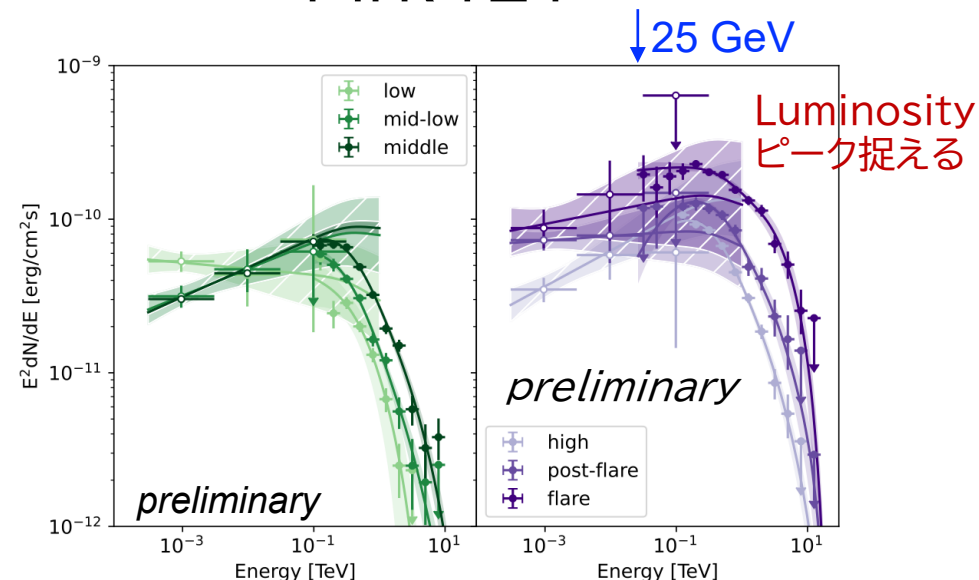
Mrk501
($z=0.034$) 21σ

1ES1959+650
($z=0.048$) 13σ

1ES0647+250
($z=0.45 \pm 0.05$) 7σ

PG1553+113
($z=0.433$) 16σ

Mrk421



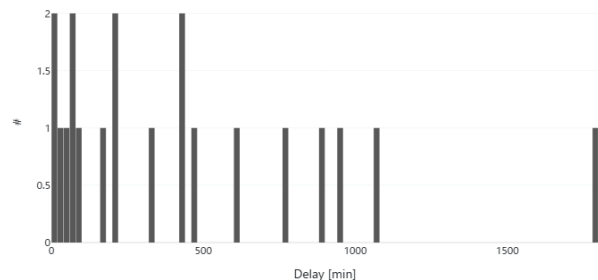
アラート follow up (マルチメッセンジャー観測)

2023/12以降の観測数

GRBs	GWs
93 # total alerts	26 # total alerts
18 # observed alerts	2 # observed alerts
43.4h observed	3.3h observed

Neutrinos	Total
9 # total alerts	128 # total alerts
0 # observed alerts	20 # observed alerts
0.0h observed	46.7h observed

Delay of observations wrt T0

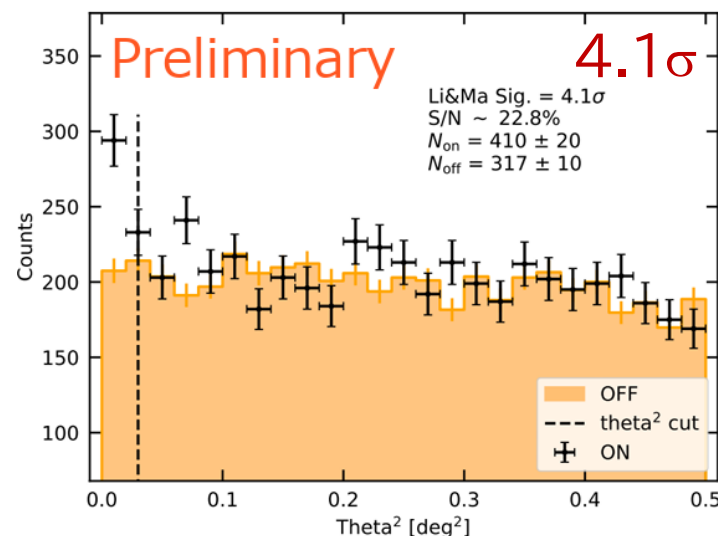


GRB 221009A(z=0.15): Brightest-of-all-times(BOAT) GRB

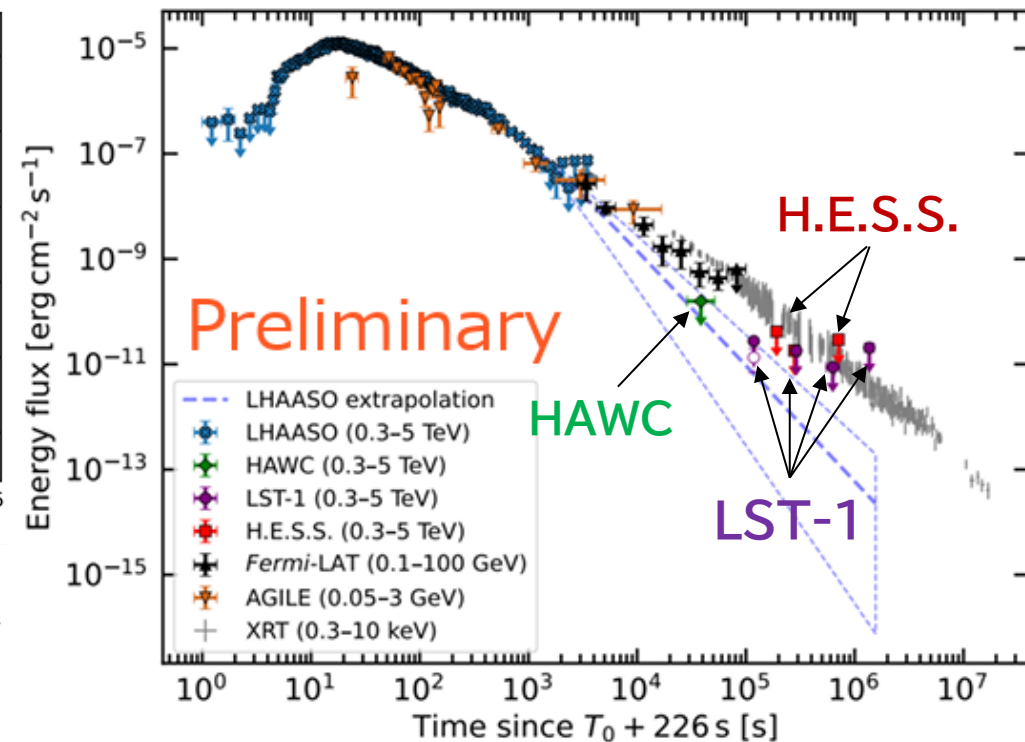
LST-1観測

- 2022/10/10 バースト発生1.3日, 3日, 6~19日後まで計13時間
- チェレンコフ望遠鏡の中で最初に観測開始(H.E.S.S.は2.1日後)
- 発生3日後までの観測は月光下(エネルギー閾値高 数百GeV)

□ 1.3日後(10/10)のデータ

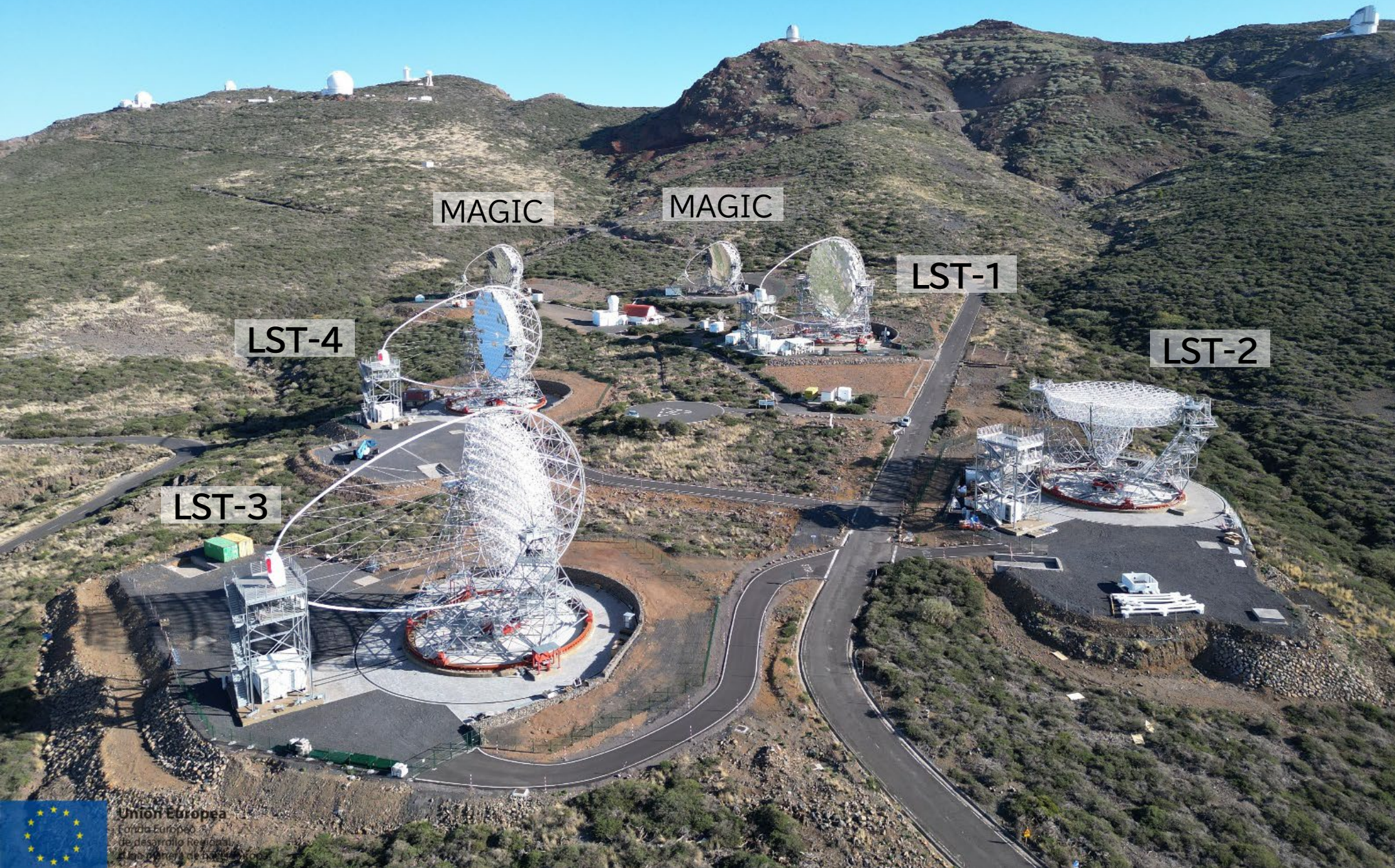


□ 10/12以降に有意な信号なし



⇒ジェットモデルに制限

LST 2-4号基@ラパルマ島 建設中(昨年12月撮影)

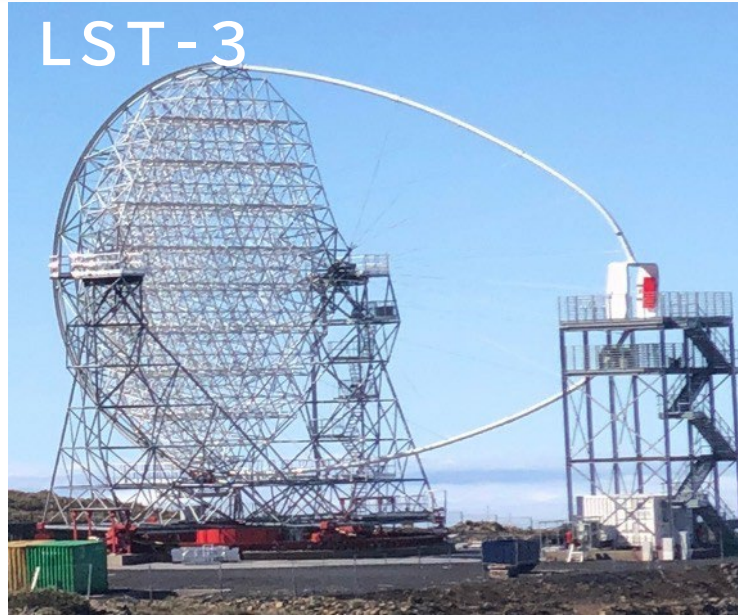


LST 2-4号基@ラパルマ島 建設状況

LST-1



LST-3



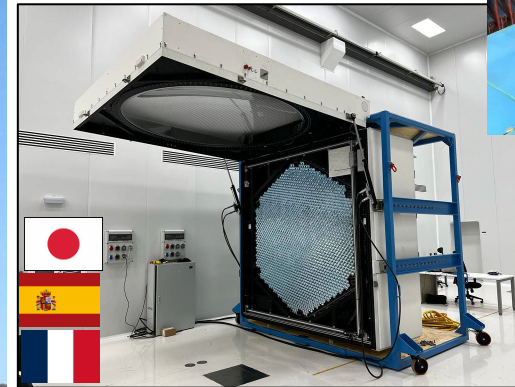
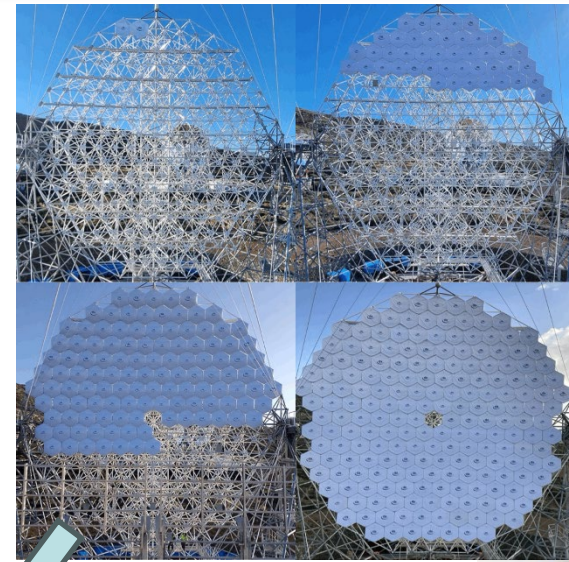
LST-2



LST-4



昨年
LST-4 鏡取付



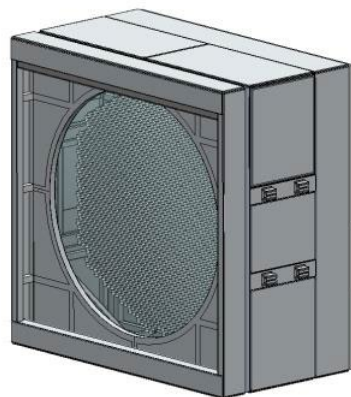
LST 2-4号基に搭載予定の
鏡・カメラ 現地保管中⇒望遠鏡取付 来年Q1まで
来年Q2
LST 2-4号基 建設完了予定

- 南サイトのLST 2基 イタリアが予算獲得(COVID-19危機後の再興・回復のための国家計画PNRRの一部)

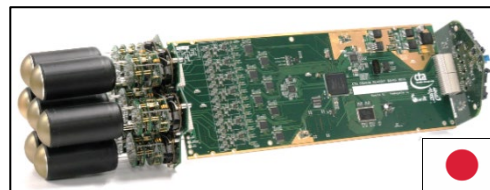
LST構造
(南サイトの
耐震要求対応)

公開版ファイル
から図削除

LSTカメラ



PMT+読出し回路モジュール

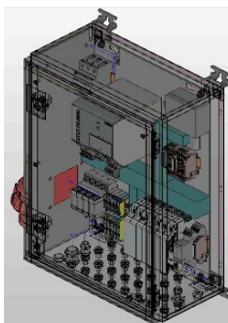


日本グループ開発品の完全コピーを量産する
(設計データをイタリアグループに提供。
試験方法含めて、技術サポート中)

望遠鏡各要素の調達スケジュール(昨年開始)

現地建設
完了
2027

LST光学系



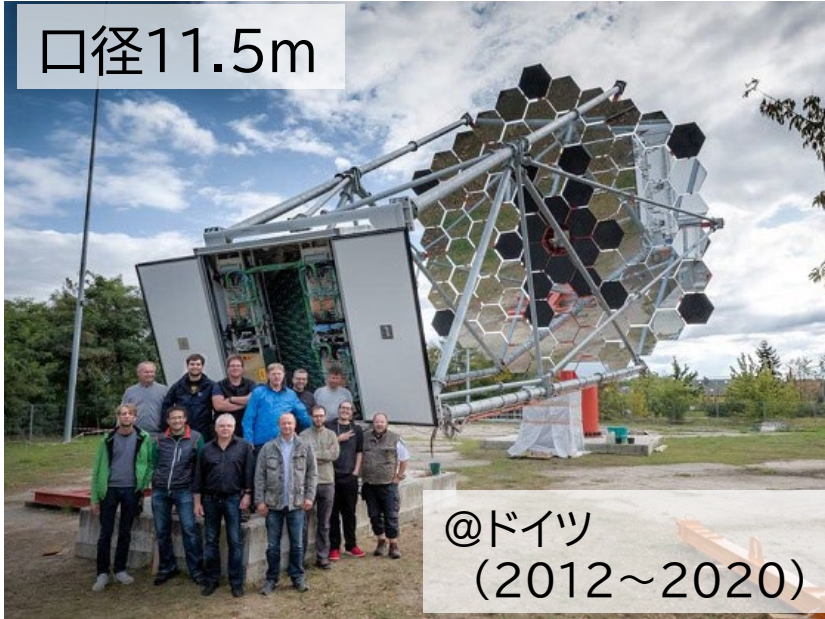
公開版ファイルから表削除

- LST 残り2基 議論中

中口径望遠鏡MST

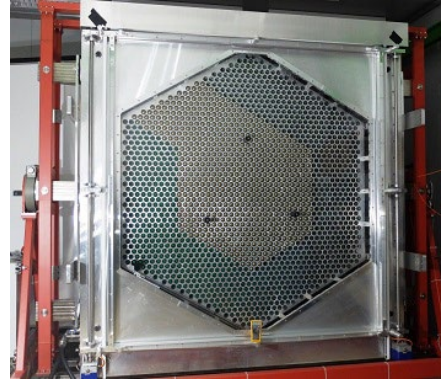
- Davies-Cotton型 MST(欧州)

口径11.5m



@ドイツ
(2012~2020)

カメラPMT約1800本



➤ 読出回路2種類
(南サイト用はHESS-II
に搭載し観測2019年~)

- Schwarzschild-Couder型 SCT



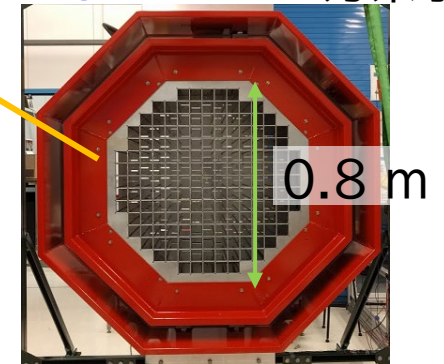
主鏡9.7m+副鏡5.4m

□ カメラ

SiPM~1.1万素子



@USA(2015~)



北サイト完成予想図

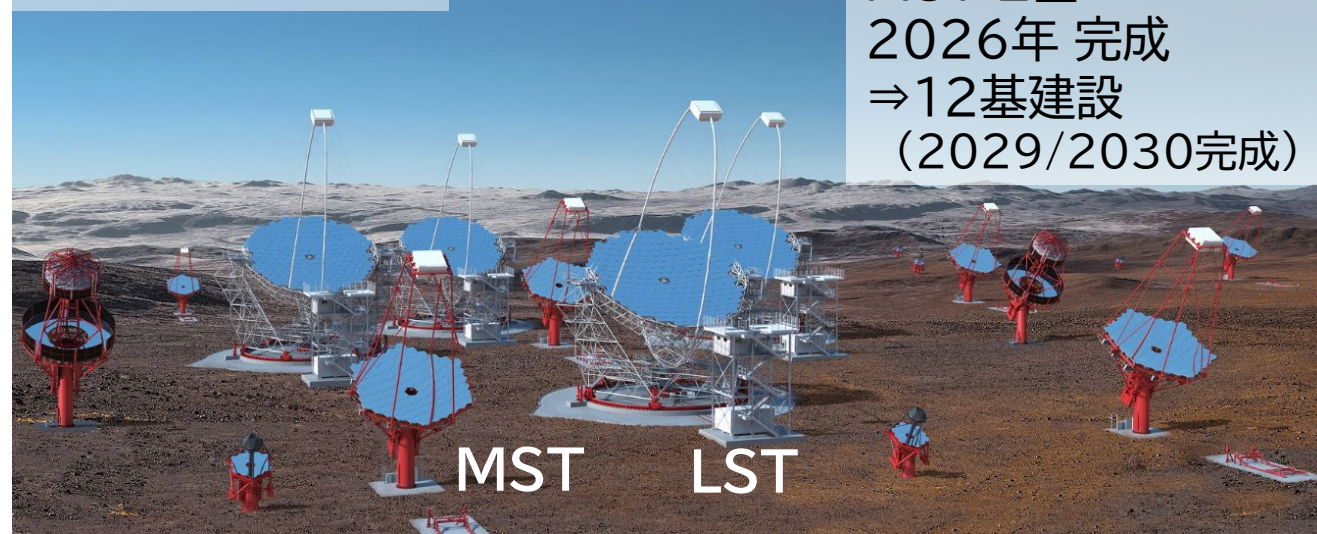


LST

MST

MST 初号基
2027年 完成
⇒8基建設
(2029/2030完成)

南サイト完成予想図

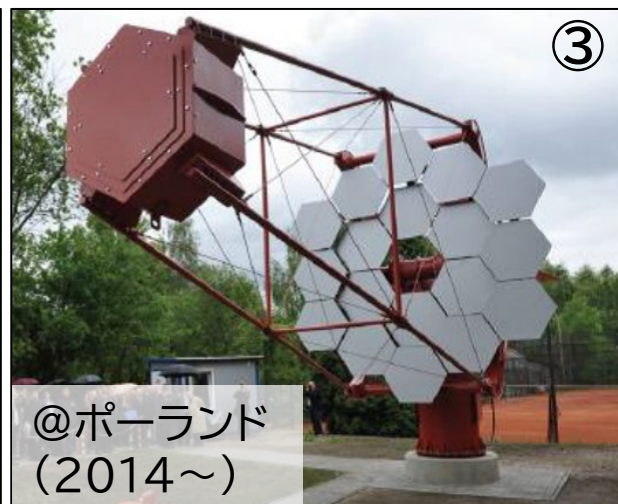


MST

LST

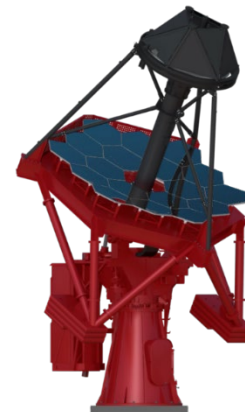
MST 2基
2026年 完成
⇒12基建設
(2029/2030完成)

● 3種類のプロトタイプ開発



● 1つへ(2019年決定)

- Schwarzschild-Couder型 ①採用 (主鏡4.3m+副鏡1.8m)
- SiPMカメラ(2048素子) ②採用



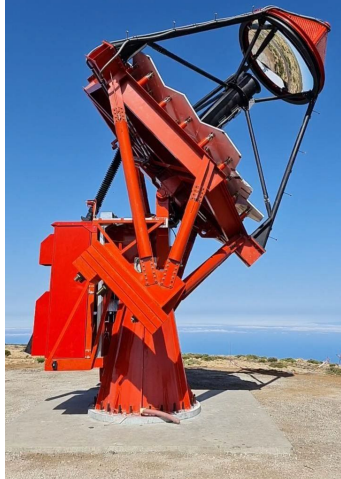
①の改良望遠鏡

カナリア諸島
テネリフェ島に
9基建設中
(ASTRI
mini-array)

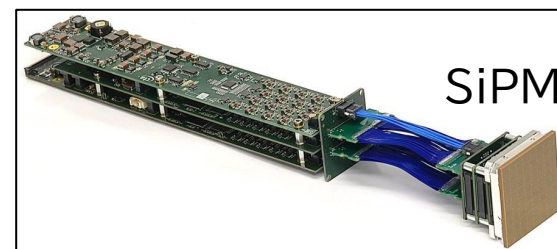
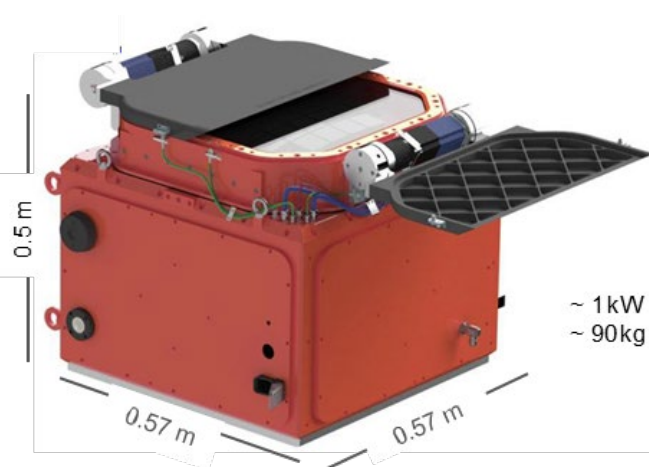


来年 全数完成

初号基
昨年ファーストライト



②のカメラ改良中



名大グループ
初号基カメラ搭載用
SiPM試験中

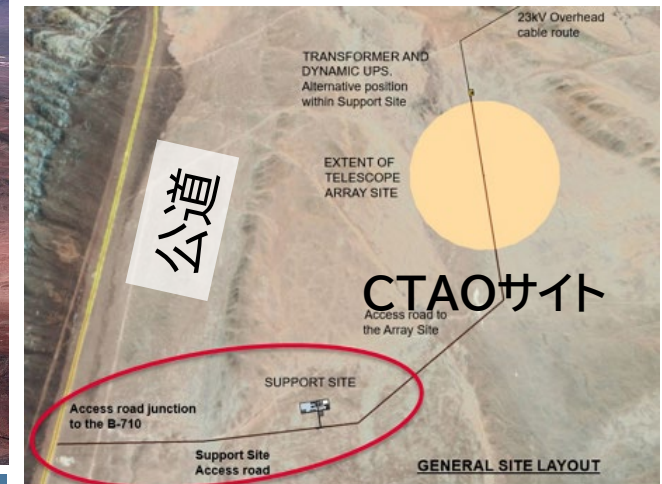
今年Critical Design Review
⇒SST初号基@南サイトの建設
来年初めまでに開始
⇒2-5号基完成 2026年

CTAO南サイト@チリ・パラナル

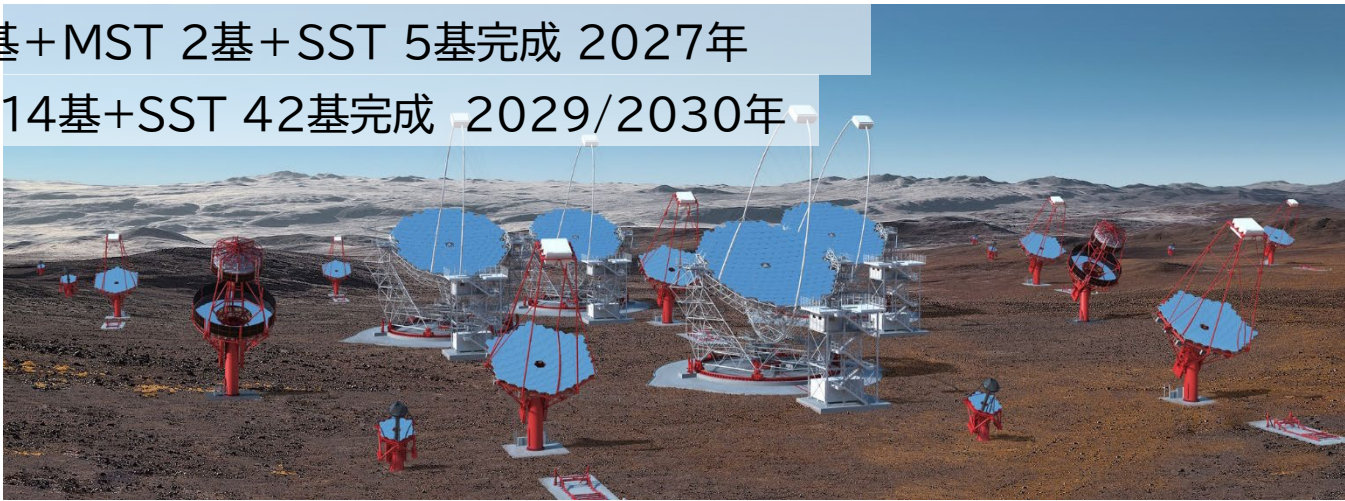


ERIC設立によって、
インフラ整備が本格化

- アクセス道路(残り)
- 望遠鏡初号基の電力線
来年整備



部分アレイ:LST 2基+MST 2基+SST 5基完成 2027年
⇒LST 2基+MST 14基+SST 42基完成 2029/2030年



口径17m 2基 ガンマ線望遠鏡 MAGIC

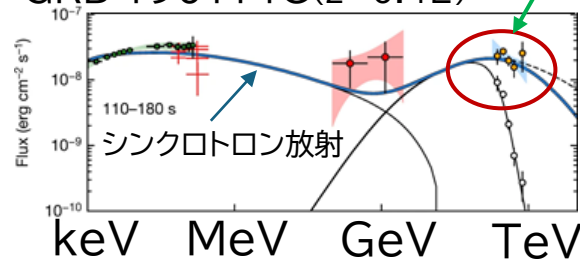


- 50 GeV – 100 TeV以上
- MAGIC-I(2003~), -II(2009~)
- 日本(2012年加入)約30名を含む13か国
約300名
- 210編以上の査読付論文出版

① ガンマ線バースト

高有意度検出 史上初

GRB 190114C($z=0.42$)MAGIC



シンクロトロン放射

逆コンプトン散乱放射

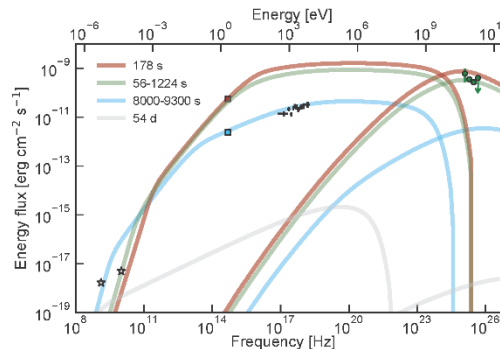
GRBに普遍的に存在

Nature, 575, 455 (2019)

Nature, 575, 459 (2019)

VHE γ 領域で最遠天体

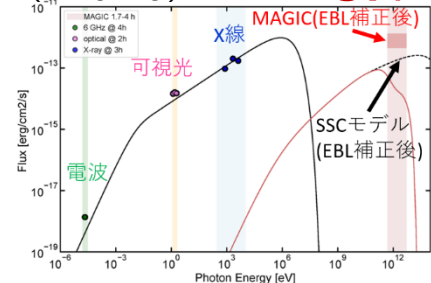
GRB 201216C($z=1.1$)



MNRAS, 527, 5856 (2024)

Short GRB
からの γ 線兆候

GRB 160821B
($z=0.16$)

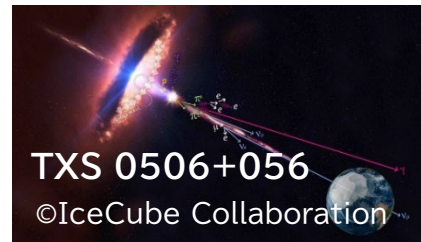


ApJ, 908, 90 (2021)

② 宇宙ニュートリノと γ 線によるニュートリノ源

天体同定 史上初

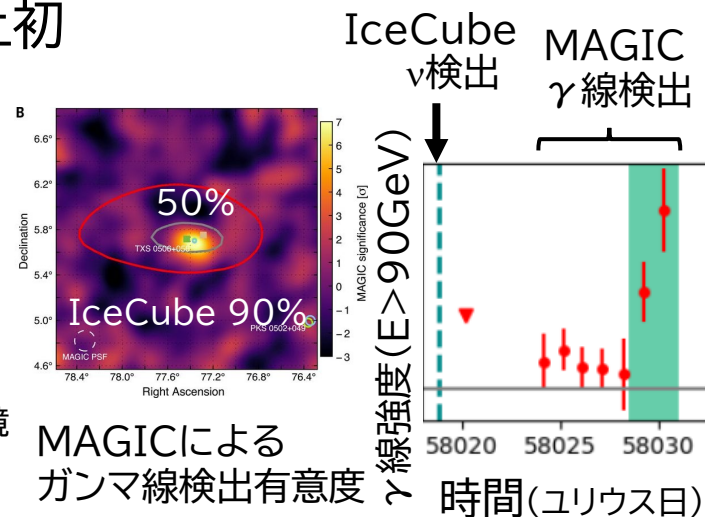
2017年9月22日



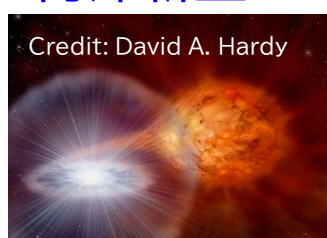
TXS 0506+056
©IceCube Collaboration

IceCube実験、Fermi衛星、
MAGIC望遠鏡、かなた望遠鏡
及び多波長観測チームの共著

Science, 361, 6398 (2018)



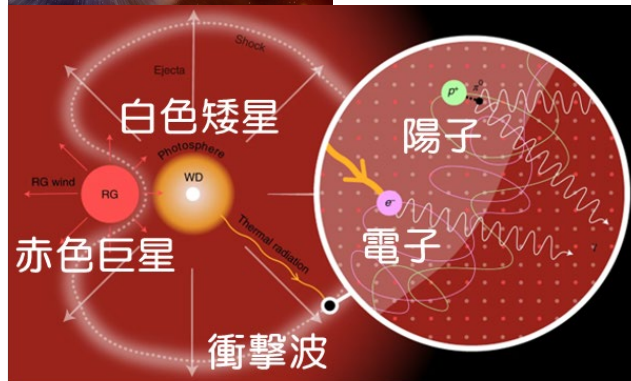
③ 再帰新星からのVHE γ 線発見



Credit: David A. Hardy

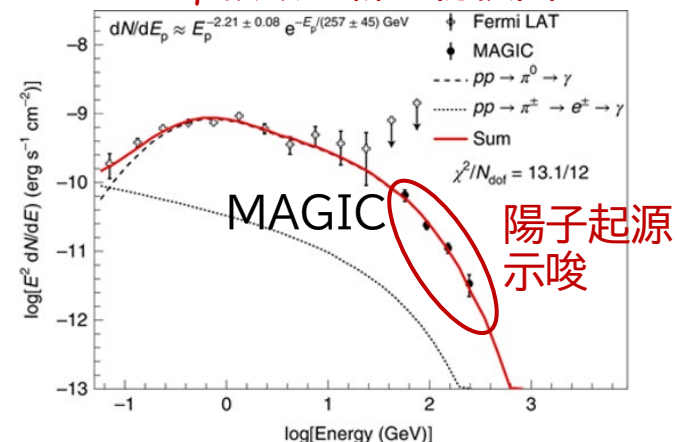
RS Ophiuchi

爆発周期:約15年



2021年8月爆発

VHE γ 領域で新星初検出



Nature Astronomy, 6, 689(2022)

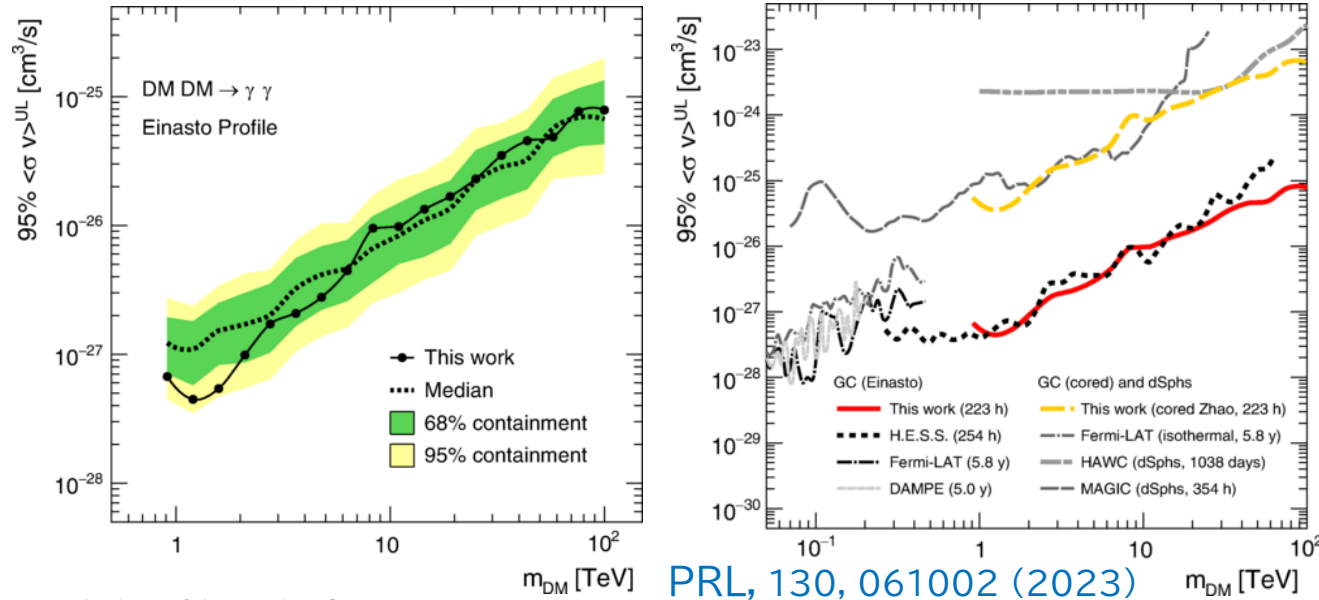
次の観測ターゲット:T CrB

MAGIC

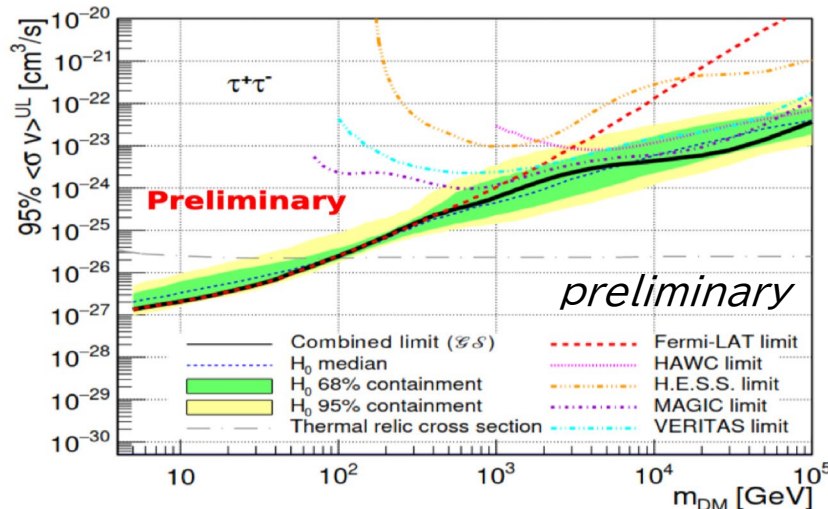


④ 暗黒物質対消滅ガンマ線探索 銀河中心領域

$E > 20$ TeV 従来に比べ約2倍強い制限



矮小楕円体銀河



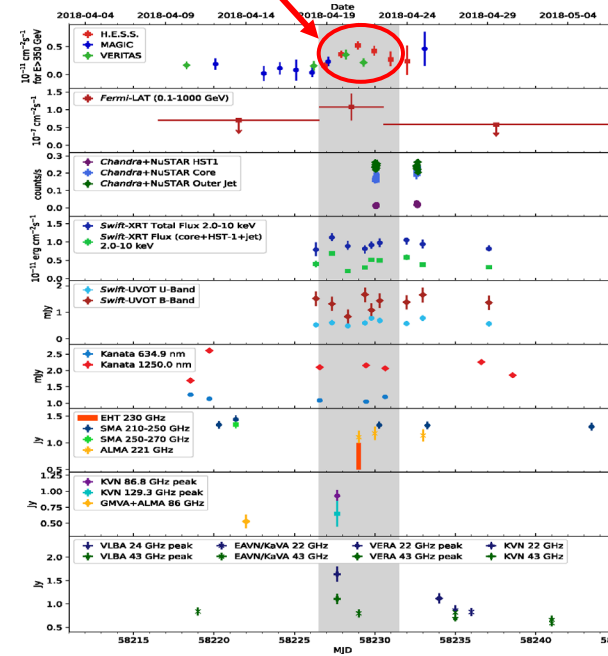
【論文投稿中】

Fermi, HAWC,
H.E.S.S., MAGIC,
VERITASの結合解析
⇒ 2-3倍強い制限

⑤ 活動銀河核M87ジェットから強力なガンマ線 フレアを検出

イベント・ホライズン・テレスコープ(EHT)を含む、
電波から γ 線までの多波長観測(2018年4月)

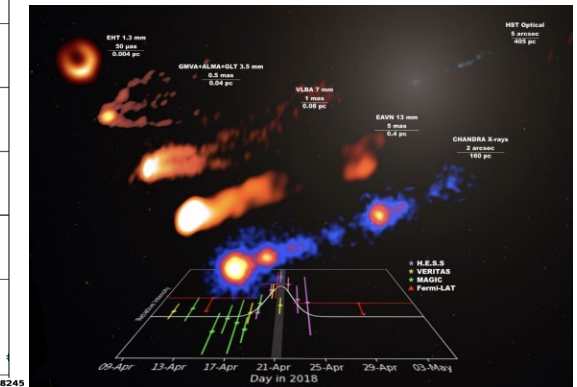
約10年ぶりの活動期を捉えた A&A, 692, A140 (2024)



強度変動から求めた γ 線放射領域
のサイズはBH半径の約10倍

2024年12月 共同プレスリリース

東京大学、名古屋市立大学、国立天文台、
工学院大学、東京科学大学、茨城大学、
大阪公立大学



⑥ チェレンコフ望遠鏡の光強度干渉計としての開発

角度分解能<0.5 mas達成

MAGICの今後の運用計画

- 昨年Collaboration MoU更新(~2029/6)
- 北CTAOとの運用については未定

- 次世代ガンマ線天文台CTAO(Cherenkov Telescope Array Observatory)
 - 高エネルギー天体現象や宇宙線起源の解明、暗黒物質探索、宇宙論・基礎物理学に関するテーマ
 - CTAO ERIC(European Research Infrastructure Consortium)が今年1月設立し、建設加速
 - 両半球サイトが2029/2030年に完成予定、公開天文台20年以上運用
- 北サイト建設 順調
 - 日本グループが中核的役割を担う大口径望遠鏡LSTの4基アレイは来年Q2に完成予定
 - MAGICと連携観測中
- 初号基LST-1による科学成果創出
 - VHEガンマ線で最遠AGNのOP313、BOAT GRB、再帰新星 RS Ophなど
 - 突発天体フォローアップ観測(マルチメッセンジャー観測) 進行中
- 南サイト建設
 - インフラ整備中
 - 日本グループは小口径望遠鏡SSTのSiPMカメラ開発
 - 2027年に、部分アレイ LST 2基、中口径望遠鏡MST 2基、SST 5基が完成予定

