

チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ (CTA)

スペイン・カナリー諸島 ラパルマ島・
ロケ・デ・ロス・ムチャチョス天文台



- 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9名, 研究員4, 院生10(博士7, 修士3), 技術職員3, 秘書1
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

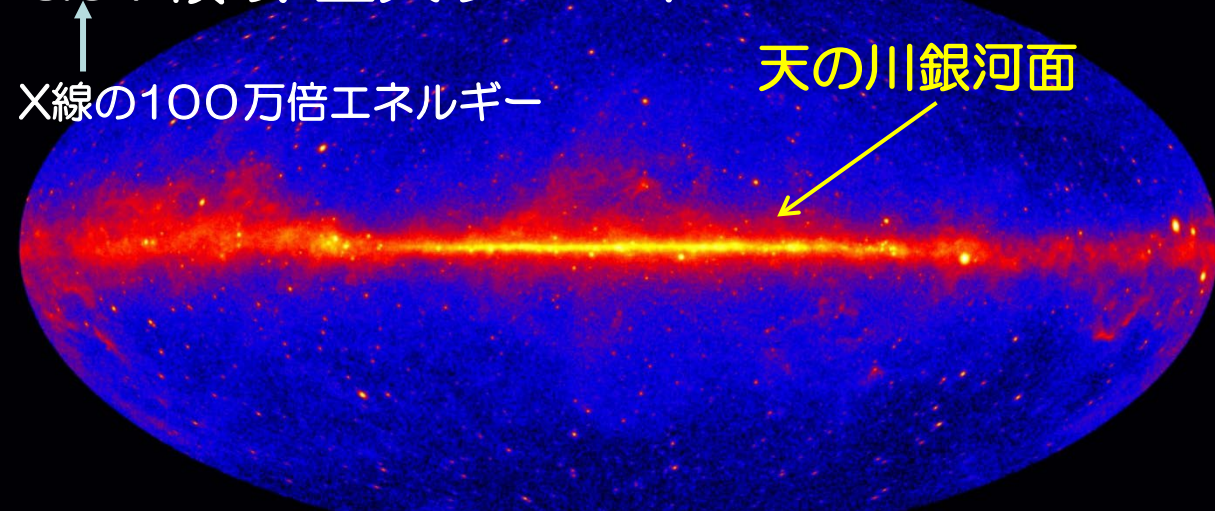
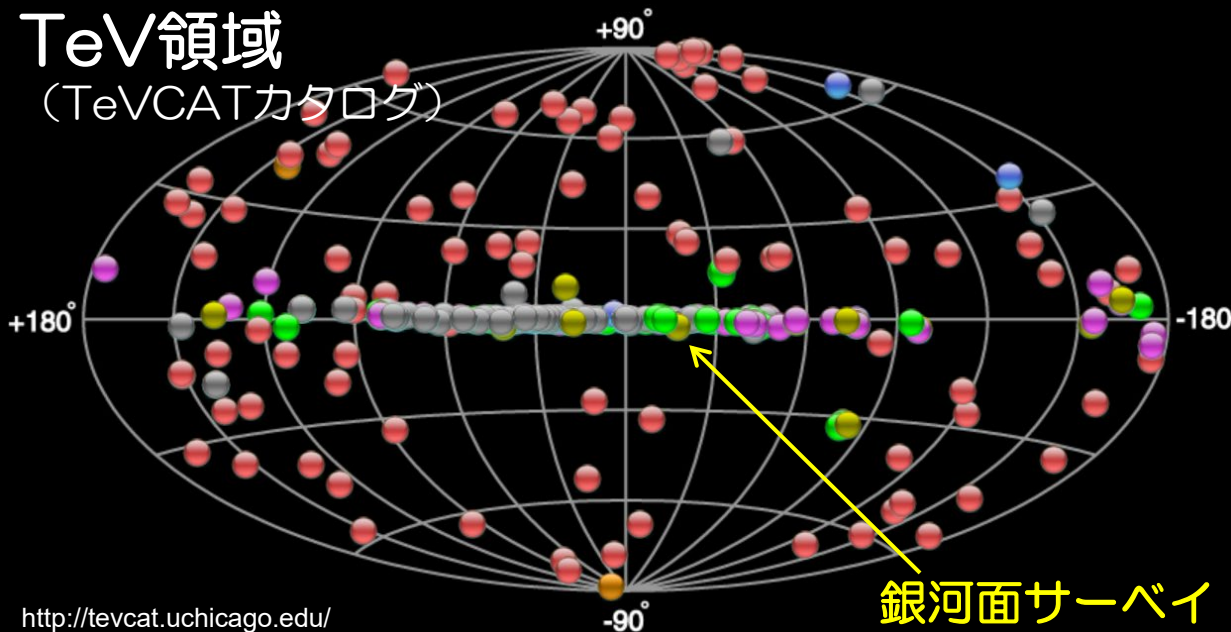


Image Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration



- 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：活動銀河核 など)

テーマ①高エネルギー天体の性質解明

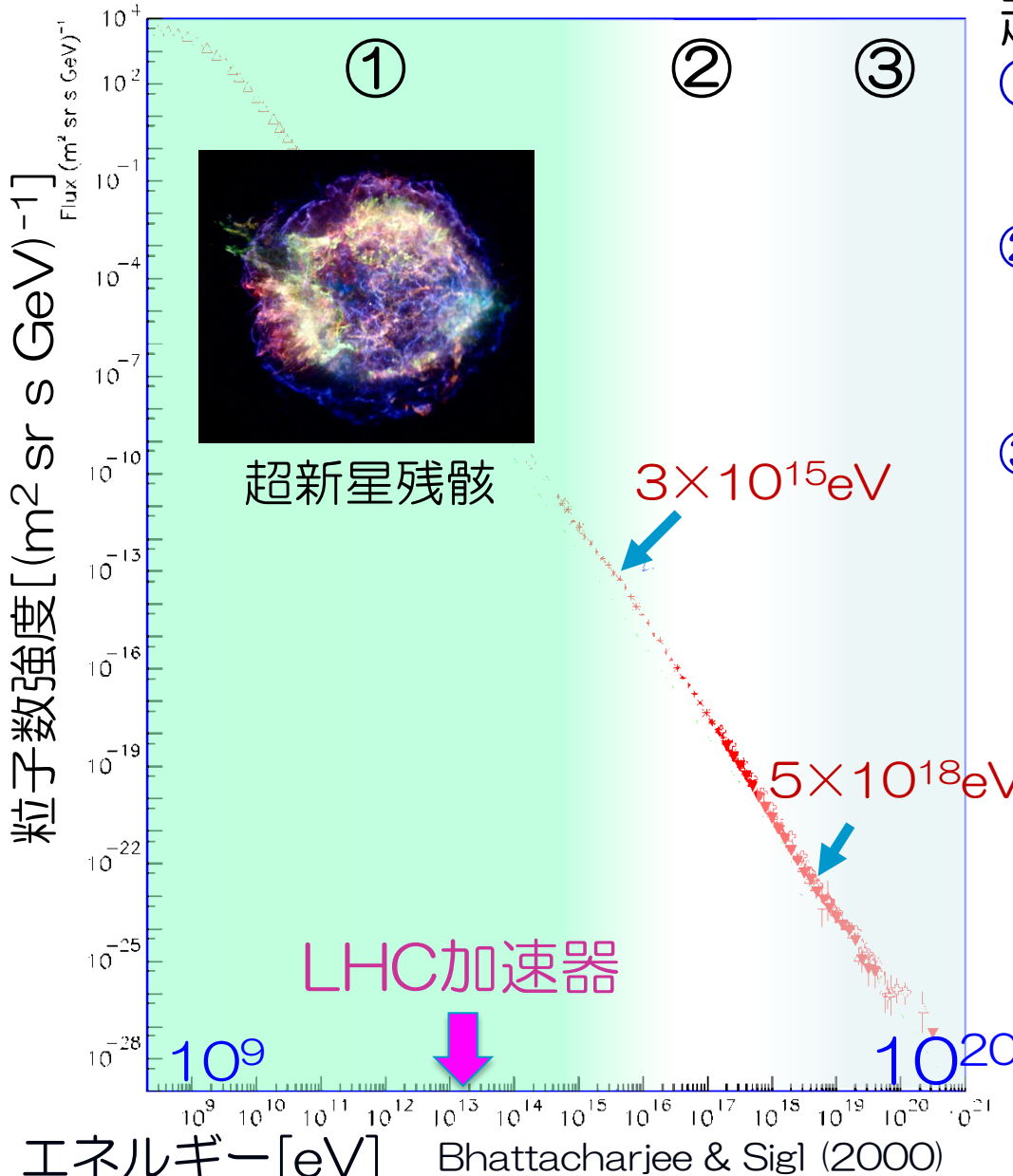
(主に)天の川銀河内

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

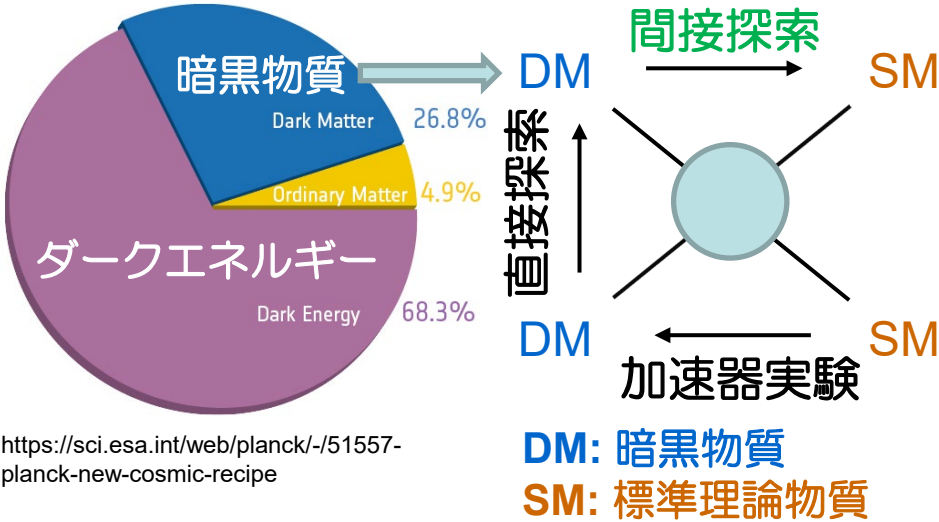
銀河系内閉じ込めできるエネルギーを越えている⇒天の川銀河外起源



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。

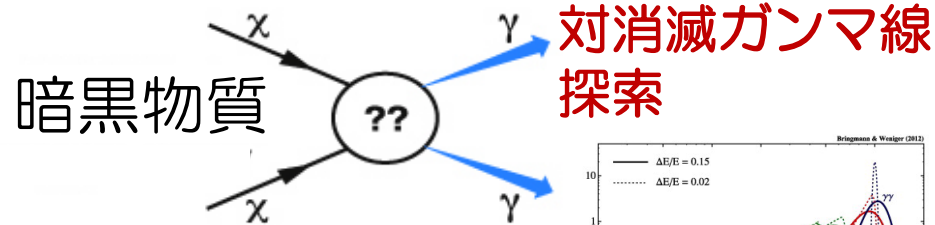
③標準理論を超えた物理探求

(A) 暗黒物質探索



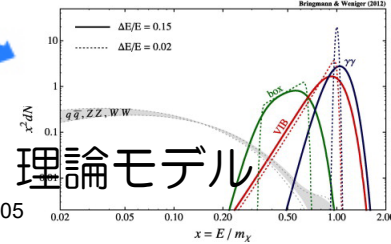
ガンマ線観測による間接探索法

超対称性理論で予言されるWIMP粒子の場合



E A Baltz+, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2008/07/013>

<https://doi.org/10.1016/j.dark.2012.10.005>



(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。

⇒

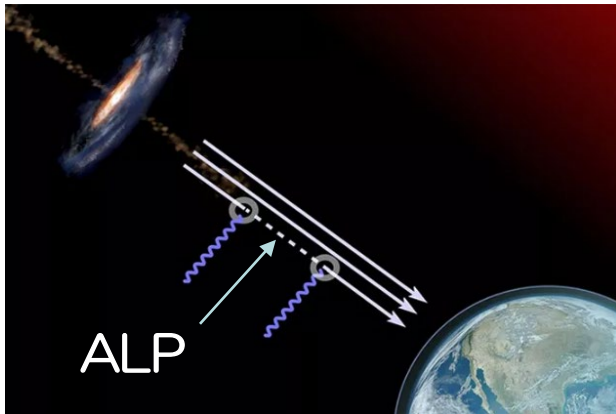
光の伝搬時間のずれが大きく

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

Axion like particle(ALP)の探索



光子が地球へ飛来する間に、

ALP ↔ 光子

変換が起こる

⇒

γ線スペクトル変化。

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

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

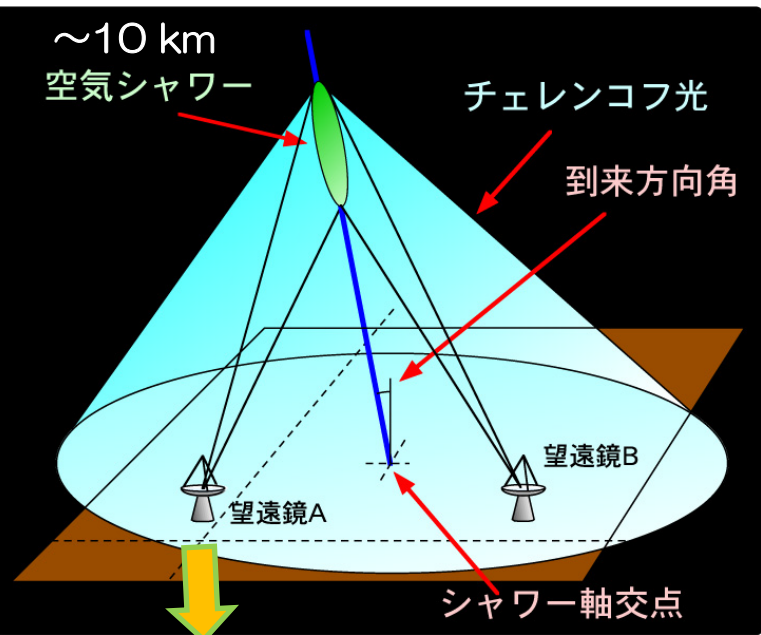
- GeVガンマ線：人工衛星（Fermi衛星稼働中）
- TeV以上ガンマ線：天体からの放射強度が弱く、衛星搭載装置の面積では検出できず⇒地球大気を検出器として利用する

ICRRグループが参加

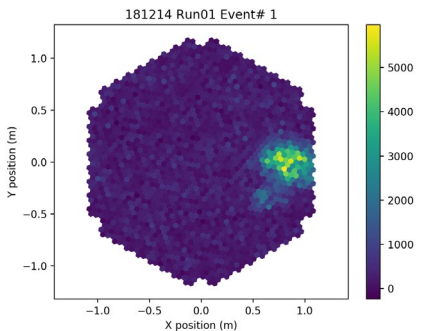
MAGIC @スペイン・カナリー諸島



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 γ 線観測
- 約40名の日本グループ(東大、京大、東海大、名大、山形大他)を含む13か国(主に欧州)約200名の国際チームで運用(院生も現地シフト)

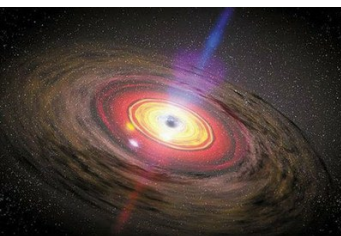
スペイン領
カナリー諸島
ラパルマ島



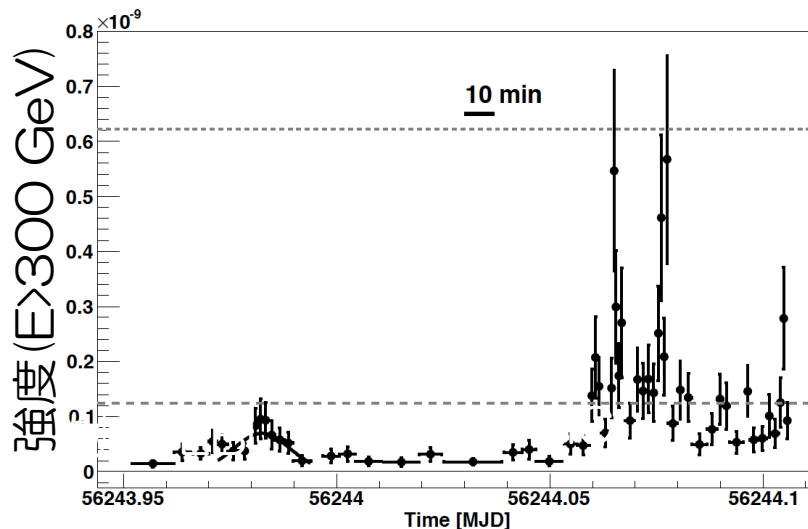
重要な発見①活動銀河核ブラックホール極冠からのガンマ線放射

- 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

MAGIC collaboration,
Science誌, 346 (2014) 1080



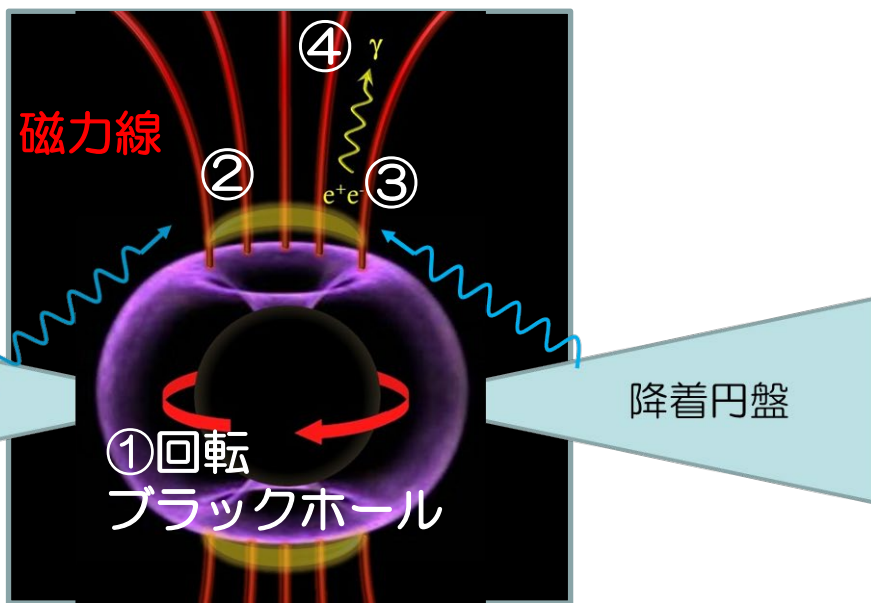
NASA / Dana Berry,
SkyWorks Digital



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

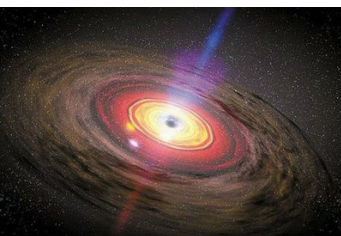
- ①ブラックホールの回転
- ②ブラックホール極冠で電位差が発生
- ③降着円盤からの光子から生成された電子・陽電子が加速
- ④ガンマ線放射



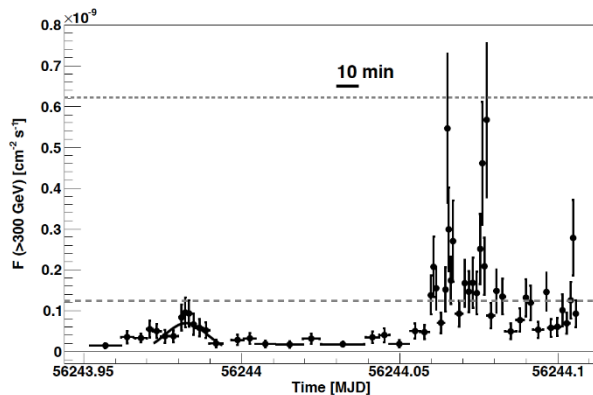
重要な発見①活動銀河核ブラックホール極冠からのガンマ線放射

MAGIC collaboration,
Science誌, 346 (2014) 1080

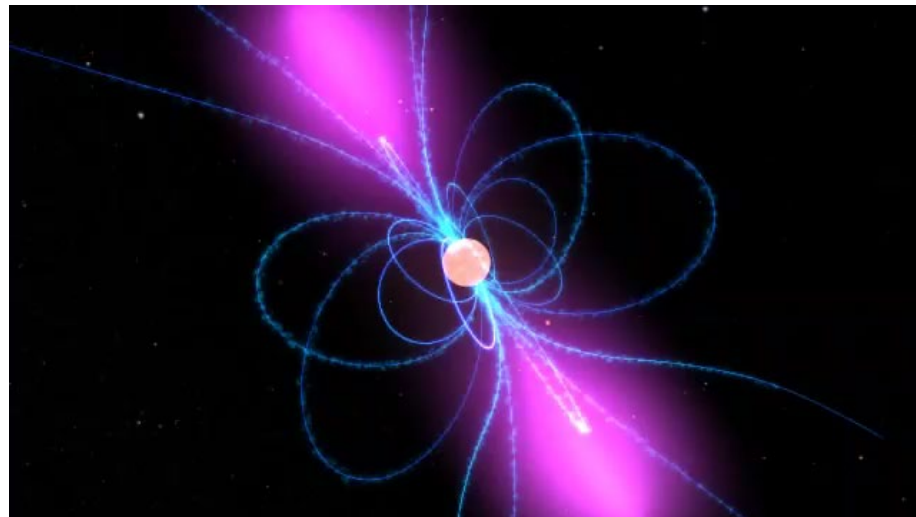
- 活動銀河核 IC310 (2.6億光年先)
- $E > 300$ GeVで、強度変動 < 5分を検出



NASA / Dana Berry,
SkyWorks Digital

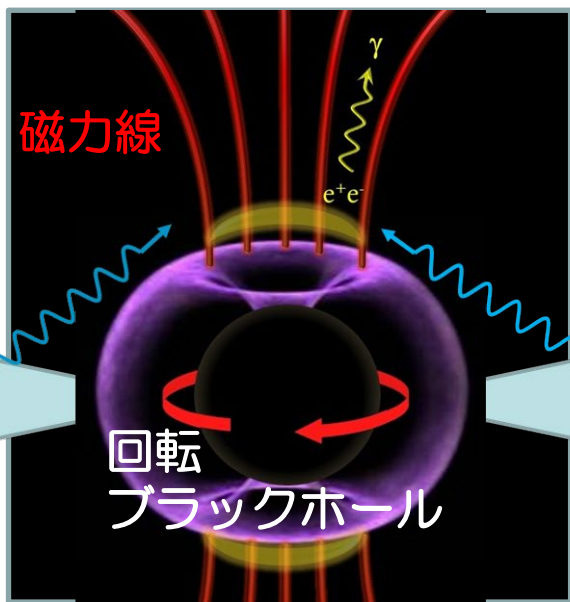


中性子星パルサー



動画

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

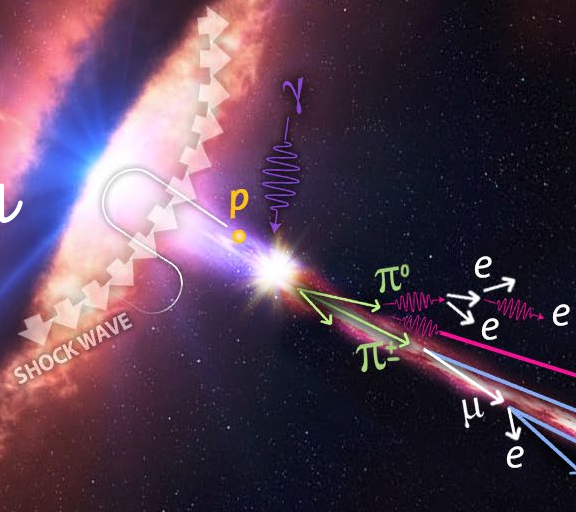
重要な発見②宇宙ニュートリノとガンマ線観測による ニュートリノ源天体同定に史上初成功

IceCube, Fermi, MAGIC+, 2018, Science誌361, eaat1378

2017年9月22日

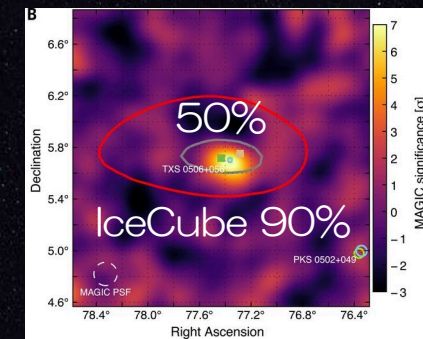
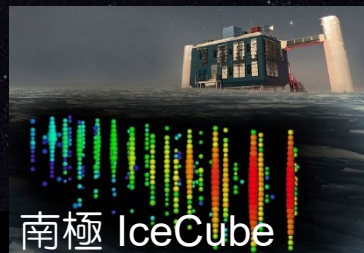
この発見以前、我々の銀河系外の天体で、ニュートリノが検出されたのは、SN1987Aだけであった。

約38億光年先
巨大ブラックホール
を持つ活動銀河核



ニュートリノ

約0.3 PeV ($=3 \times 10^{14}$ eV)



ガンマ線検出有意度



ガンマ線



©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

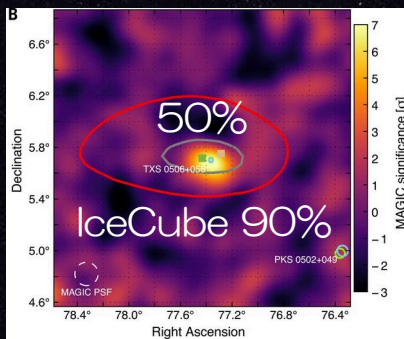
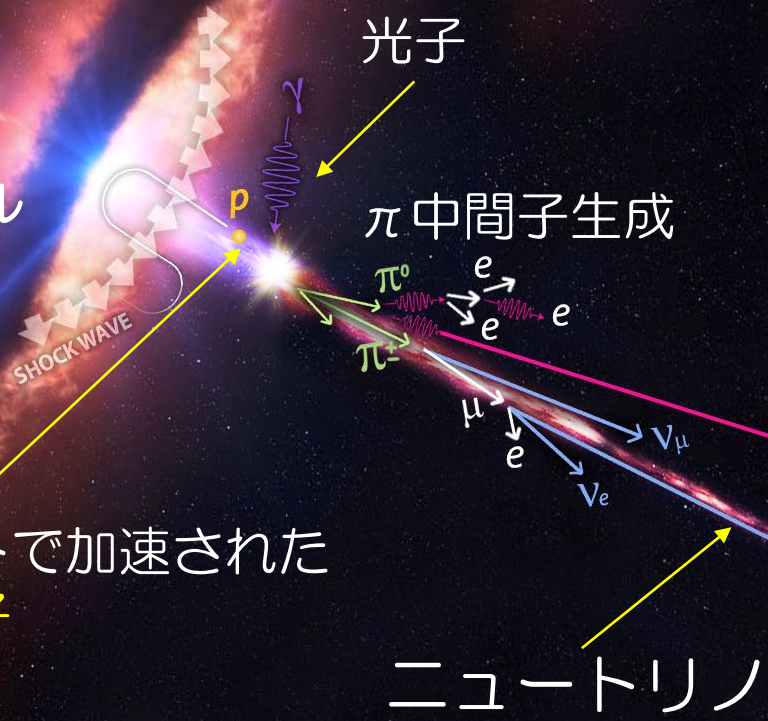
IceCube, Fermi, MAGIC+, 2018, Science誌361, eaat1378

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。

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



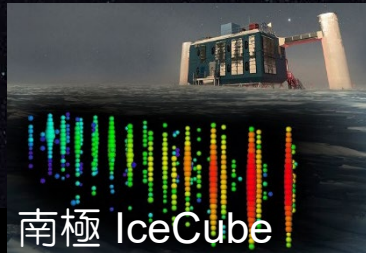
ガンマ線検出有意度



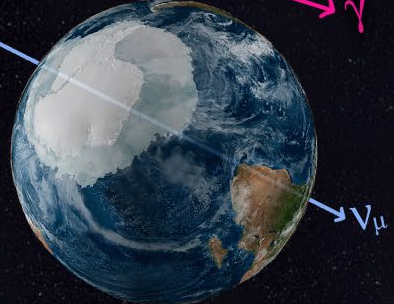
ガンマ線

ニュートリノ

約0.3 PeV (=3×10¹⁴ eV)



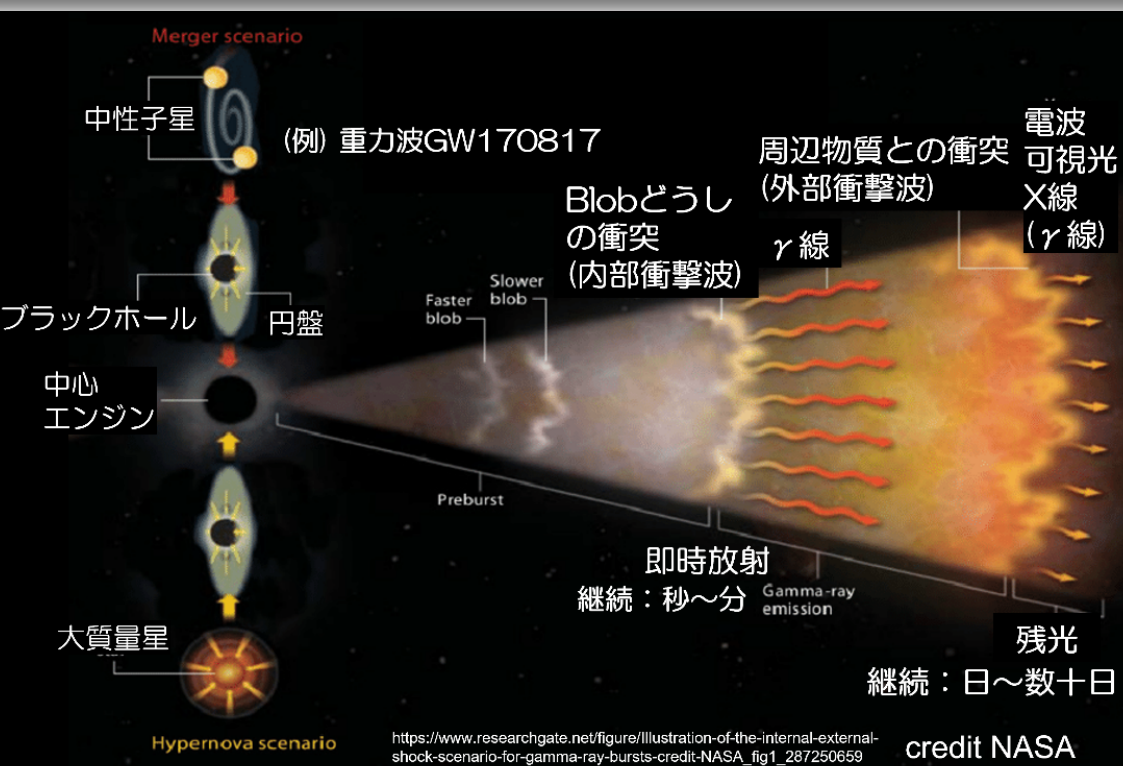
南極 IceCube



©IceCube Collaboration

- ◆ 活動銀河核は超高エネルギー宇宙線の起源(の一つ)
- ◆ 観測一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

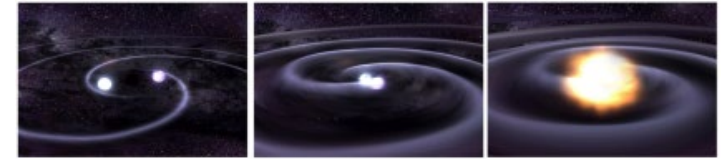
重要な発見③ガンマ線バーストからのTeVガンマ線検出に 史上初成功



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

起源候補:

①中性子連星合体⇒重力波源

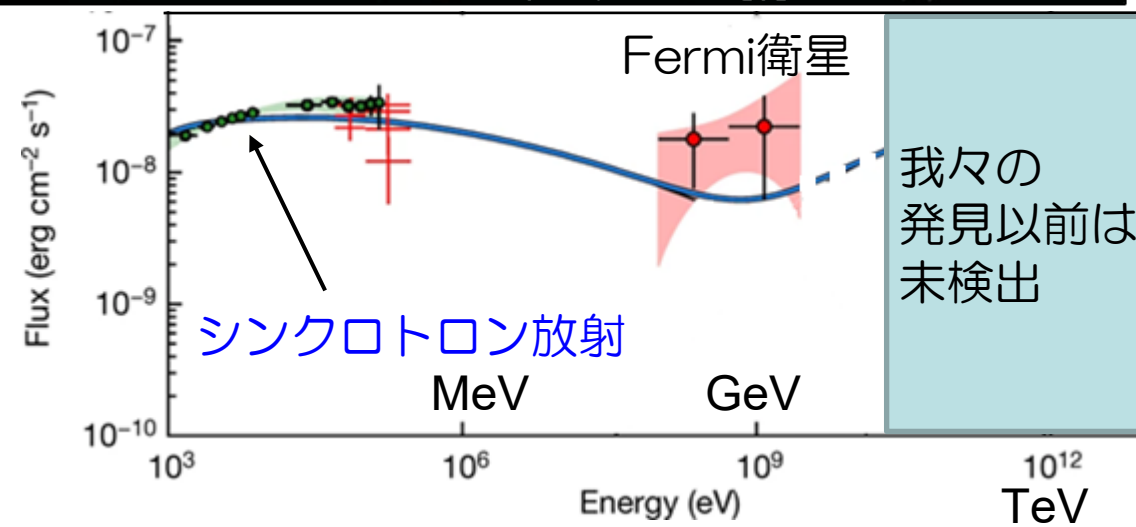


<http://www.ligo.org/science/Publication-S6CBCLowMass/>

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。

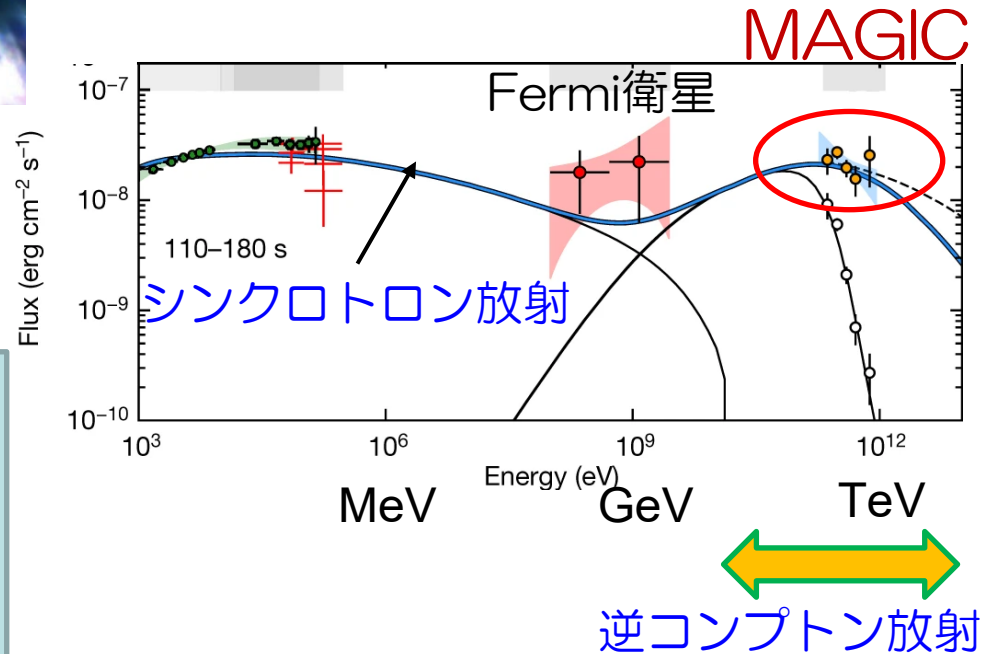
かに星雲
ガンマ線バースト (ガンマ線標準光源)

ガンマ線事象数(積算)

公開版ファイルでは図を削除

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！

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



MAGICで観測したTeV領域ガンマ線は、
⇒GRB普遍的に存在。

現在4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
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1750-x>
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1754-6>

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

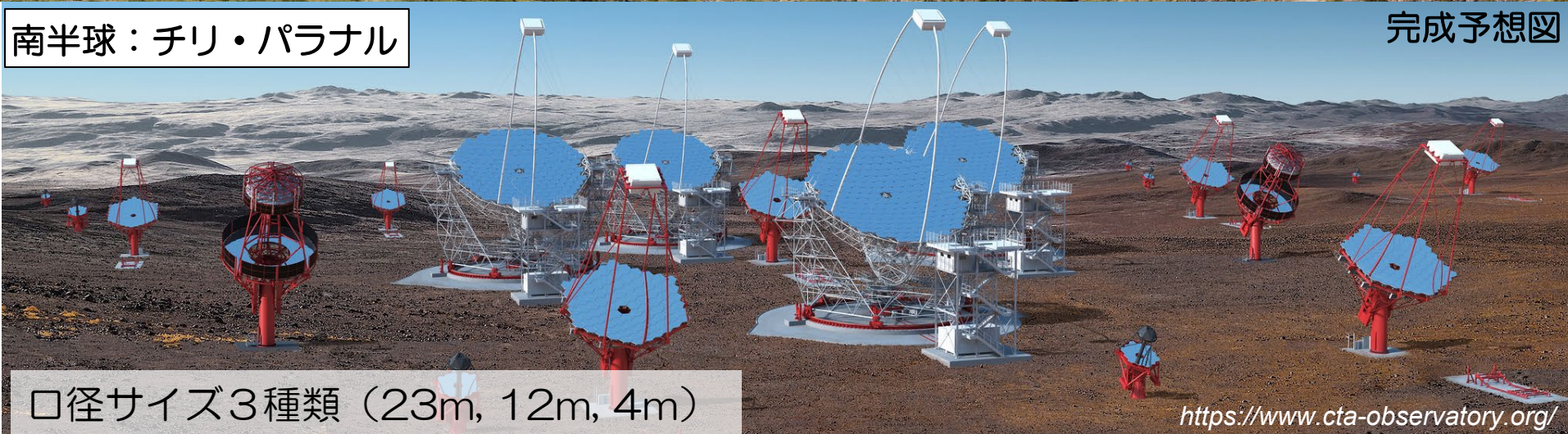
北半球：スペイン・カナリー諸島ラ パルマ島

完成予想図



南半球：チリ・パラナル

完成予想図



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1400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 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

CTA大口径望遠鏡(LST)初号機@スペイン・カナリー諸島



MAGIC 口径 17 m

CTA-LST初号機(LST1)

2018年10月完成

Credit: S.Nozaki

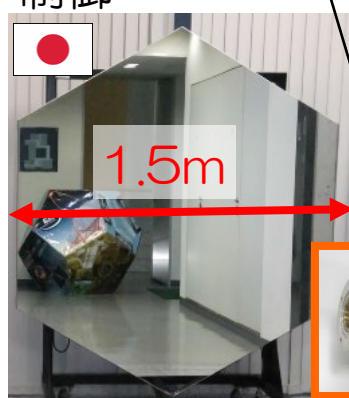
口径 23 m 大口径望遠鏡

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)
- 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

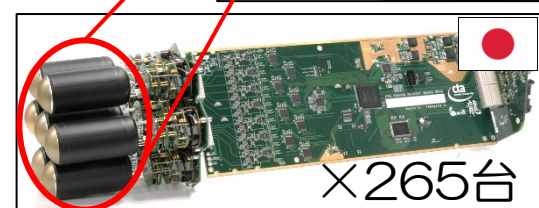
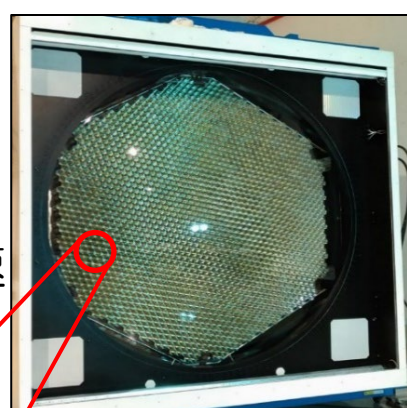
➤ 鏡

- 分割鏡 ~200枚
- アクチュエーター制御



➤ 主焦点カメラ

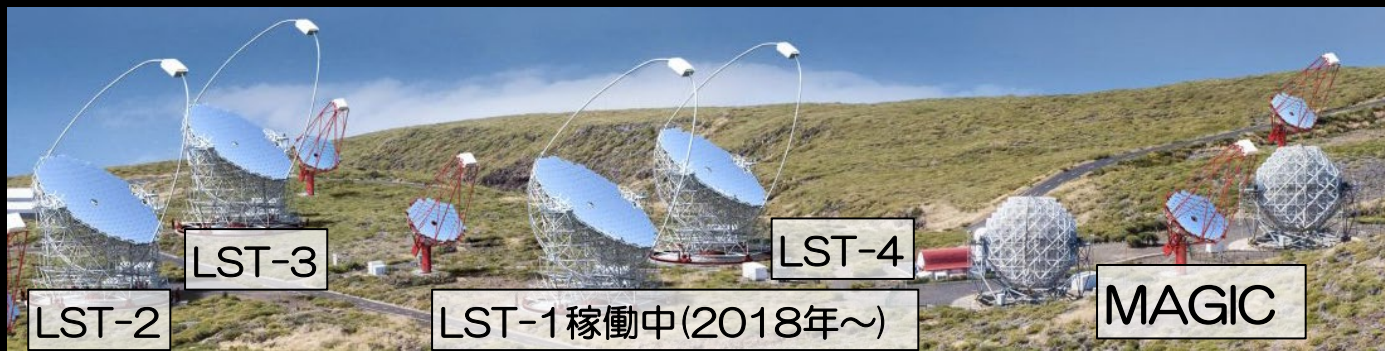
- 視野 4.5度
- 光電子増倍管 ~2千本
- GHz波形高速記録回路



CTA望遠鏡の建設@スペイン・カナリー諸島



動画：http://www.cta-observatory.jp/pic/TOTAL_LST.mp4

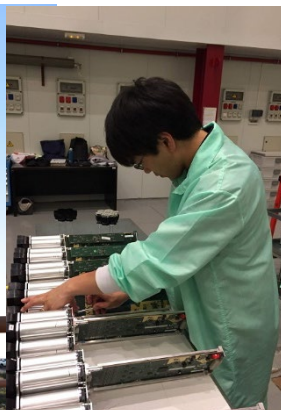
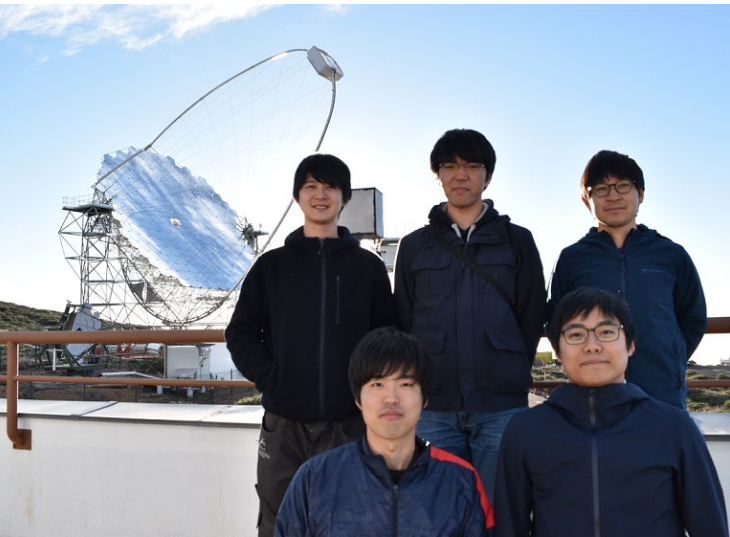


LST2-4号機
今年から現地建設
⇒
2024年度に完成
(修士2年時)

CTA大口径望遠鏡(LST)－院生の活躍

大学院生が第一線で活躍

観測データ解析においても
国際グループを牽引



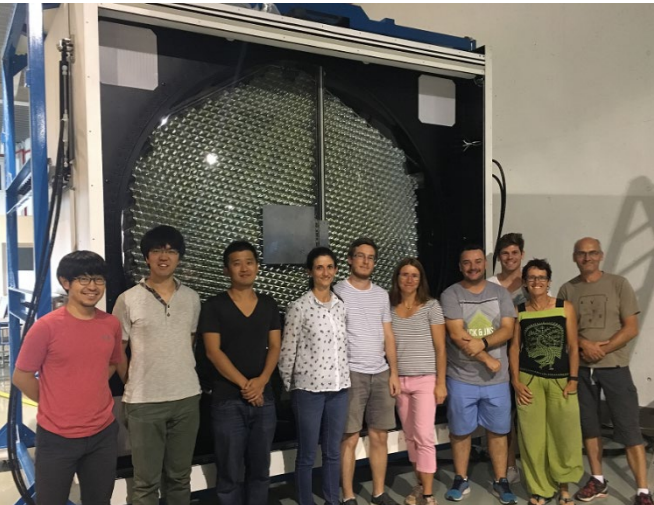
カメラ組立中
@スペイン

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

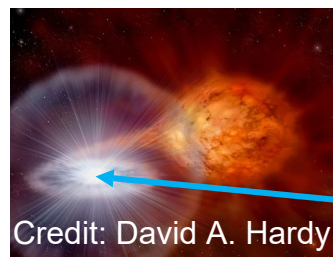
カメラの望遠鏡取付直後



望遠鏡横の
運用室

日本院生

新種のガンマ線天体

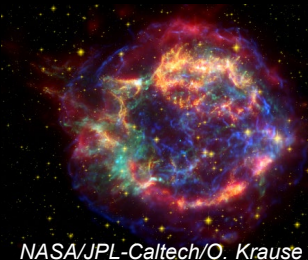


再帰新星

白色矮星

Credit: David A. Hardy

公開版ファイルでは
図を削除



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



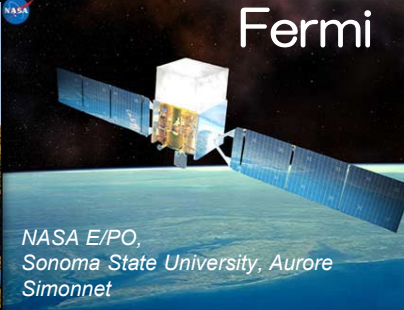
NASA, ESA,
Hubble Heritage Team
(STScI/AURA)

高エネルギー天体の性質解明

ガンマ線観測



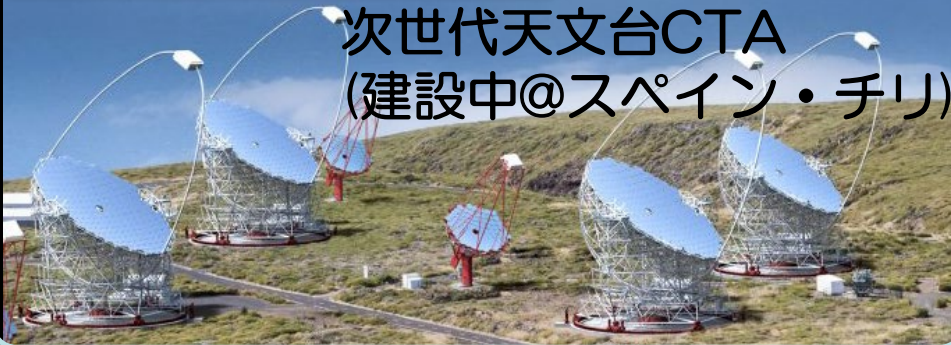
MAGIC



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)



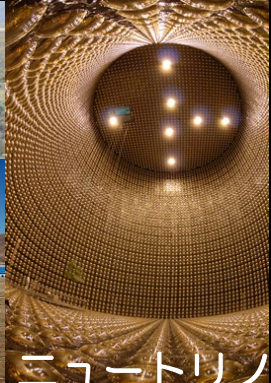
マルチメッセンジャー天文学



粒子線



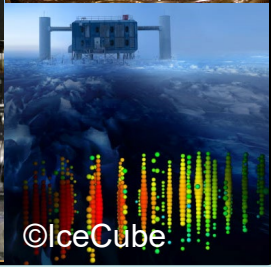
粒子線 γ



ニュートリノ



重力波

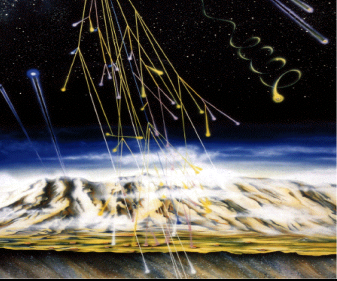


©IceCube

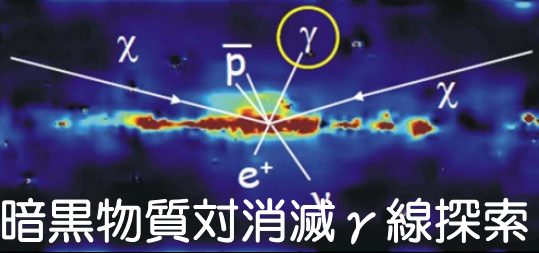
+

宇宙線起源

ブラックホール
物理・ジェット
形成



NAOJ//AND You Inc.



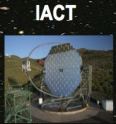
暗黒物質対消滅 γ 線探索

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)



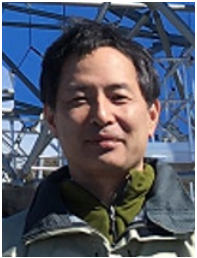
IACT

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

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



准教授 吉越 貴紀

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/>

