

# 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・  
ロケ・デ・ロス・ムチャチョス天文台



MAGIC-II

MAGIC-I

CTA-LST初号機

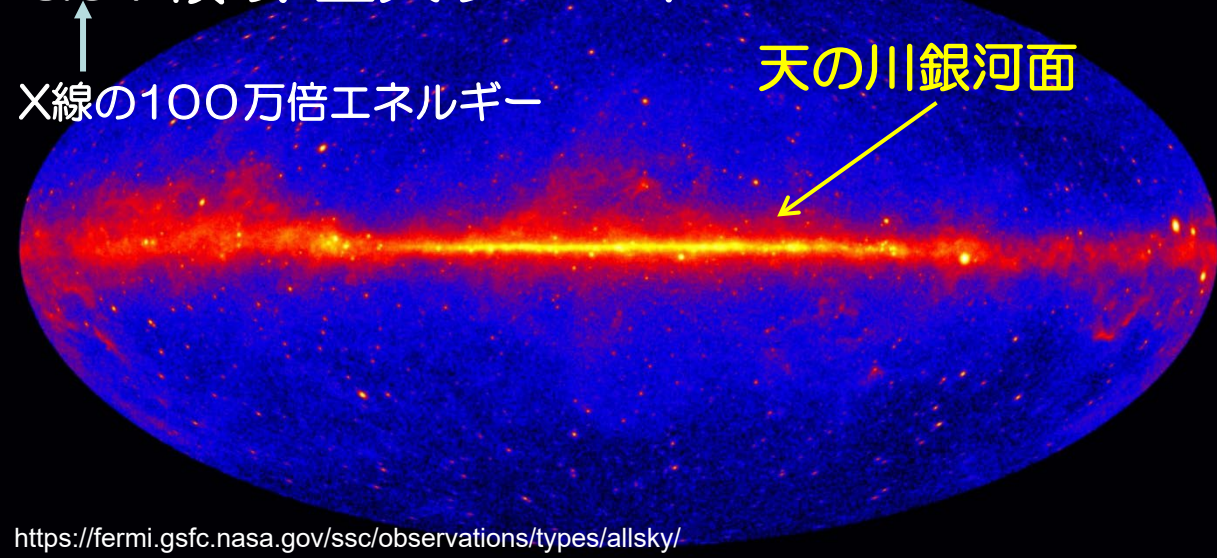
- 高エネルギー天体(ブラックホール天体など)の性質解明
- 宇宙線の起源 (宇宙の巨大加速器) の解明
- 標準理論を超えた物理探求 (暗黒物質探索、量子重力理論)

教員8名, 研究員3, 院生6(博士4, 修士2), 技術職員2, 秘書2

A8受入教員: 窪秀利、吉越貴紀

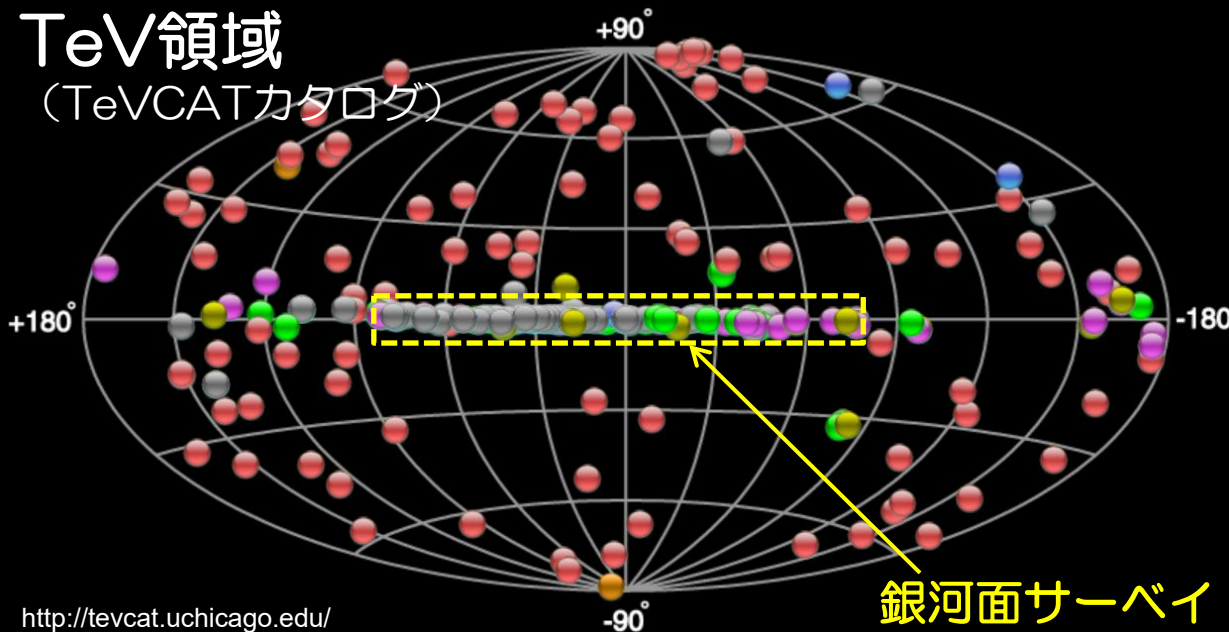
# ガンマ線全天画像

## GeV領域 全天サーベイ



- 銀河面からの広がった放射
- 6000個以上の天体検出

## TeV領域 (TeVCATカタログ)



- 約250個の天体検出  
(赤：ブラックホール活動銀河核 など)

# テーマ①高エネルギー天体の性質解明

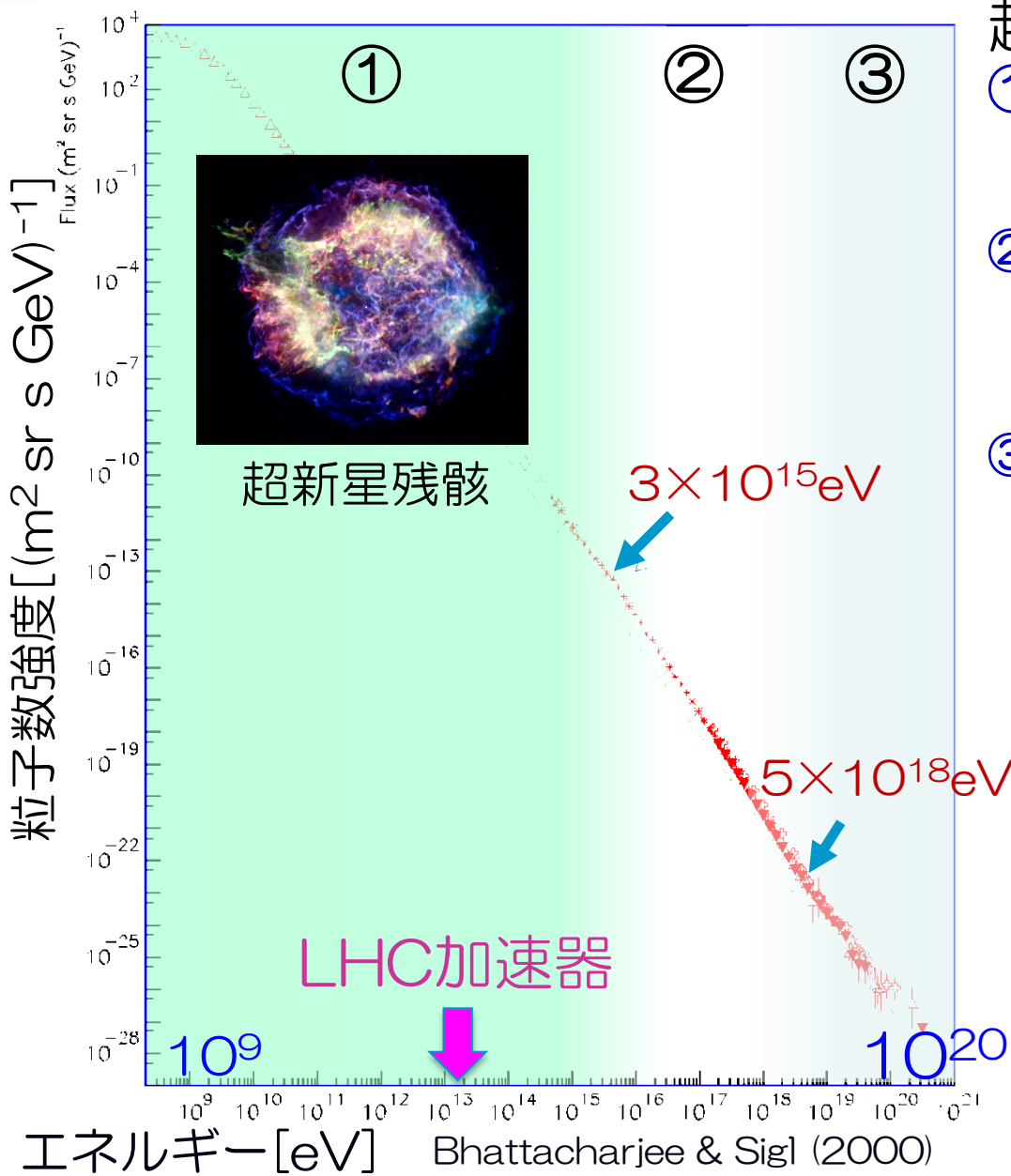
(主に)天の川銀河内

天の川銀河外



- 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



起源は100年来の謎

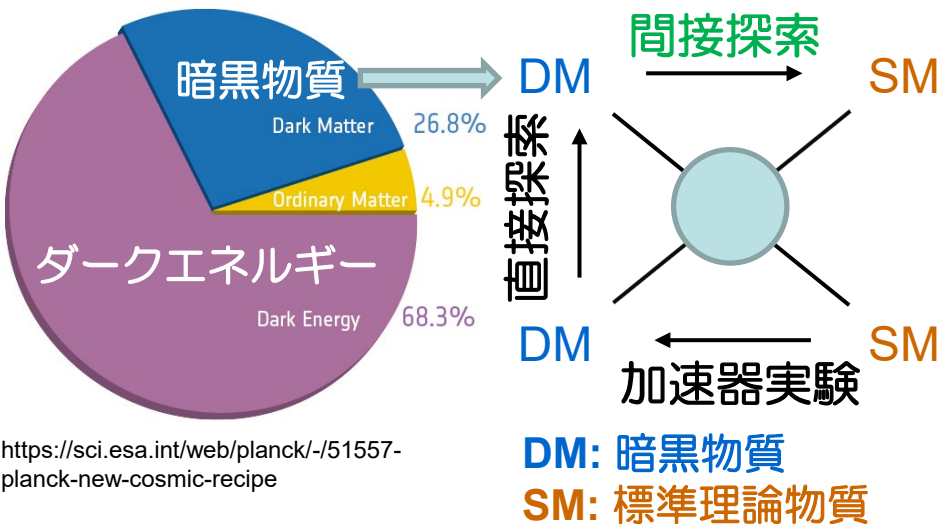
- ①  $E < 10^{15-16} eV$   
天の川銀河内超新星残骸など
- ②  $10^{15-16} < E < 10^{18-19} eV$ 
  - 天の川銀河内?外?
  - 大規模構造?
- ③  $E > 10^{18-19} eV$   
銀河系内閉じ込めできるエネルギーを越えている⇒天の川銀河外起源



銀河磁場で曲げられてしまう粒子と異なり、ガンマ線の到来方向に起源がある。

# ③標準理論を超えた物理探求

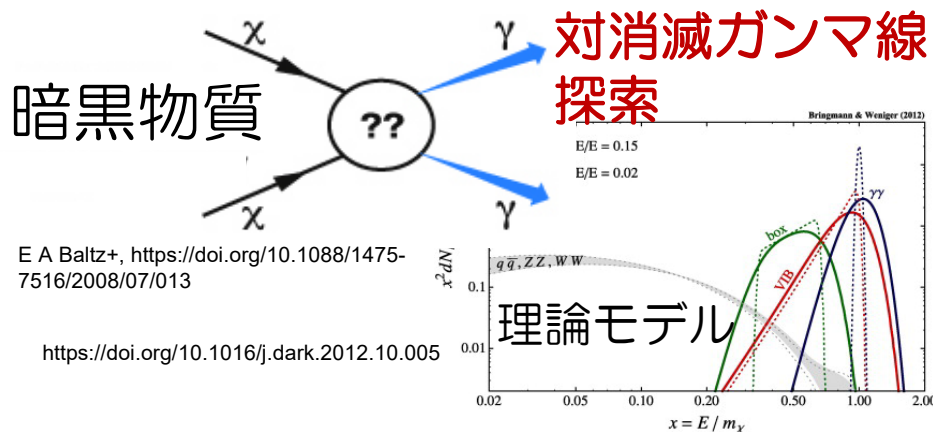
## (A) 暗黒物質探索



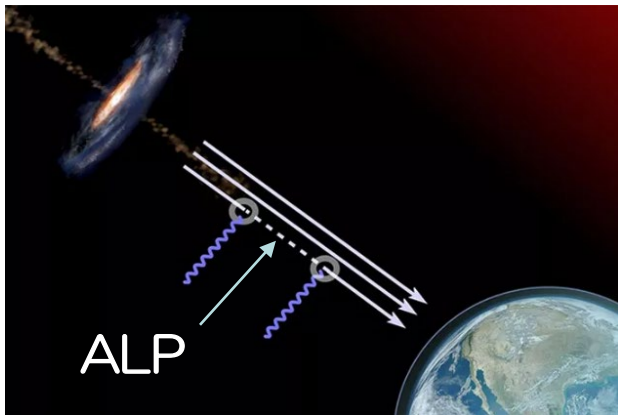
<https://sci.esa.int/web/planck/-/51557-planck-new-cosmic-recipe>

## ガンマ線観測による間接探索法

超対称性理論で予言されるWIMP粒子の場合



## Axion like particle (ALP) の探索



光子が地球へ飛来する間に、  
ALP  $\leftrightarrow$  光子  
変換が起こる  
 $\Rightarrow$   
 $\gamma$ 線スペクトル変化。

(Image credit: Aurore Simonnet/Sonoma State University/NASA/NOAA/GSFC/Suomi NPP/VIIRS/Norman Kuring)

## (B) 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。

$\Rightarrow$

光の伝搬時間のずれが大きく  
ガンマ線エネルギー 高いほど  
天体までの距離 遠いほど

遠方天体からのガンマ線到来時間差を測定し検証

# 超高エネルギーガンマ線観測方法—大気チェレンコフ望遠鏡

宇宙ガンマ線は地球大気で吸収⇒直接観測するには人工衛星や気球

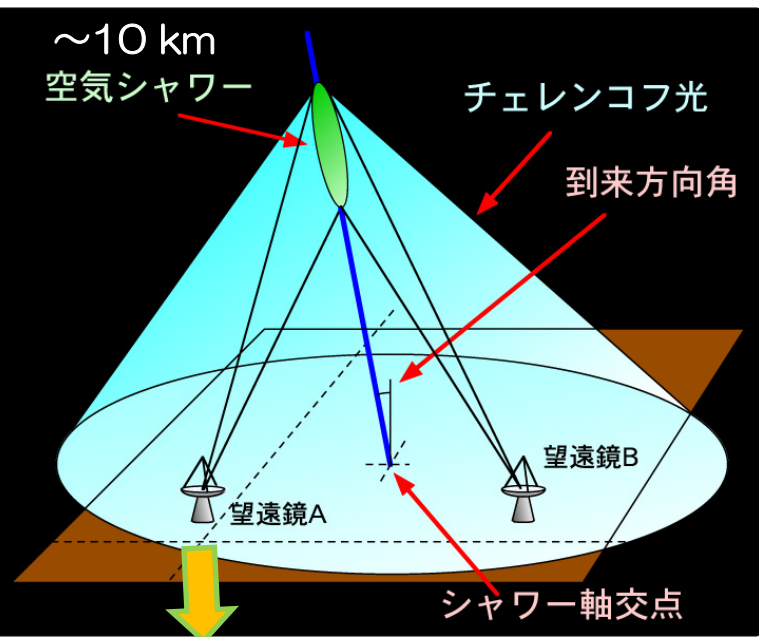
- GeVガンマ線：人工衛星（Fermi衛星稼働中）
- TeV以上ガンマ線：天体からの放射強度が弱く、衛星搭載装置の面積では検出できず⇒地球大気を検出器として利用する

ICRRグループが参加

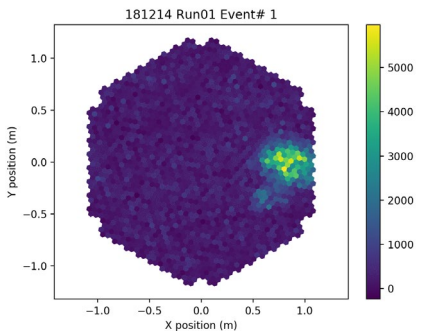
MAGIC @スペイン・カナリー諸島



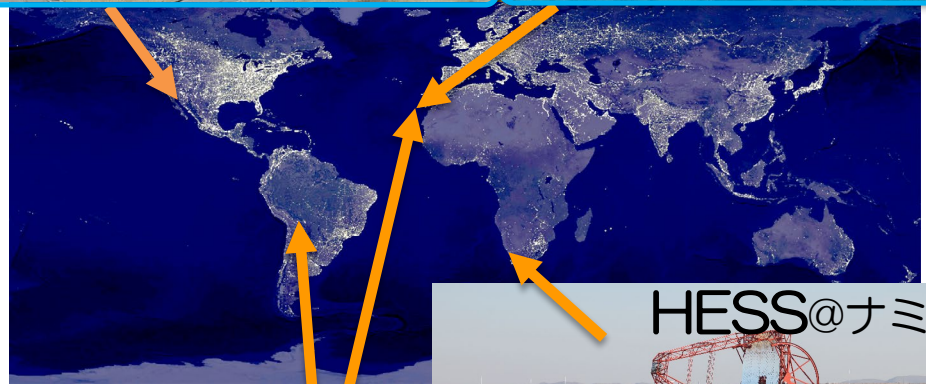
VERITAS @USA



焦点面カメラ



千本の  
光電子増倍管  
1ナノ秒刻み撮像  
⇒形状から  
ガンマ線と背景事象  
を判別



HESS@ナミビア



建設中CTA@カナリー諸島(北) + チリ(南)

- 南北半球に配置⇒全天観測
- 異なる経度⇒観測時間帯を繋ぐ

# 大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC

口径17m 2台@高度2200m ORM天文台(10以上の観測施設)

➤ 50 GeV-50 TeV  $\gamma$ 線観測

➤ 約40名の日本グループ(東大、京大、東海大、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(院生も現地シフト)

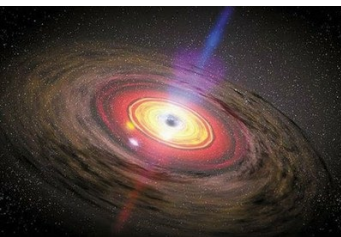
スペイン領  
カナリア諸島  
ラパルマ島



# 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

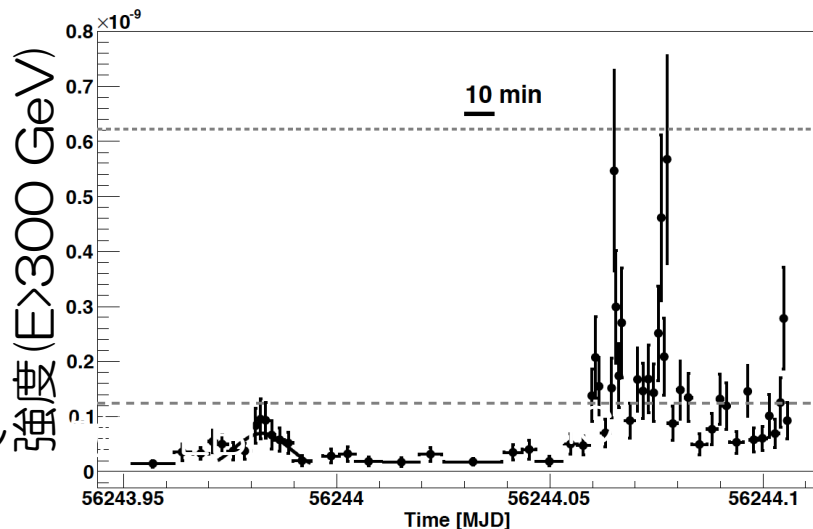
MAGIC collaboration,  
Science誌, 346 (2014) 1080

- 活動銀河核 IC310 (2.6億光年先)
- $E > 300 \text{ GeV}$ で、強度変動 < 5分を検出



NASA / Dana Berry,  
SkyWorks Digital

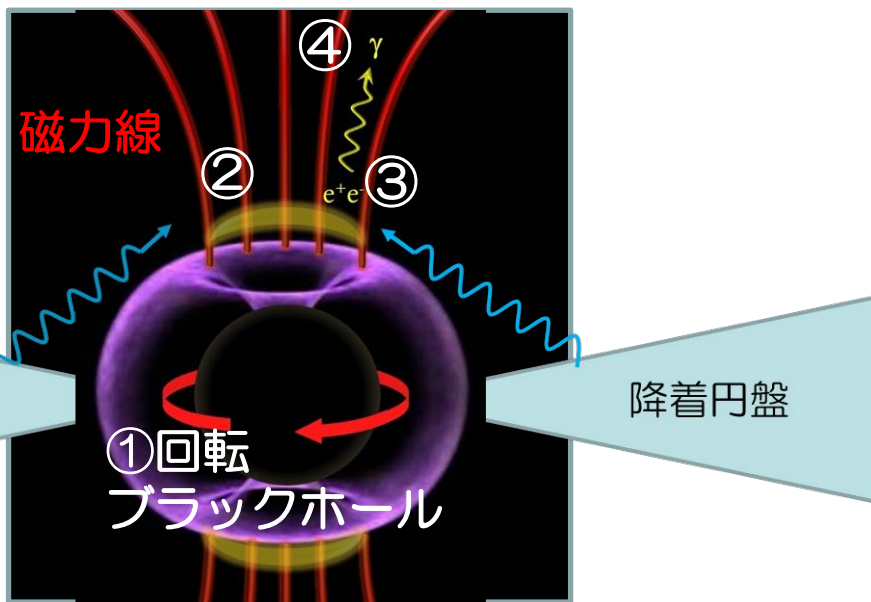
太陽質量3億倍  
ブラックホール



もし、ガンマ線放射領域サイズ  
=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。

## 粒子加速・放射機構

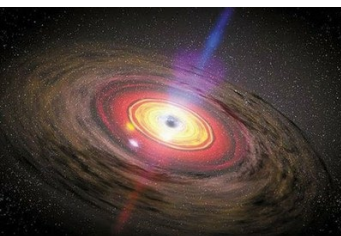
- ①ブラックホールの回転
- ②ブラックホール極冠で電位差が発生
- ③降着円盤からの光子から生成された電子・陽電子が加速
- ④ガンマ線放射



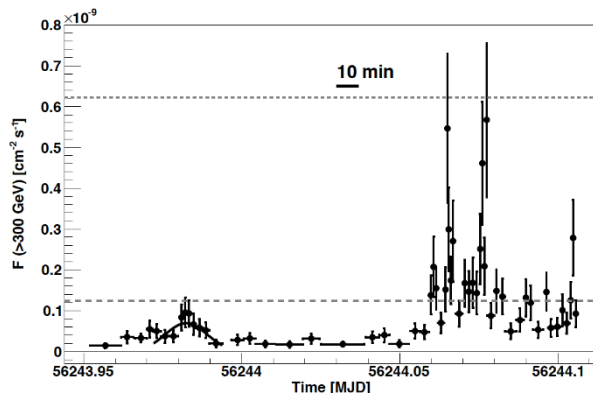


# 重要な発見①活動銀河核ブラックホール極冠からのガンマ線放射

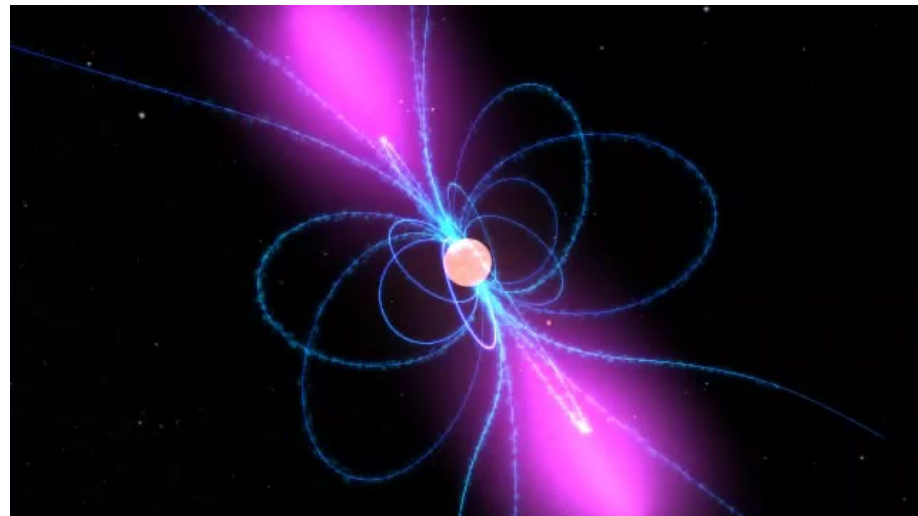
- 活動銀河核 IC310 (2.6億光年先)
- $E > 300$  GeVで、強度変動 < 5分を検出



NASA / Dana Berry,  
SkyWorks Digital



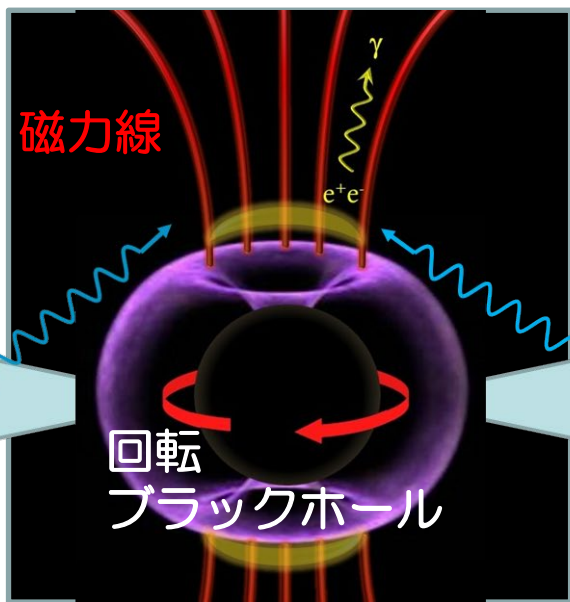
## 中性子星パルサー



動画

<https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/pulsars/>

[https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/pulsars/a010205\\_pulsar\\_720p.mp4](https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/pulsars/a010205_pulsar_720p.mp4)



降着円盤

(今後)

ブラックホール物理・ジェット形成の解明へ

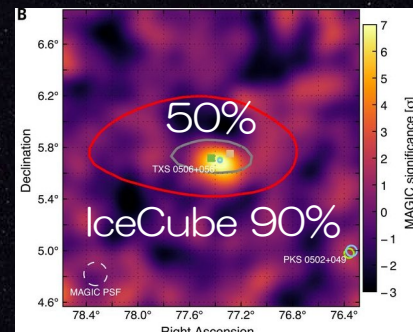
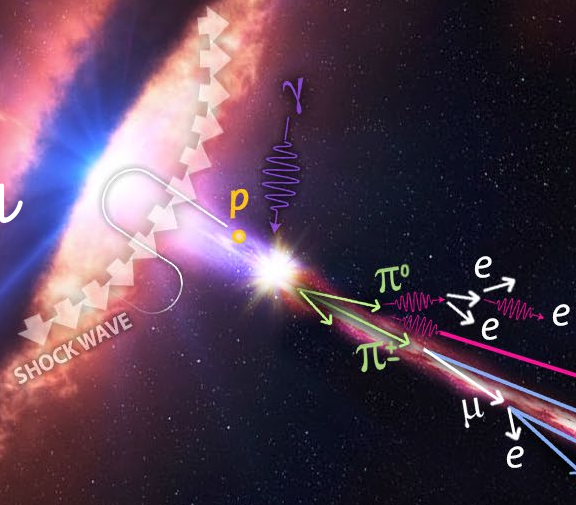
# 重要な発見②宇宙ニュートリノとガンマ線観測による ニュートリノ源天体同定に史上初成功

2017年9月22日

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

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。

約38億光年先  
巨大ブラックホール  
を持つ活動銀河核



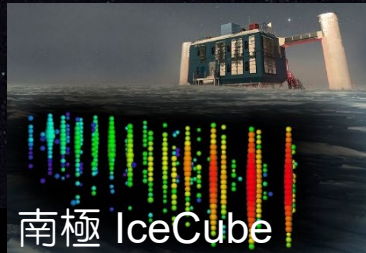
ガンマ線検出有意度



ガンマ線

ニュートリノ

約0.3 PeV (=3×10<sup>14</sup> eV)



南極 IceCube



©IceCube Collaboration

# 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

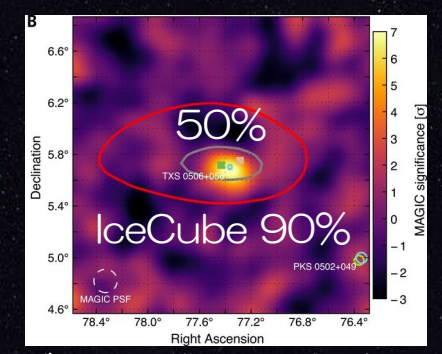
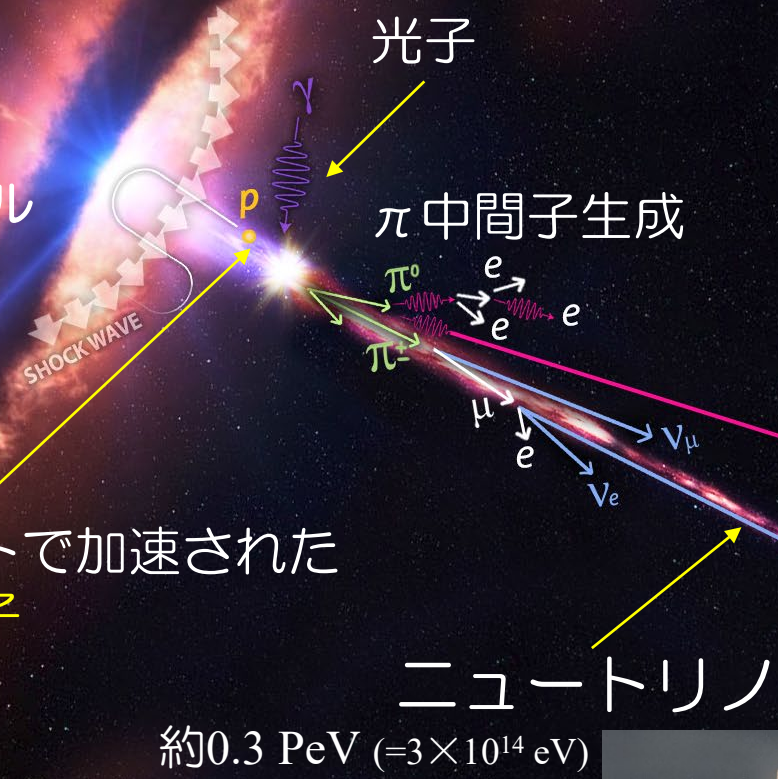
2017年9月22日

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

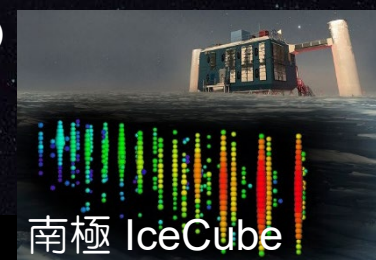
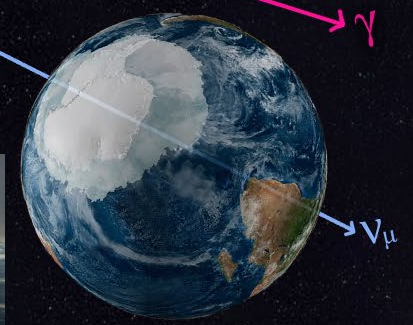
この発見以前、我々の銀河系外の天体で、ニュートリノが検出されたのは、SN1987Aだけであった。

約38億光年先  
巨大ブラックホール  
を持つ活動銀河核

相対論的ジェットで加速された  
高エネルギー陽子



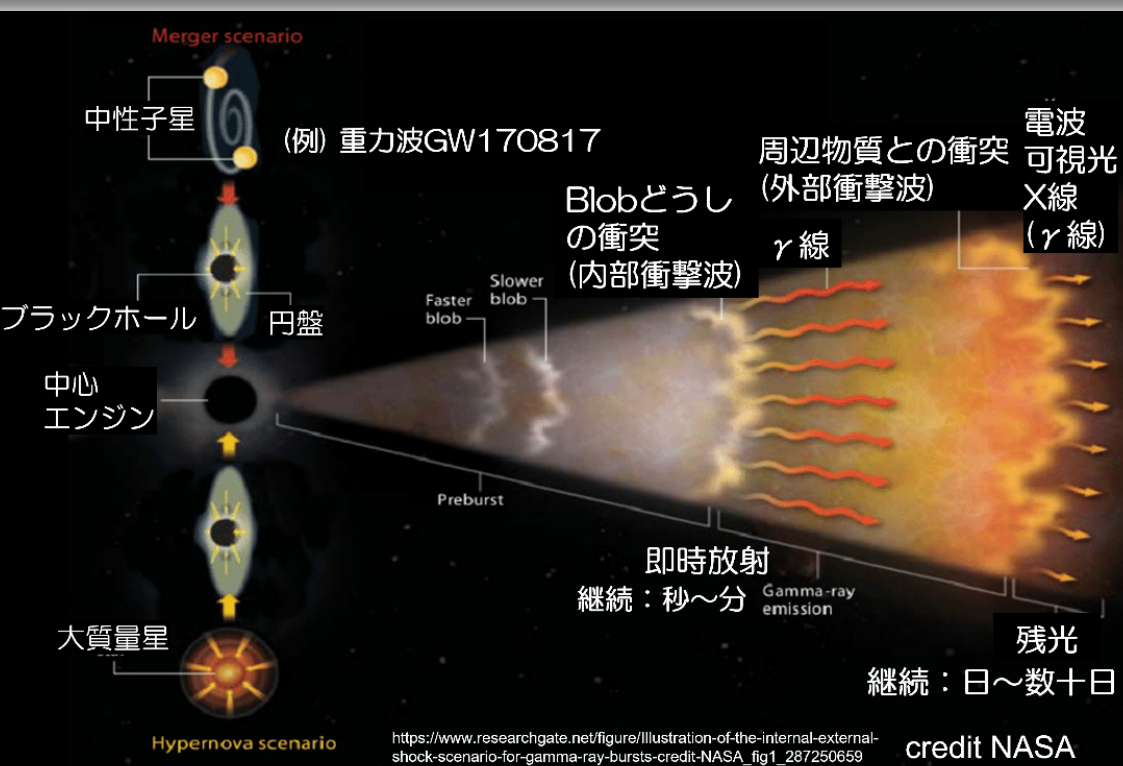
ガンマ線検出有意度



©IceCube Collaboration

- ◆ 活動銀河核は超高エネルギー宇宙線の起源(の一つ)
- ◆ 観測2例のみで今後増やす必要あり。
- ◆ 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

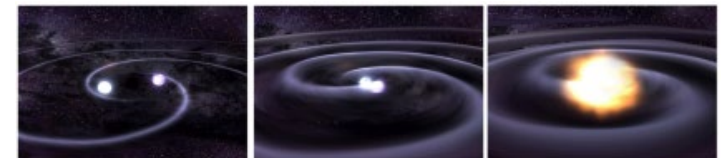
# 重要な発見③ガンマ線バーストからのTeVガンマ線検出に 史上初成功



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**

起源候補：

①中性子連星合体⇒重力波源

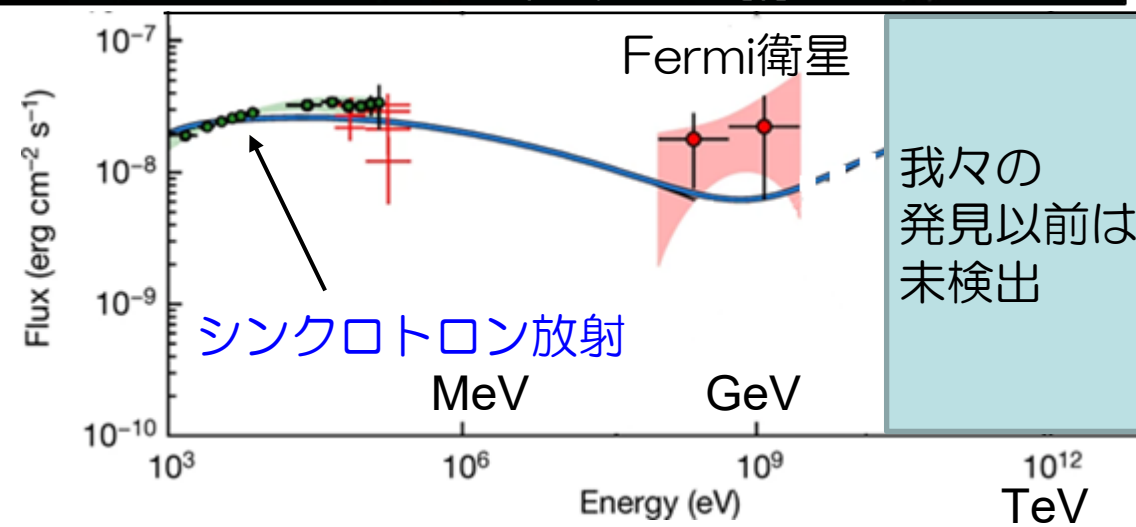


<http://www.ligo.org/science/Publication-S6CBCLowMass/>

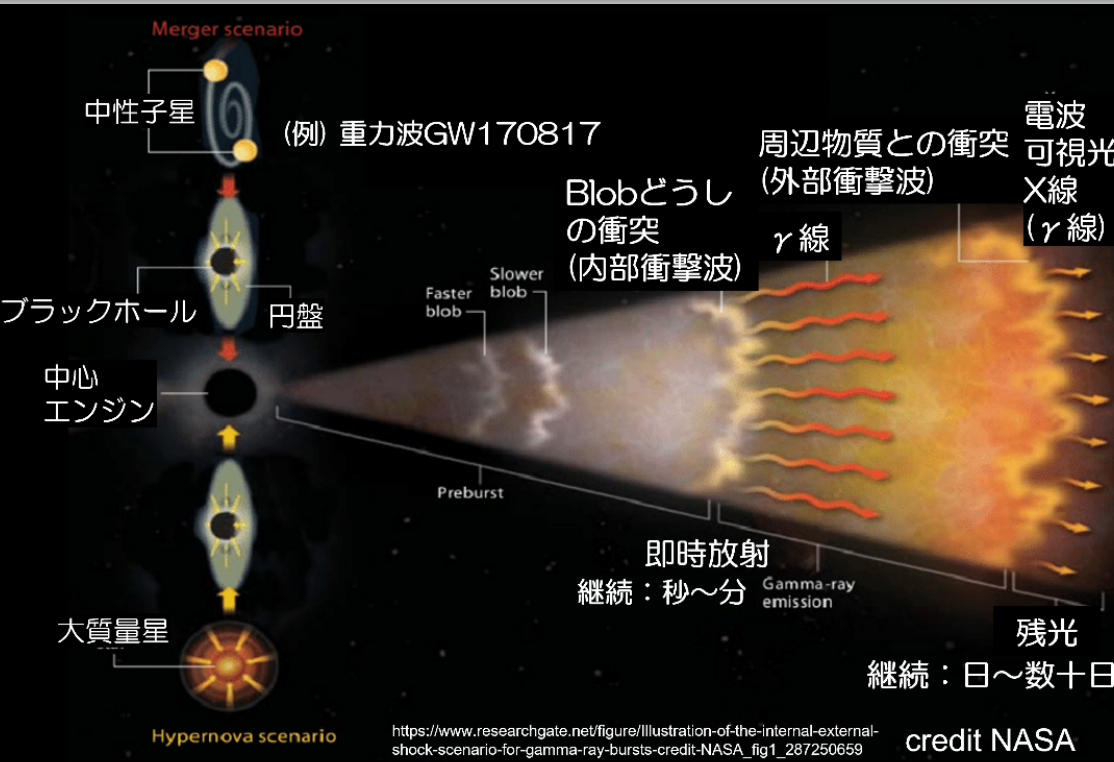
②極超新星爆発

X線・ガンマ線放射スペクトル

高エネルギー側(GeV以上)の  
スペクトルに、別の成分が  
あるかも(起源は?)



# 重要な発見③ガンマ線バーストからのTeVガンマ線検出に史上初成功



2019年1月14日発生

GRB 190114C (45億光年先)



MAGICは、バースト発生アラート受信後**27秒**で追尾開始。

宇宙線研研究員が、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領域ガンマ線は、⇒GRB普遍的に存在。

Nature誌(2019年)掲載 2編

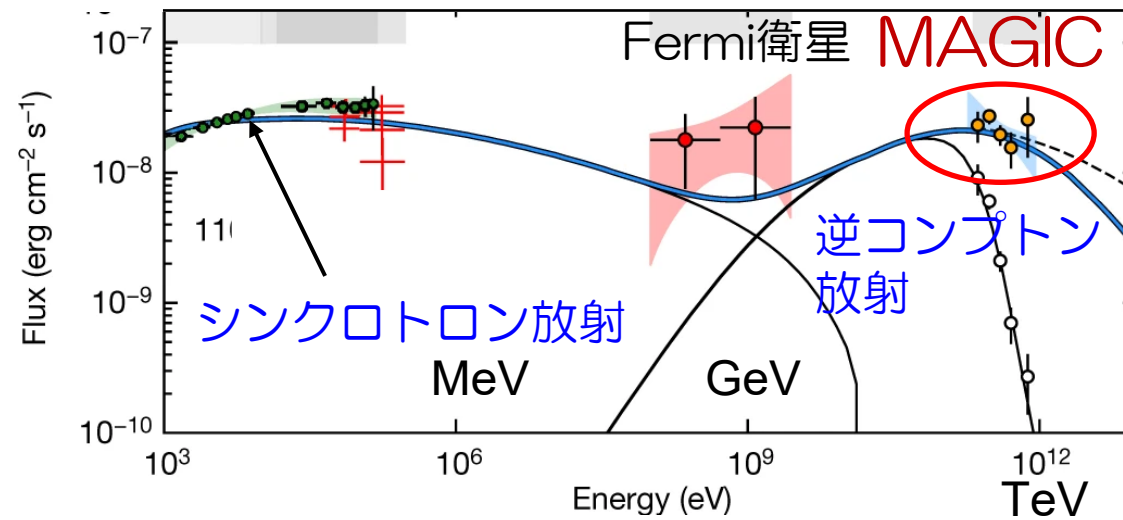
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1750-x>

<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1754-6>

ICRR院生博士論文

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



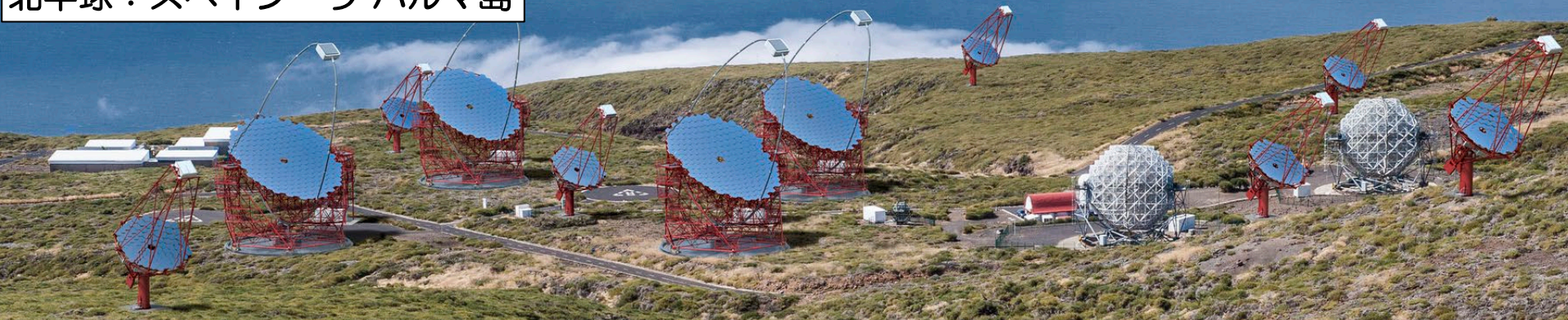
# 次世代のTeVガンマ線天文台計画CTA



現行は2-4台 ⇒ 次世代では約100台配置、検出感度 10倍+エネルギー帯域 10倍

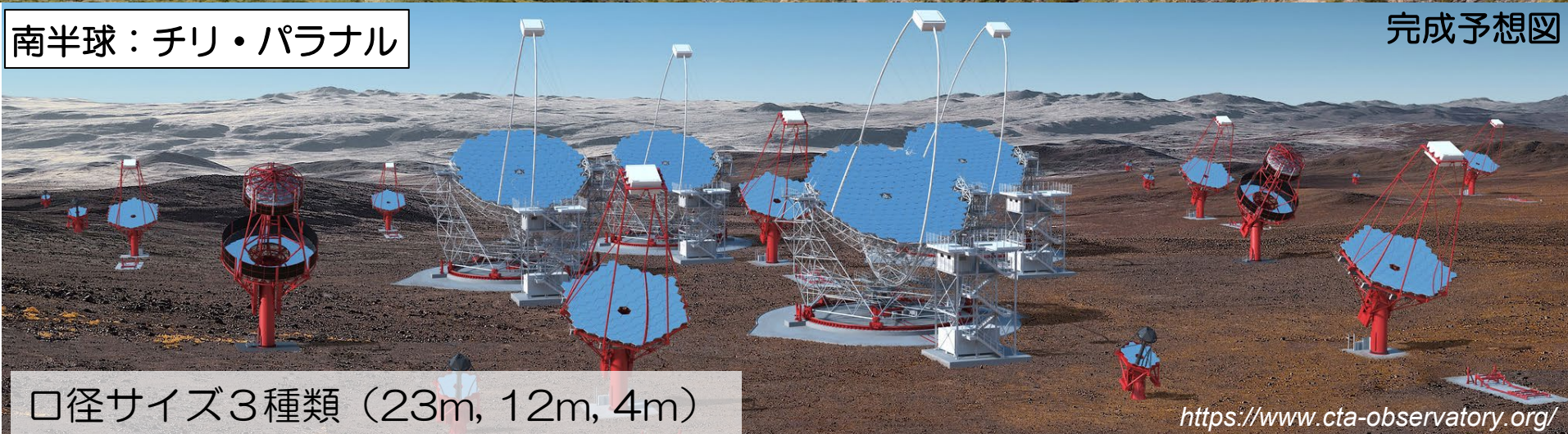
北半球：スペイン・ラパルマ島

完成予想図



南半球：チリ・パラナル

完成予想図



口径サイズ3種類 (23m, 12m, 4m)

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

25か国 国際協力実験



約1500名(日本約120名)

- 全天から1000 個以上の天体の検出期待 (84億光年先⇒123億光年先)
- 暗黒物質対消滅  $\gamma$  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

# CTA大口径望遠鏡(LST)初号機@スペイン・ラパルマ島



MAGIC 口径 17 m

CTA-LST初号機(LST1)  
2018年10月完成

Credit: S.Nozaki

## 口径 23 m 大口径望遠鏡

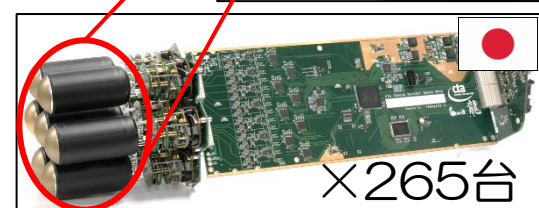
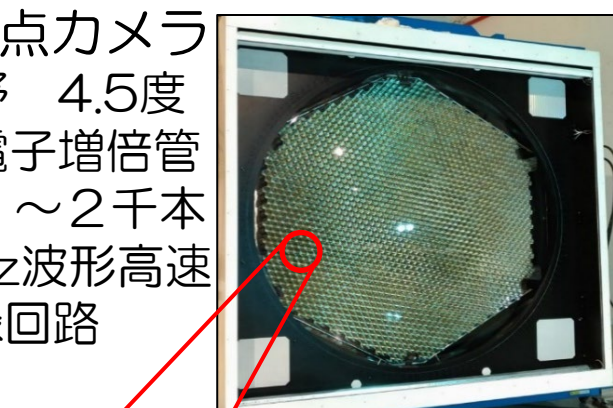
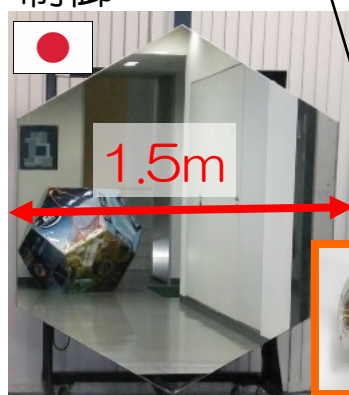
## 日本グループ 鏡・カメラ 開発の中心的役割

- 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)

- 鏡
  - 分割鏡 ~200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 ~2千本
  - GHz波形高速記録回路

- 検出有効面積は、Fermi衛星LATの**1万倍**  
圧倒的な検出事象数
- 高速回転 **20秒**/180度  
突発天体を捉える
- 11か国(日欧+)約300名



×265台

# CTA望遠鏡の建設@スペイン・カナリア諸島



動画：[http://www.cta-observatory.jp/pic/TOTAL\\_LST.mp4](http://www.cta-observatory.jp/pic/TOTAL_LST.mp4)

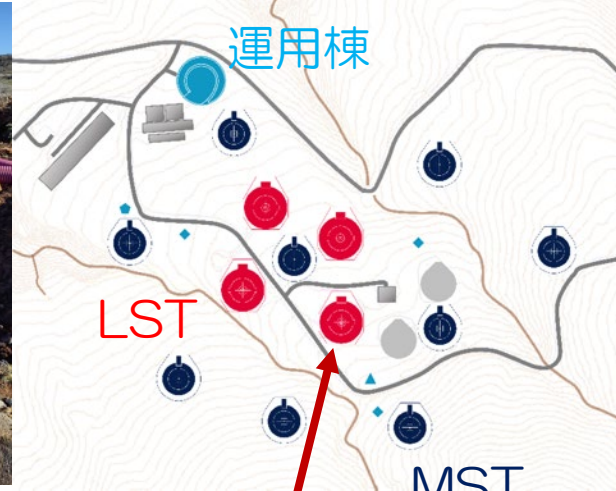


LST2-4号機  
昨年から現地建設  
⇒  
2025年度に完成  
(修士2年時)



# LST 2-4号基 準備状況@ラパルマ島

昨年10月、現地行政の建設許可が下り、基礎工事中



LST-1



LST-2



LST-3



LST-4

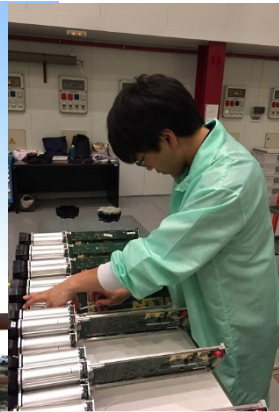
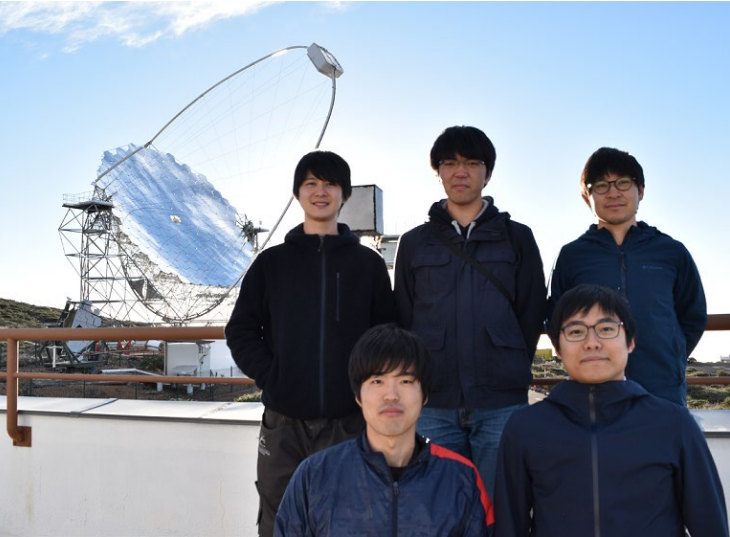


# CTA大口径望遠鏡(LST)－院生の活躍

大学院生が第一線で活躍

観測データ解析

学位論文・投稿論文



カメラ組立中  
@スペイン

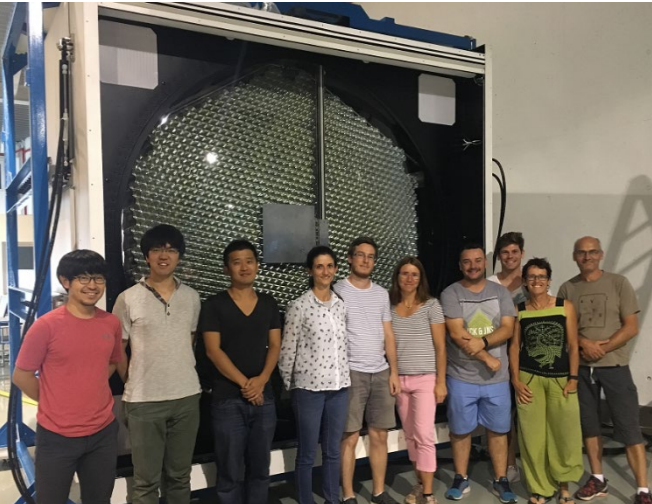
活動銀河核(BL Lac)

20 GeV LSTで初検出

強度変動

公開版ファイルでは図を削除

カメラの望遠鏡取付前試験



外国グループと共同作業

カメラの望遠鏡取付直後



望遠鏡横の  
運用室

日本院生

新種のガンマ線天体



再帰新星

白色矮星

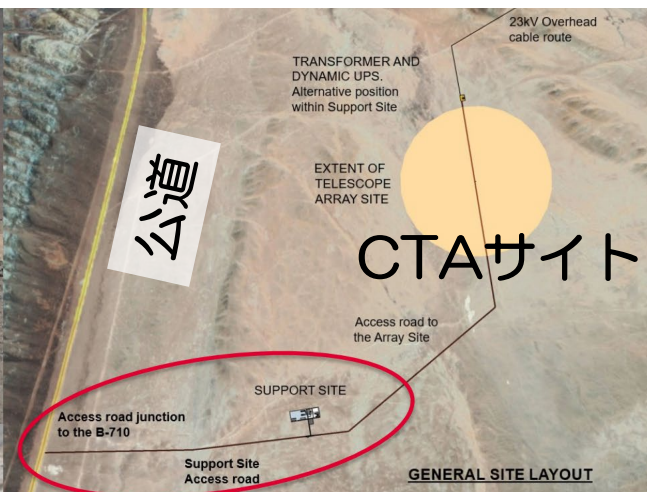
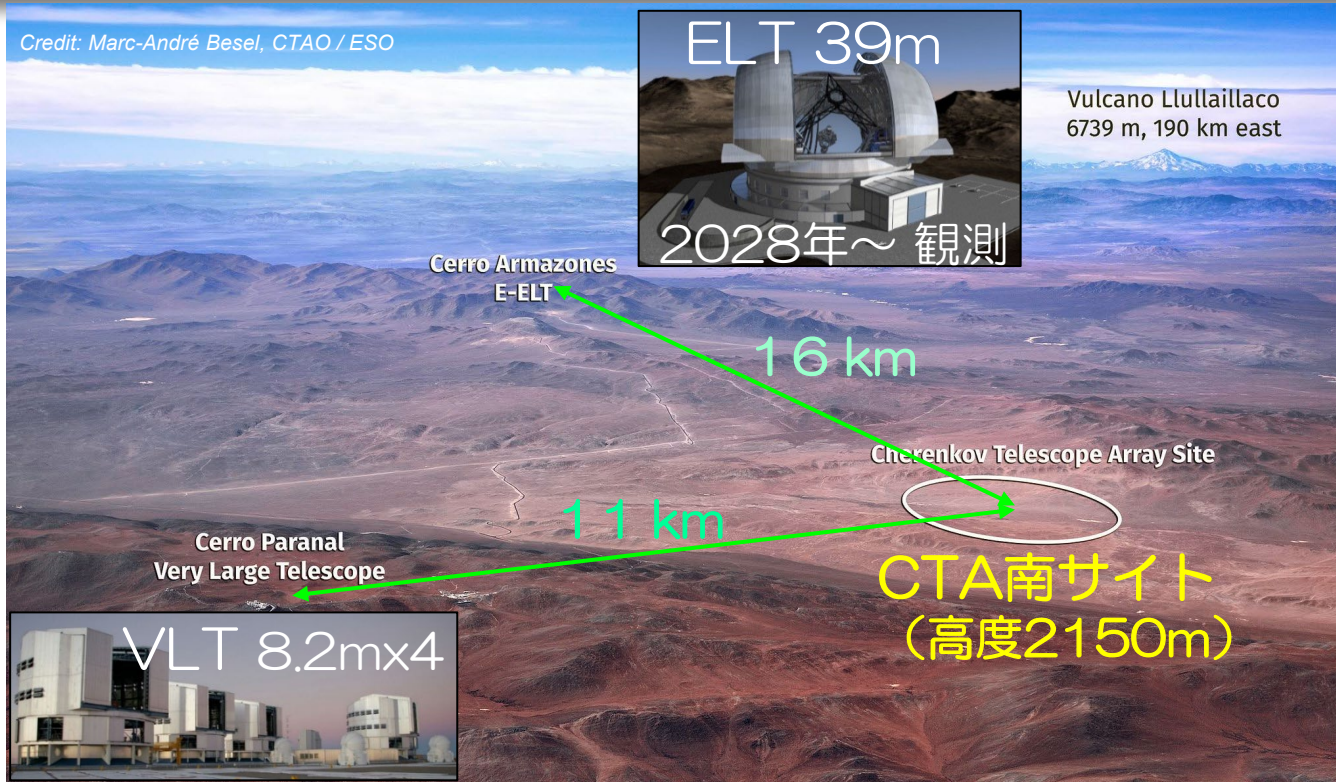
Credit: David A. Hardy

公開版ファイルでは  
図を削除

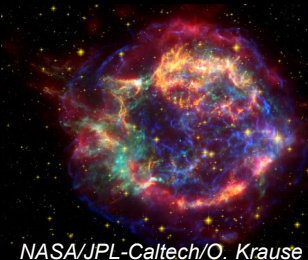
# CTA南サイト@チリ・パラナル



Credit: Marc-André Besel, CTAO / ESO



昨年、公道からCTAサイトへの道路建設



NASA/JPL-Caltech/O. Krause



ESO/L. Calçada



NASA/CXC/ASU/J.  
NASA/HST/ASU/J.  
Hester et al.;



NASA / Dana Berry,  
SkyWorks Digital



©東京大学宇宙線研究所/若林亮輔



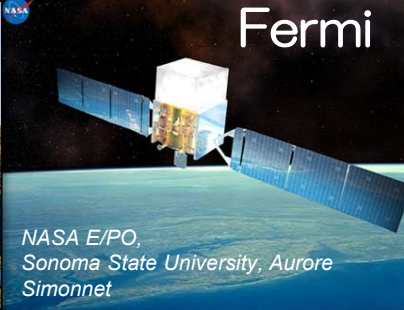
NASA, ESA,  
Hubble Heritage Team  
(STScI/AURA)

# 高エネルギー天体の性質解明

## ガンマ線観測

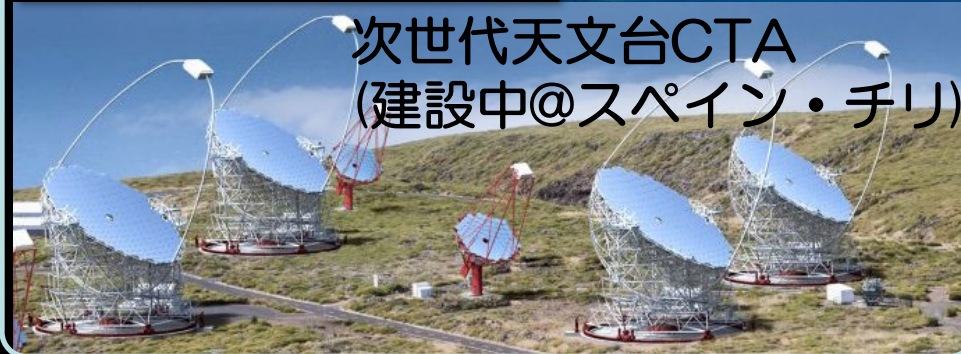


MAGIC



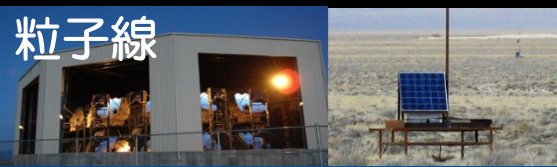
Fermi

NASA E/PO,  
Sonoma State University, Aureore  
Simonnet



次世代天文台CTA  
(建設中@スペイン・チリ)

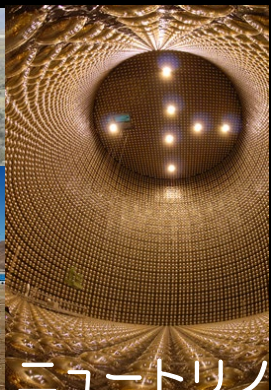
## マルチメッセンジャー天文学



粒子線



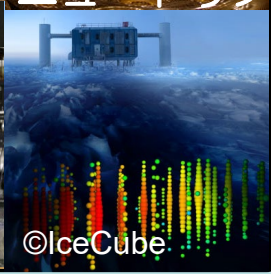
粒子線  $\gamma$



ニュートリノ



重力波



©IceCube

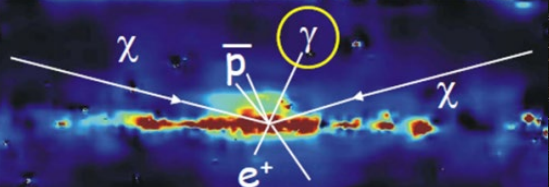
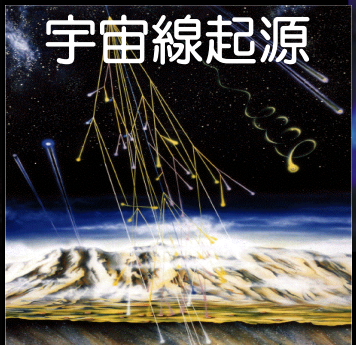
+

## ブラックホール 物理・ジェット 形成



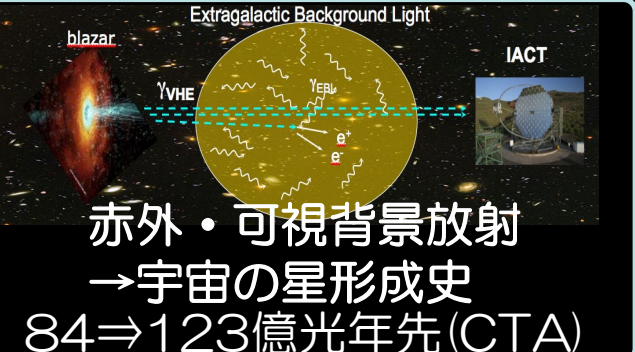
NAOJ//AND You Inc.

## 宇宙線起源



暗黒物質対消滅  $\gamma$  線探索

ローレンツ不変性検証



赤外・可視背景放射

→宇宙の星形成史

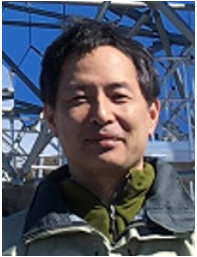
84⇒123億光年先(CTA)

# 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 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/>

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/>

