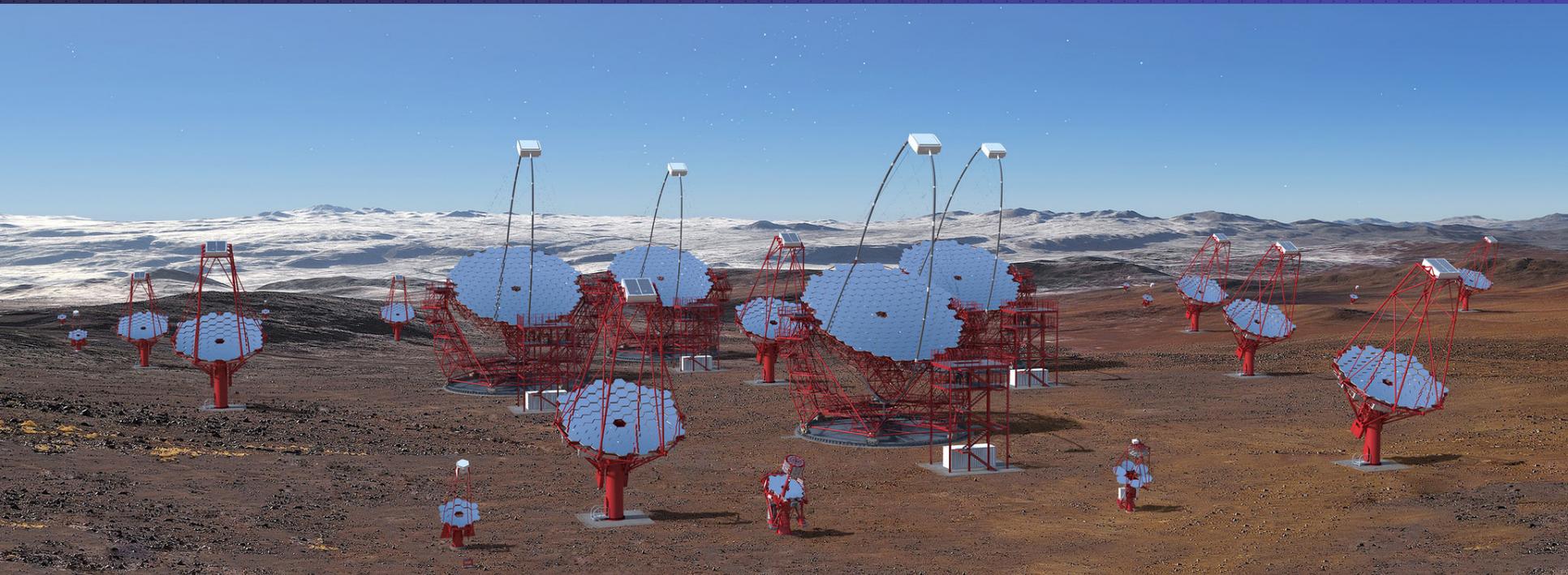
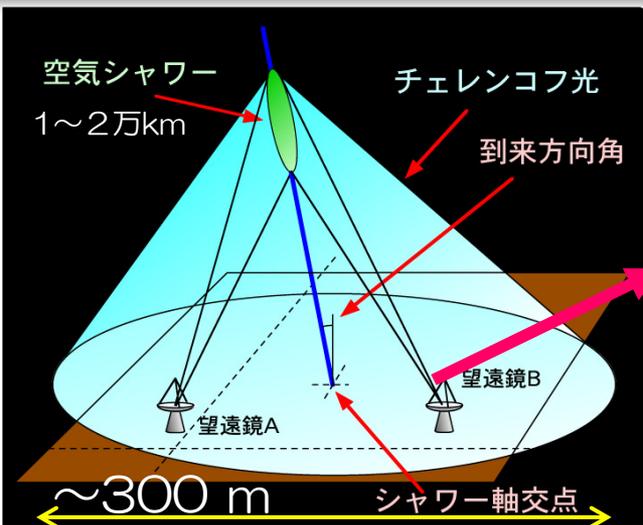


窪 秀利 (京都大学)

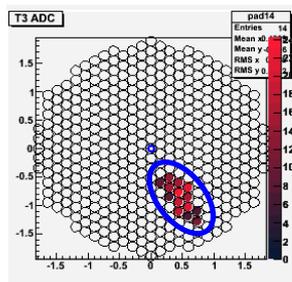
- TeVガンマ線観測の現状
- Cherenkov Telescope Array (CTA)計画
- CTAで狙うサイエンス



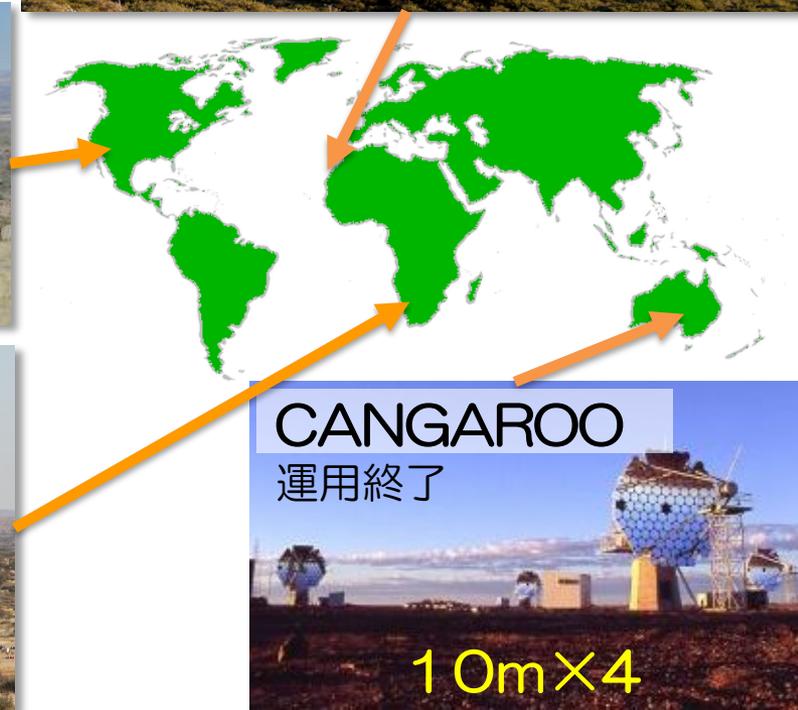
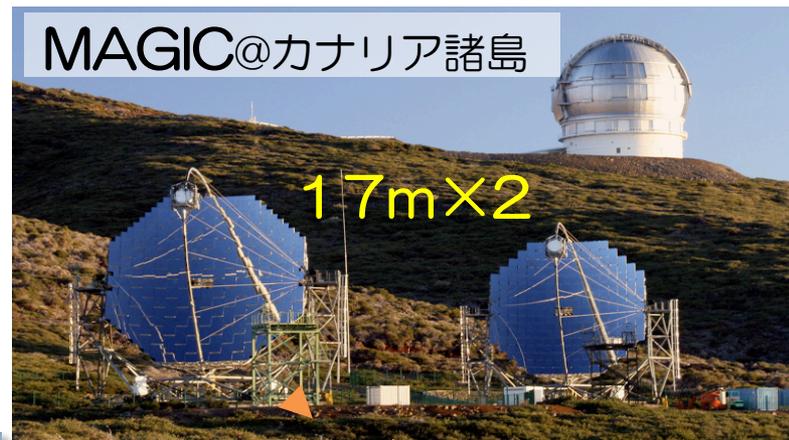
大気チェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーガンマ線観測



焦点面カメラ
(現行)
光電子増倍管
500~1000本

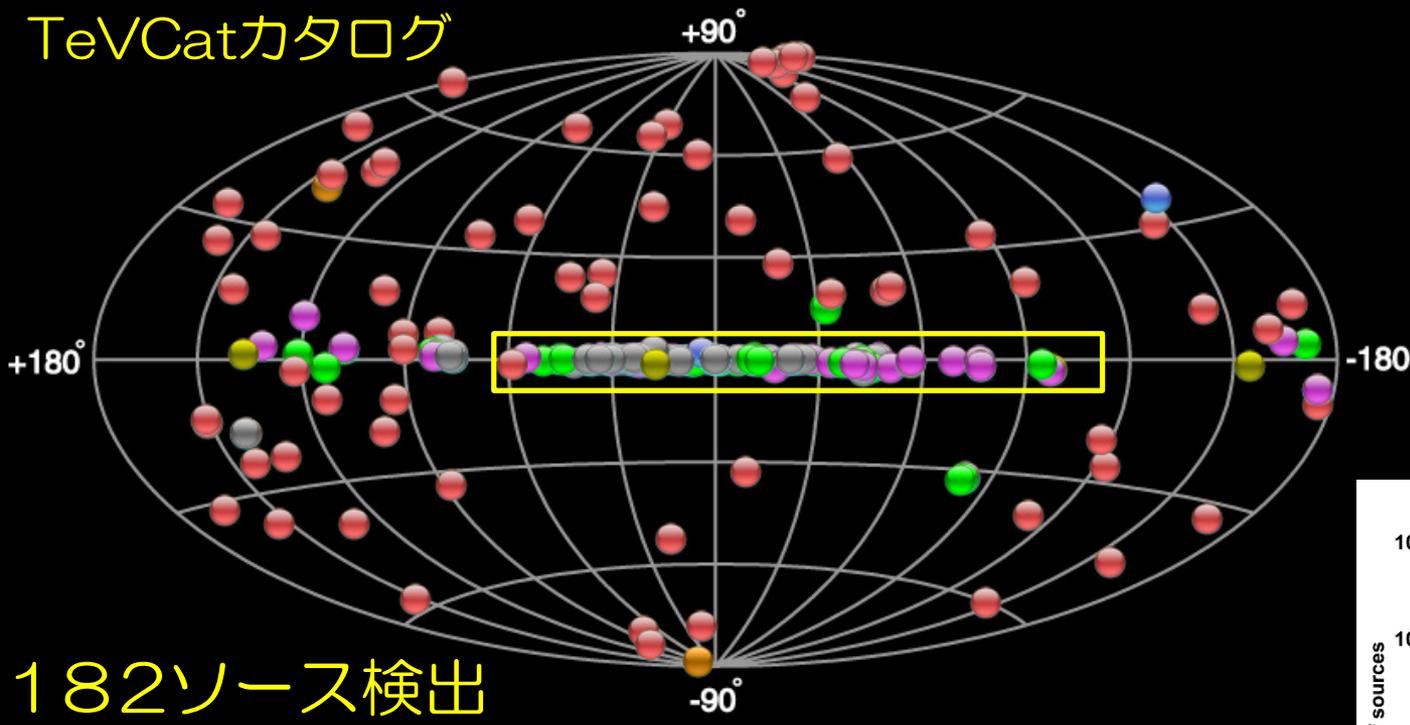


現行ステレオ観測 50 GeV~50 TeV



TeVガンマ線天体数の増加

TeVCatカタログ



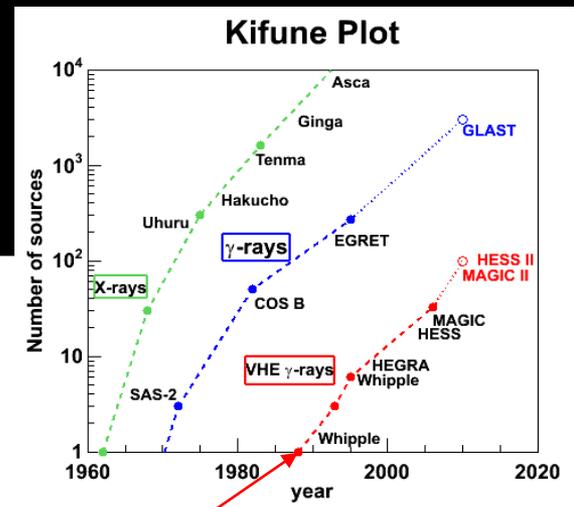
- PWN
- Starburst
- HBL, IBL, FRI, FSRQ, LBL, AGN (unknown type)
- Globular Cluster, Star Forming Region, uQuasar, Cat. Var., Massive Star Cluster, BIN, BL Lac (class unclear), WR
- Shell, SNR/Molec. Cloud, Composite SNR
- DARK, UNID, Other
- Binary, XRB, PSR, Gamma BIN

182ソース検出

銀河系外 75 (最遠方 $z=0.94$)
 活動銀河核70, スターバースト銀河2,
パルサー星雲1, スーパーバブル1 超新星残骸1

銀河系内 75
パルサー星雲 33, 超新星残骸24, 連星系 6,
 大質量星団3, パルサー2, 球状星団1 未同定 6

未同定 32 ガンマ線バーストは未検出



1989年 かに星雲の検出

13/182ソースは、シャワー観測装置 (Milagro, HAWC等) による発見。多くは未同定。

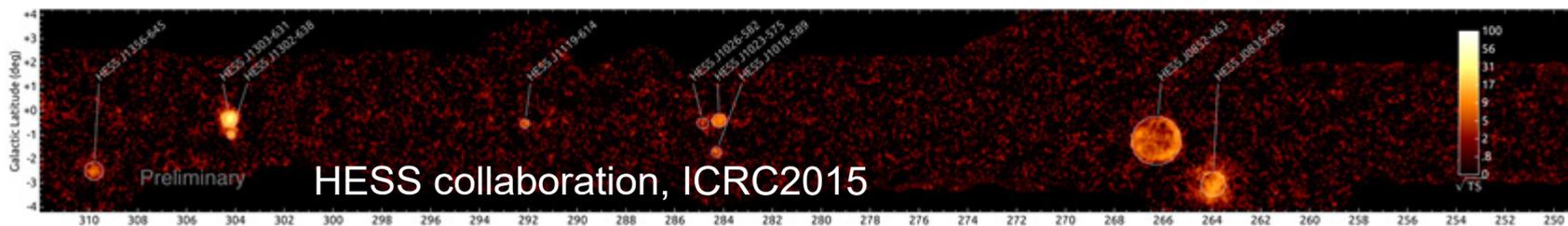
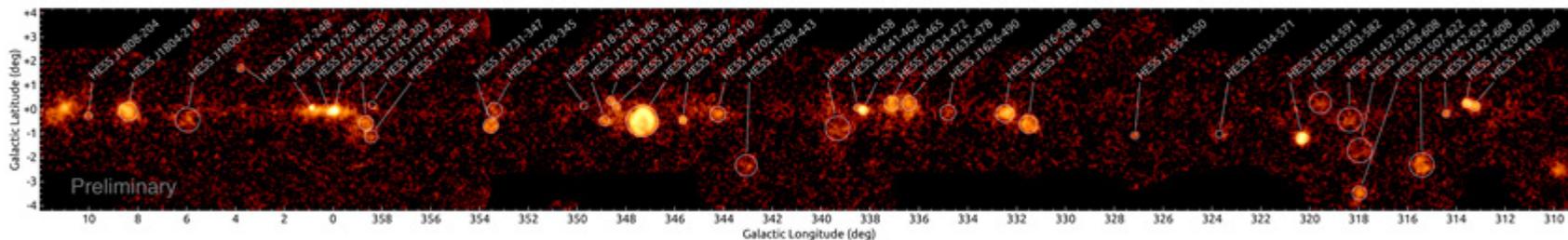
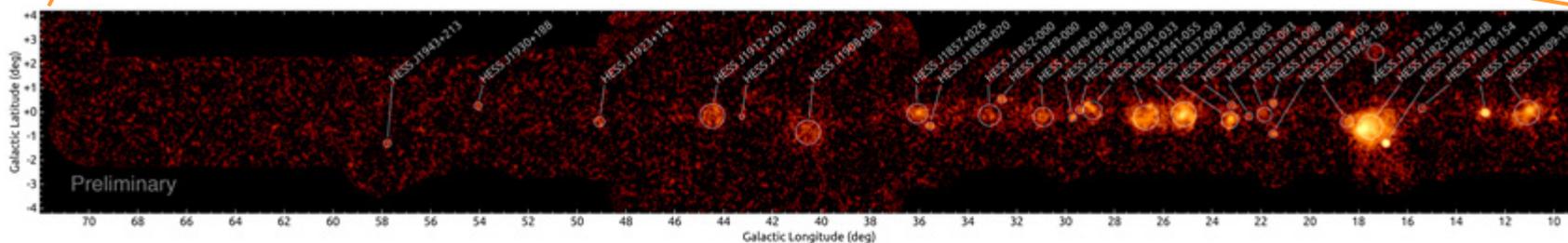
銀河面サーベイによる多数の天体の発見

- H.E.S.S.望遠鏡 2004-2013年 3000時間, $E > 0.2$ TeV, 感度 $\sim 1\%$ Crab
- $250^\circ < l < 65^\circ$ $-3.5^\circ < b < 3.5^\circ$

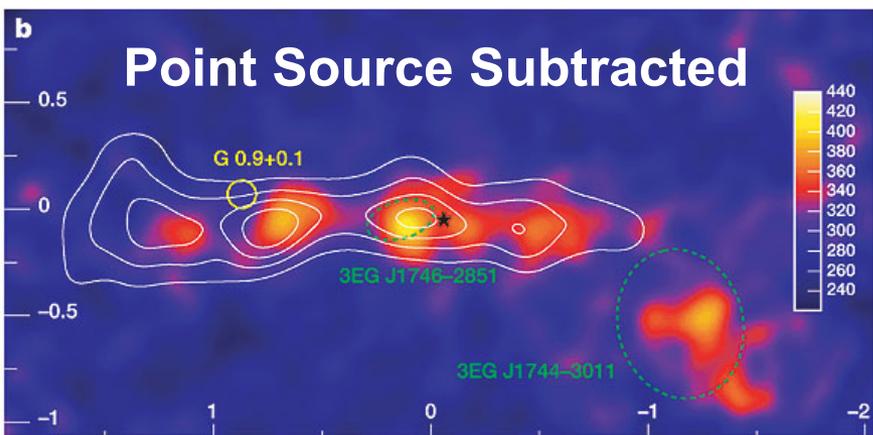
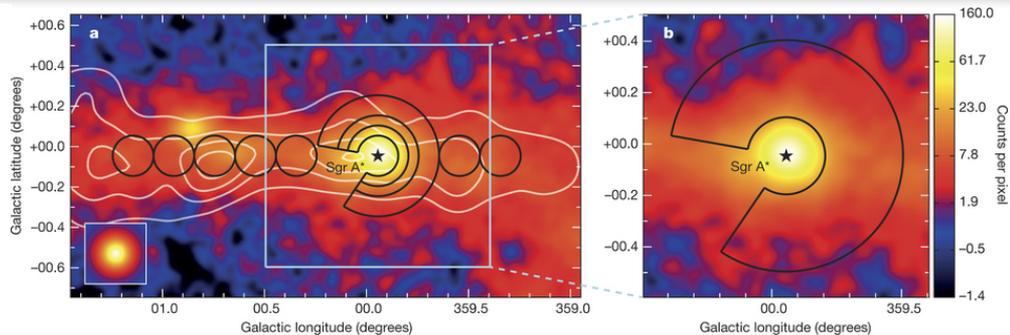
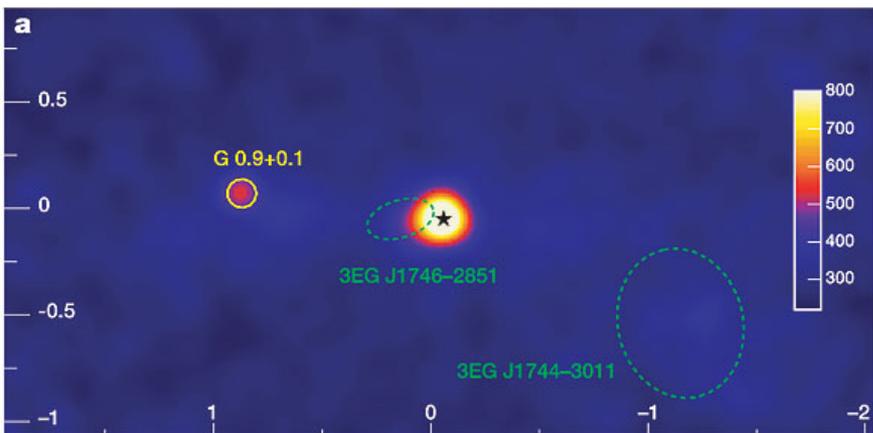
- 未同定
- PWN
- SNR
- 複合
- Binary



角度分解能0.07度(rms)

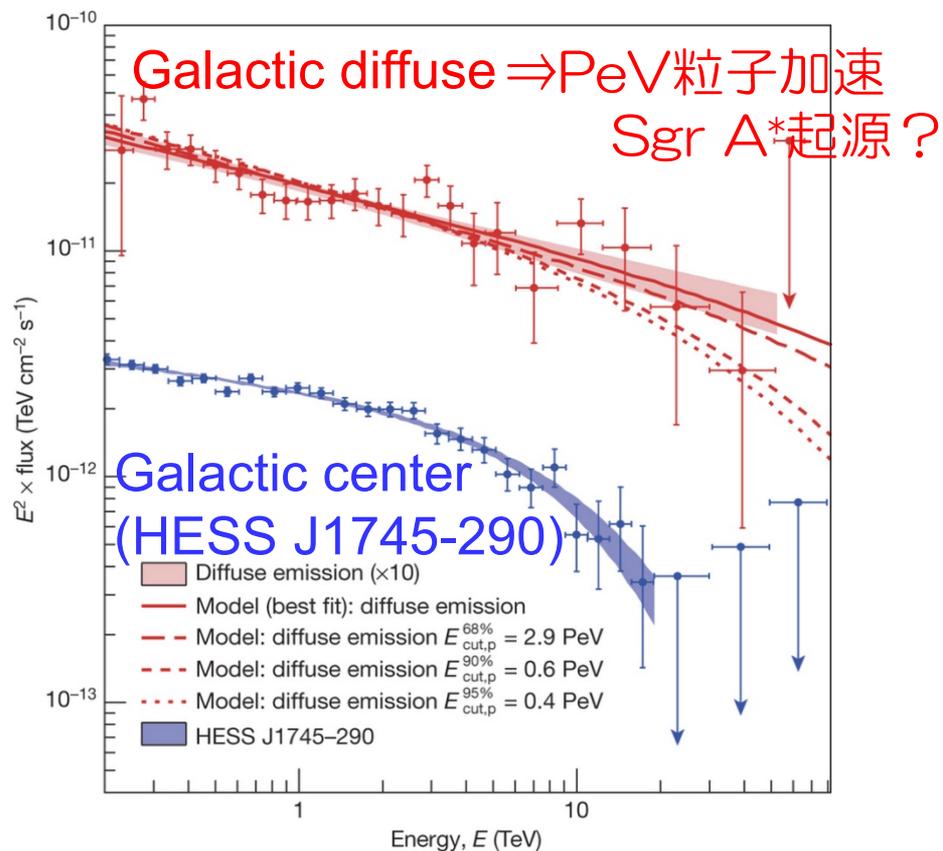


銀河中心領域からのTeVガンマ線



HESS collaboration., *Nature*, 439, 695 (2006)

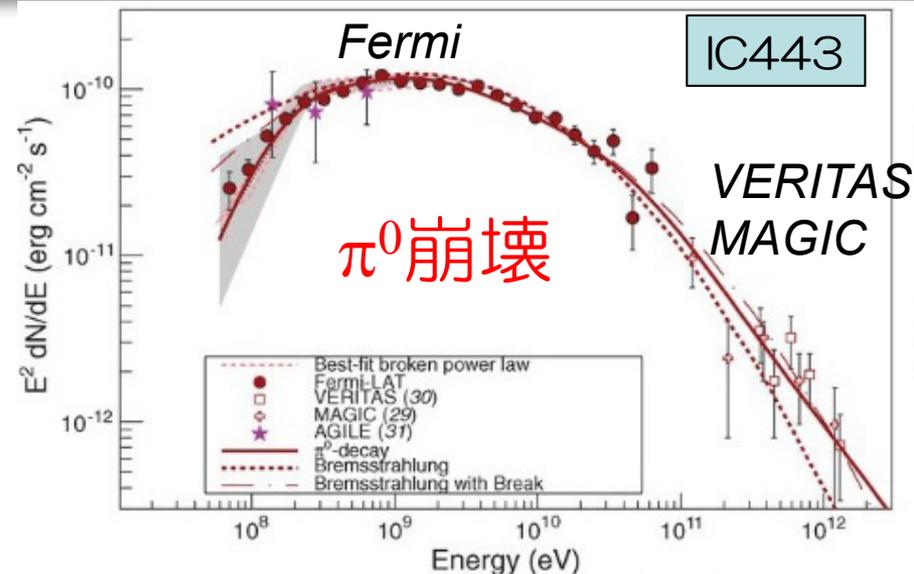
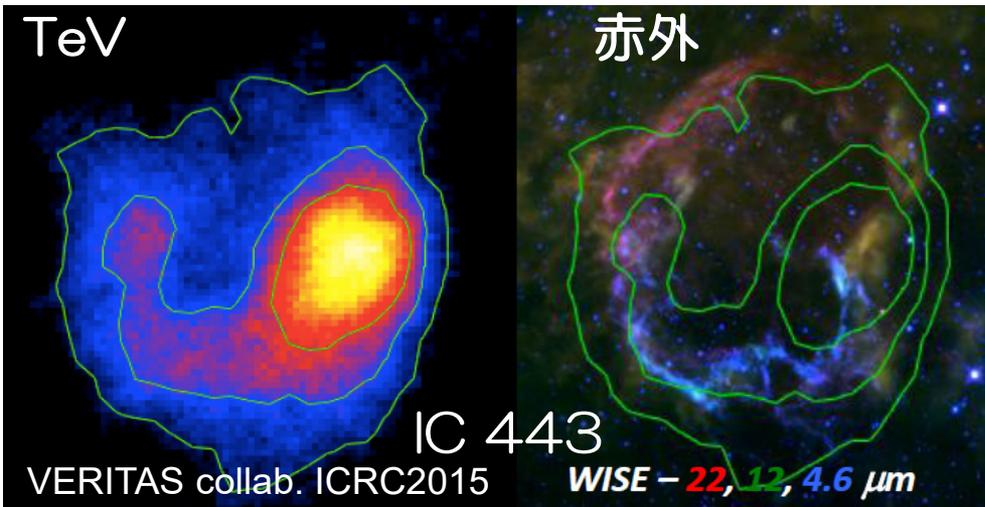
拡散ガンマ線強度は、CS輝線強度と相関⇒宇宙線と分子雲の相互作用



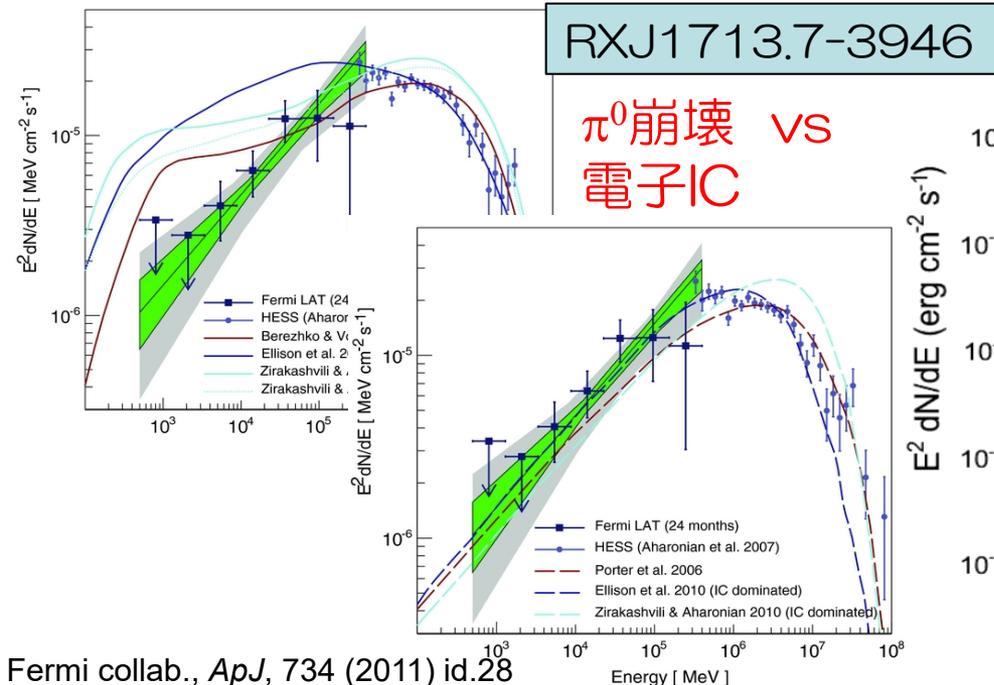
HESS collaboration., *Nature*, 531 (2016) 476

超新星残骸のGeV-TeVガンマ線放射

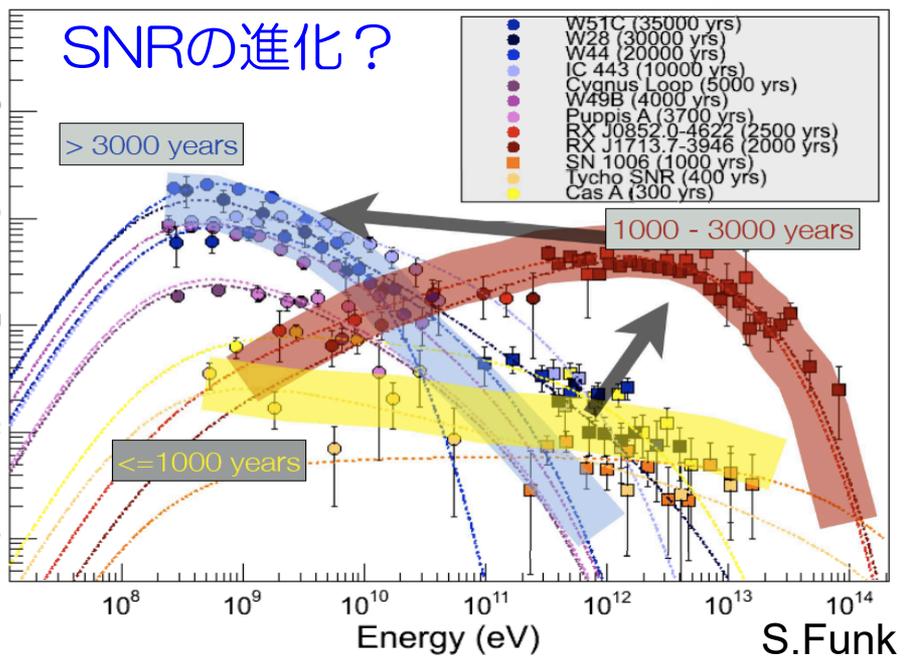
SNR：銀河内宇宙線起源の候補



Fermi collaboration., *Science*, 339 (2013) 807



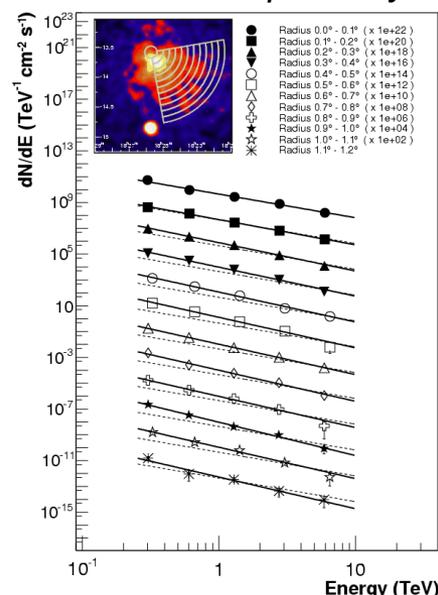
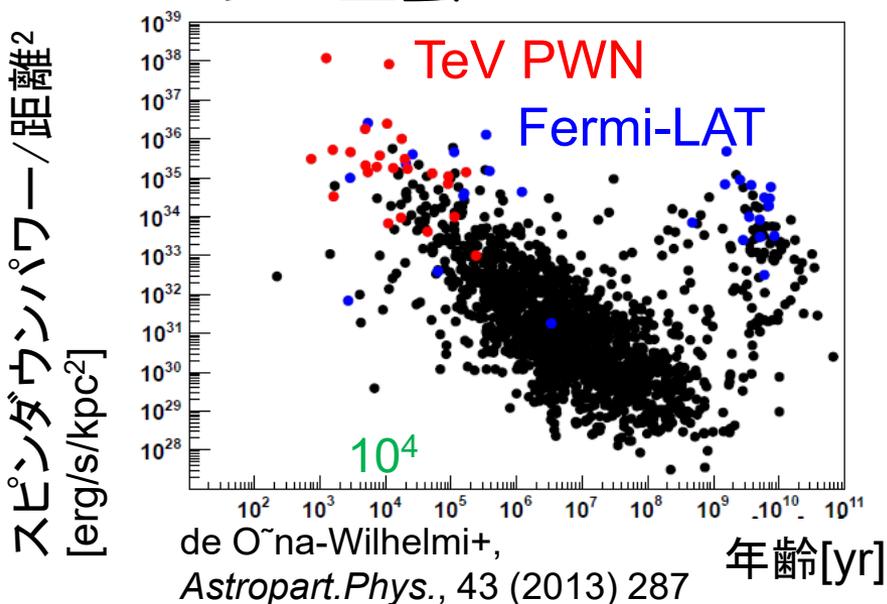
Fermi collab., *ApJ*, 734 (2011) id.28



S.Funk

パルサー・パルサー星雲からのTeVガンマ線

● パルサー星雲

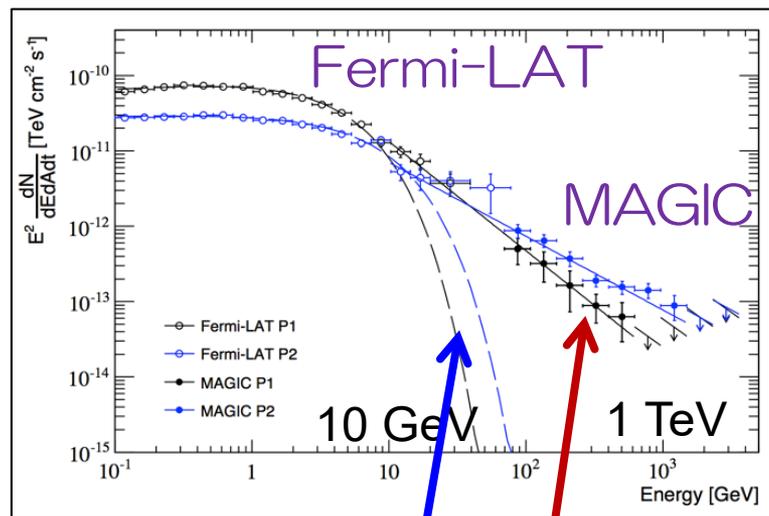
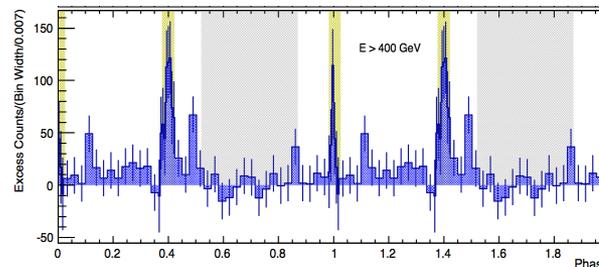


HESS J1825-137

パルサーから遠ざかる
ほどに、スペクトルの
べきが大
⇒粒子冷却

HESS collaboration, A&A,
460 (2006) 365

● かにパルサー



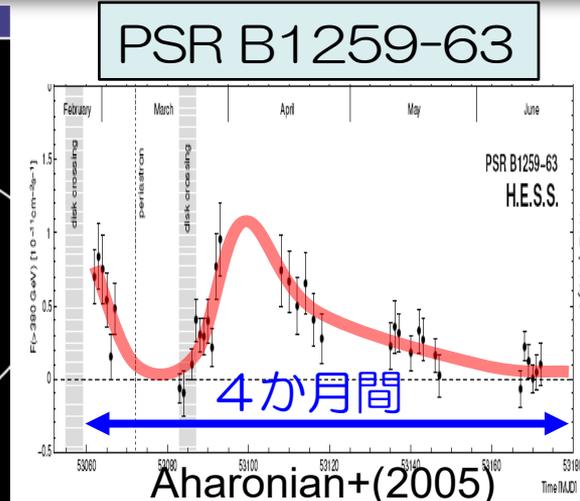
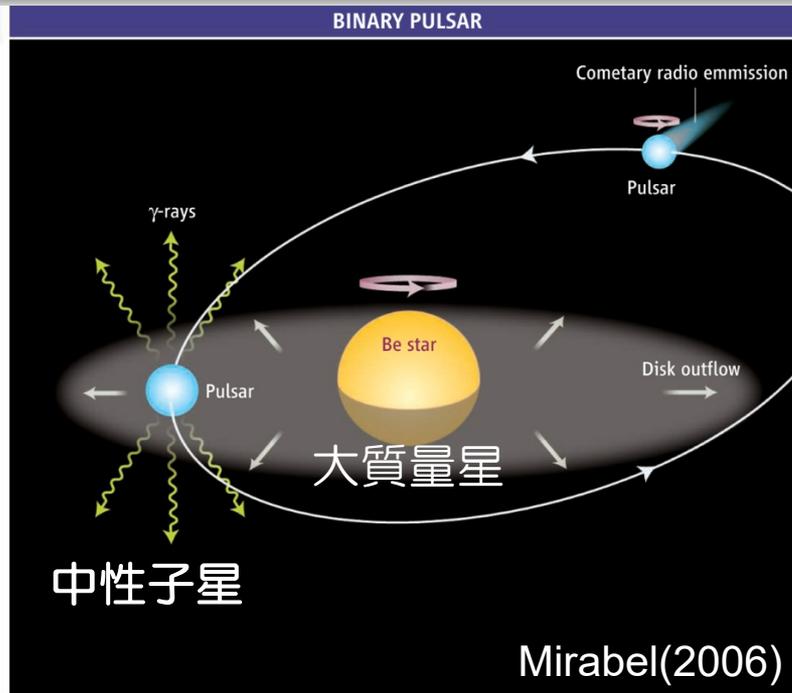
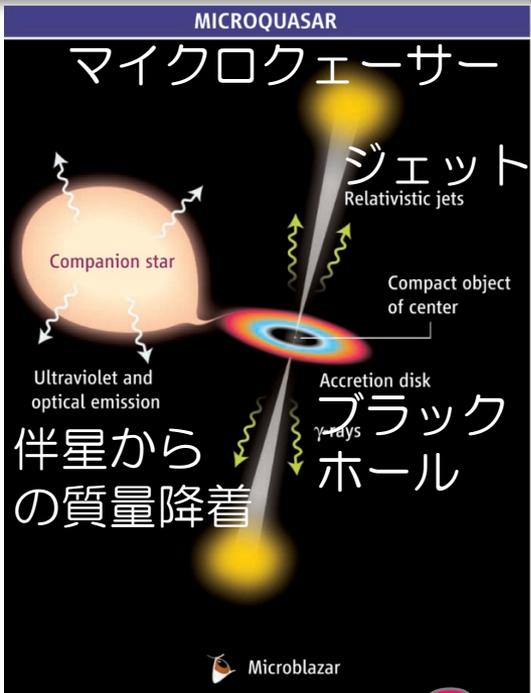
MAGIC collaboration., A&A,
585 (2016) id.A133

従来のモデル

中性子星磁気圏の静電
場により粒子を加速。
曲率輻射によりGeV
ガンマ線を放射

パルス放射が
TeVまで
伸びていた！
発生機構は謎

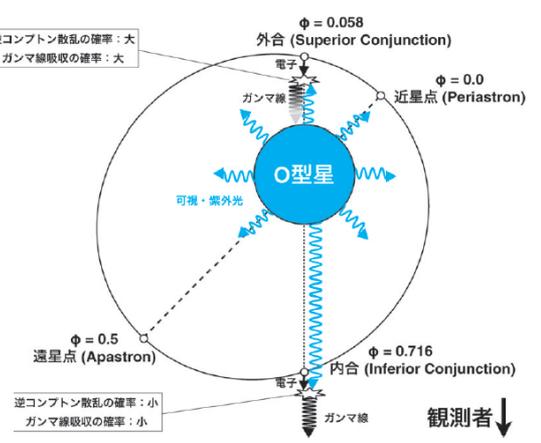
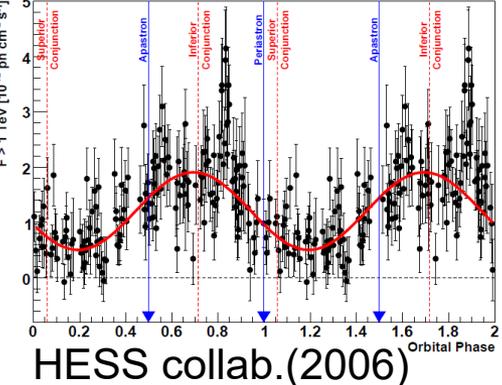
連星系からの周期的ガンマ線放射



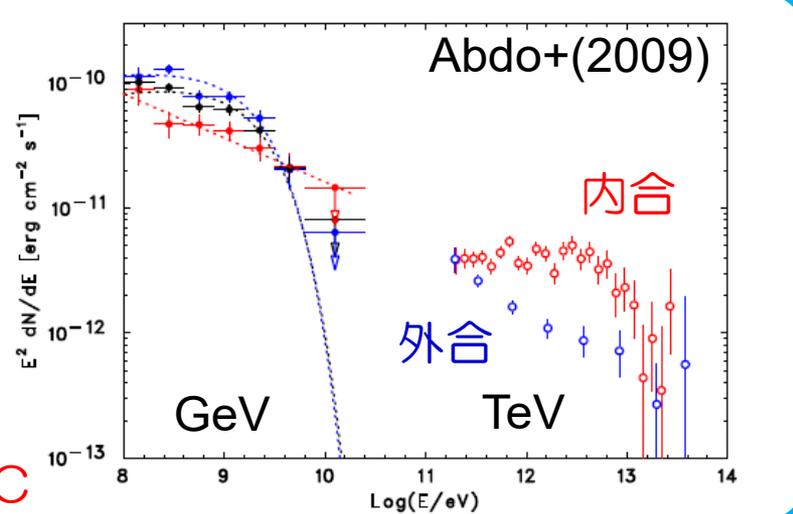
● パルサー風と恒星風の衝突により衝撃波が形成され粒子を加速。
電子？陽子？

LS5039

軌道周期(3.9日)と同期

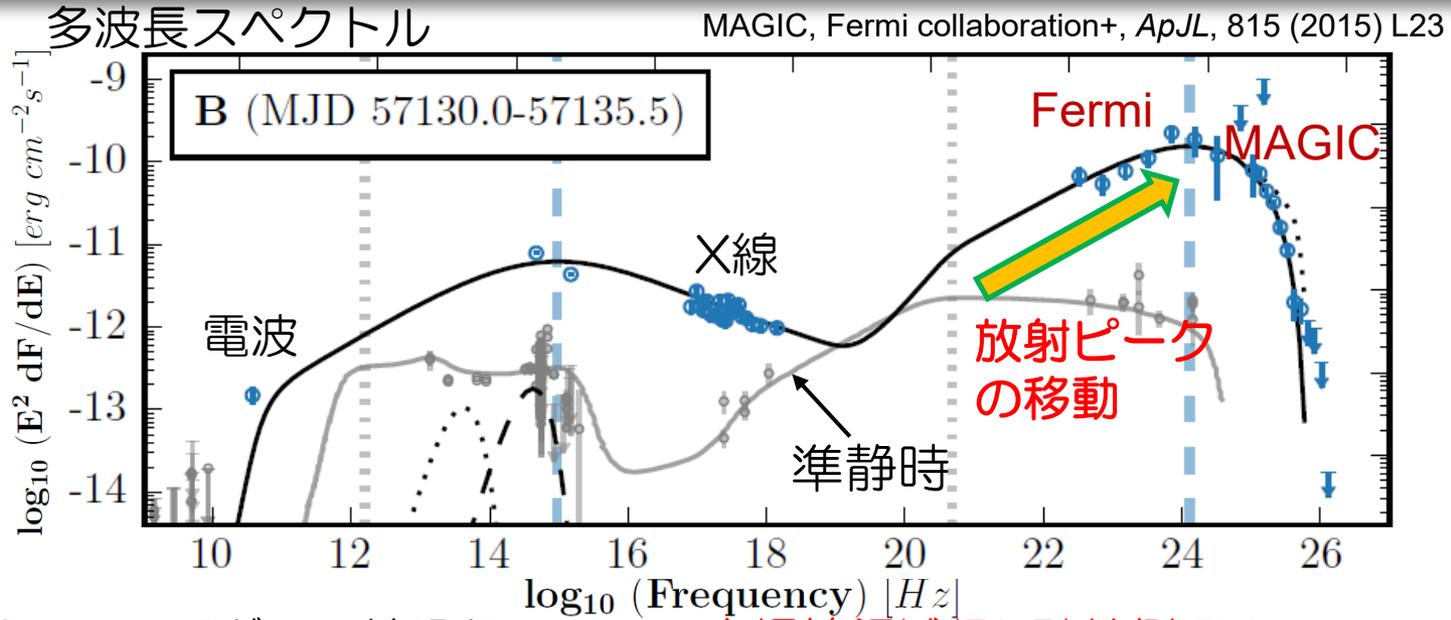


田中+(2010) γ 線：電子IC



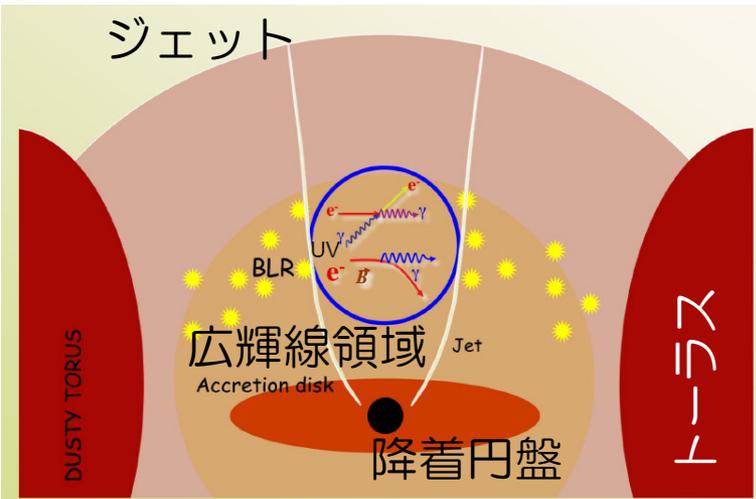
FSRQの γ 線放射領域

PKS 1441+25
($z=0.940$)
最遠方VHEガンマ線天体



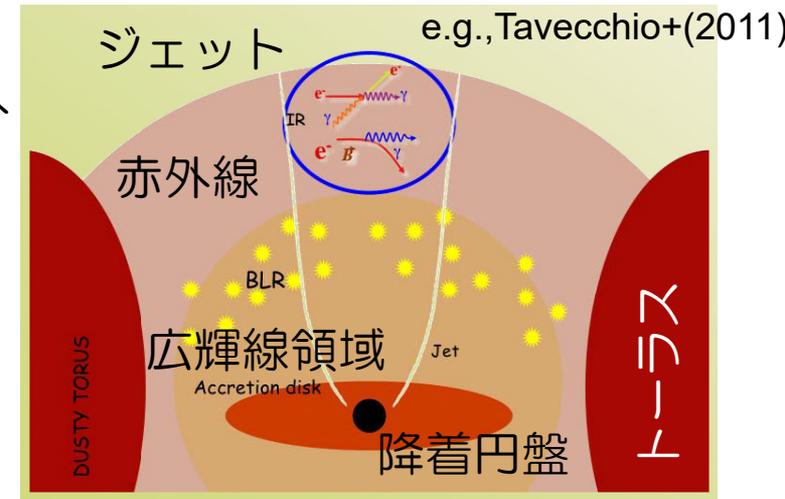
広輝線領域 (BLR) からのUVでガンマ線吸収
数十GeVでカットオフ

広輝線領域 (BLR) 外側での
逆コンプトンによる γ 線放射



準静時

光子密度 内 > 外
電子冷却 >
電子 γ max <



フレア時

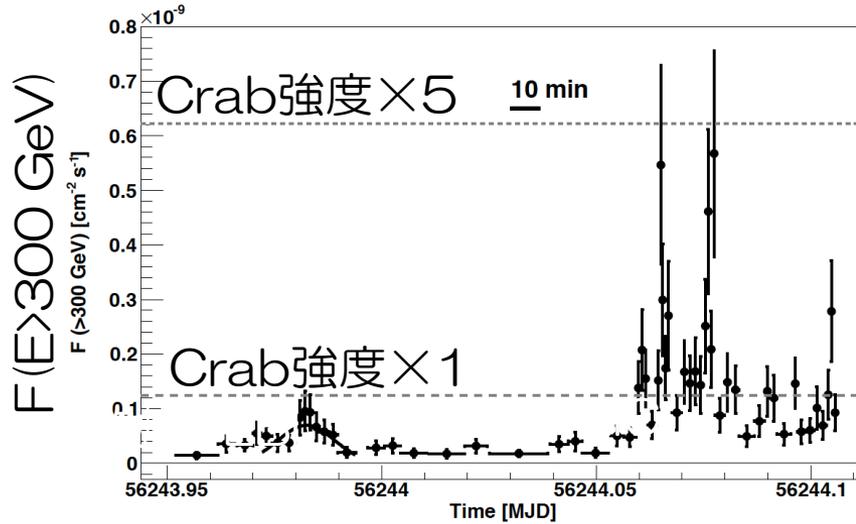
Stamerra's presentation



AGNブラックホール極冠からのガンマ線放射

- 電波銀河 IC310 ($z=0.019$)
- $E>300\text{GeV}$ で、強度変動 < 4.8 分(doubling time scale)を検出

MAGIC collaboration, *Science*, 346 (2014) 1080



もし、放射領域サイズ=ブラックホールサイズ($3 \times 10^8 M_{\odot} \rightarrow \sim 3\text{AU}$)ならば、ジェットによる相対論的時間短縮効果を考慮しても20分相当

⇒ガンマ線放射がブラックホールサイズより狭い領域で起こっていることを発見。

放射機構

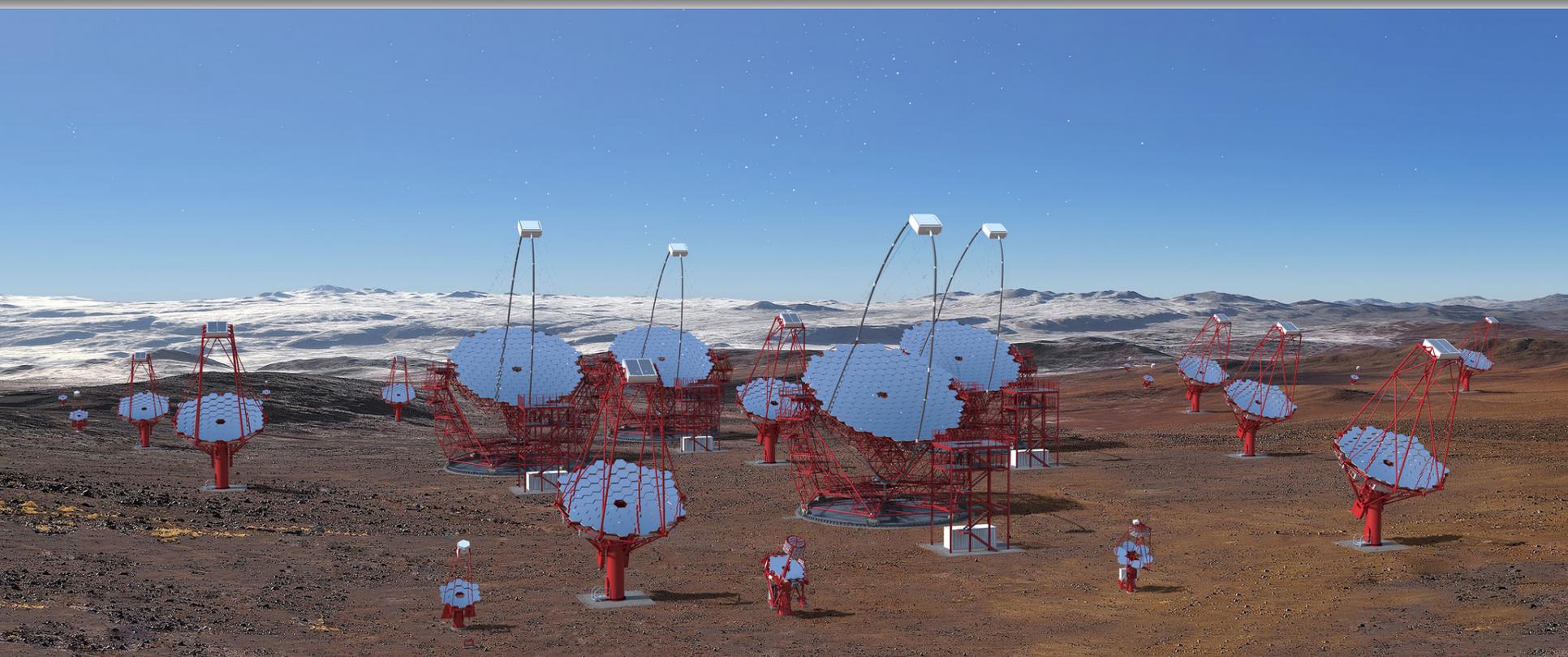
回転ブラックホール極軸付近の磁気圏に、電位ギャップが生成

→電子・陽電子(降着円盤からの光子・光子衝突で対生成)が加速

→逆コンプトン散乱によりガンマ線が放射

降着円盤

Cherenkov Telescope Array (CTA)計画



CTA Consortium 32か国 ~1300名(日本119名)



サイト建設 北半球：2016年～ 南半球：2018年～

部分観測 2018年～

公開天文台として運用 2021年～ (現行望遠鏡は基本的に観測非公募)

フルアレイによる観測 2024年～ 運用期間20年



CTA-Japan Consortium (119名)



PI: 手嶋政廣, Collaboration Board Chair: 戸谷友則, Co-PI: 窪秀利

青山大 大平豊, 木坂将大, 澤田真理, 柴田徹, 山崎了, 吉田篤正

茨城大 加賀谷美佳, 片桐秀明, 重中茜, DANG VIET TAN, 本橋大輔, 柳田昭平, 吉田龍生

JAXA/ISAS 井上芳幸, 小山志勇, 李兆衡

大阪大 藤田裕

北里大 村石浩

京大基研 井岡邦仁

京大物理 窪秀利, 今野裕介, 齋藤隆之, 田中孝明, 谷川俊介, 鶴剛, 野崎誠也, 増田周

近畿大 千川道幸

熊本大 高橋慶太郎

KEK素核研 郡和範, 田中真伸, 廣島渚

甲南大 猪目祐介, 岸田柊, 高見将太, 田中周太, 山本常夏

国立天文台 井上剛志

埼玉大 寺田幸功, 永吉勤, 西山楽

東海大 池野祐平, 木村颯一郎, 櫛田淳子, 辻本晋平, 西嶋恭司, 吉田麻佑

東大 浅野勝晃, 石尾一馬, 稲田知大, 岩村由樹, 大石理子, **宇宙線研** 大岡秀行, 岡崎奈緒, 加藤翔, 黒田隼人, 榊直人, 櫻井駿介, 高橋光成, 手嶋政廣, 中嶋大輔, 野田浩司, 林田将明, 広谷幸一, 深見哲志, 村瀬孔大, 吉越貴紀, K.S.Cheng, Xiaohong Cui,

Timur Dzhatdoev, Daniela Hadasch, David C.Y.Hui, Albert K.H. Kong, Pratik Majumdar, Daniel Mazin, Jumpei Takata, Thomas P. H. Tam, Wenwu Tian

東大天文 川中宣太, 戸谷友則

東大物理 中山和則, 馬場彩

東北大 格和純, 當真賢二

徳島大 折戸玲子

名大KMI 松本浩典

名大理 佐野栄俊, 立原研悟, 早川貴敬, 林克洋, 福井康雄, 山本宏昭, 吉池智史

名大ISEE 朝野彰, 奥村暁, 佐藤雄太, 田島宏康, 中村裕樹, 日高直哉, 山根暢仁

広大理 高橋弘充, 深沢泰司

広大宇宙科学センター 田中康之, 水野恒史

宮崎大 森浩二

山形大 郡司修一, 武田淳希, 門叶冬樹, 中森健之

山梨学院大 内藤統也, 原敏

理研 井上進, 長瀧重博, Maxim Barkov, Gilles Ferrand, Haoning He, Donald Warren

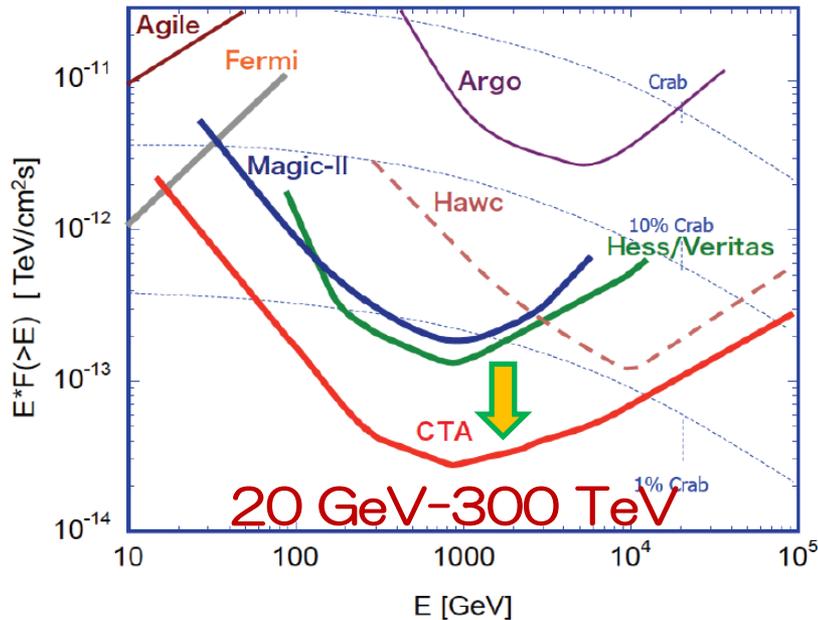
立教大 内山泰伸

早稲田大 片岡淳

Cherenkov Telescope Array (CTA)計画

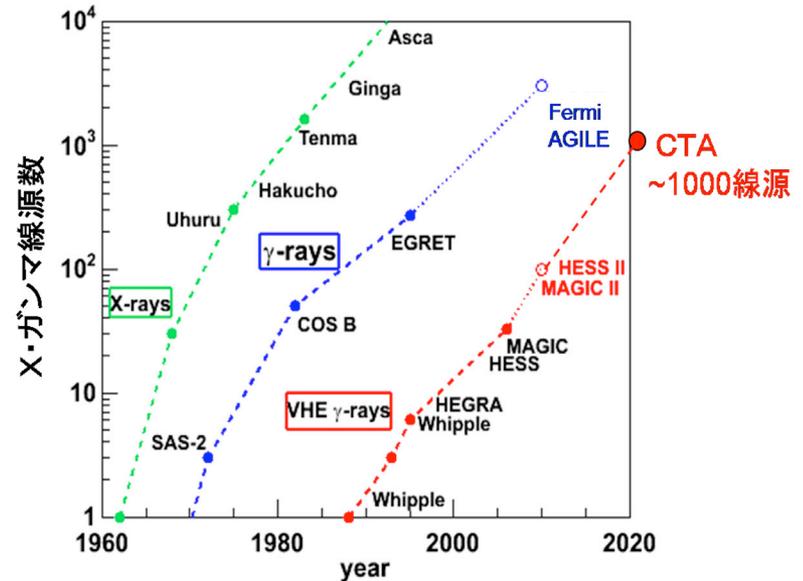
現行望遠鏡に比べ

- 感度 10倍
- エネルギー帯域 10 倍



CTAでは

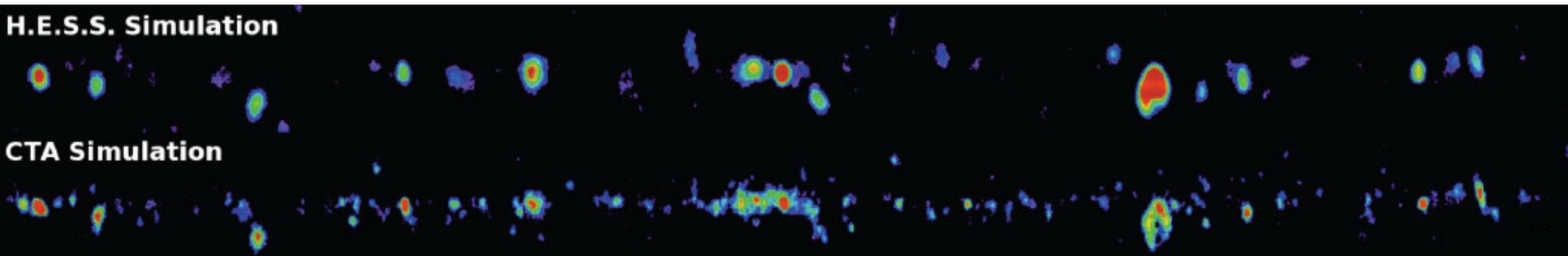
- 検出1000個以上
- 最遠方 $z \sim 1$ (現行) $\Rightarrow z \sim 4$



- 角度分解能 2~3 倍 (2分角@10TeV)

H.E.S.S. Simulation

CTA Simulation



LST × (北4+南4)

23m口径

20 GeV - 1 TeV

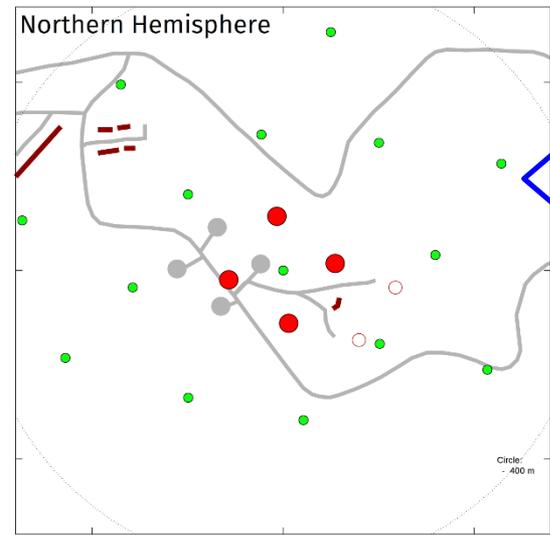
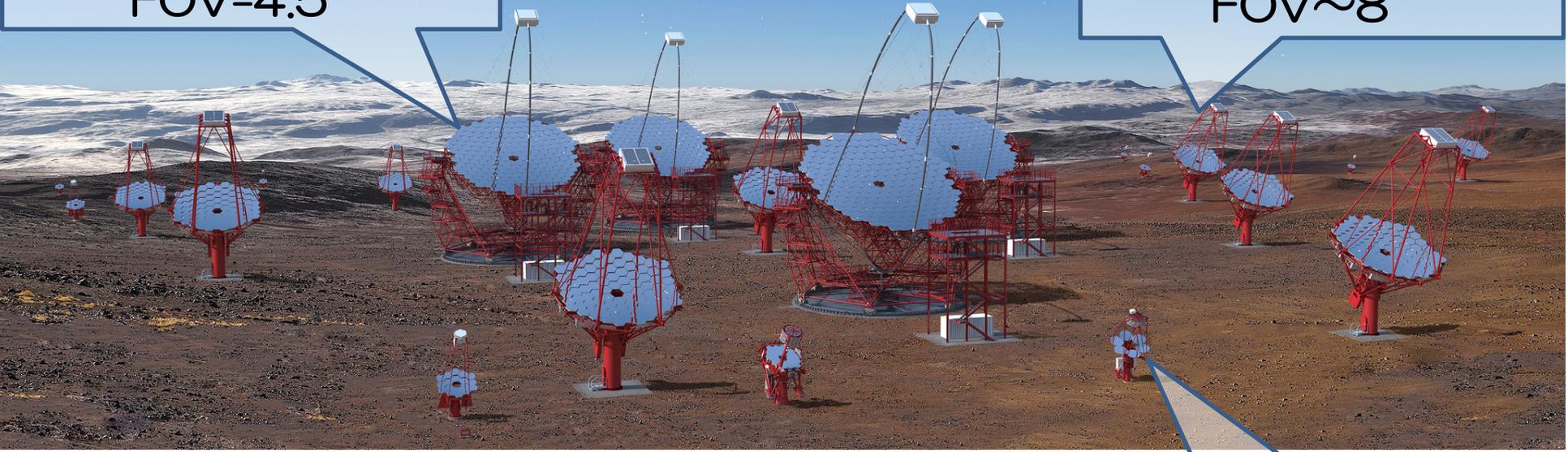
FOV=4.5°

MST × (15+25)

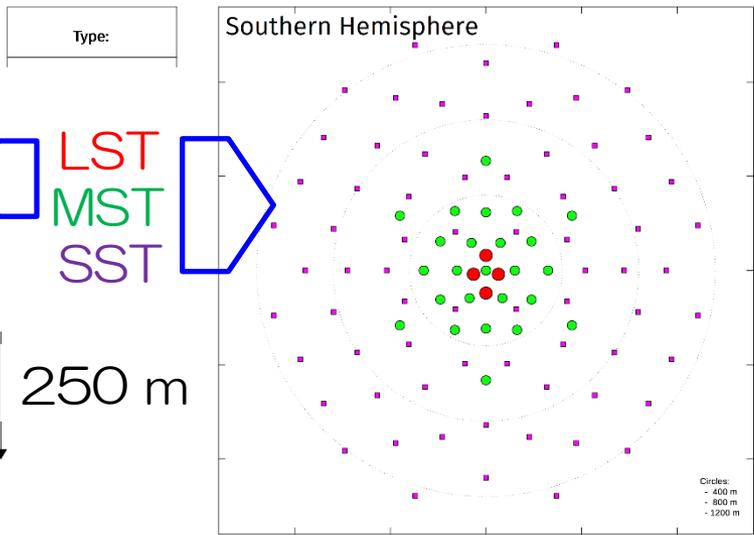
12m口径

100 GeV - 10 TeV

FOV~8°



北半球サイト



南半球サイト

SST × (0+70)

4m口径

5 TeV - 300 TeV

FOV~10°

1 km

総建設費400M€
 (日本負担 46億円)

CTA 北サイト@スペイン・ラパルマ



カナリア諸島



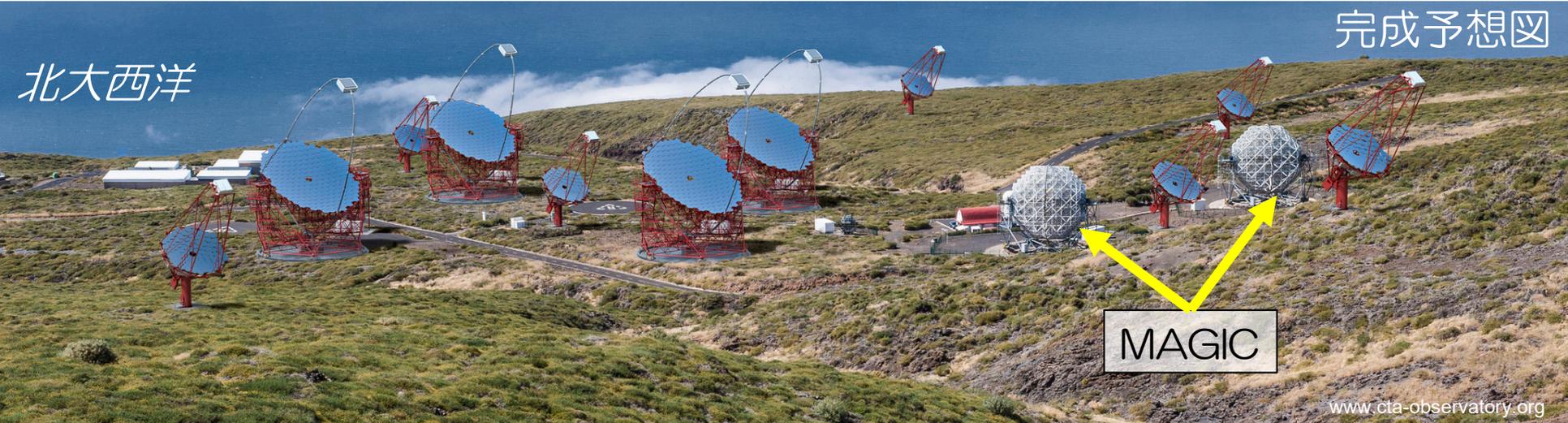
ラパルマ島



Roque de los Muchachos
天文台

北大西洋

完成予想図



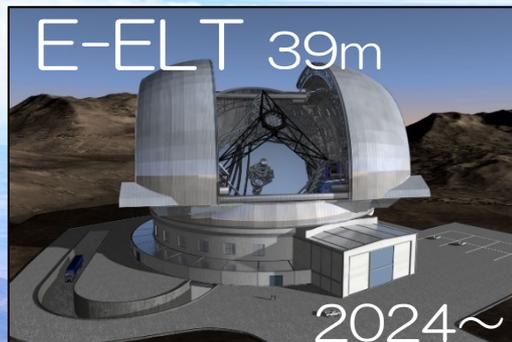
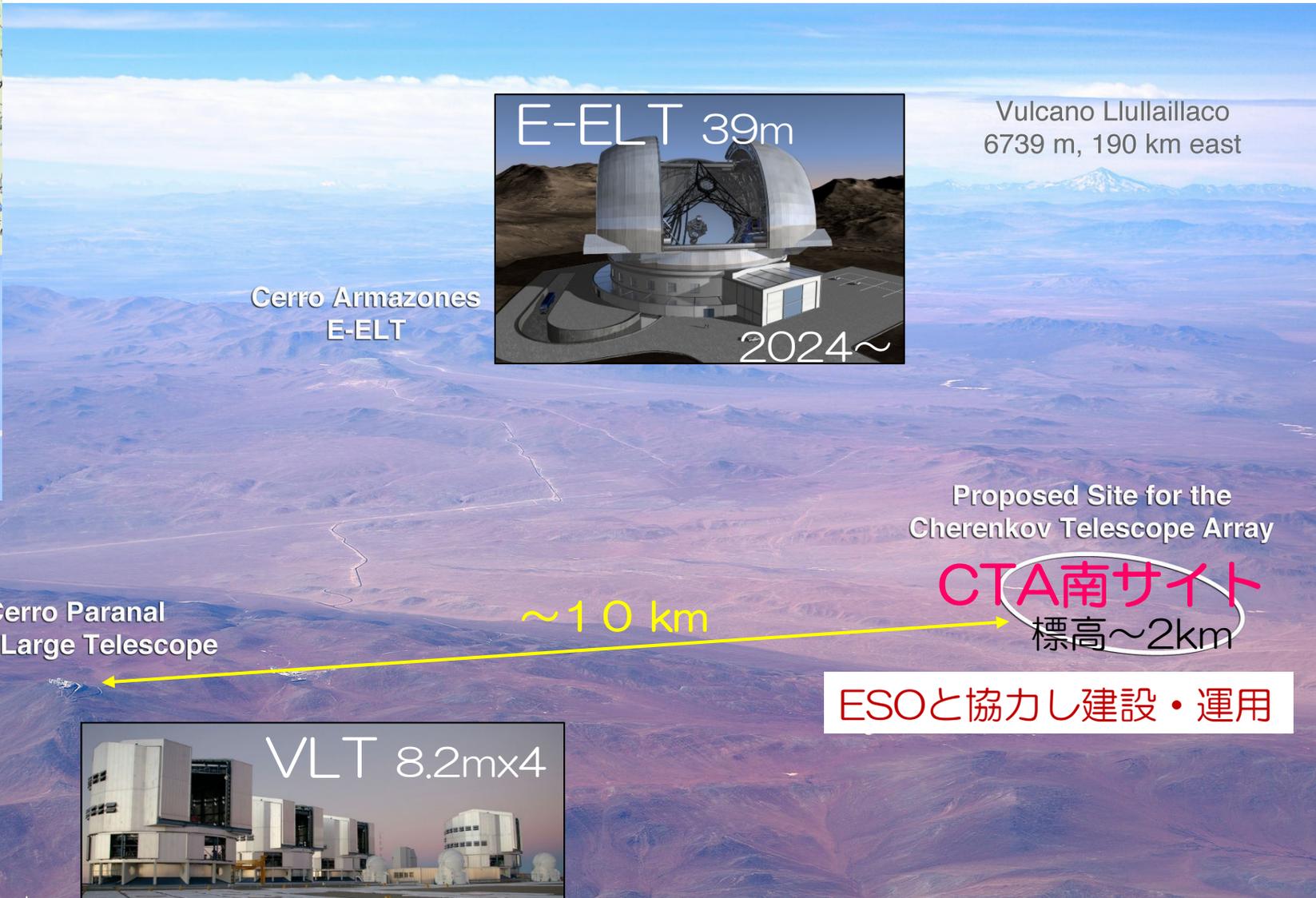
www.cta-observatory.org

標高2200 m MAGIC 望遠鏡に隣接してLST 4台+外側にMST 15台建設

今年11月 LST 1号機ファーストライト
2019年～ LST 4機による観測

CTA 南サイト@チリ

アタカマ砂漠



Cerro Armazones
E-ELT

Vulcano Llullaillaco
6739 m, 190 km east

Proposed Site for the
Cherenkov Telescope Array

CTA南サイト
標高~2km

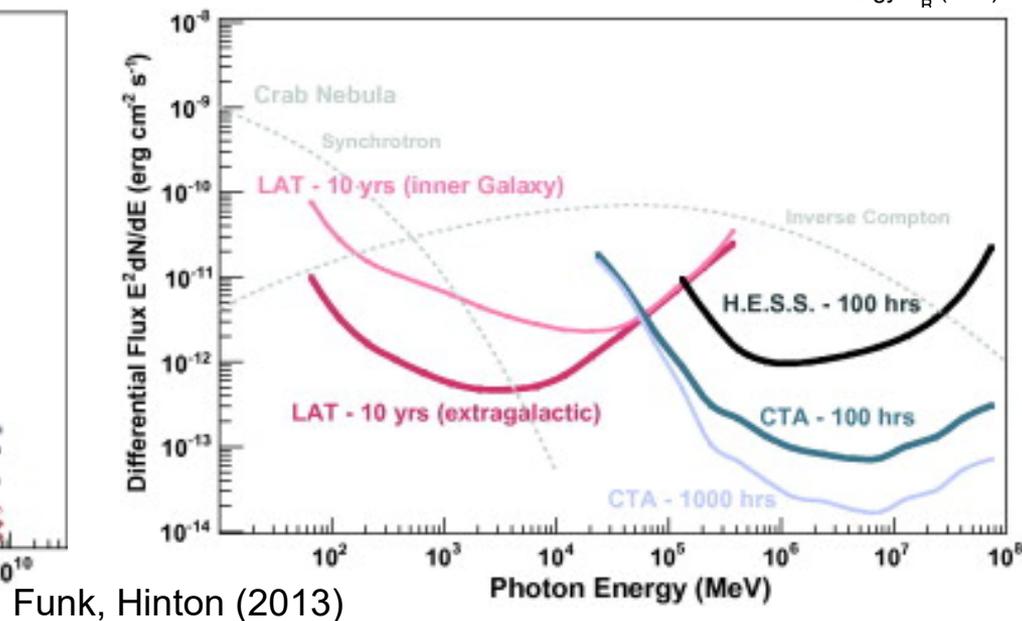
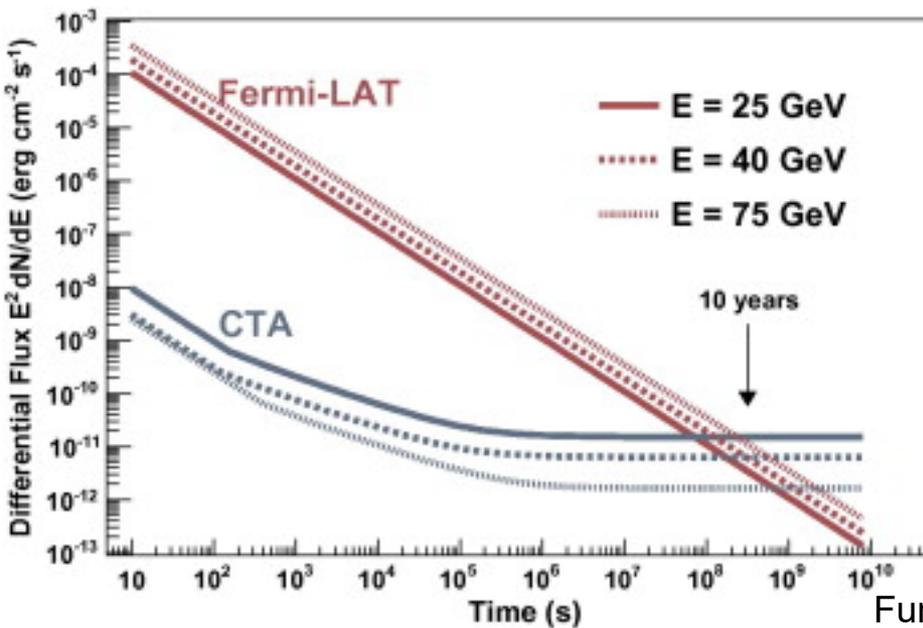
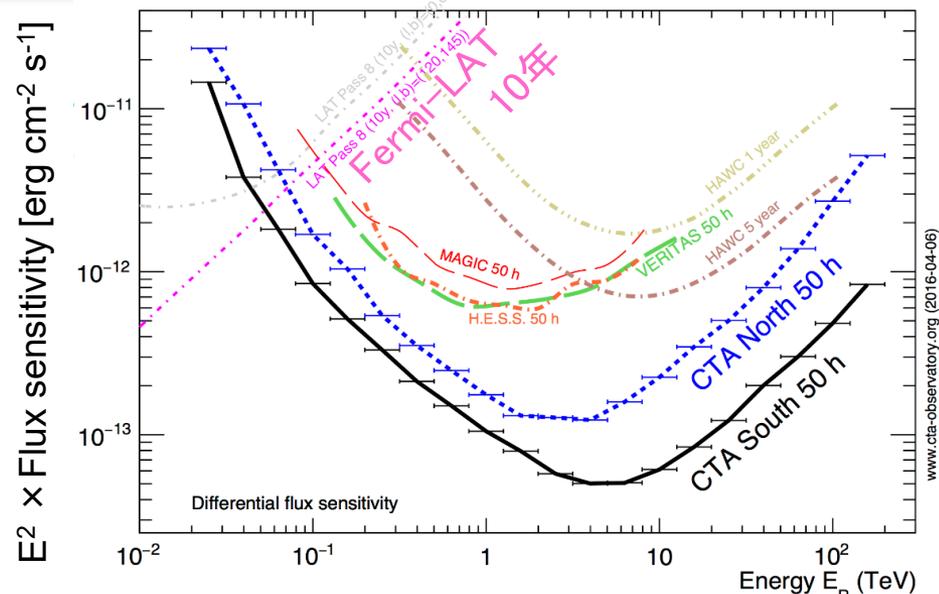
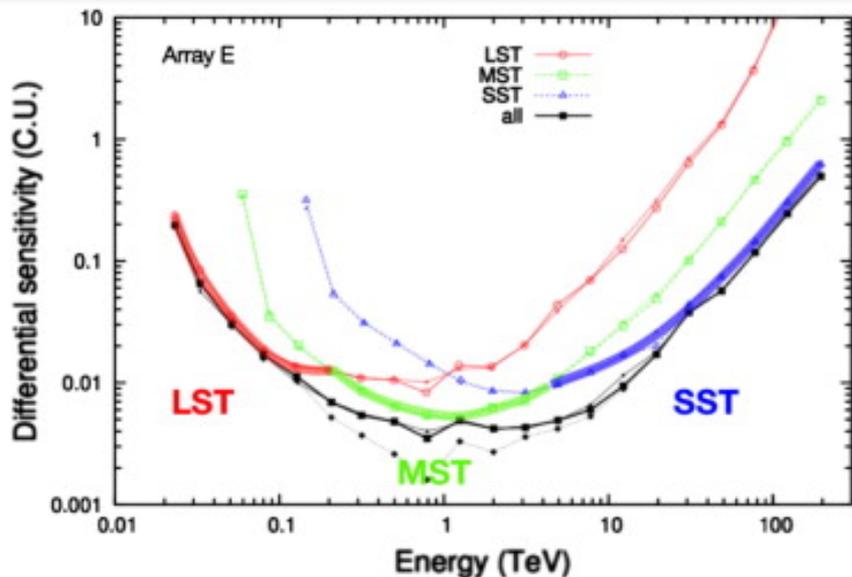
~10 km

Cerro Paranal
Very Large Telescope



ESOと協力し建設・運用

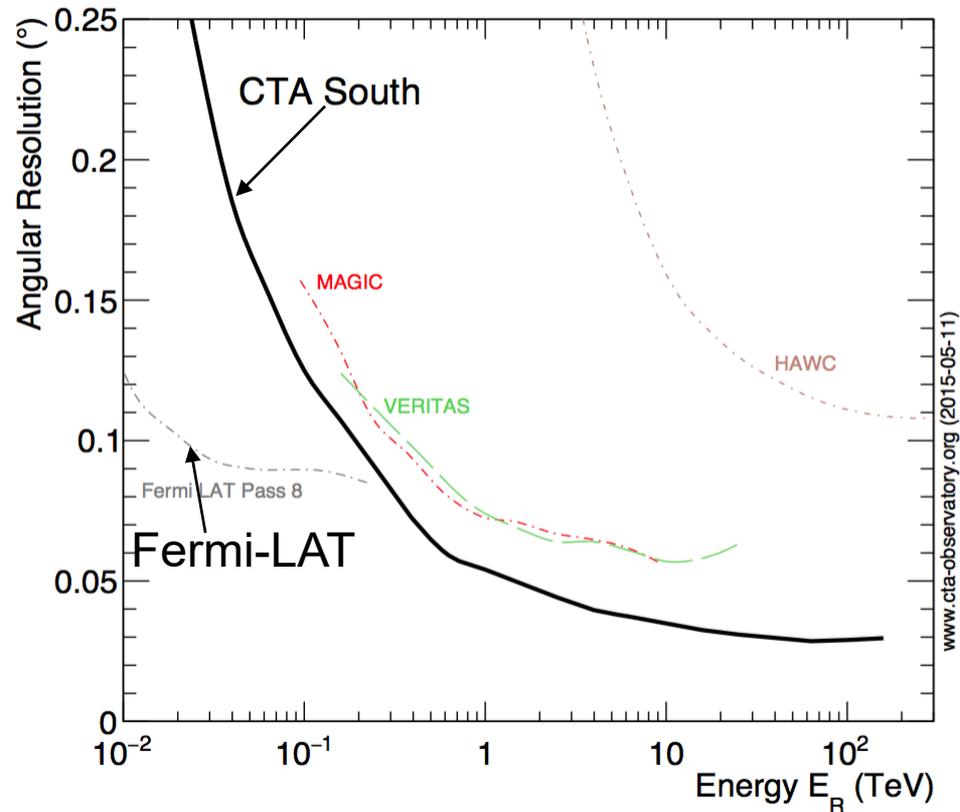
CTA検出感度



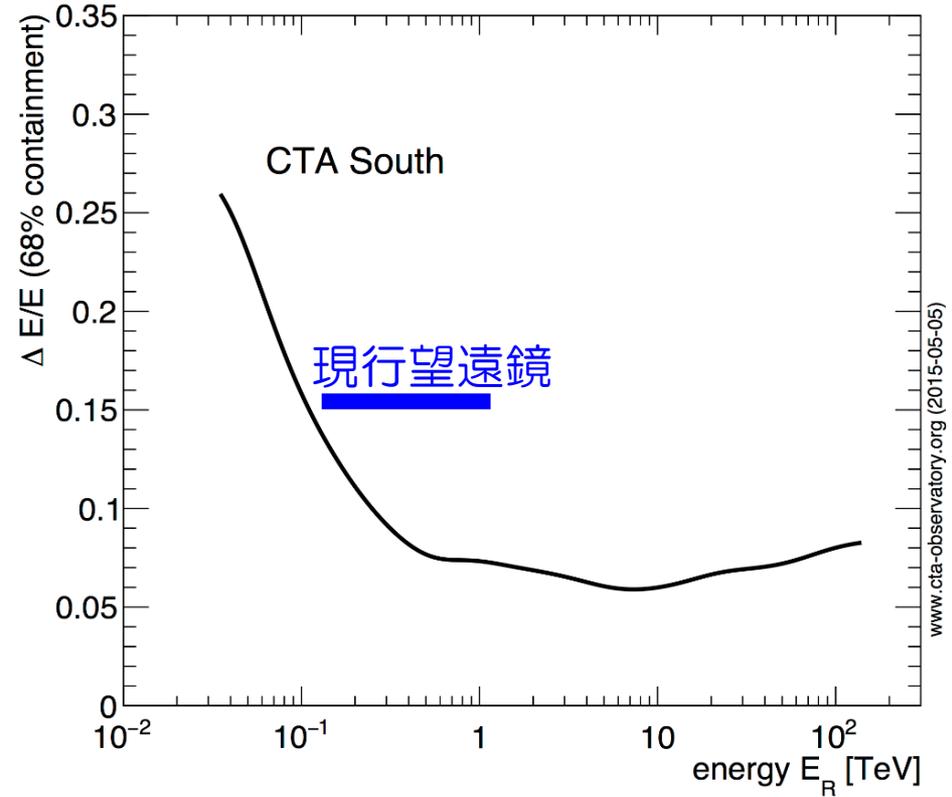
Funk, Hinton (2013)

CTAの角度・エネルギー分解能

角度分解能



エネルギー分解能



大口径望遠鏡 (LST) 仕様

観測帯域 20 GeV - 1 TeV



日本グループ
鏡・カメラ 開発の中心的役割

➤ 望遠鏡構造

- 口径 23m
- 総重量 100トン
- 回転速度 $180^\circ / 20$ 秒
←GRBなどの観測

×198枚/望遠鏡



➤ 主焦点カメラ

- 視野 4.5度
- 光電子増倍管 1855本



×265台/望遠鏡

口径23m LST建設@北サイト(ラパルマ)に向けて



国際協力 10か国184名：

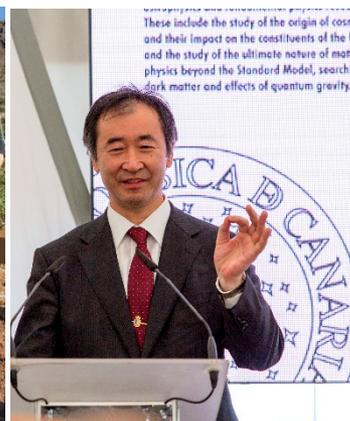
日本(53)、スペイン(35)、イタリア(35)、ドイツ(26)、フランス(17)、インド、
ブラジル、クロアチア、スウェーデン、スイス



完成予想図

■ 2015年10月9日
LST 1号機着工記念式典@ラパルマ

■ 昨年4月
スペインカナリア天体物理研究所(IAC)と
東大宇宙線研が、LST 4台の建設・運用に
関する協定締結



IAC所長 国務長官

駐日スペイン大使館HP

情報 ニュース 日本スペイン交流400周年

ニュース

スペインと日本の間でラ・パルマ島に4期
の新しい望遠鏡を設置することを合意

14/04/2016

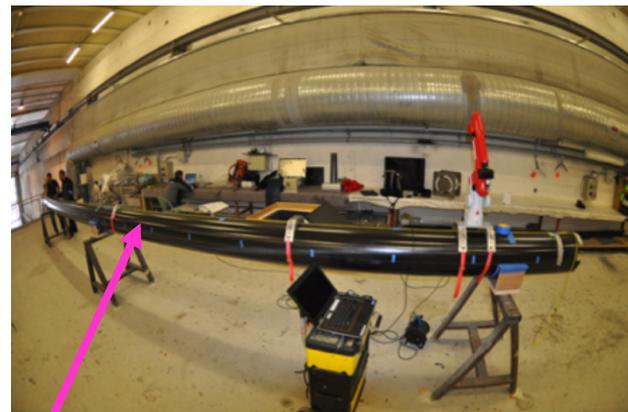
カルメン・ベラ研究開発イノベーション長官は、日本の高岡勉文部科学副大臣と共に、ラ・パルマ島のロケ・デ・ロス・ムチャーチョス天文台に4基のチェレンコフ望遠鏡を設置・操作するための協定に合意する調印式に出席した。同式において、ラファエル・レボロカナリア天体物理研究所(IAC)所長と梶田 隆章東京大学宇宙線研究所長(ICRR)による署名・調印が行われた。4基のチェレンコフ望遠鏡は、直径23メートル

LST 1号機@ラパルマ島の建設



昨年7月開始

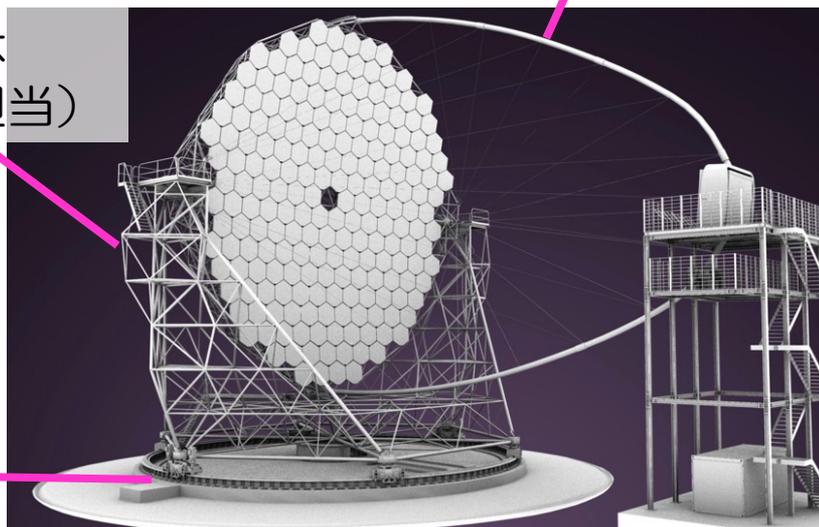
カメラ支持構造
(フランス・イタリア担当)



構造体
(ドイツ担当)



レールと
ボギー台車
(スペイン・
ドイツ担当)



• サイトに置く
計算機や
ネットワーク



• UPS
(日本担当)

LST 1号機@ラパルマ島の建設



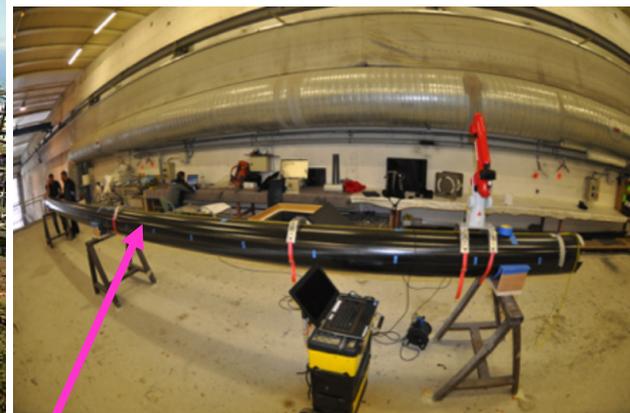
今年11月
ファーストライト予定

カメラ支持構造
(フランス・イタリア担当)



筐体部品が入ったコンテナ

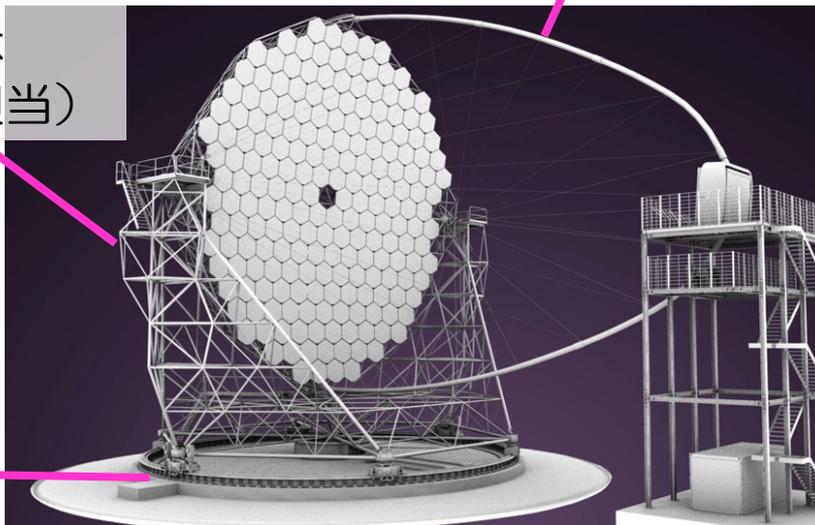
LST1 telescope construction site - Wed Feb 15 13:30:01 UTC 2017 - <http://www.lst1.iac.es>



構造体
(ドイツ担当)



レールと
ボギー台車
(スペイン・
ドイツ担当)

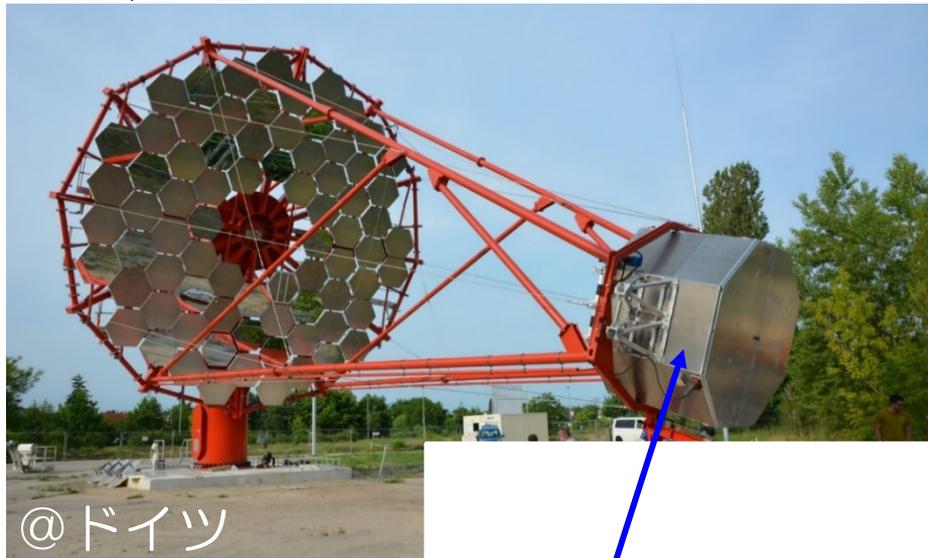


- サイトに置く
計算機や
ネットワーク
- 
- UPS
(日本担当)

中口径望遠鏡プロトタイプ

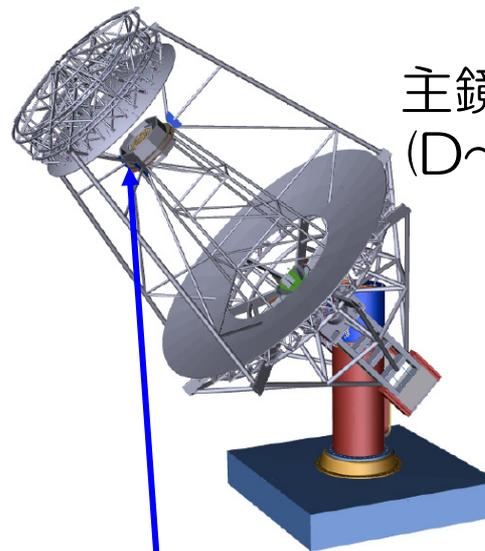
- Davies-Cotton型 MST (欧州)
口径12m

- Schwarzschild-Couder型 SCT
(USA+名大+独)



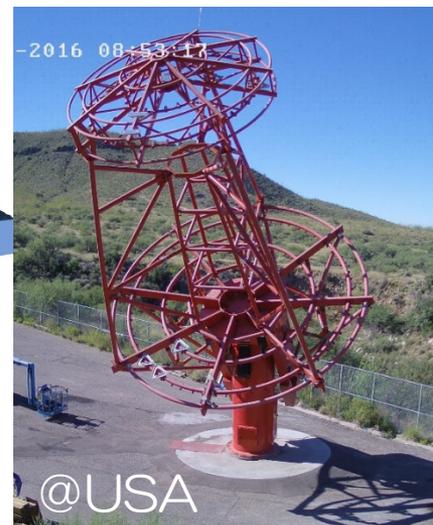
@ドイツ

副鏡 (D~5.4m)



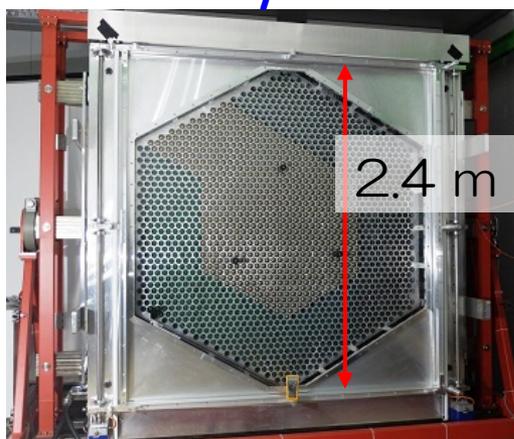
主鏡
(D~9.7m)

組上げ中

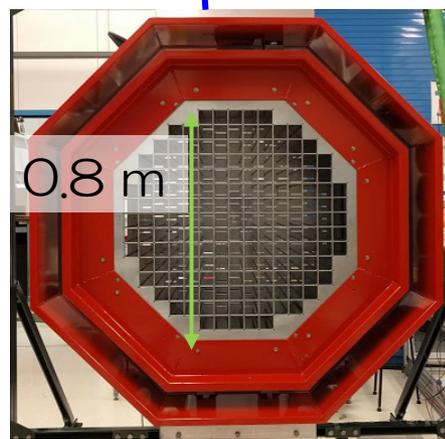


@USA

- カメラ
- 視野~8度
 - **PMT**
~1800本



2.4 m



0.8 m

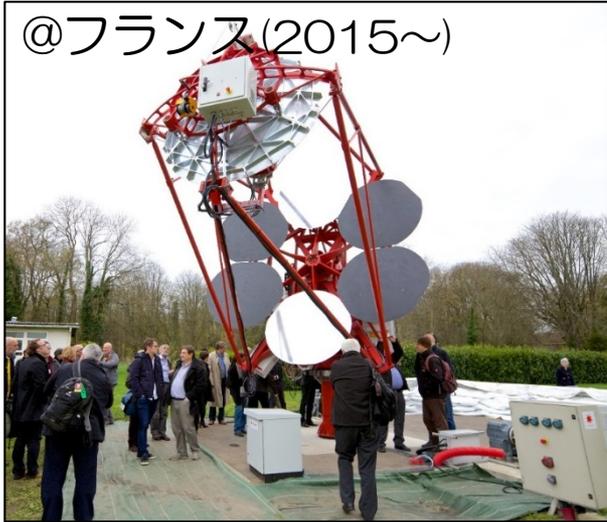
- 視野8度
 - **SiPM**~1.1万素子
- ↪ 月光下での観測可

小口径(SST)プロトタイプー3タイプー

● Schwarzschild-Couder型(欧+米+豪+名大+茨城大)

①GCT 口径4.2+1.8m

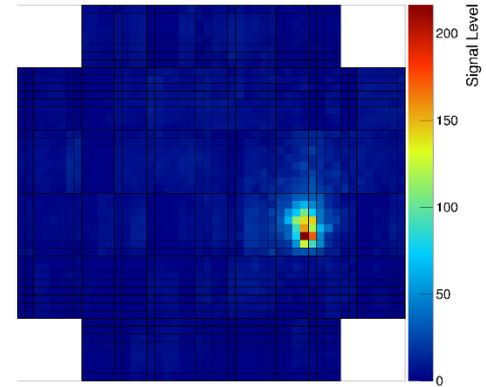
@フランス(2015~)



SiPMカメラ(2048ch)
視野 9.2度



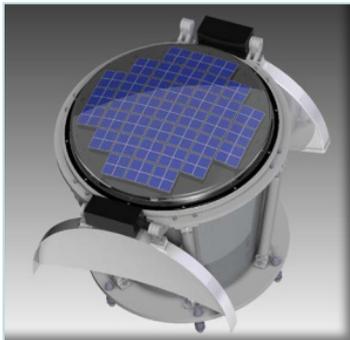
ファーストライト



②ASTRI 口径4+2m

@イタリア(2014~)

SiPM(2368 ch)
視野 9.6度

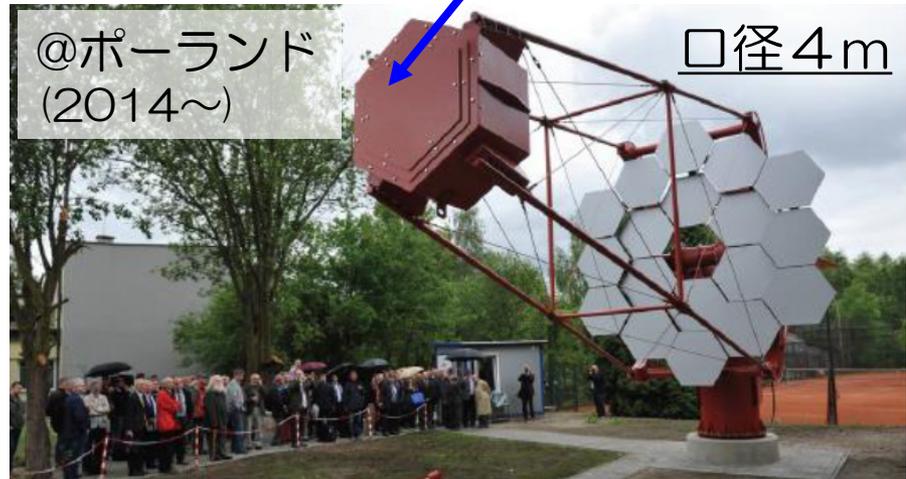


● Davies-Cotton型(欧)

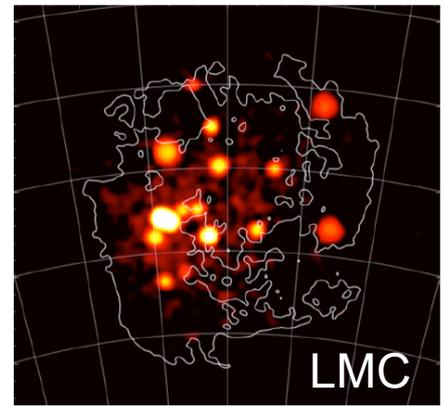
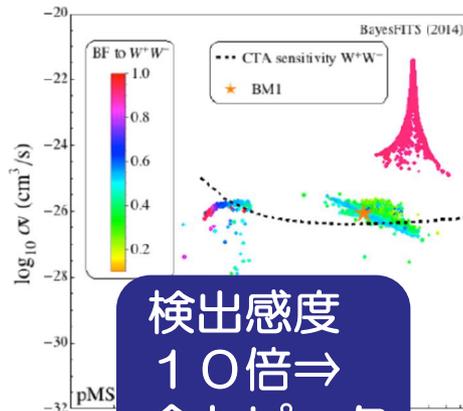
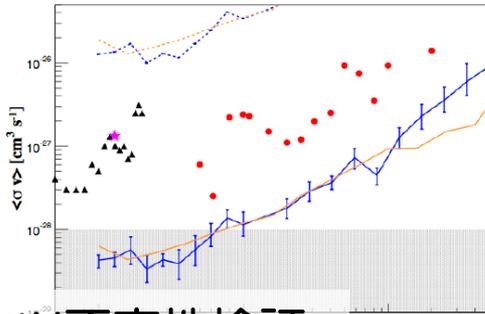
@ポーランド
(2014~)

SiPM (1296 ch) 視野9度

口径 4m

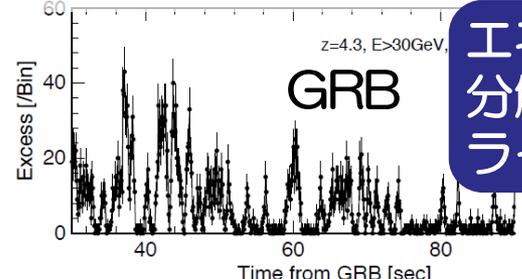


暗黒物質対消滅 γ 線探索



LMC

ローレンツ不変性検証



GRB

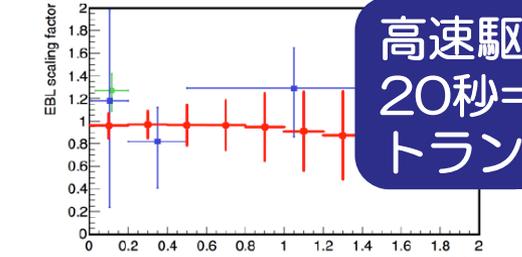
エネルギー分解能 $\sim 10\% \Rightarrow$ ライン、構造

検出感度10倍 \Rightarrow 全トピック

視野 ~ 8 度 \Rightarrow サーベイ、広がった天体

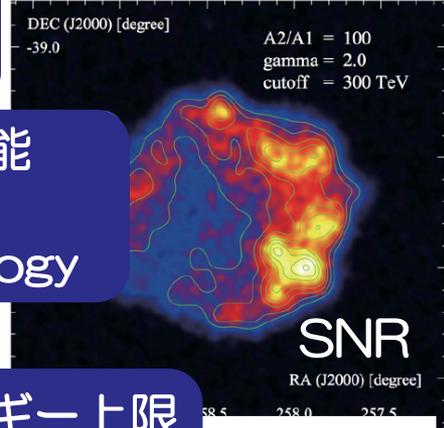
角度分解能数分角 \Rightarrow Morphology

高速駆動20秒 \Rightarrow トランジェント



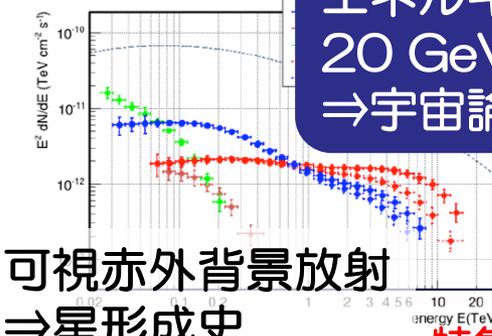
エネルギー下限20 GeV $\wedge \Rightarrow$ 宇宙論+

エネルギー上限300 GeV $\wedge \Rightarrow$ PeV加速器



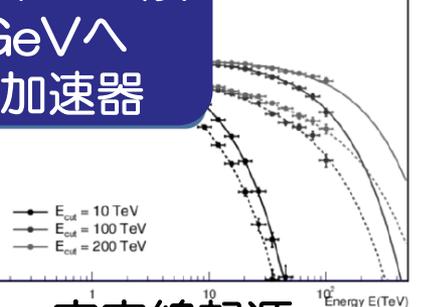
銀河面

SNR



可視赤外背景放射 \Rightarrow 星形成史

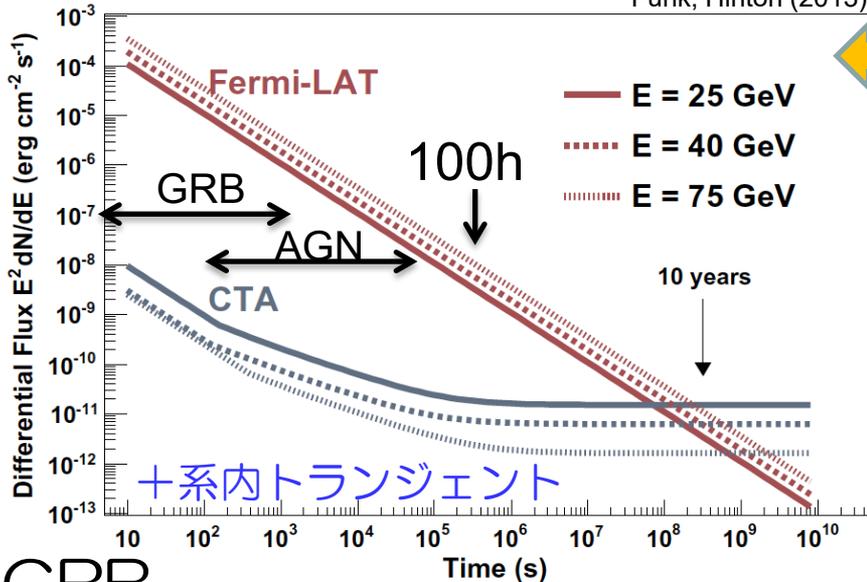
CTAの性能とサイエンス



CTAで短時間変動を捉える

悪
感度
良

Funk, Hinton (2013)

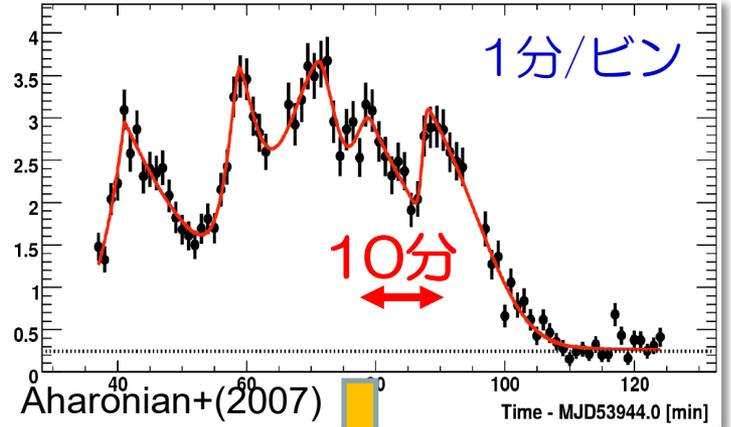


CTA有効面積:

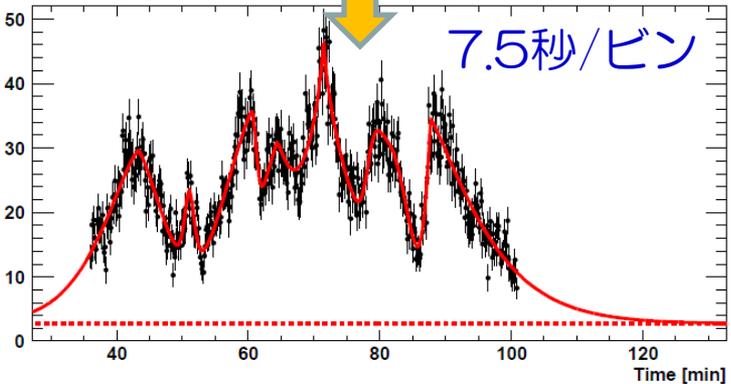
Fermi LATの1万倍@30 GeV

● AGN

$E > 200 \text{ GeV}$ 強度



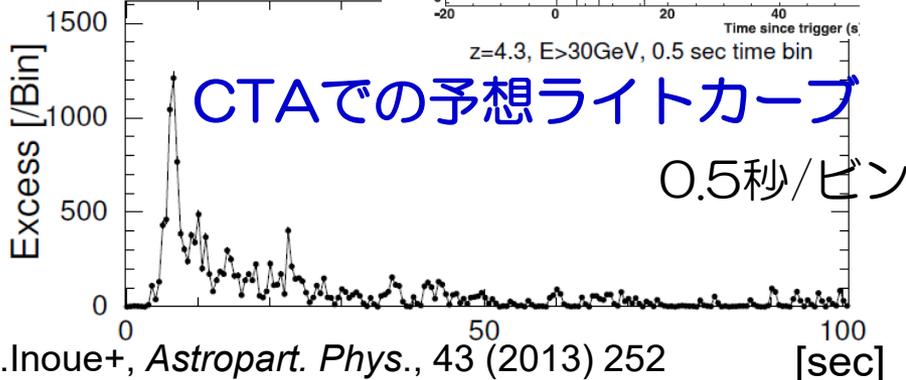
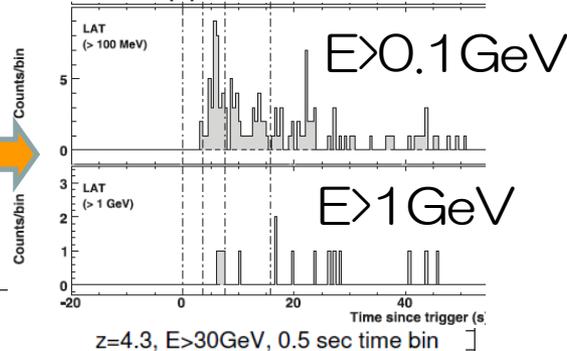
$I_{\text{CTA}} (> 50 \text{ GeV})$ [$10^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]



CTAの10倍高い時間分解能で、
放射領域・加速機構に強い制限

● GRB

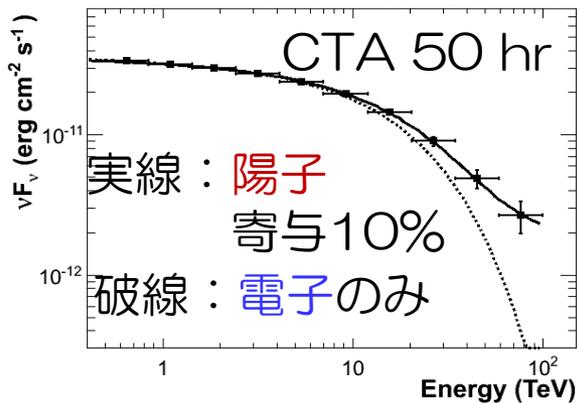
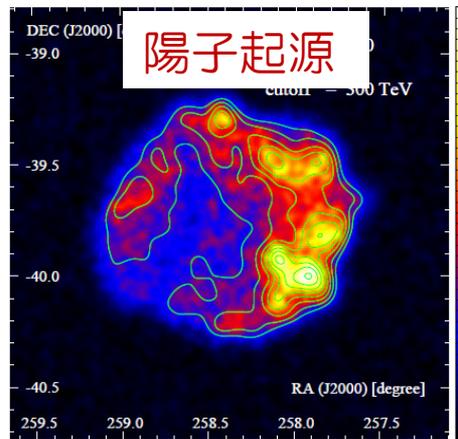
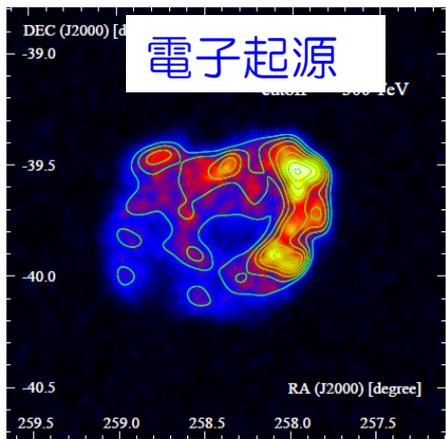
GRB080916C
($z=4.3$)
Fermi観測結果
Abdo+(2009)



電子起源 or 陽子起源の解明

● 超新星残骸

RXJ1713.7-3946

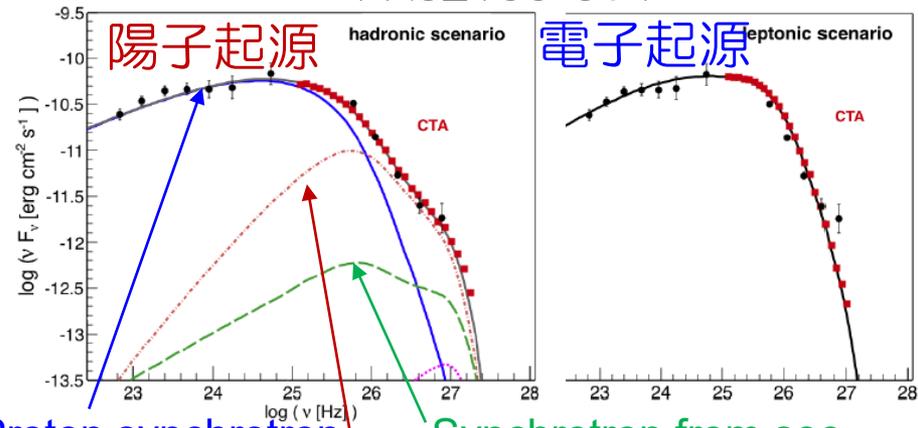


Nakamori+, arXiv:1508.06052

● 活動銀河核

Cen A ⇒ 井上講演

PKS2155-304

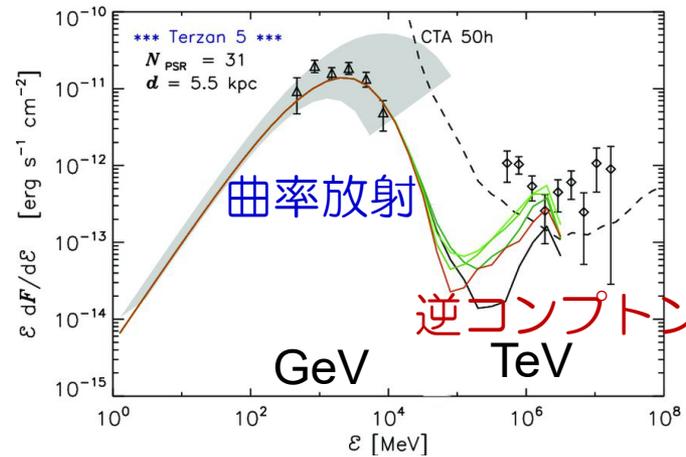


Proton synchrotron
 Muon synchrotron
 Synchrotron from sec. pairs from pi0 decay

Cerruti, Zech & Boisson, 2015, MNRAS, 448, 0910
 Zech & Cerruti for CTA, 33rd ICRC

● 球状星団

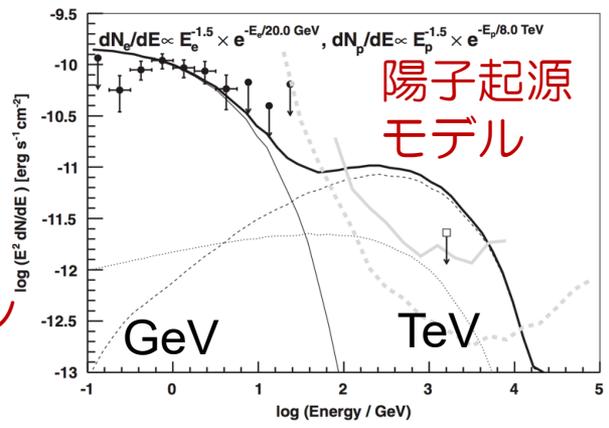
Terzan 5



Zajczyk+, MNRAS, 432 (2013) 3462

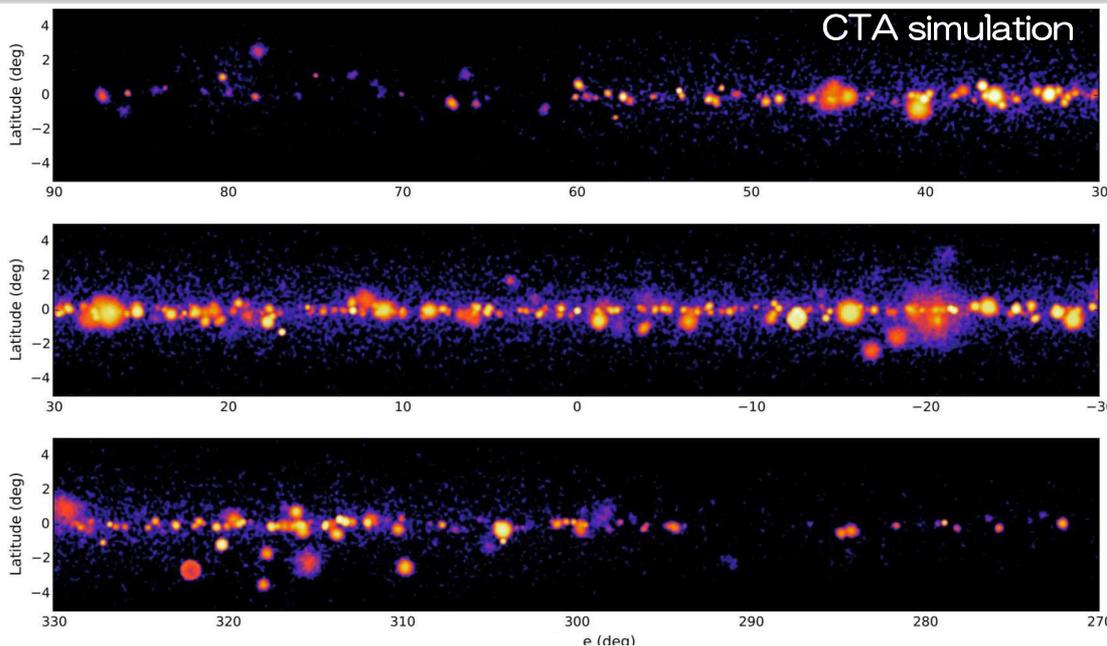
● 新星

V407 Cygni



Sitarek+, PRD, 86 (2012) id. 063011

CTAによるサーベイ

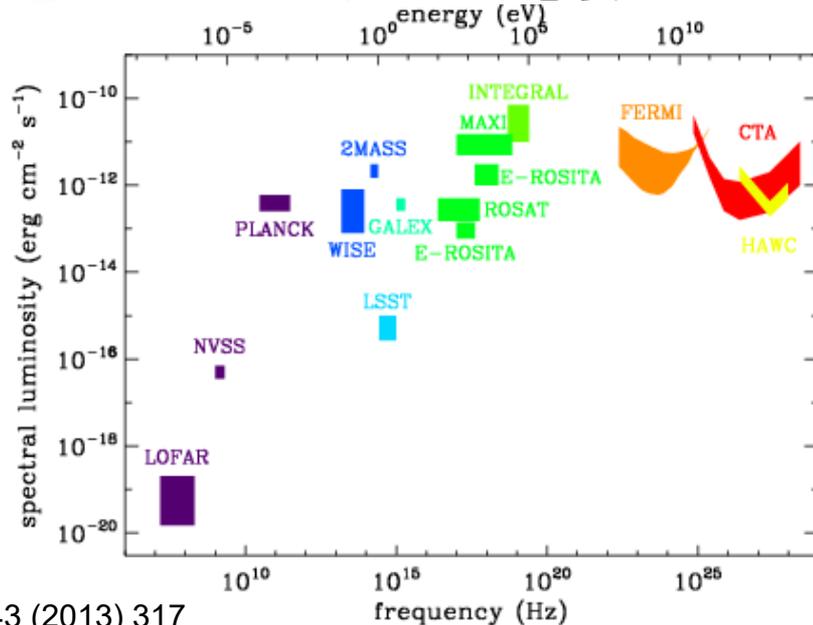


銀河面サーベイ

- 300-500のソース発見 (PWN, SNR, Binary, New transients, Dark accelerators...)
- PeV加速候補天体の発見 (宇宙線起源解明へ)
- diffuse成分の精密測定

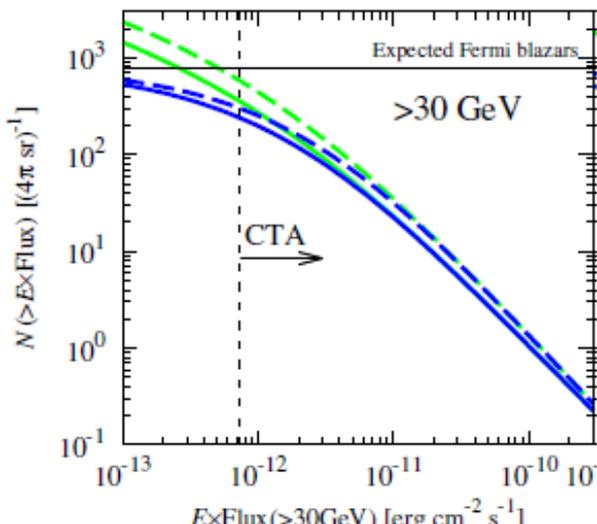
<https://www.cta-observatory.org/science/study-topics/key-targets/>

サーベイ感度



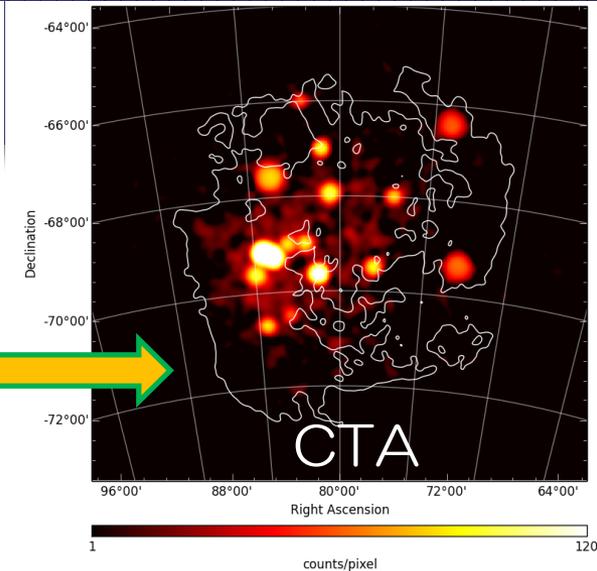
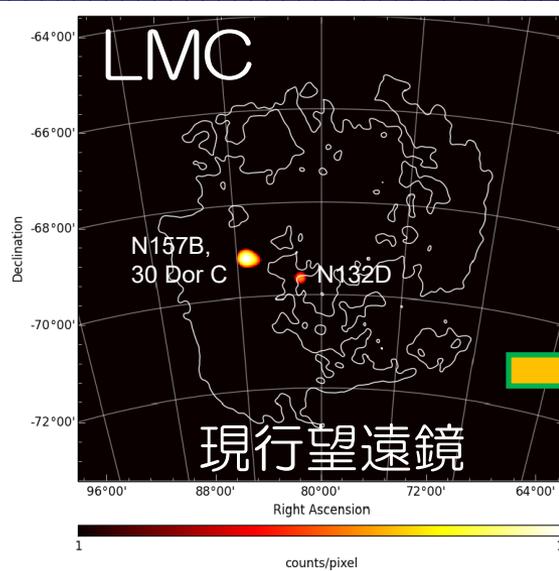
全天サーベイ AGN検出数予想

- サーベイ: 吸収無 (dashed green line)
- サーベイ: 吸収 (solid green line)
- Fermi: 吸収無 (dashed blue line)
- Fermi: 吸収 (solid blue line)

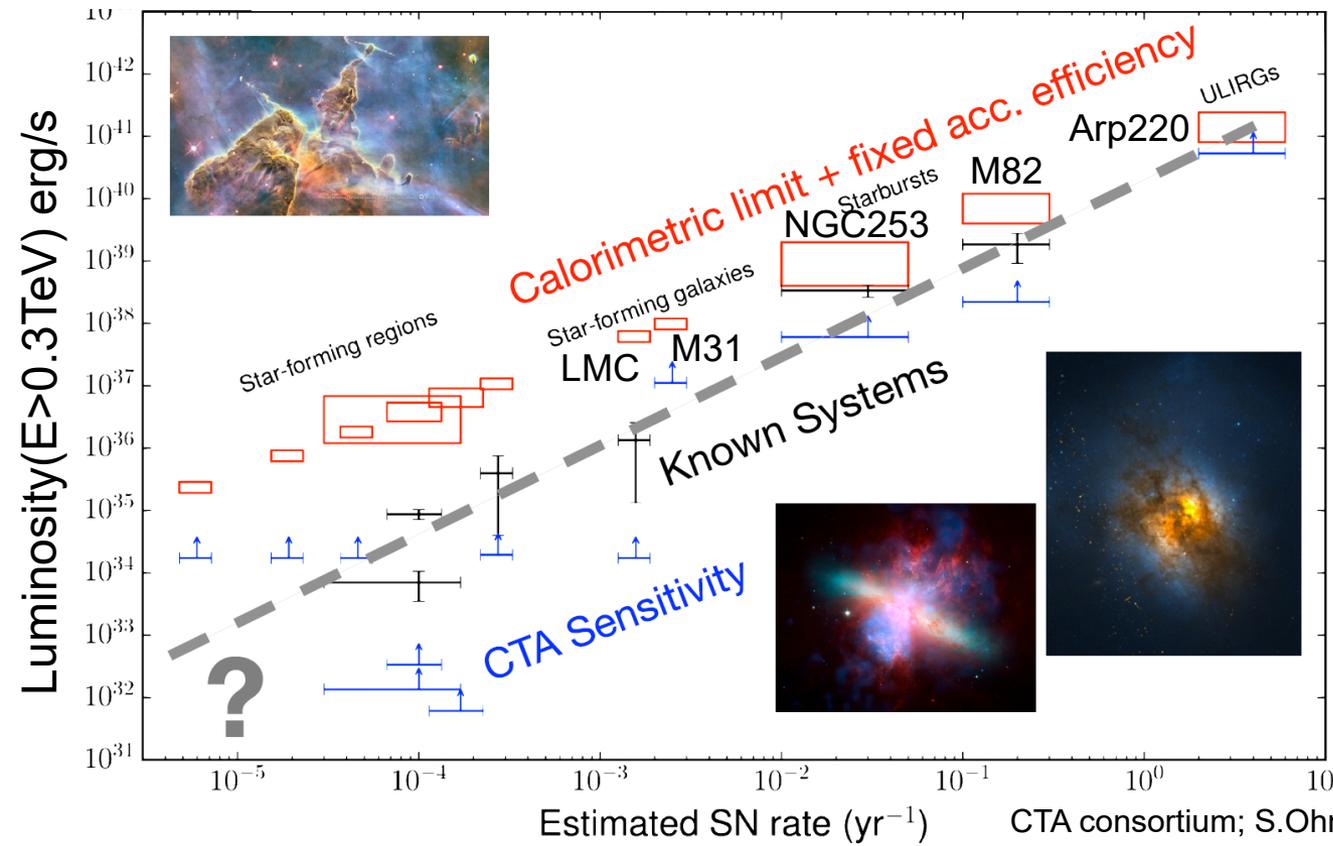


星形成系

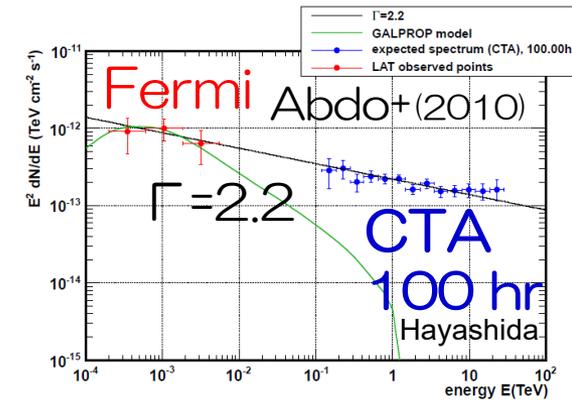
- 加速粒子の星形成における役割は？
- SFRと粒子加速・輸送との関係は？



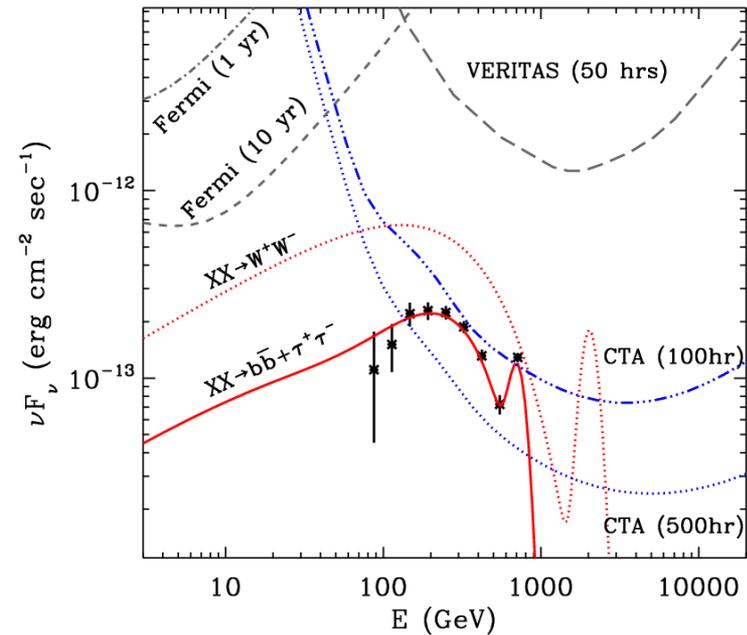
<https://www.cta-observatory.org/science/study-topics/key-targets/>



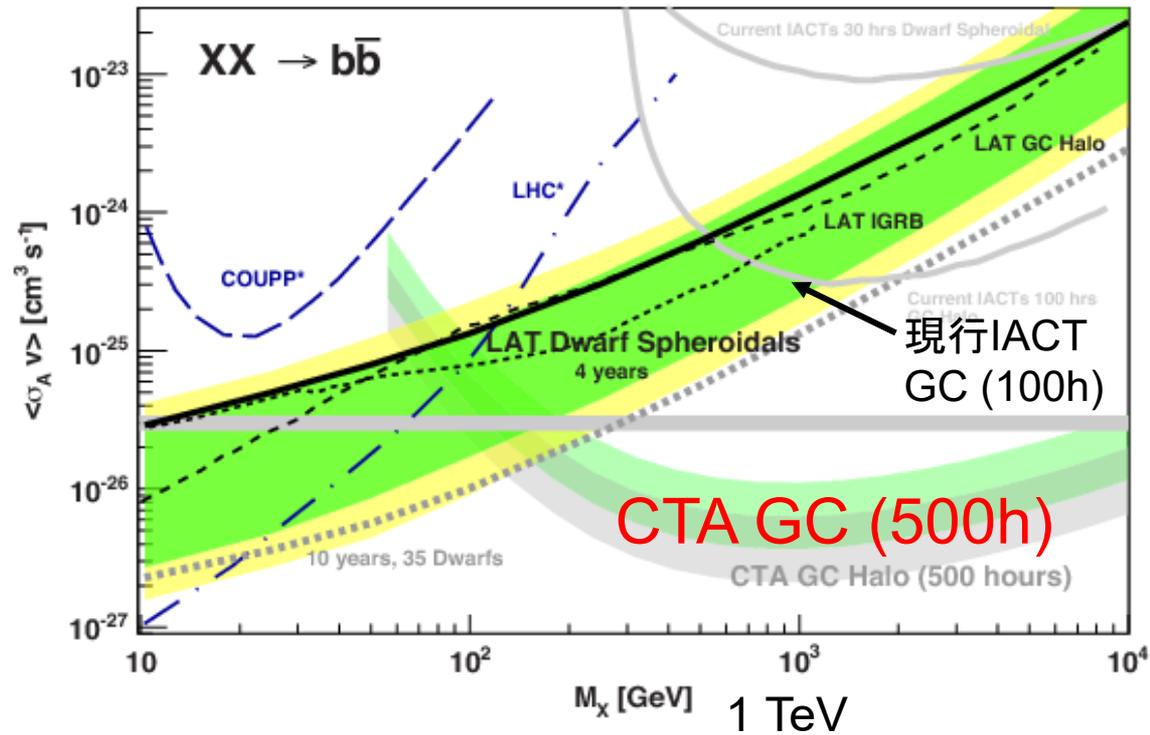
(例) M31



暗黒物質対消滅 γ 線探索



Buckley+, arXiv:1310.7040



Funk, Proc.Nat.Acad.Sci. 112 (2015) 2264

- 現行チェレンコフ望遠鏡では感度が足りないが、CTAで探れる。
- CTAは、<数100GeV探索のFermi衛星やLHC実験と相補的

まとめ

- CTA計画：大(23m)中(10-12m)小(4m)口径からなる大気チェレンコフ望遠鏡群(計118台)を北：スペイン・ラパルマ島、南：チリに設置し、全天観測。
- 現在、大口径望遠鏡@北サイト建設中⇒2021年 南北サイト 天文台運用開始予定 ⇒2024年 フルアレイ完成⇒20年間運用。日本グループは、大口径望遠鏡の鏡・カメラ、2回反射型望遠鏡のカメラ開発、サイエンス検討に大きく貢献。
- CTAは、20 GeV-300 TeVで従来より一桁良い感度で、1000を超えるガンマ線源が銀河系内・系外($z < \sim 4$)に検出されると予想。粒子加速機構、宇宙線起源、星形成史の解明、ローレンツ不変性検証、暗黒物質対消滅 γ 線探索。

