

# チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ (CTA)

スペイン・カナリア諸島 ラパルマ島



- 高エネルギー天体(ブラックホール天体など)の性質解明
- 宇宙線の起源解明: 宇宙の巨大加速器の探索
- 標準理論を超えた物理探求(暗黒物質探索、量子重力理論)
- 観測手段: 主にガンマ線(地上望遠鏡、人工衛星、気球)、電波、X線

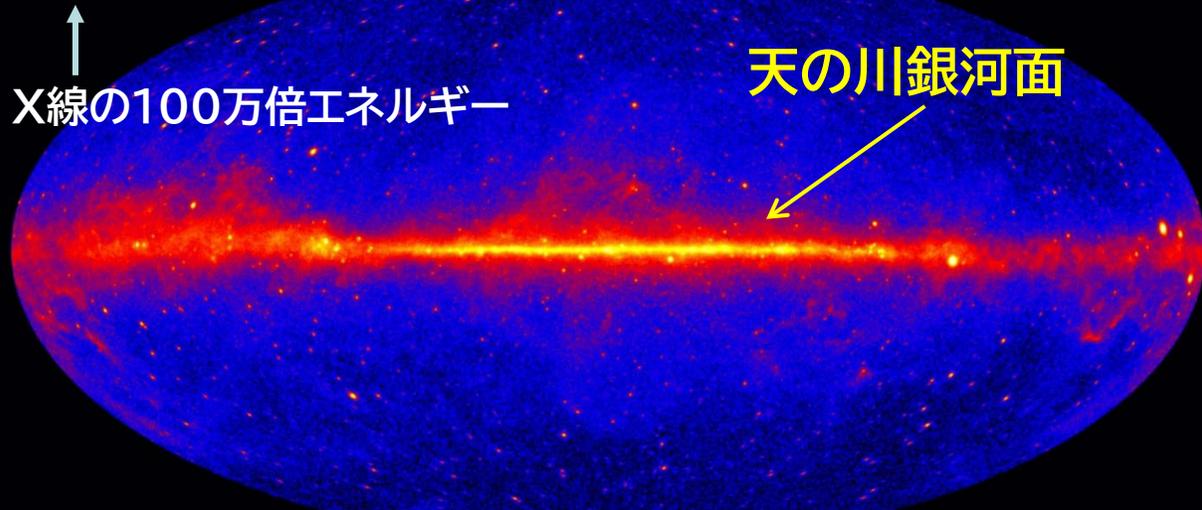
教員9名(うち外国籍3), 研究員5(うち外国籍3), 院生4(博士2, 修士2), 技術職員2, 秘書3

A8受入教員: 窪秀利、齋藤隆之、吉越貴紀

東京大学宇宙線研究所 大学院進学のための交流会  
2025年6月7日

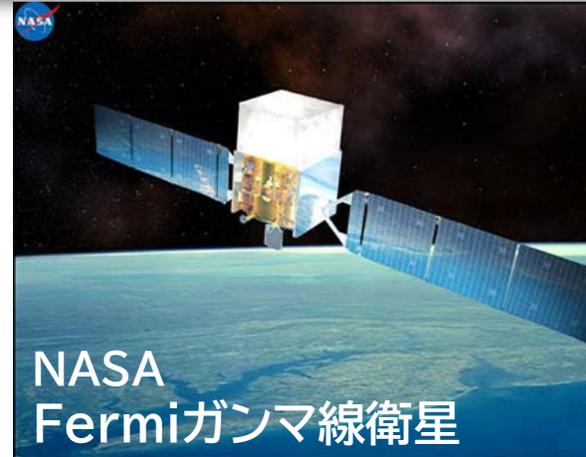
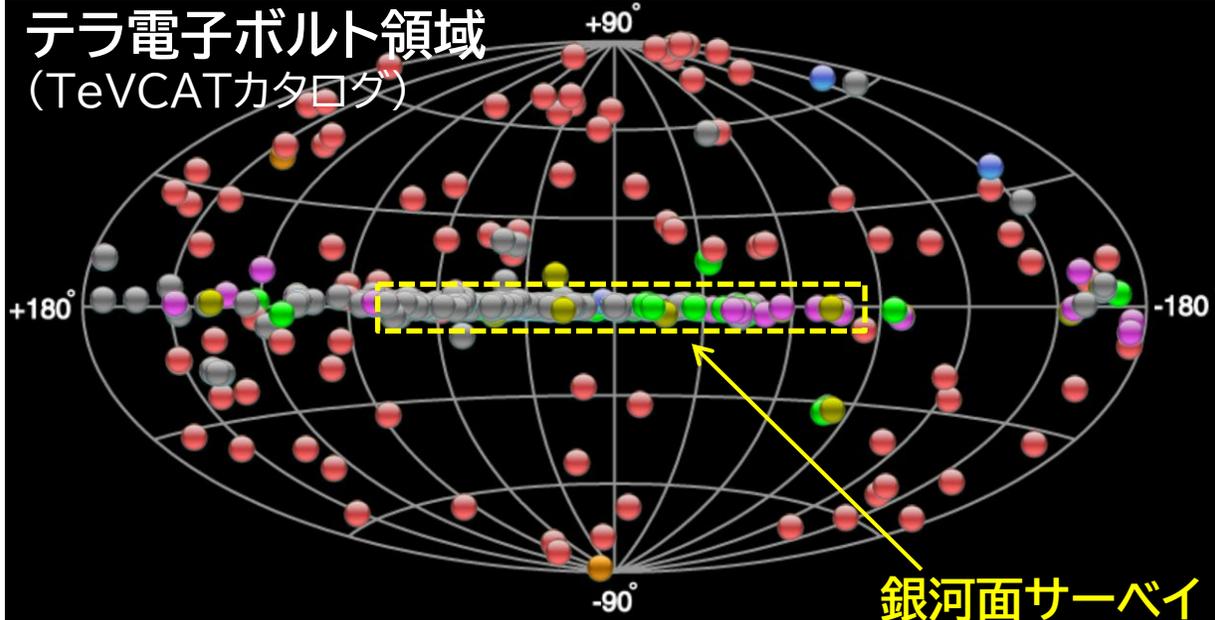
# ガンマ線全天画像の最新結果

ギガ電子ボルト領域 全天サーベイ



<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/observations/types/allsky/>

テラ電子ボルト領域  
(TeV CATカタログ)



- 銀河面からの広がった放射
- 7000個以上の天体検出



- 約300個の天体検出  
(赤色：巨大ブラックホール天体 など)

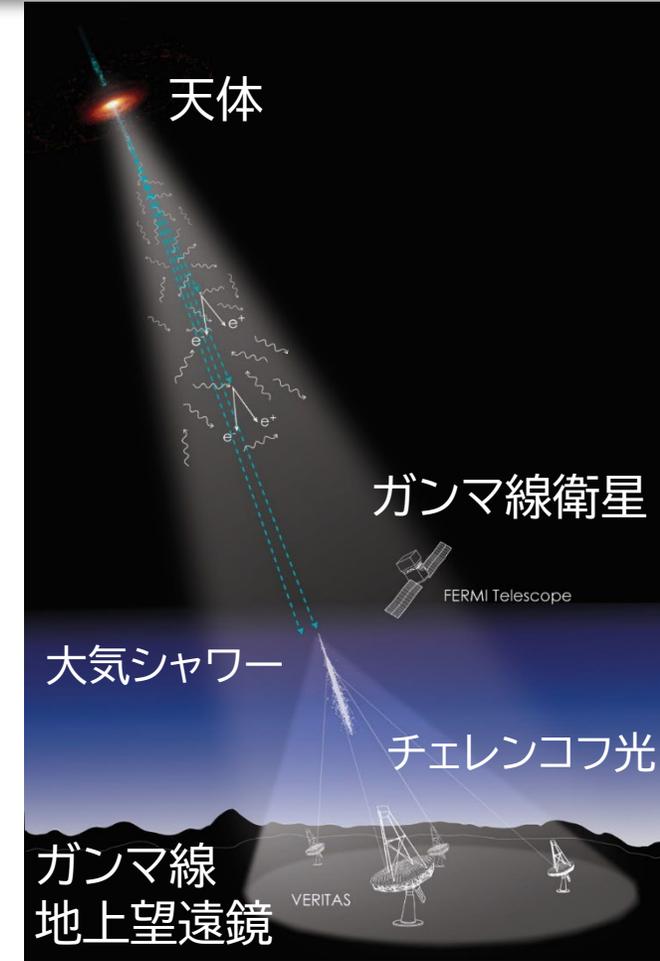
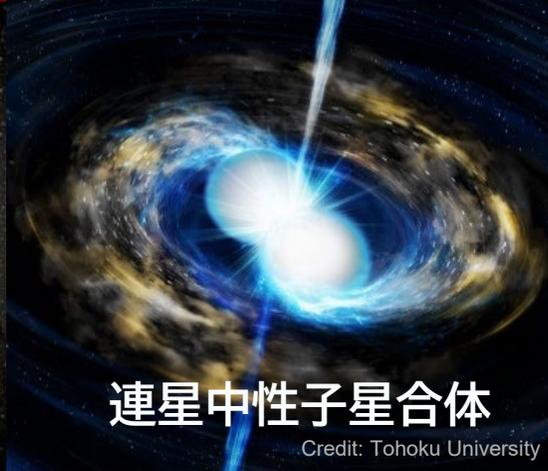
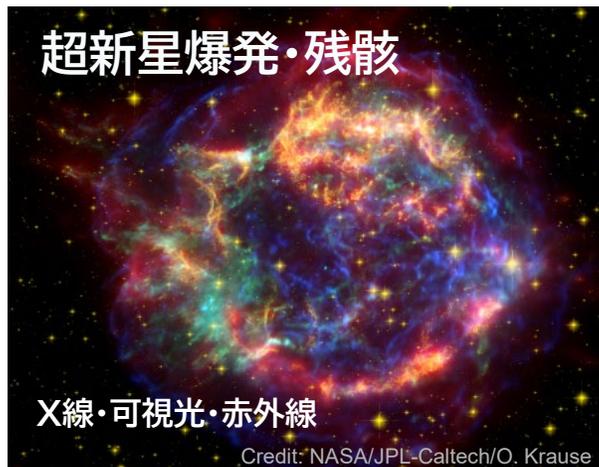


Illustration: Nina McCurdy & Joel Primack

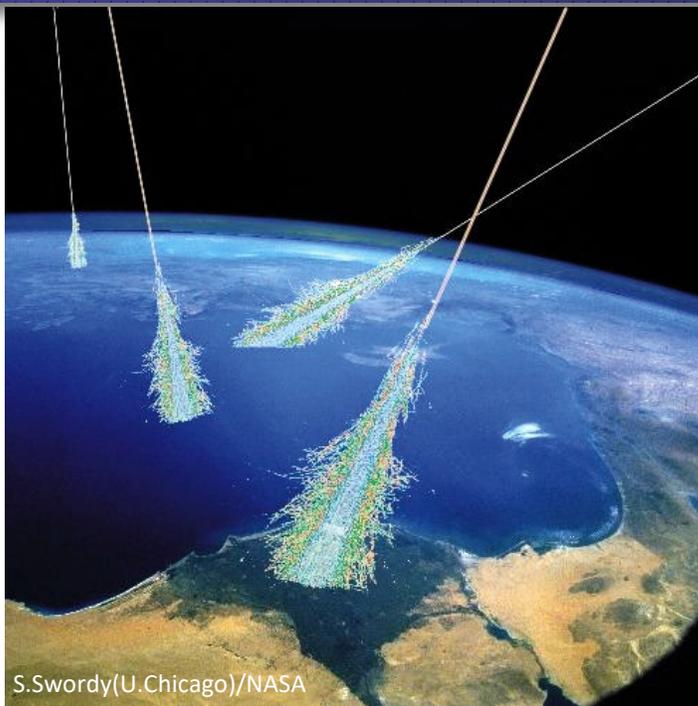
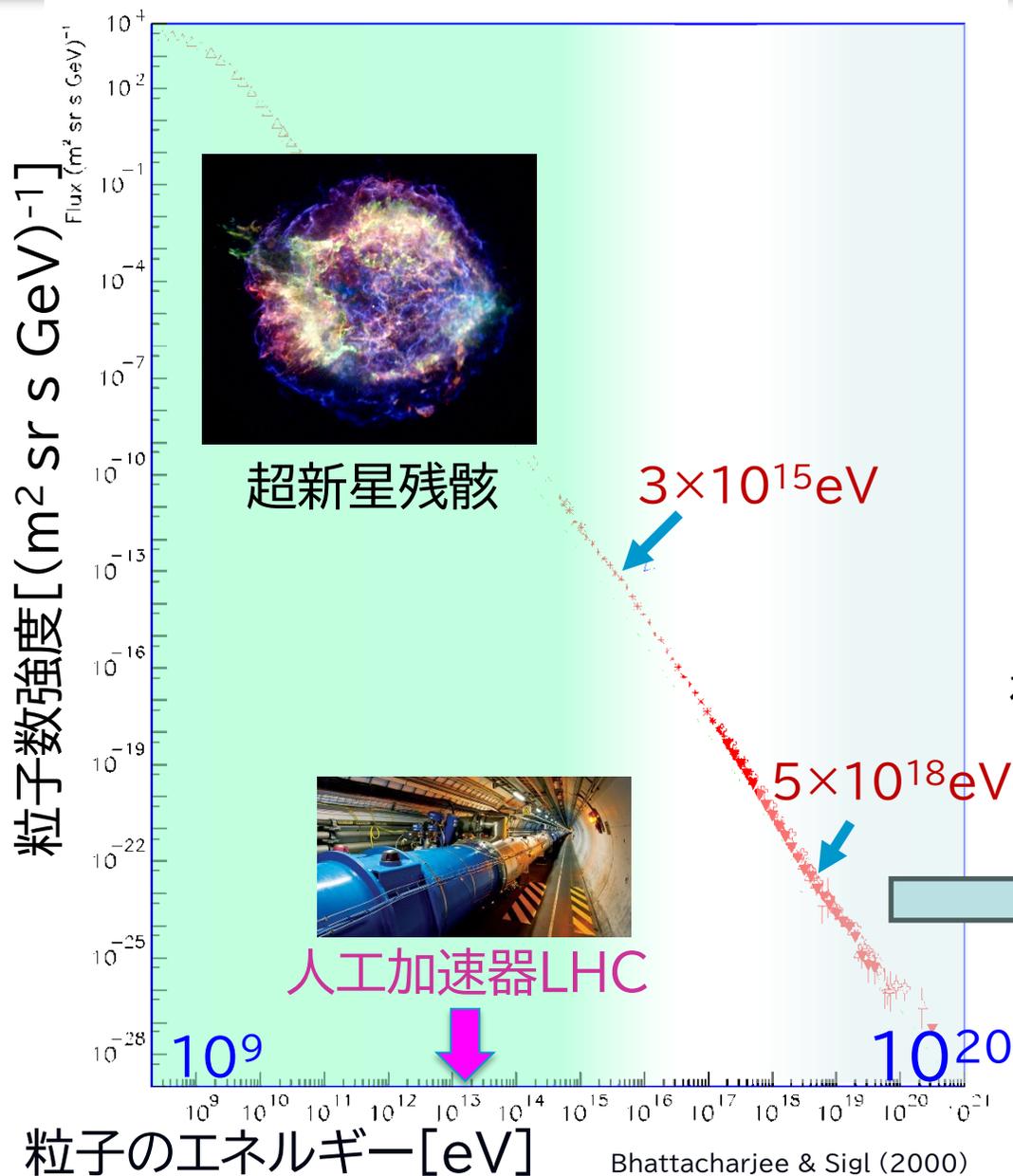
# テーマ①高エネルギー天体の性質解明

天の川銀河外 (主に)天の川銀河内



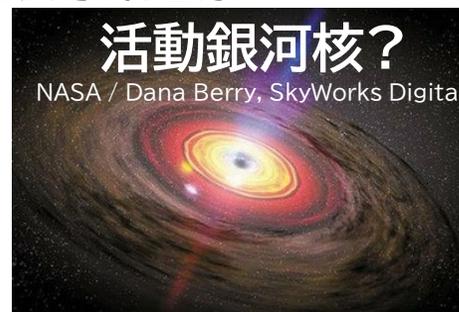
- 人工で作り出せない極限状態を高エネルギーガンマ線で観測し解明する
- GeV-TeV領域ガンマ線が検出⇒粒子がGeV-TeV領域(以上)まで加速  
ガンマ線天体＝宇宙の巨大粒子加速器⇒宇宙線起源の解明

## ②宇宙からの高エネルギー粒子(宇宙線)の起源解明



- 人工の粒子加速器で現在作れるエネルギーを**1000万倍**超えるエネルギーを持つ粒子が宇宙から飛来(=宇宙線)。
- 宇宙線の発見から100年経つが、その**起源は謎**で宇宙物理学の重要テーマの一つ。

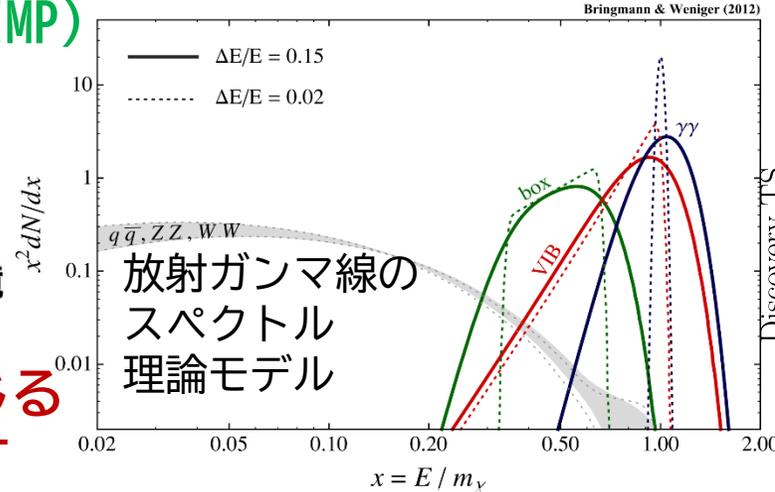
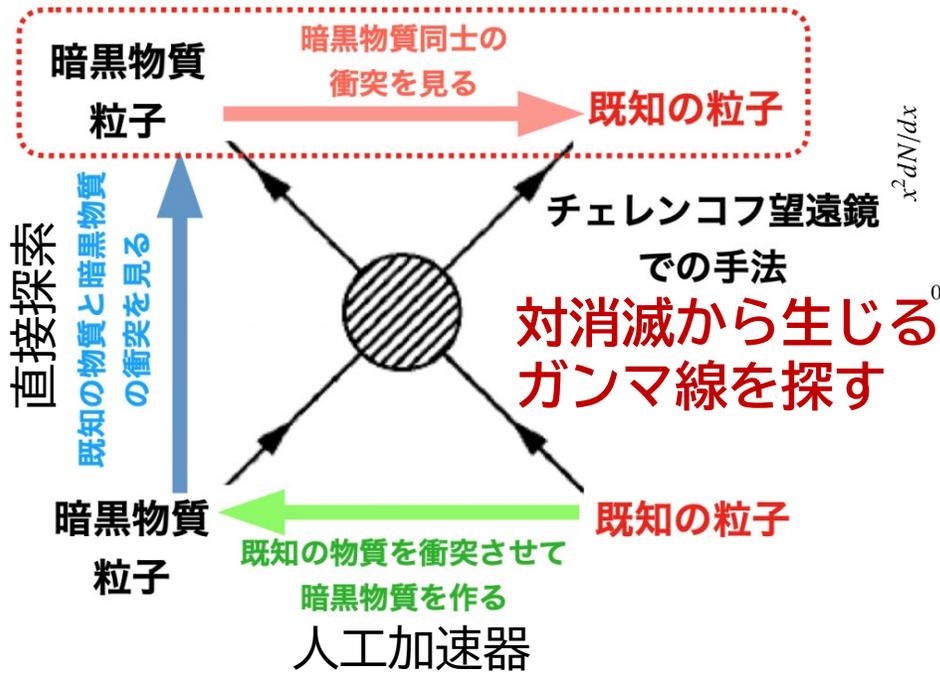
荷電粒子が天の川銀河内に閉じ込めできるエネルギーを越えている  
⇒天の川銀河外起源



銀河磁場で曲げられてしまう荷電粒子と異なり、  
ガンマ線の到来方向に起源天体があることを利用し、解明を目指す

# ③標準理論を超えた物理探求

## ガンマ線観測による暗黒物質探索 (WIMP)



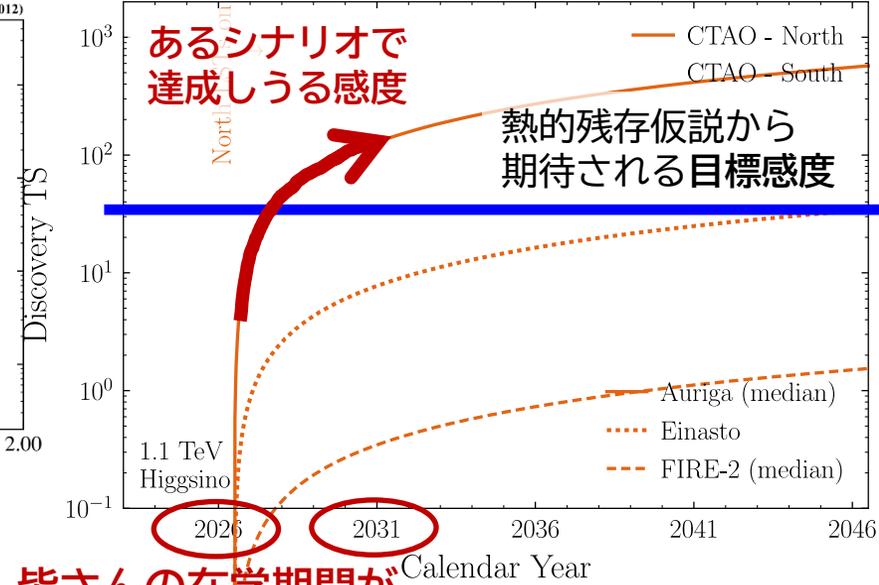
超対称性粒子などを仮定し特徴的なスペクトルを探索

## Axion-Like Particle (ALP) 探索

ガンマ線が地球に届くまでに  
 $ALP \leftrightarrow \gamma$   
 の変換が起こる

ガンマ線スペクトルの変化からALPを探索

## CTA天文台での検出予測 院生らによる研究



皆さんの在学期間が非常に重要な時期

## ローレンツ不変性検証

量子重力理論によると、非常に高いエネルギーでは、真空中の光速が波長に依存する可能性がある。

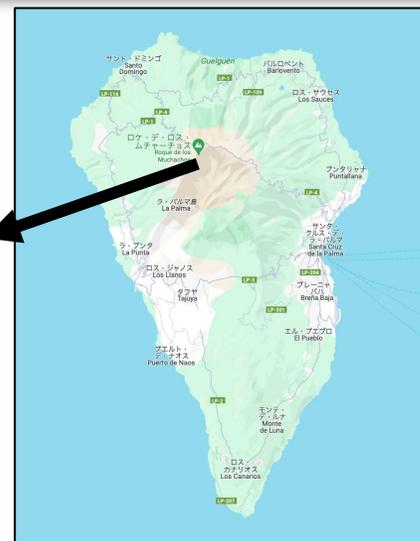
遠方天体からのガンマ線到来時間差を測定し検証



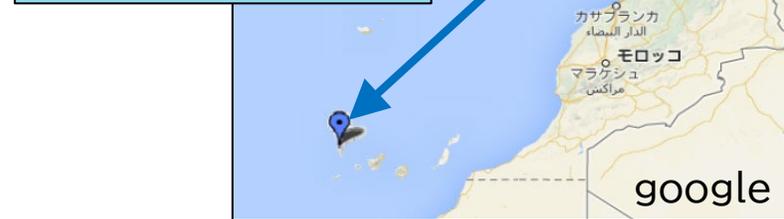
# 大気チェレンコフ撮像型ガンマ線望遠鏡 MAGIC

口径17m 2台@海拔2200m(マウナケア山頂と並ぶ天文観測地で10以上観測施設あり)

- 50 GeV-50 TeV  $\gamma$ 線観測
- 約40名の日本グループ(東大、東海大、広大、名大他)を含む  
13か国(主に欧州)約230名の国際チームで運用(日本の院生も現地で運用に参加)

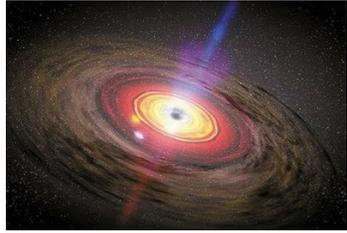


スペイン領  
カナリア諸島  
ラパルマ島  
(マドリッドから  
飛行機3時間)



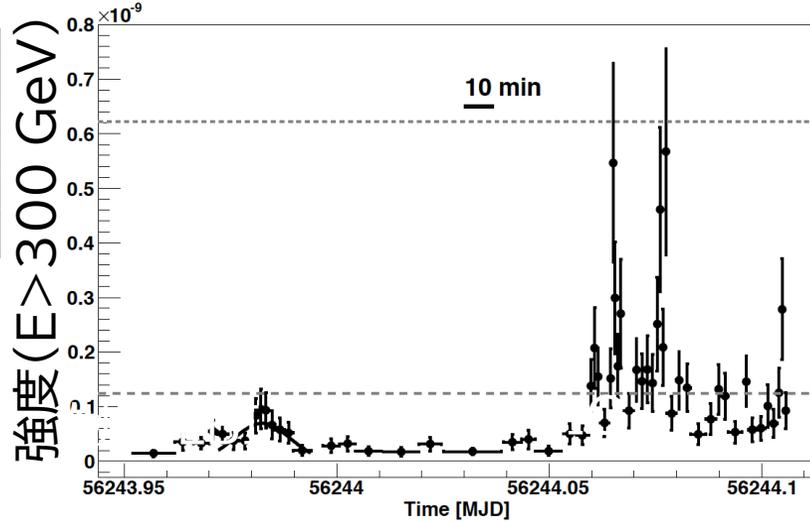
# MAGIC望遠鏡による重要な発見①活動銀河核ブラックホール極冠からのガンマ線放射

- 活動銀河核 IC310(2.6億光年先)
- $E > 300$  GeVで、5分以下の短時間強度変動を検出



NASA / Dana Berry,  
SkyWorks Digital

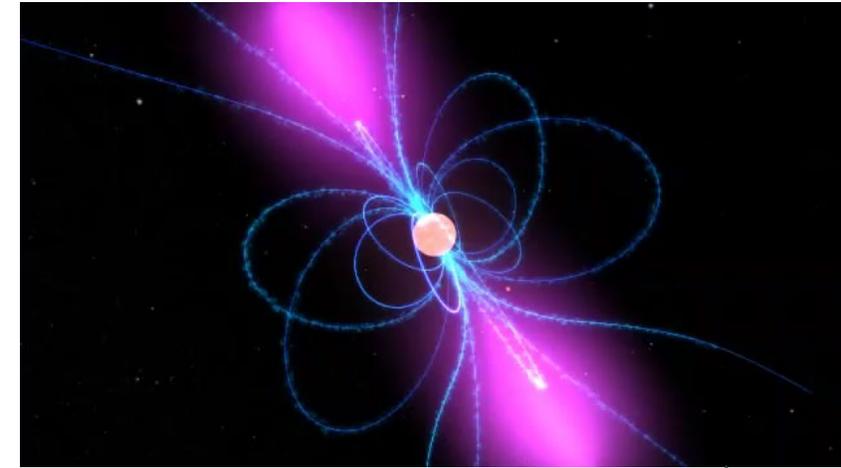
太陽質量3億倍  
ブラックホール



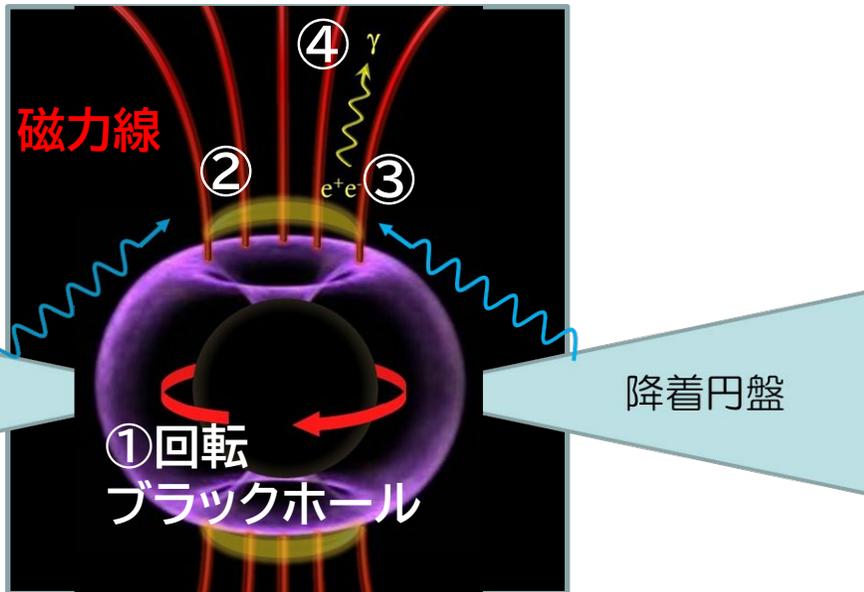
⇒ガンマ線放射が  
ブラックホールサイ  
ズ(太陽地球間距離  
の3倍)より狭い領  
域で起こっているこ  
とを発見。

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

中性子星高速回転パルサー



動画 <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/etepulsars/>  
[https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/etepulsars/a010205\\_pulsar\\_720p.mp4](https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/etepulsars/a010205_pulsar_720p.mp4)



粒子加速・放射機構

- ①ブラックホールの回転
- ②ブラックホール極冠で電位差が発生
- ③降着円盤からの光子から生成された電子・陽電子が加速
- ④ガンマ線放射

類似性

# 重要な発見②宇宙ニュートリノとガンマ線観測によるニュートリノ源天体同定に史上初成功

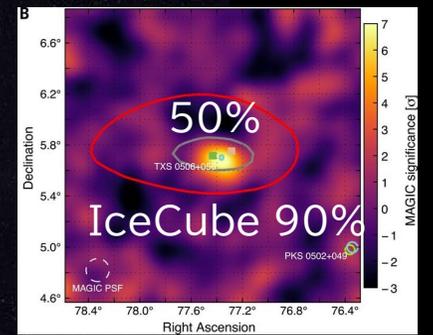
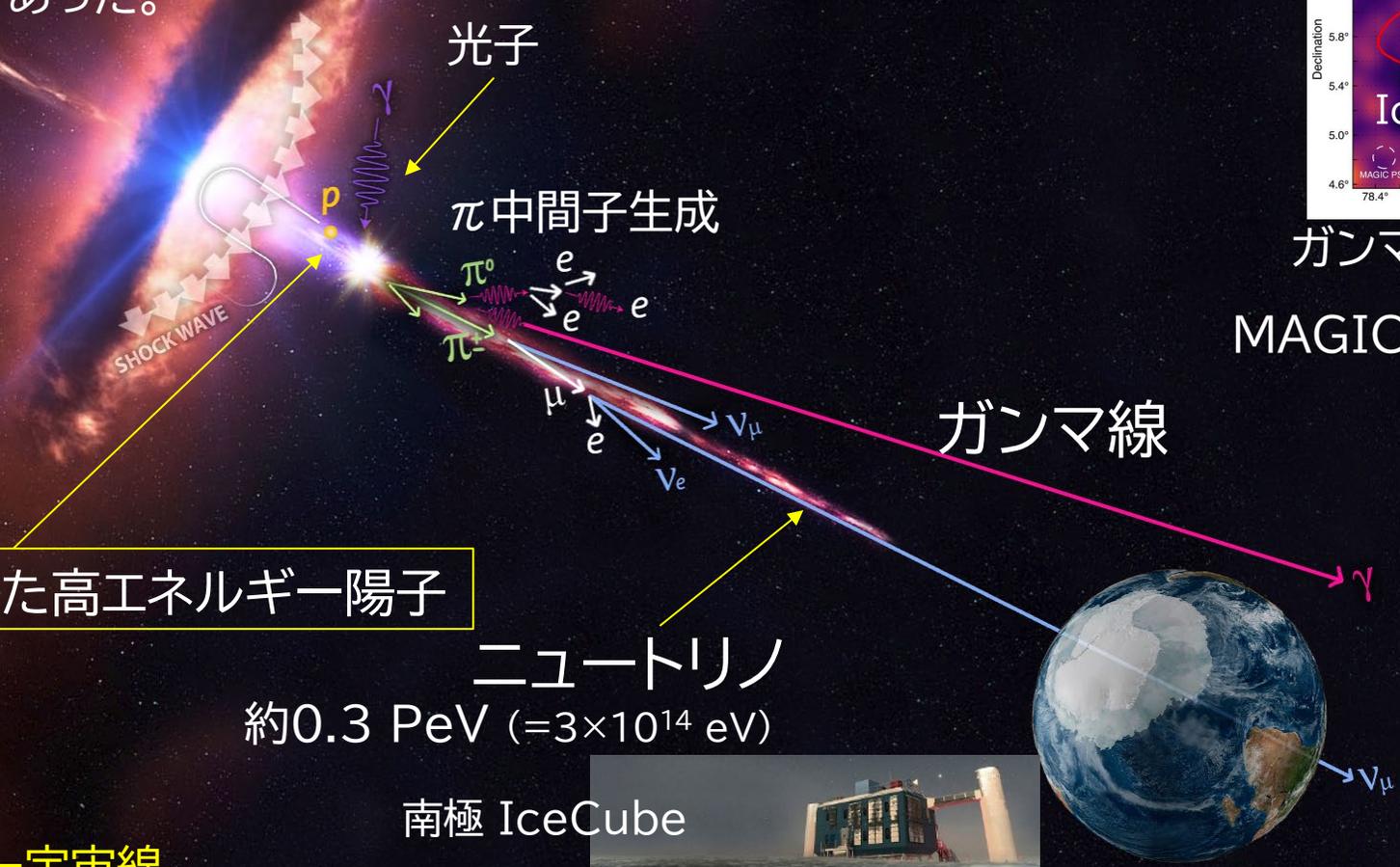
2017年9月22日

この発見以前、我々の銀河系外の天体で、ニュートリノが検出されたのは、SN1987Aだけであった。

IceCube, Fermi, MAGIC+, 2018年, *Science*誌掲載

約38億光年先  
巨大ブラックホール  
を持つ活動銀河核

ジェットで加速された高エネルギー陽子



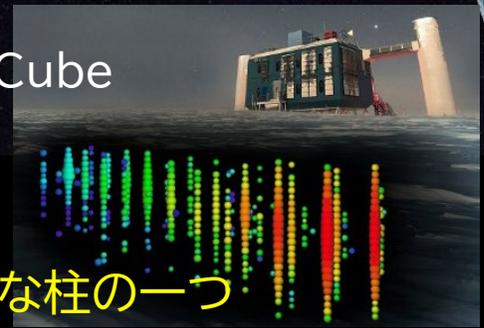
ガンマ線検出有意度

MAGIC



ニュートリノ  
約0.3 PeV (=3×10<sup>14</sup> eV)

南極 IceCube

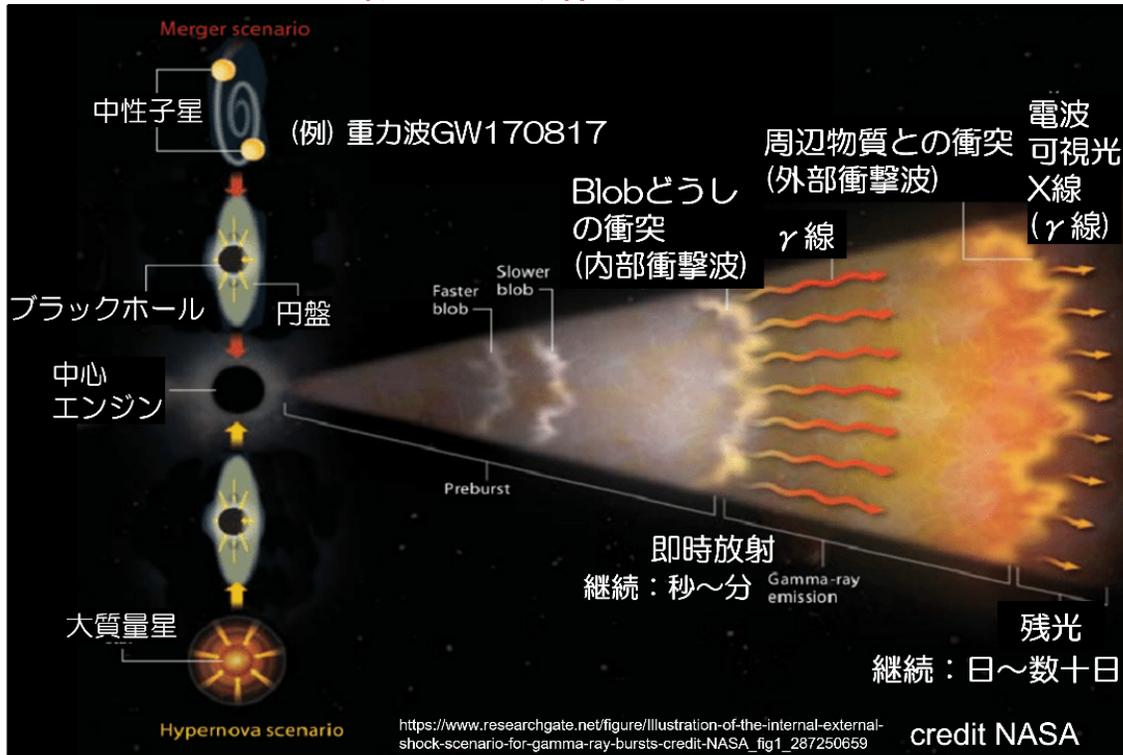


©IceCube Collaboration

- ◆ 活動銀河核は超高エネルギー宇宙線の起源(の一つ)
- ◆ ガンマ線観測は、マルチメッセンジャー天文学 (ニュートリノ、重力波、電磁波、粒子線)の大きな柱の一つ

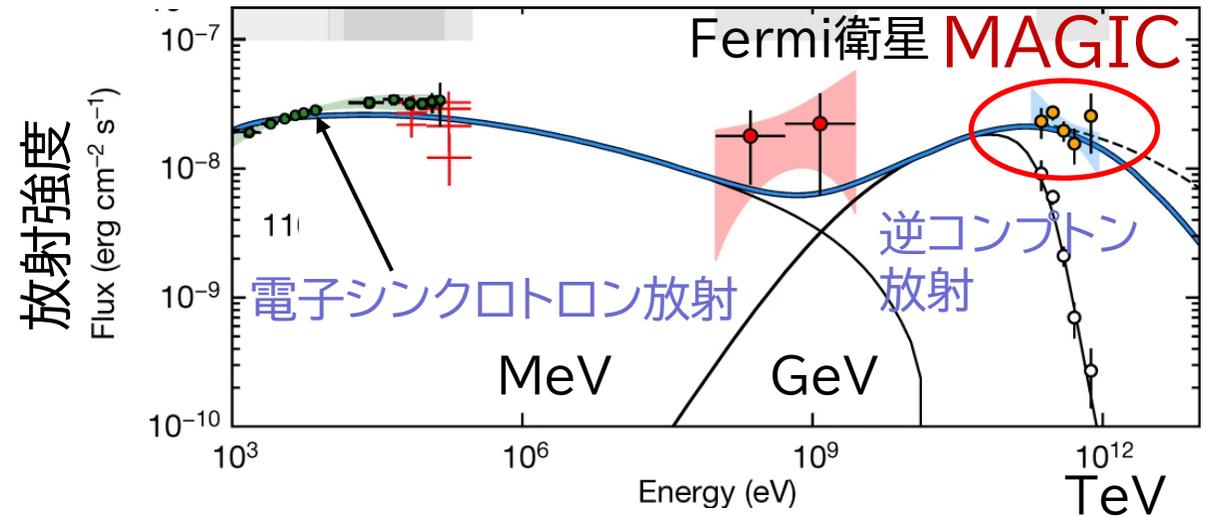
# 重要な発見③ガンマ線バースト(GRB)からのTeVガンマ線検出に史上初成功

宇宙最大の爆発現象:太陽の一生の間に放出するエネルギー(以上)を~秒で放出  
**ブラックホール誕生の瞬間**



2019年1月14日発生した GRB 190114C(45億光年先)

- MAGIC望遠鏡は、バースト発生アラート受信後 **27秒**で追尾開始。
- 東大宇宙線研の研究者が、ラパルマ島現地で観測当番中に起こった！



MAGICで観測したTeV領域ガンマ線⇒GRB普遍的に存在

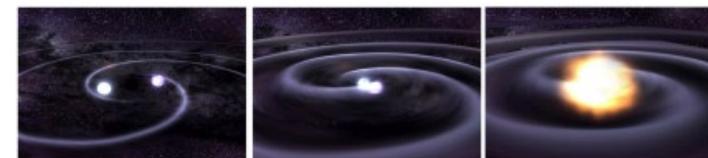
現在5つしかないGRBの検出数を増やし⇒爆発機構・中心エンジンの解明へ

γ線到来時間のエネルギー依存性  
 ⇒ローレンツ不変性検証

Nature誌(2019年)掲載 2編  
 東大宇宙線研の院生博士論文

起源候補:

- ①中性子連星合体⇒重力波源 ②極超新星爆発



# 次世代の国際ガンマ線天文台CTA計画

現行は2-5台(約20年前建設) ⇒ 次世代のCTAで70台以上配置、検出感度 10倍+エネルギー帯域 10倍

北半球:スペイン・カナリア諸島

完成予想図



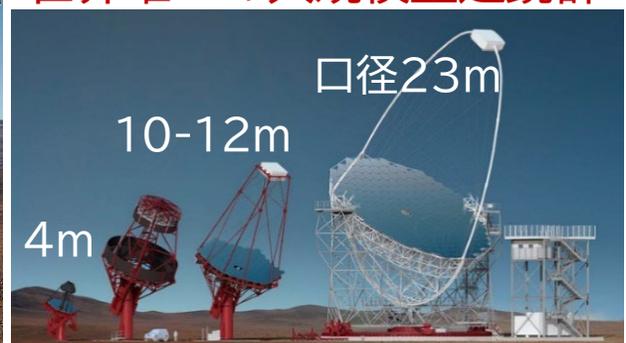
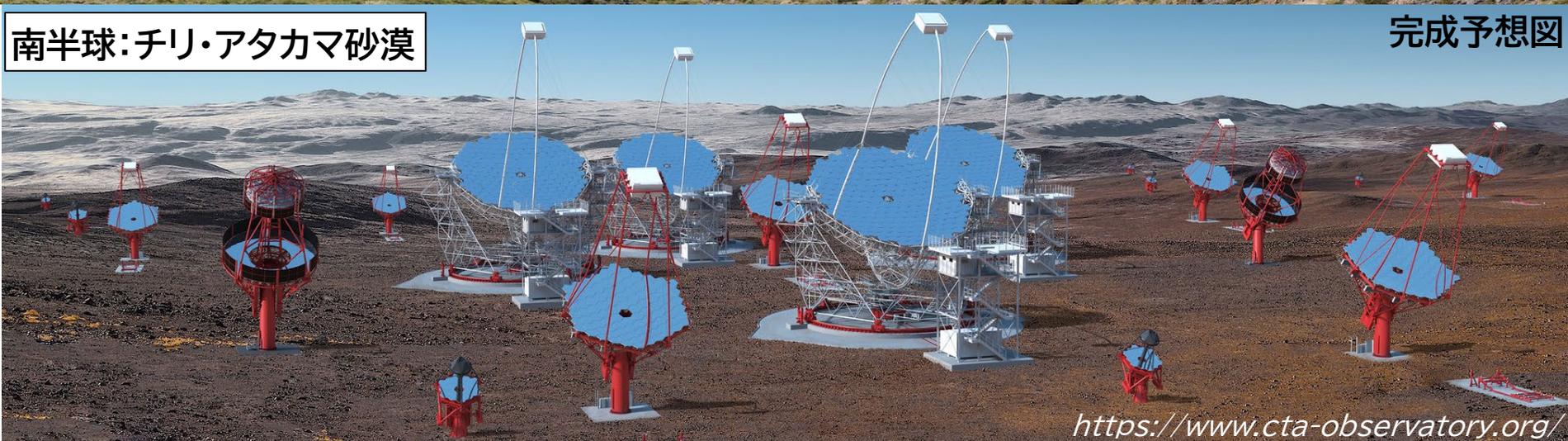
両半球に配置し全天観測



TeVガンマ線領域 次世代で世界唯一の大規模望遠鏡群

南半球:チリ・アタカマ砂漠

完成予想図



高	中間	低	エネルギー
近	中間	遠	観測限界距離

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

25か国 国際協力実験



約1500名(日本約120名)

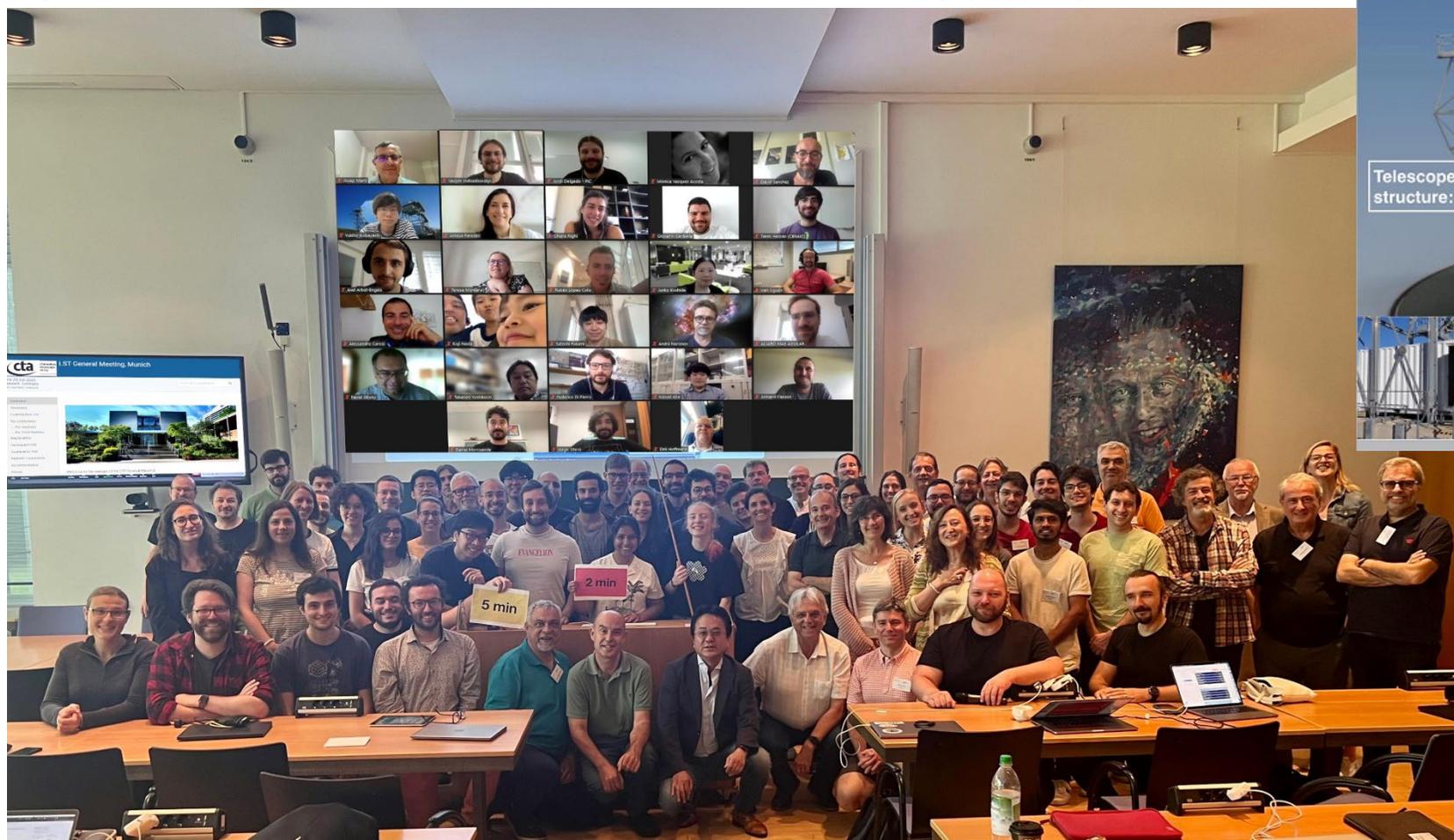
- 数千個の天体の検出期待 (現行 84億光年先⇒CTA23m口径 123億光年先)
- 暗黒物質対消滅γ線探索、アクシオン様粒子探索、ローレンツ不変性検証など

日本グループは観測限界が遠い23m大口径望遠鏡の建設で中心的役割

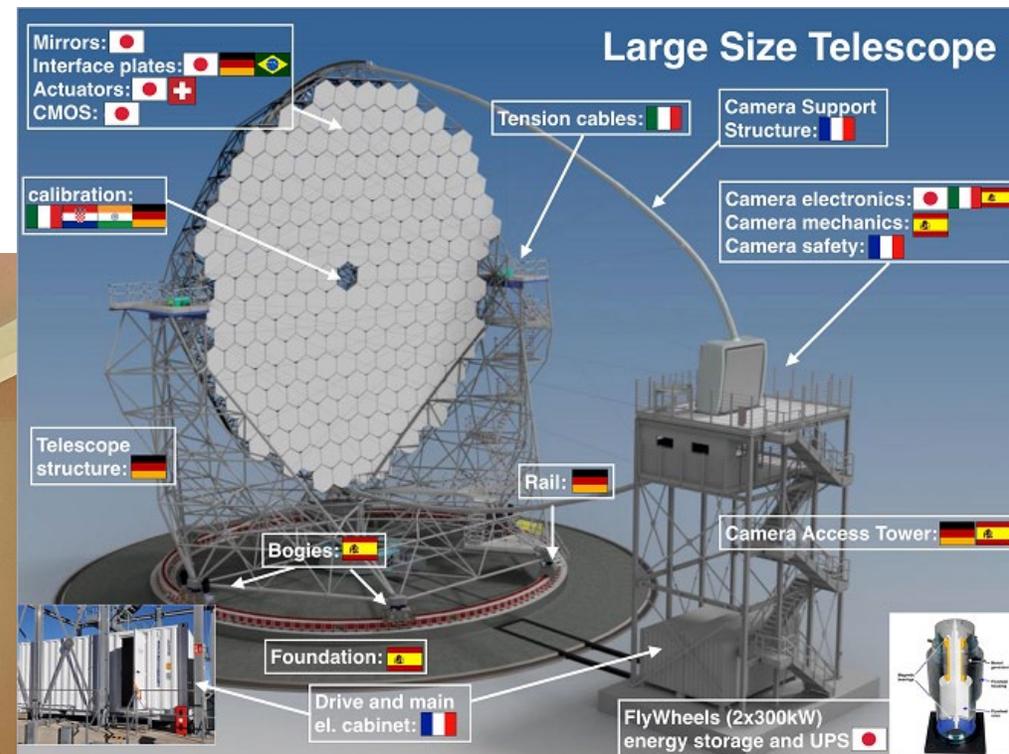
# CTA大口徑望遠鏡(LST)の国際チーム

23m大口徑望遠鏡(LST)建設・運用  
11か国(主に欧州) 約400名

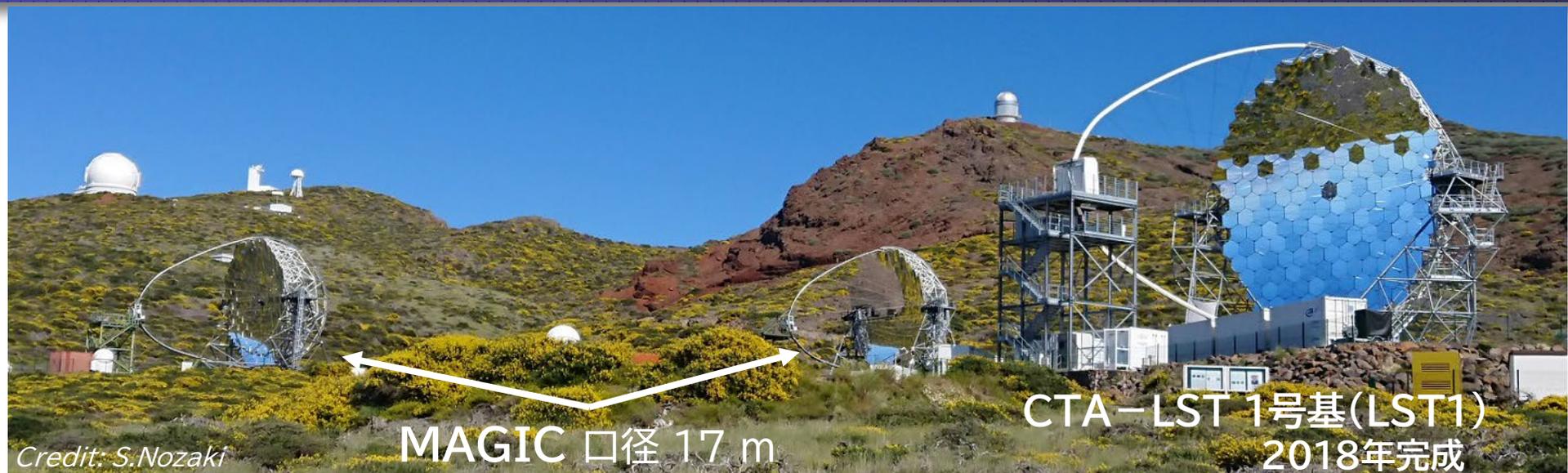
チーム会議(ハイブリッド)の開催場所は参加国持ち回り  
写真はドイツ・マックスプランク研究所@ミュンヘンにて(宇宙線研院生も参加)



## 開発・運用の国際分担



# CTA大口徑望遠鏡(LST)初号機@スペイン・カナリア諸島ラパルマ島



Credit: S.Nozaki

MAGIC 口径 17 m

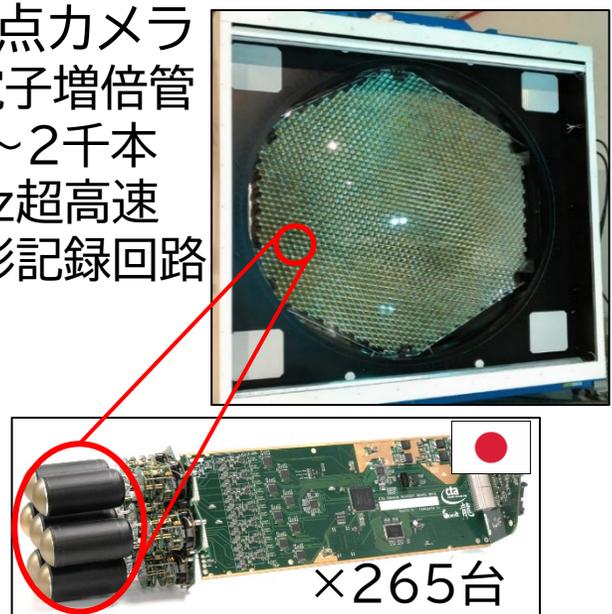
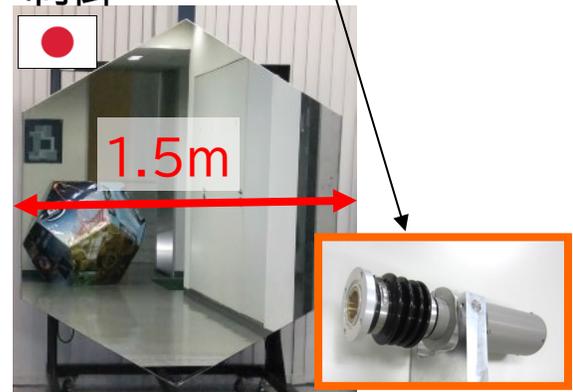
CTA-LST 1号基(LST1)  
2018年完成

## 口径23m 大口徑望遠鏡

- 20 GeV-20 TeV  
CTA口径3種類の望遠鏡で最も低いエネルギー閾値  
⇒最も遠くまで観測可:  
123億光年)
- 高速回転20秒/180度  
ガンマ線バーストなどの突発天体を捉える

## 日本グループ 反射鏡・カメラ 開発の中心的役割

- 反射鏡
  - 分割鏡 ~200枚
  - アクチュエーター制御
- 主焦点カメラ
  - 光電子増倍管 ~2千本
  - GHz超高速波形記録回路



大学院生が設計・試験・改良の全過程で大きく貢献

# CTA望遠鏡の建設@スペイン・カナリア諸島ラパルマ島



動画:  
<http://www.cta-observatory.jp/pic/TOTAL LST.mp4>

# 23m大口径望遠鏡2-4号基@ラパルマ島 建設状況(昨年12月)

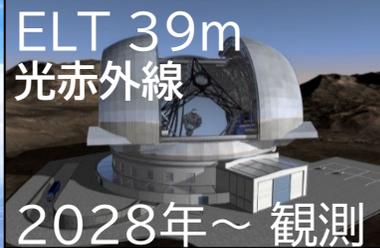


2-4号基 同時建設中(日本グループ製作の鏡・カメラ取付中)⇒来年4月 2-4号基完成

# CTA南サイト@チリ・アタカマ砂漠



Credit: Marc-André Besel, CTAO / ESO



Cerro Armazones  
E-ELT

Vulcano Llullaillaco  
6739 m, 190 km east

CTA南サイト  
(海拔約2千m)

Cherenkov Telescope Array Site

Cerro Paranal  
Very Large Telescope



公道からCTAサイトへの道路建設



来年から、現地の望遠鏡建設 → 2027年(修士2年) 9台

2029年(博士2年) 58台  
完成予定



# 世界第一線で活躍する院生

世界中の研究者たちと協力して  
自分たちの手で世界最高の望遠鏡を作り上げる。

国際学会・会議での研究発表

カメラ試験の準備  
@ラパルマ島



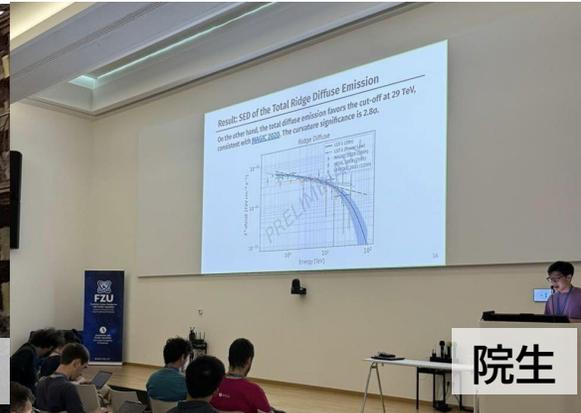
観測シフトでの一コマ  
@ラパルマ島



院生



院生



院生

トップクラス海外大学・研究機関への長期滞在

国際チームの最前線で活躍！

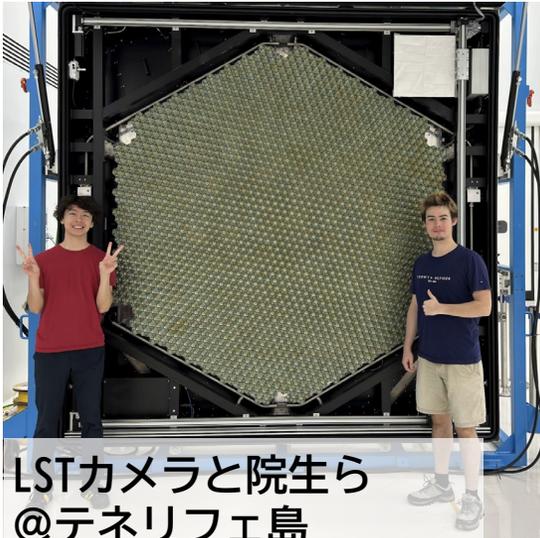


院生



院生

マドリード・コンプルテンセ大学(半年)



LSTカメラと院生ら  
@テネリフェ島

望遠鏡へのカメラ  
取付直後の一コマ



院生

ドイツ・マックスプランク物理学研究所(3か月)



# 院生の研究が世界を変える：修士・博士のインパクト

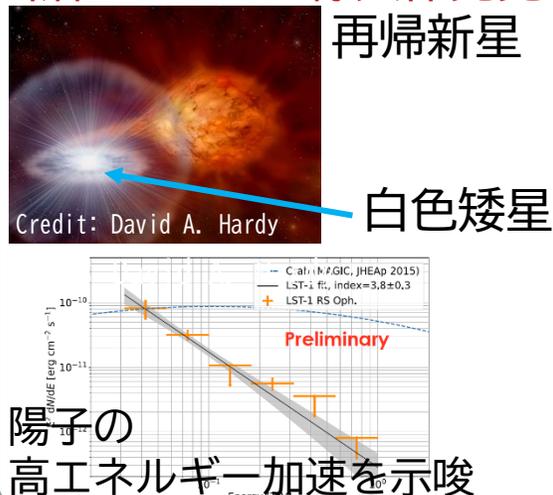
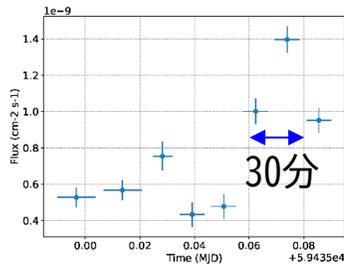
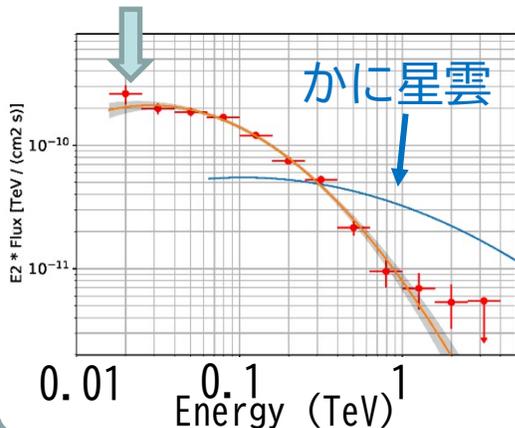
作り上げた望遠鏡から世界にインパクトをもたらす博士論文に！ 次世代観測機器を自ら開発し革新的な観測を実現

活動銀河核(BL Lac)  
20 GeV LSTで初検出

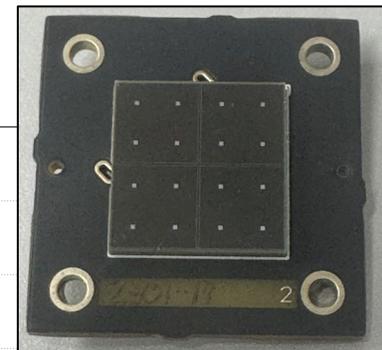
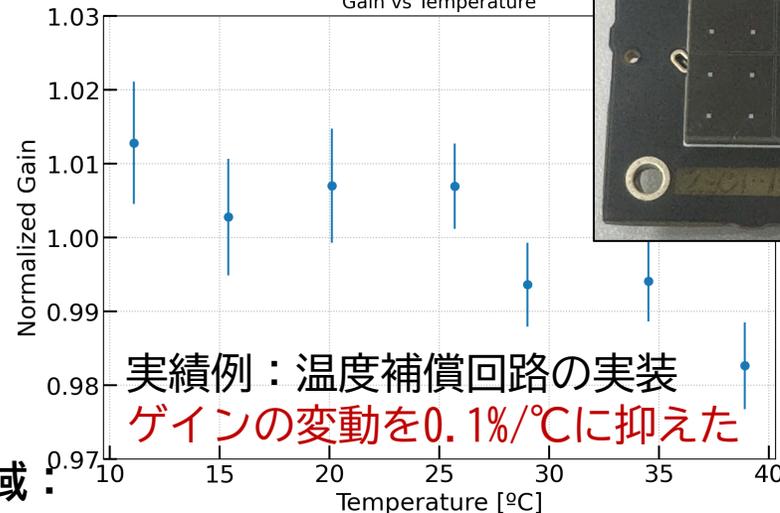
短時間  
強度変動検出

新種のガンマ線天体発見  
再帰新星

シリコン光検出器を用いた  
次世代カメラの開発



Gain vs Temperature



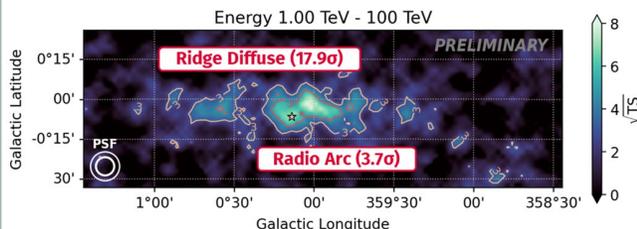
実績例：温度補償回路の実装  
ゲインの変動を0.1%/°Cに抑えた

活動銀河核OP313  
(赤方偏移=0.997)

天の川銀河中心領域  
拡散ガンマ線放射

院生の活動領域：

LST-1で初検出 2023年  
速報を世界へ発信



銀河宇宙線シナリオに制限

- 次世代観測装置の開発
- CTA天文台完成に向けた現地作業
- ソフトウェア開発やデータ解析
- ガンマ線を用いた宇宙物理学的解釈

直近数年の研究室出身者の就職先  
研究職：

- ドイツ・マックスプランク物理学研究所
- 欧州原子核研究機構 CERN (加速器実験)
- 千葉大学 (宇宙ニュートリノ観測)

一般就職：

- 電機メーカー (人工衛星開発)
- 銀行 (クオンツ)
- サービス業
- その他外資系戦略コンサル・日系証券会社などの内定実績アリ

VHE  $\gamma$  線領域で

- 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

ガンマ線バースト検出兆候

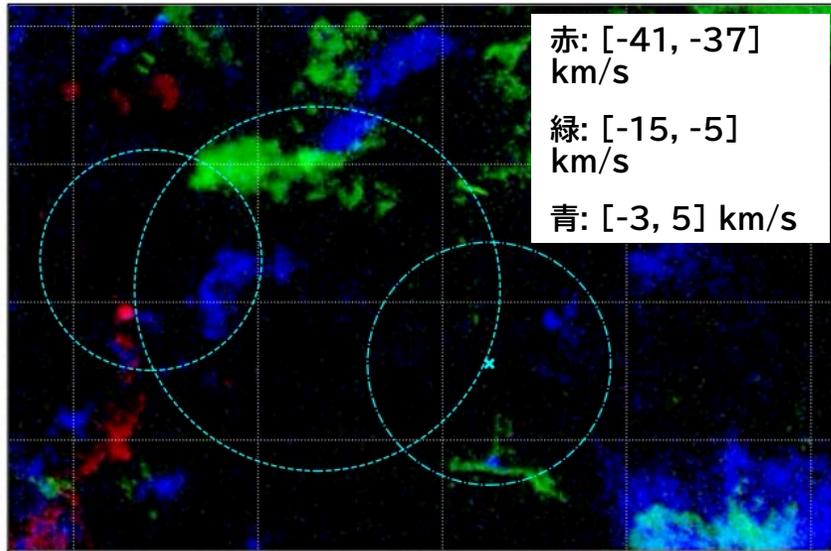
そしてどんな場所でも活躍できる人材に！

# 多波長観測 (高エネルギーガンマ線観測に加えて)

## 電波観測

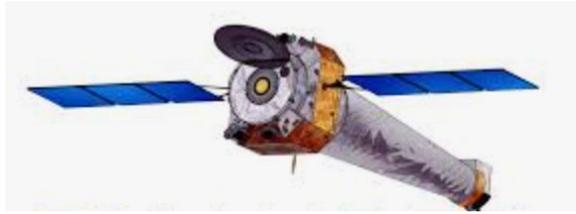


←野辺山45m  
電波望遠鏡  
(今年の名探偵コナンの映画にも登場!)



超高エネルギーガンマ線領域内の  
分子雲を探索

## X線観測



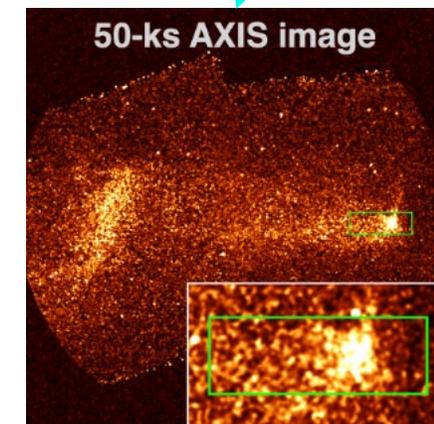
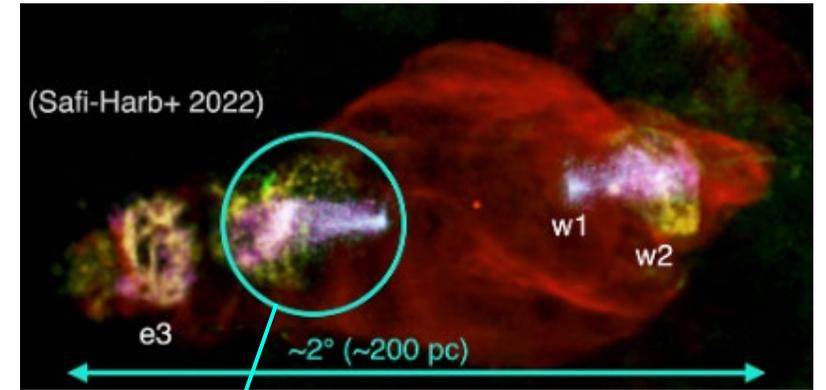
チャンドラX線衛星



ティコの超新星残骸

## X線衛星将来計画

- 日本: JEDI/Chronos
- アメリカ: AXIS, SuperHERO/HEROIX
- ヨーロッパ: Athena



- ブラックホール SS 433からのジェット構造
- AXIS衛星でどう見えるか  
シミュレーション



# GRAMS計画

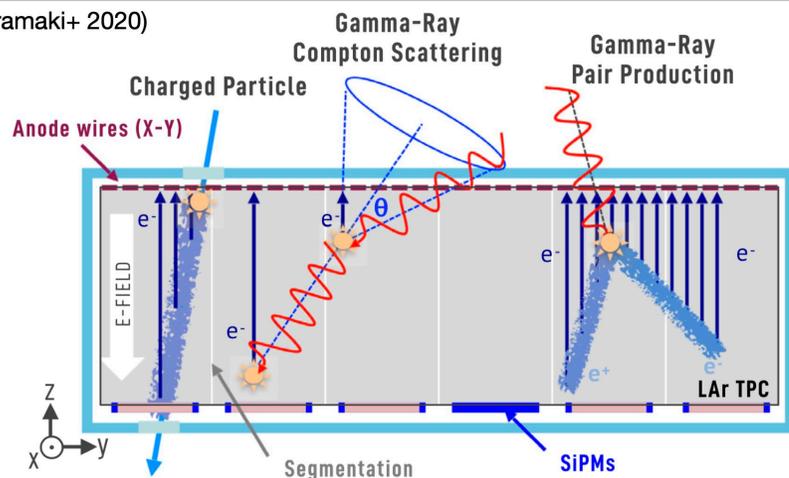
- Gamma-Ray and AntiMatter Survey (GRAMS)計画
- MeVガンマ線と反粒子の同時検出を目指す
- 液体アルゴンTPC(3次元粒子飛跡)検出器の飛翔体への搭載
- 日米国際コラボレーション(約60人)



実験容器

2023年7月 北海道大樹町での気球実験の様子

(Aramaki+ 2020)



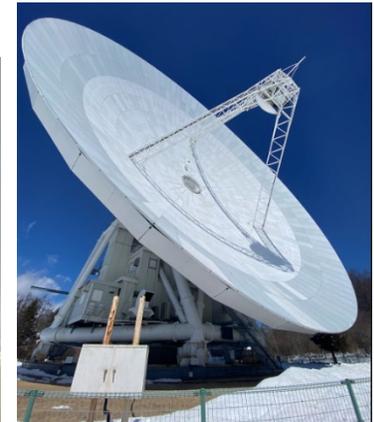
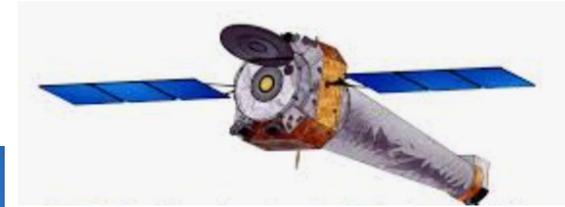
ガンマ線・反粒子の検出方法



# まとめ

## チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ (CTA)

- 最先端のガンマ線観測装置で、極限宇宙や暗黒物質の謎を明らかにしたい
- 国際共同研究に関わってみたい(望遠鏡建設・運用・データ解析+海外機関へ長期派遣可)
- 興味があれば以下もできます。
  - 次世代観測機器開発
  - 電波・X線観測、気球実験観測



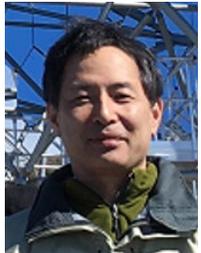
詳しく知りたい方は、オープンラボへ！

# 連絡先

東京大学宇宙線研究所  
チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ (CTA)

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~cta/index.html>

## A8受入教員



教授 窪 秀利

[kubo@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:kubo@icrr.u-tokyo.ac.jp)

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~kubo/>



准教授 齋藤 隆之

[tsaito@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:tsaito@icrr.u-tokyo.ac.jp)

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~tsaito/>



准教授 吉越 貴紀

[tyoshiko@icrr.u-tokyo.ac.jp](mailto:tyoshiko@icrr.u-tokyo.ac.jp)

<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~tyoshiko/>

我々の研究グループメンバーが推進しているプロジェクト

CTA国際グループ <https://www.cta-observatory.org/>

CTA日本グループ <http://www.cta-observatory.jp/>

MAGIC国際グループ <https://magic.mpp.mpg.de/>

MAGIC日本グループ <http://magic.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

VERITAS国際グループ <https://veritas.sao.arizona.edu/>

H.E.S.S.国際グループ <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>

GRAMS国際グループ <https://grams.sites.northeastern.edu/>