

# 高エネルギーガンマ線グループ 研究紹介

准教授 窪秀利  
特定助教 藤井俊博(白眉センター)  
博士課程 野崎誠也  
修士課程 岡知彦 梶原侑貴 今川要

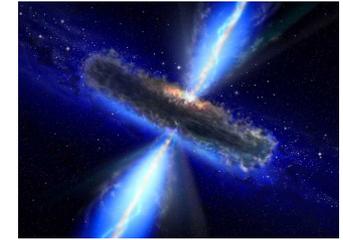
# 高エネルギーガンマ線の観測対象

## 1. 宇宙線起源の研究

超新星残骸  
-恒星の一生の最期-



巨大ブラックホール  
-宇宙巨大加速器-

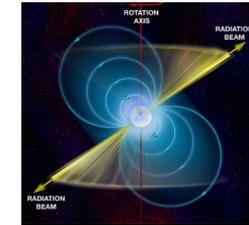


## 2. 高エネルギー天体の性質の解明

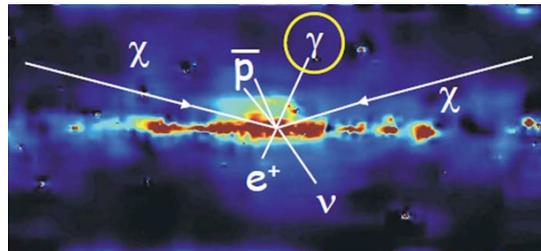
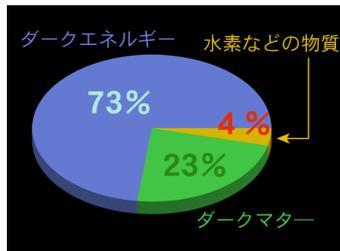
ガンマ線バースト  
-宇宙最大の爆発-



パルサー  
-宇宙の灯台-



## 3. 暗黒物質の探索



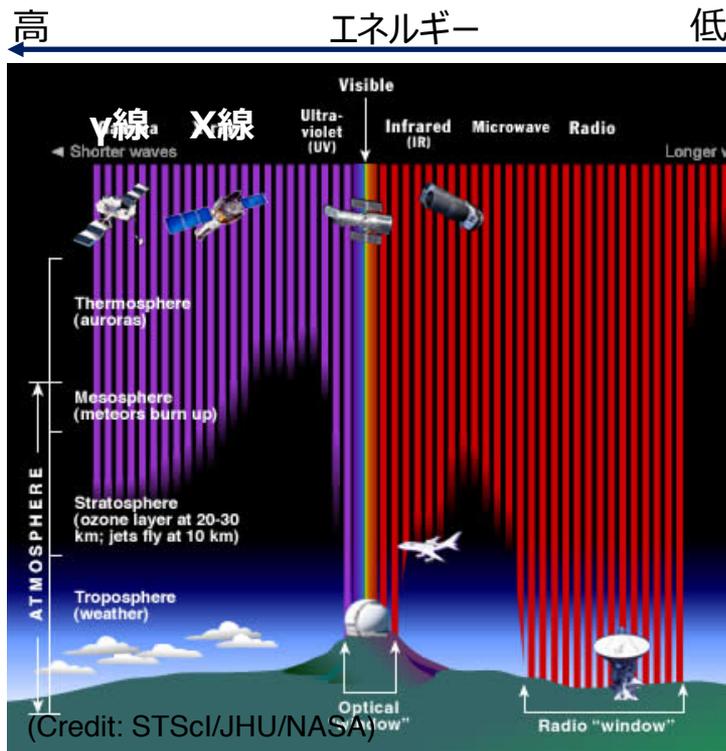
ダークマター  
-暗黒物質の探索-

様々な天体・現象から放射される

宇宙物理学の謎にアプローチ出来る！

# 高エネルギーガンマ線観測

- X線やガンマ線は大気に吸収されて、地上まで届かない
- 高エネルギーガンマ線は衛星で飛ばせるほど小さい検出器じゃ捉えられない



ガンマ線衛星「Fermi」



1 GeVくらいまでは  
衛星観測で  
なんとかなるが...

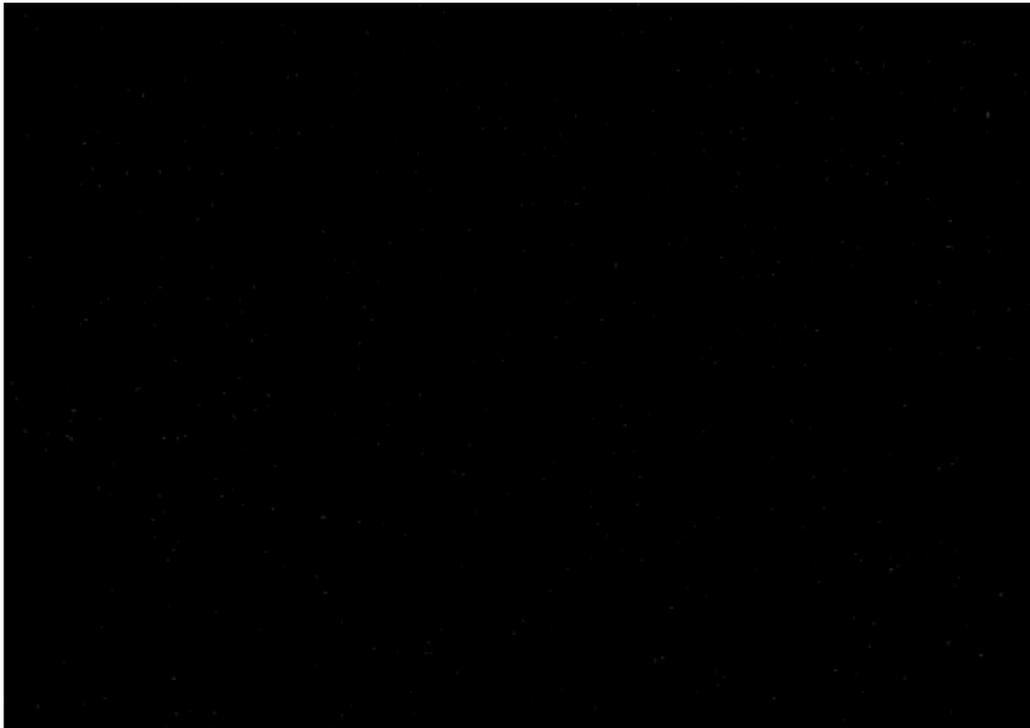
1 TeVのガンマ線  
となると厳しい

もっと有効面積が  
必要

**地球大気でガンマ線を止める！  
解像型大気チェレンコフ望遠鏡**

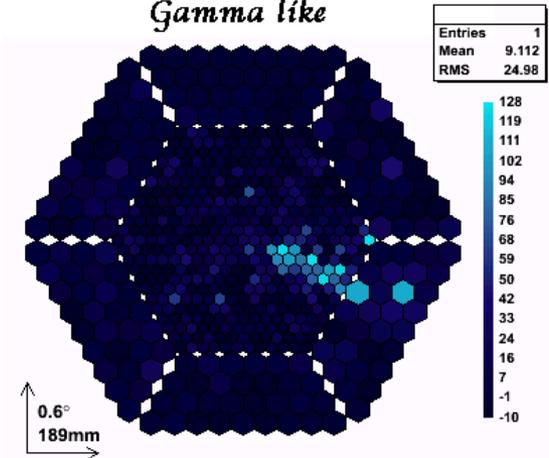
# 解像型大気チェレンコフ望遠鏡

地球大気との反応を経て放出される二次的な光（チェレンコフ光）を検出し、ガンマ線の**エネルギー**と**到来方向**を決定



シャワーイメージ

*Gamma like*

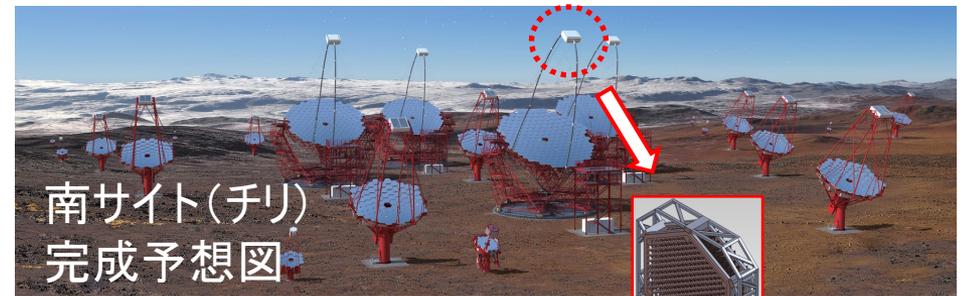


これらからガンマ線イベントを機械学習を用いて選び出す

観測が進み、ガンマ線天文学を開拓（我々も活躍中）  
しかし、まだまだ感度が足りない... さらなる感度を求めて

# Cherenkov Telescope Array 計画

- 世界32か国1000人以上が参加する**超巨大プロジェクト**
- 大中小の望遠鏡を計約**100基**設置（従来4基）  
→ 有効面積を拡大し、**感度10倍**を達成！



南サイト(チリ)  
完成予想図

焦点面カメラ

265 モジュール

光検出器モジュール

京大チームは望遠鏡の心臓とも言える  
光検出器モジュールの開発を担当  
→ 世界の第一線で活躍中

本当にできるの？

→ 昨年2018年10月  
その初号機が完成！



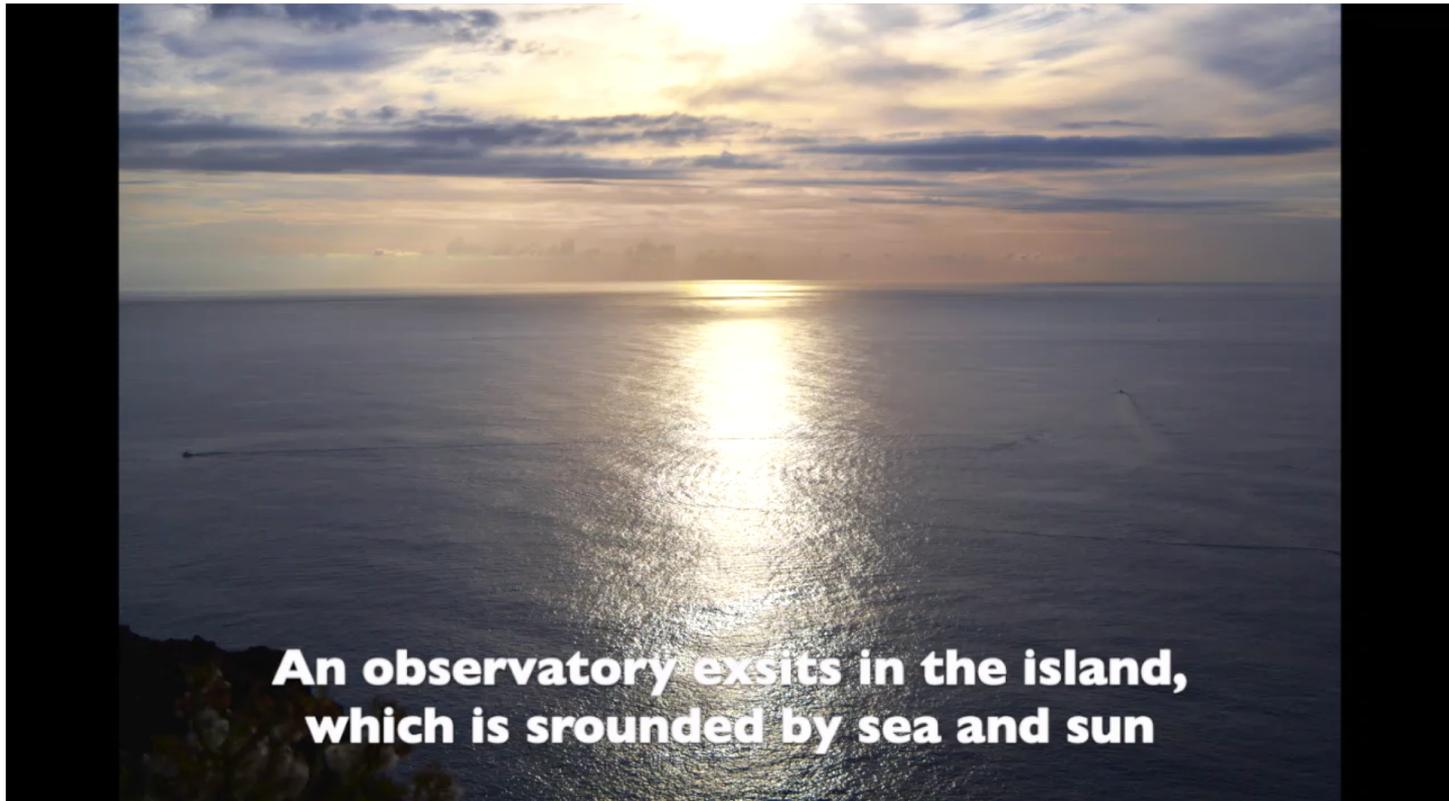
PMT×7

信号読み出し回路

# 望遠鏡建設サイト（動画 1'45''）

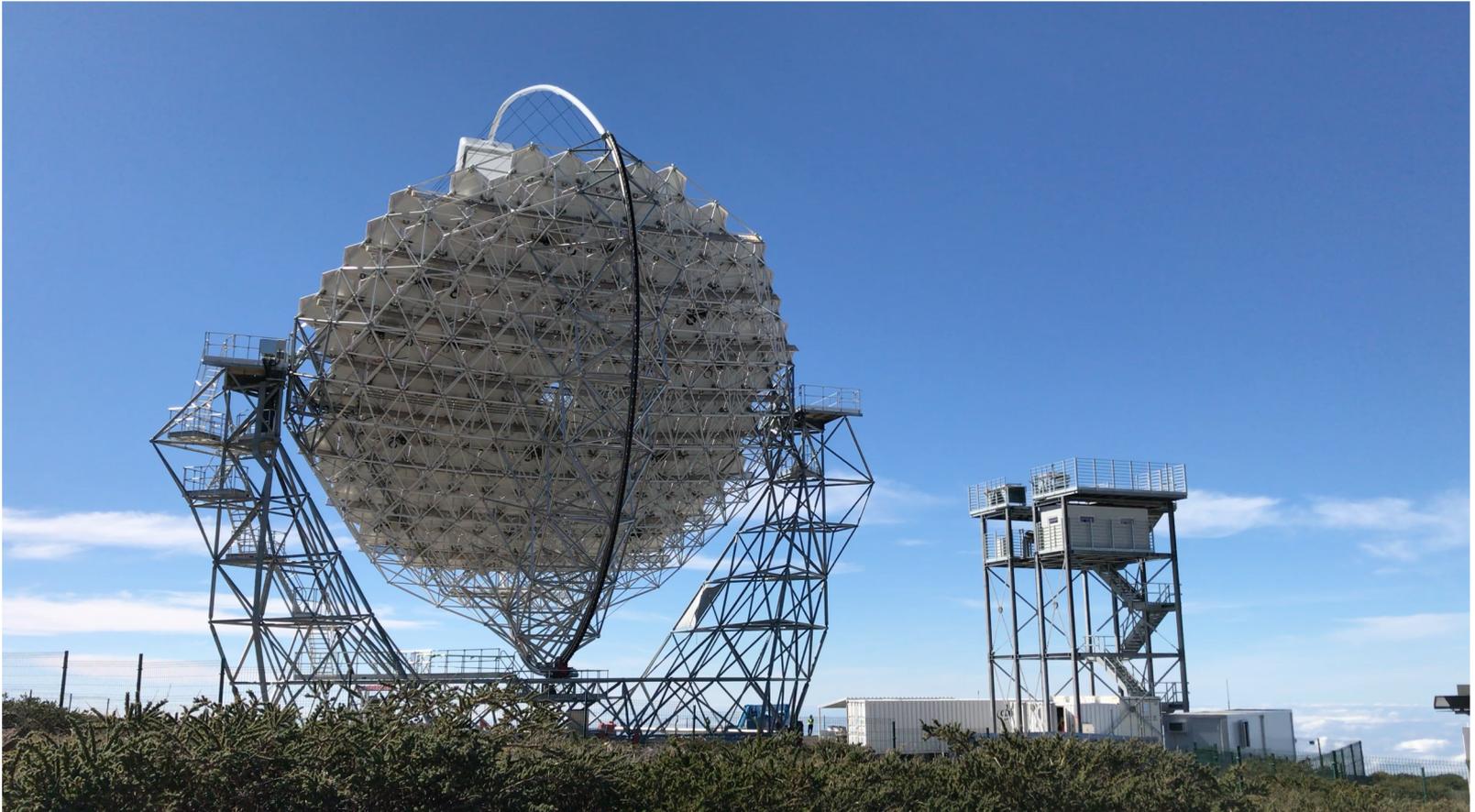


物理ノーベル賞受賞  
の梶田氏、  
スペイン王妃、  
我らの窪准教授  
も参加された



# CTA 大口径望遠鏡 動作風景 (動画 42")

CTA 大口径望遠鏡 初号基 (La Palma, Spain)

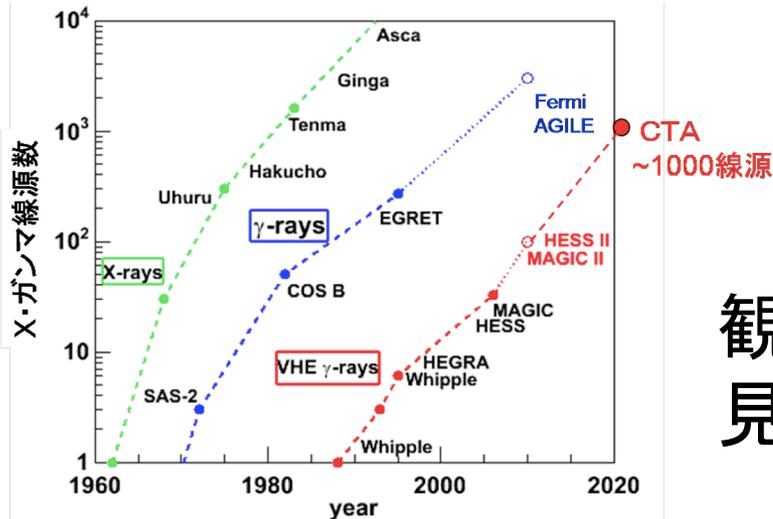


CTAでは最速20秒で180度回転可能→突発天体を捉える

# CTA計画 展望

高エネルギーガンマ線天文学では、**大気チェレンコフ望遠鏡**という観測技術を用いて、①**宇宙線起源の研究**、②**高エネルギー天体の性質の解明**、③**暗黒物質の間接探索**などを行っている

観測天体数



-CTA計画 スケジュール-

2022年 北サイト大口径望遠鏡アレイ完成  
2025年 CTA南北 計118基 フルアレイ完成

観測天体数が10倍に  
見えなかった宇宙が見えてくる！

完成した暁には...

**高エネルギー天文学 新時代の幕開け！！**

# 最高エネルギー宇宙線観測実験

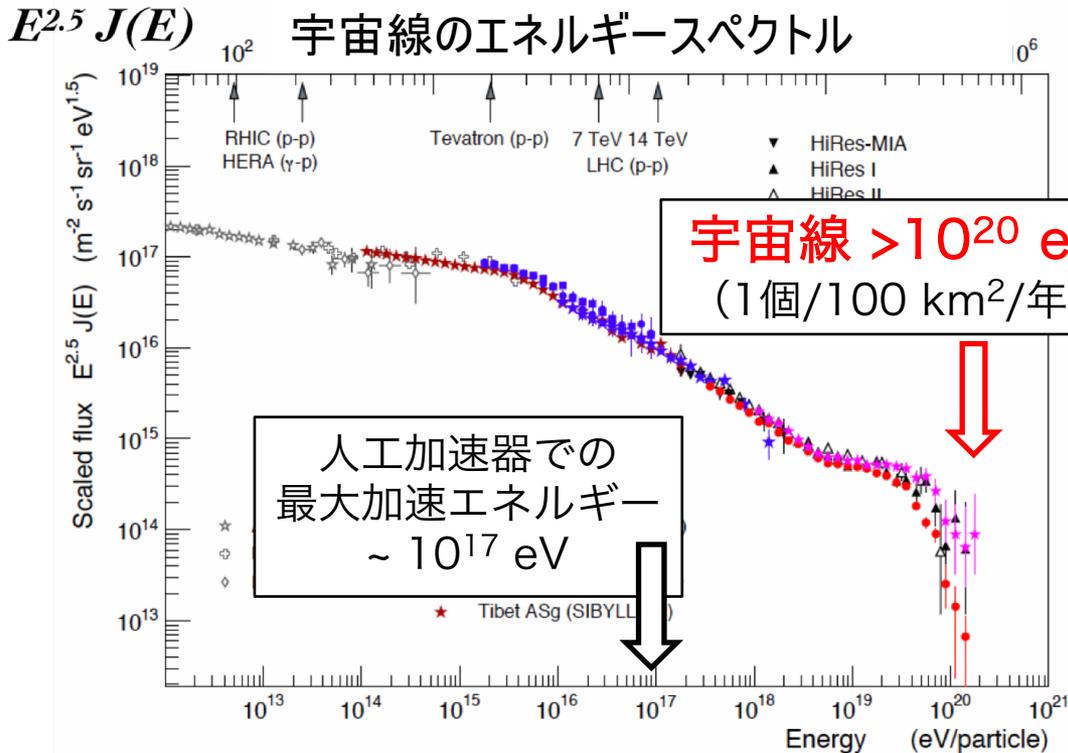
昨年2018年12月 京大宇宙線研究室に  
新たに藤井俊博 特定助教が着任  
新たな実験が始まりました！



# 宇宙線の最高エネルギー問題

宇宙線のエネルギー密度  $1 \text{ eV/cc}$  → 宇宙の構成要素

しかし、どこで・どうやって・どれだけ 作るのかは未だ謎に包まれたまま...



地表検出器アレイ

大気蛍光望遠鏡



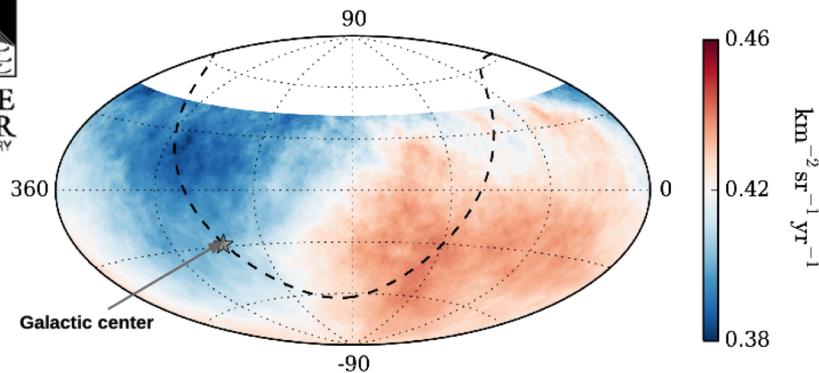
最高エネルギー宇宙線を使って

- 加速器未到達のエネルギー領域で、標準モデルは成り立つか？
- 宇宙磁場で曲がりにくく、宇宙線起源との相関が期待  
「極高エネルギー宇宙線による次世代天文学」

# 未だ黎明期 最高宇宙線観測



$>8 \times 10^{18}$  eV ダイポール型異方性

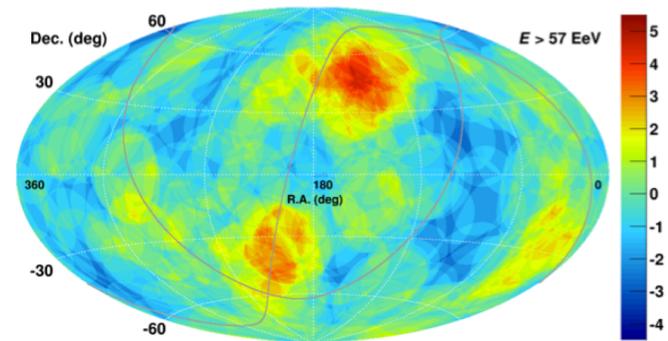


Pierre Auger Collab. Science 357, 1266 (2017)

銀河系外起源を支持



$>5.7 \times 10^{19}$  eV ホットスポット？



K. Kawata et al., Proc. of ICRC 2015

統計量不足により起源を特定できていない

有効面積拡大を目指した次世代プロジェクト

Fluorescence detector **Array of Single-pixel Telescopes (FAST)**

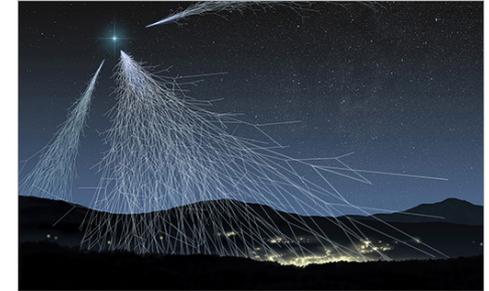


新型望遠鏡を開発中

- 藤井特定助教がプロジェクトリーダーとして計画を推進
- 極高エネルギー宇宙線天文学開拓に向け、検出器開発と回路開発に挑む

# 高エネルギーガンマ線グループ まとめ

- ・ 大気シャワーを再構成する技術を用い
  - 高エネルギーガンマ線
  - 最高エネルギー宇宙線の観測を行なっている
- ・ 次世代プロジェクトを主導し  
新たな宇宙物理を開拓する



海外出張のチャンスも多いので  
世界遺産ハンターにもなれます

グループ行事風景



モン・サン・ミッシェル



赤の広場ロシア



バチカン市国



スペインの王宮



質問いつでもお待ちしております

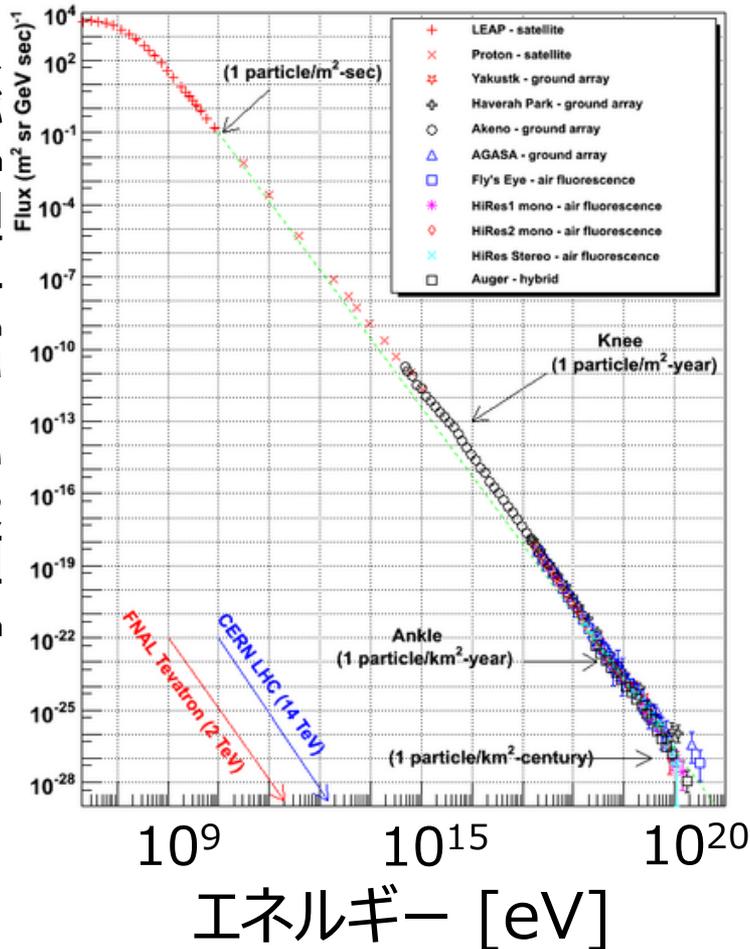
Back Up

# 1. 宇宙線の起源（宇宙の巨大加速器）の探索

宇宙では $10^{20}$  eVに及ぶ高エネルギー粒子(=宇宙線)が飛び交う

## 宇宙線スペクトル

宇宙からの到来粒子数

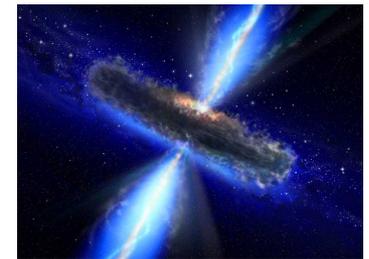


宇宙線がどこで生まれるのか  
どのように加速されているのかは未解明

超新星残骸



活動銀河核  
(巨大ブラックホール)



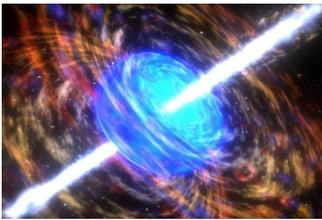
宇宙線から放射された高エネルギー  
ガンマ線は曲げられずに地球に到来する

ガンマ線の到来方向、スペクトルから  
宇宙線起源、加速機構の謎に迫る

## 2. 高エネルギー天体の性質の解明

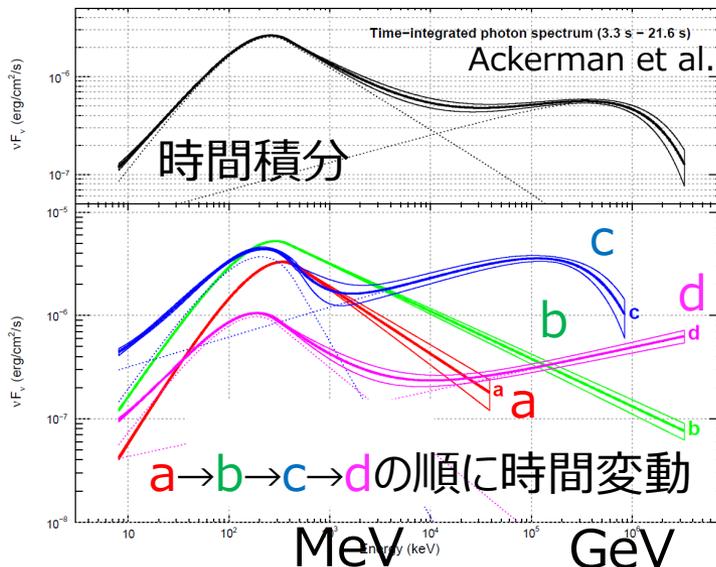
### ガンマ線バースト (GRB)

宇宙最大の爆発現象  
中心からは高速のジェットを放出



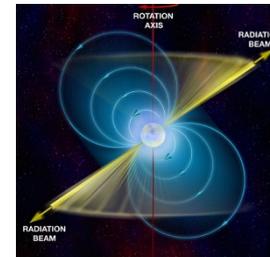
- ・中心駆動天体
- ・放射機構
- ・ジェットの形成機構  
などが未解明

あるGRBのエネルギースペクトル



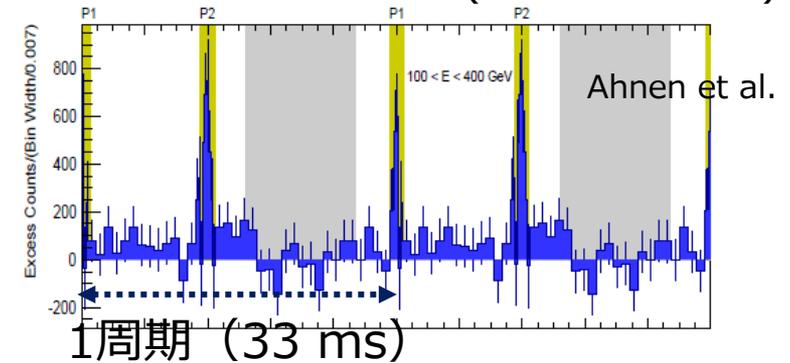
### パルサー

高速回転する中性子星  
周期的な電磁放射



- ・放射領域
- ・放射機構  
などが未解明

あるパルサーの光度曲線(100-400 GeV)

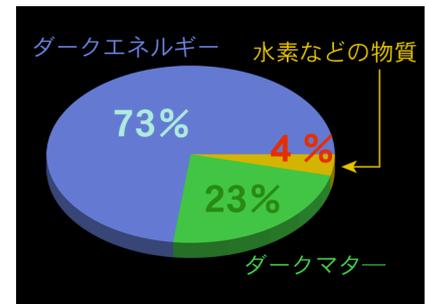


激しい高エネルギー天体現象の  
謎に迫る

### 3. 暗黒物質の間接探索

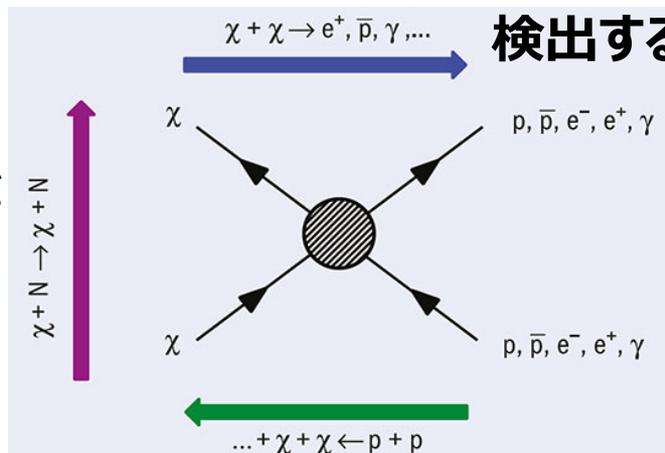
- 宇宙のエネルギー組成のうち23%はダークマター

ダークマターの正体は謎であり、未知の素粒子の候補として挙げられ、様々な手法で探索されている

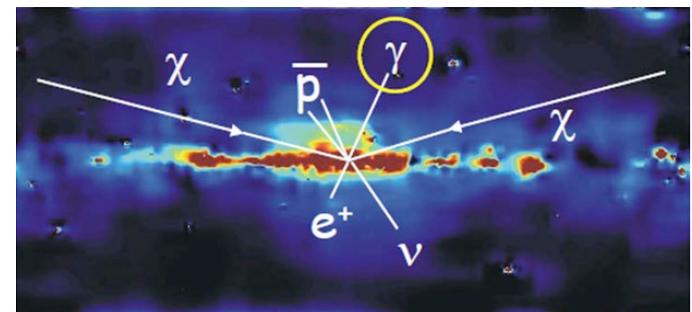


対消滅して生じたガンマ線などを  
検出する間接探索

散乱事象を  
検出する  
直接探索



加速器を用いた  
ダークマター対生成



100 GeV-数10 TeVのガンマ線の  
線スペクトルが存在するかが  
大きなカギとなる

宇宙という“巨大実験場”を用いた基礎物理探求ができる

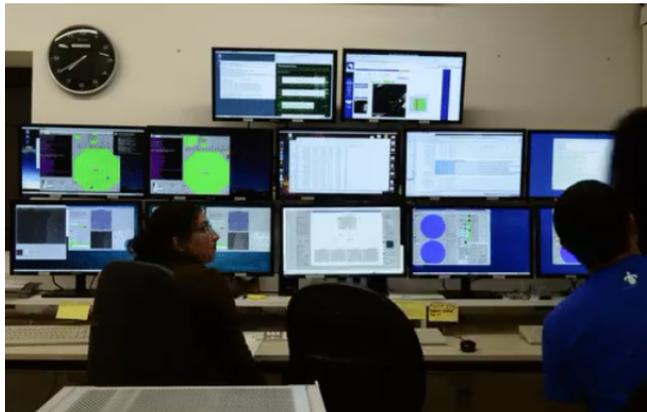
# MAGIC望遠鏡



- ラパルマ島（スペイン）に口径17m望遠鏡を2台設置
- 30 GeVから100 TeVのガンマ線を観測
- 11か国が参加

日本からは  
東大、京大、東海大などが参加  
(隔週でネットミーティング)

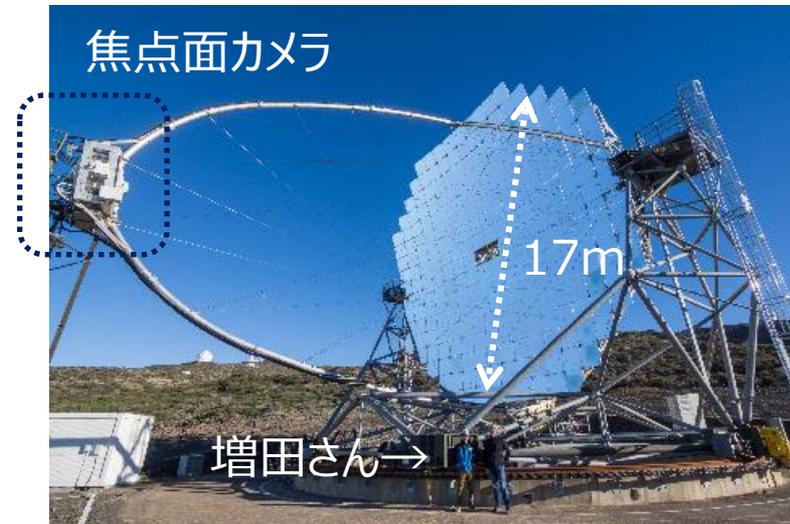
年に~1回  
運用シフト（約1か月）に参加



運用シフト中の様子



人工光が  
届かないように  
標高~2000m  
に設置



焦点面カメラ

17m

増田さん→

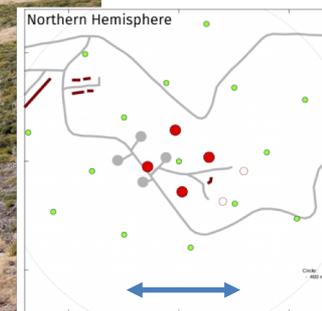
# 完成予想図

## ・北サイト (スペイン・ラパルマ島)



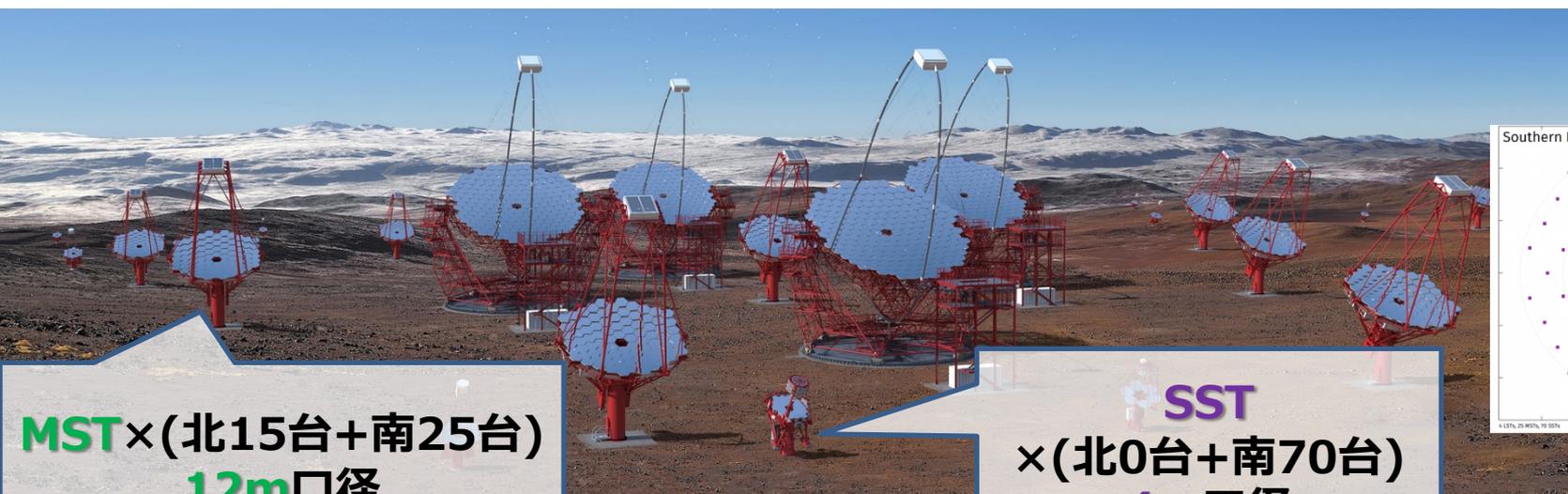
**LST** × (北4台 + 南4台)  
**23m**口径

- 大口径
- 中口径



250 m

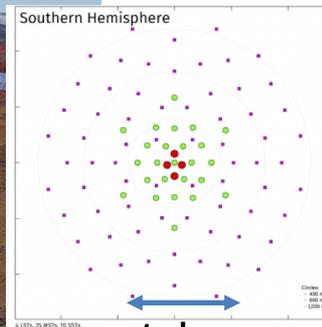
## ・南サイト (チリ・パラナル)



**MST** × (北15台 + 南25台)  
**12m**口径

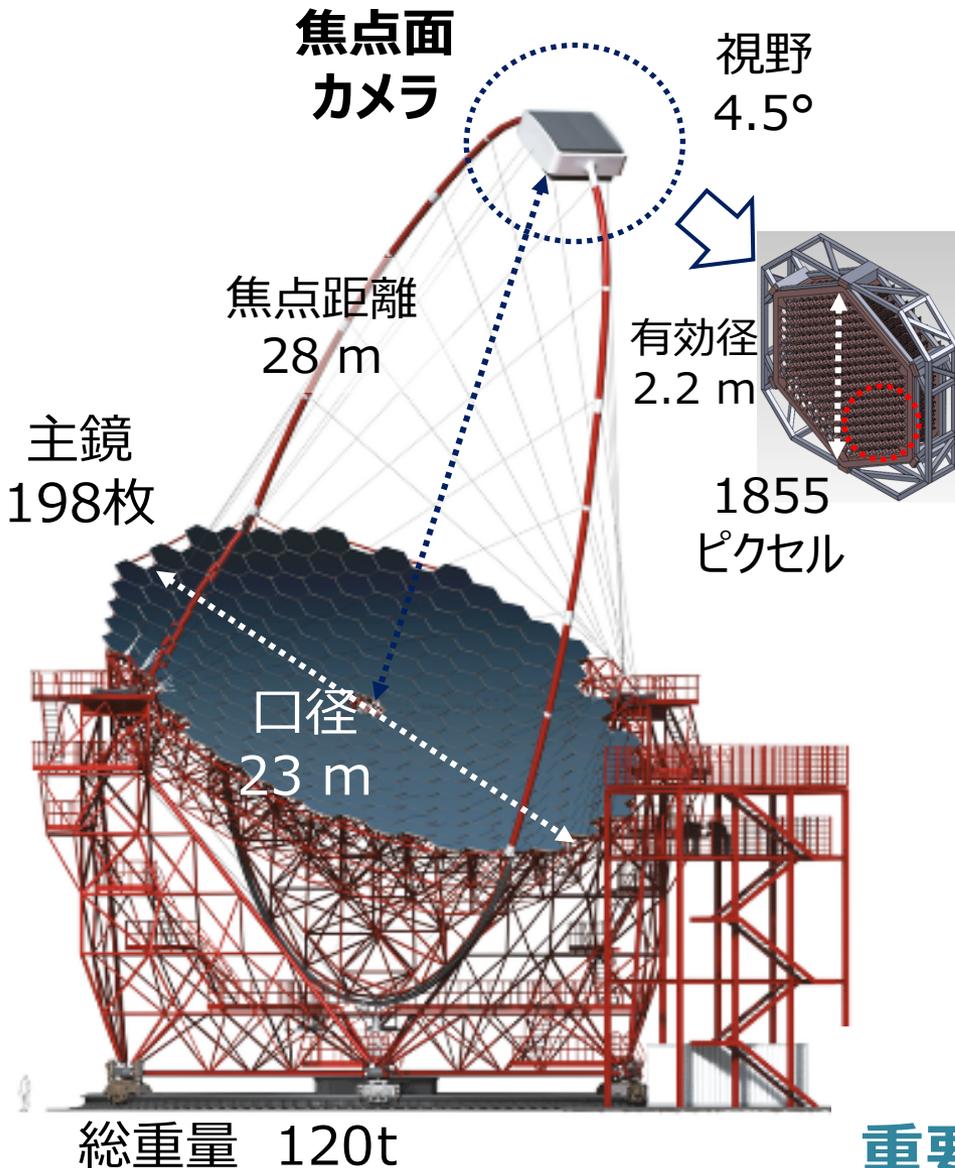
**SST**  
× (北0台 + 南70台)  
**4m**口径

- 大口径
- 中口径
- 小口径



1 km

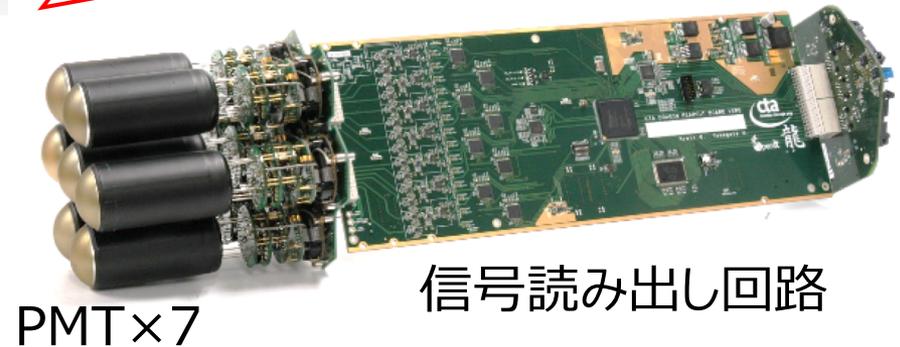
# 大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope; LST)



## 主な特徴

- ・口径23 mの望遠鏡
- ・**20秒で180度回転可能**  
→**突発天体**の観測に適している(ガンマ線バーストetc.)

## 光検出器モジュール



日本チームは主に大口径望遠鏡の  
焦点面カメラと主鏡の開発を担当

京大チーム (少人数ながら) も  
重要な仕事を担い、第一線で奮闘中!

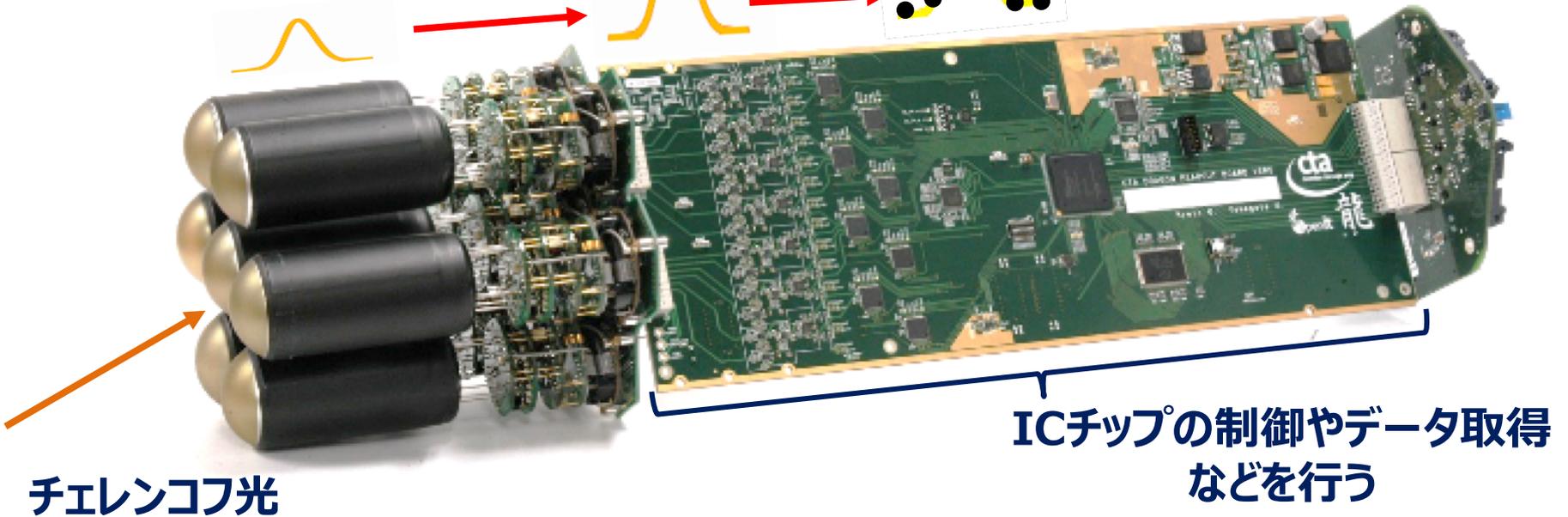
# 光検出器モジュール

PMTで  
チェレンコフ光信号を  
電気信号に変換

オペアンプで  
信号を増幅

ICチップで  
波形情報を  
デジタル変換

PCへ  
データ送信



京大グループは  
信号読み出し回路の開発を担当

# LST PMT信号読み出し回路 ~Dragon~

ver.1



大口径望遠鏡1号機用

増田

ver.5



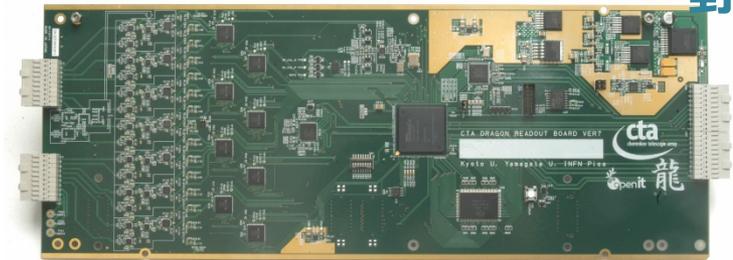
ver.2



大口径望遠鏡2-4号機用

野崎

ver.7



ver.3



ver.4

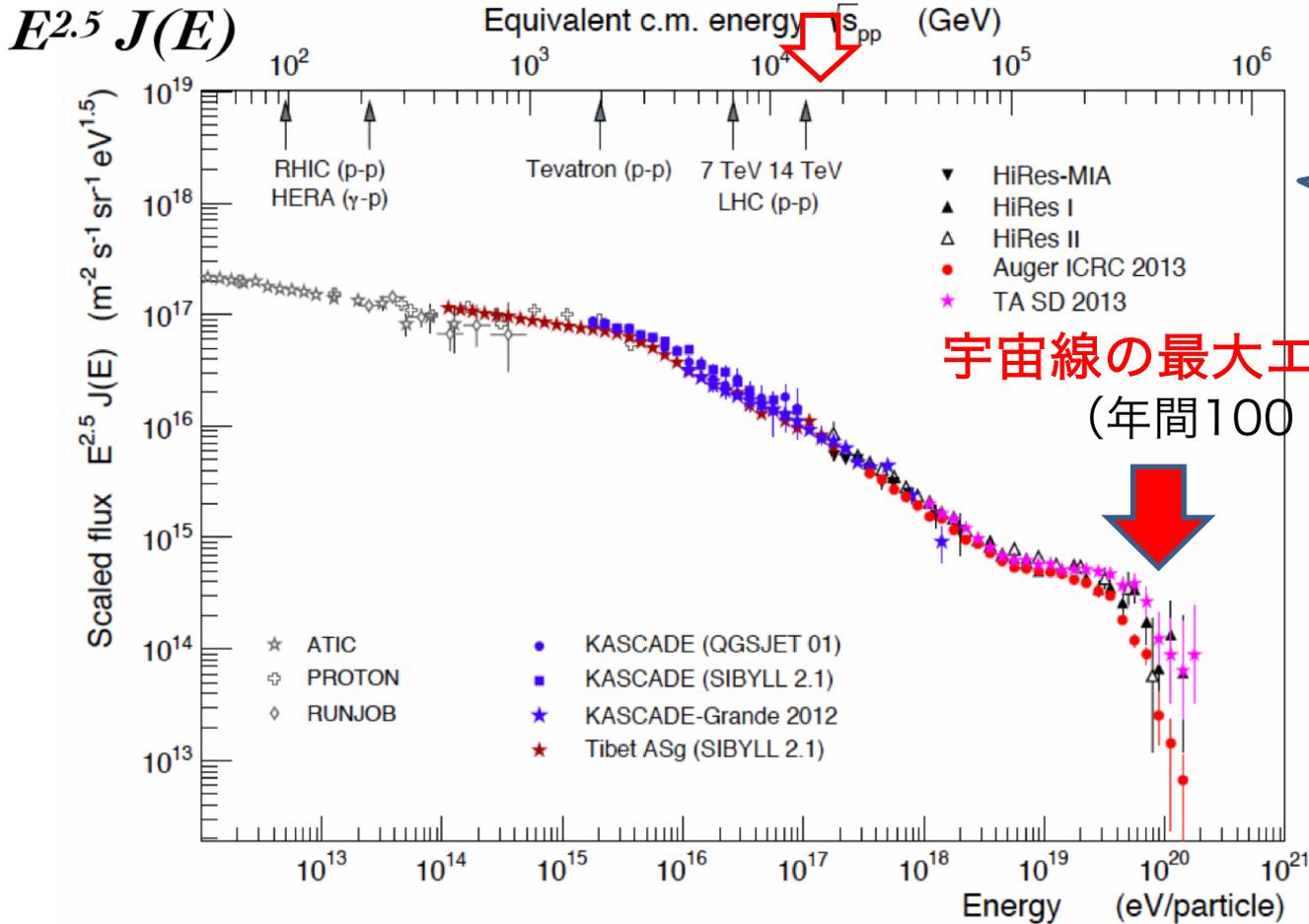


回路図設計、  
基板レイアウト、  
動作ロジック作製、  
動作試験  
⇒ 全て自分で作る

最初は  
回路の知識がなくても  
大丈夫です！  
(僕もそうでした)

# 宇宙で最大のエネルギーを持つ宇宙線の起源を解明する

地上の粒子加速器の最大加速エネルギー  $10^{17}$  eV



加速器を凌駕する  
エネルギー領域で  
新物理を探索

宇宙線の最大エネルギー  $>10^{20}$  eV

(年間100 km<sup>2</sup>に1回到来)

宇宙空間最大の加速器は？



活動銀河核？

ブラックホール？

ガンマ線バースト？

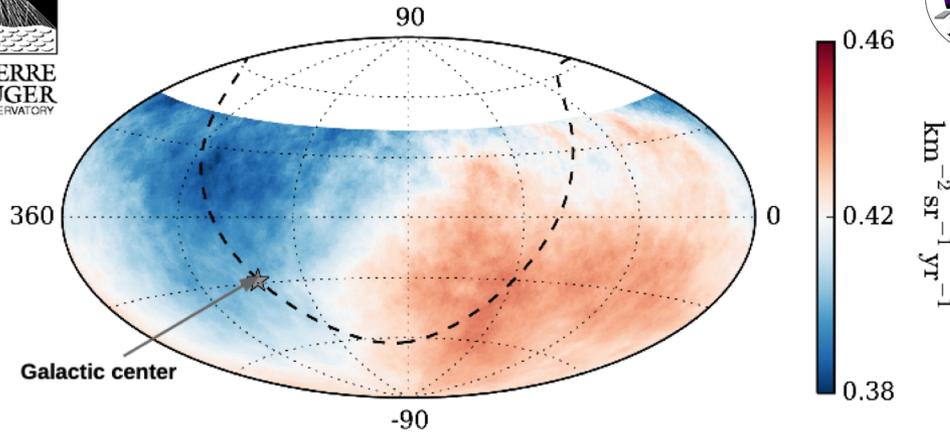
ダークマター？

- 極高エネルギー宇宙線は、どこでどのように加速されたか？
- 加速器未到達のエネルギー領域で、標準モデルは成り立つか？
- 宇宙磁場で曲がりにくく、宇宙線起源との相関が期待  
「極高エネルギー宇宙線による次世代天文学」

# 未だ黎明期にすぎない極高エネルギー宇宙線天文学



$>8 \times 10^{18}$  eV ダイポール型異方性

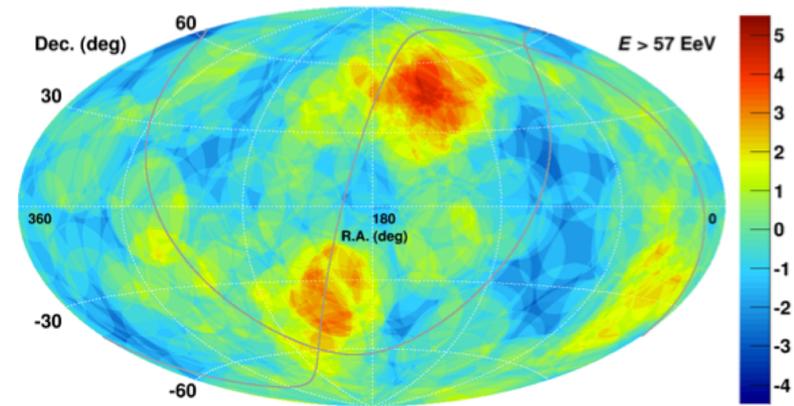


Pierre Auger Collab. Science 357, 1266 (2017)

銀河系外起源を支持



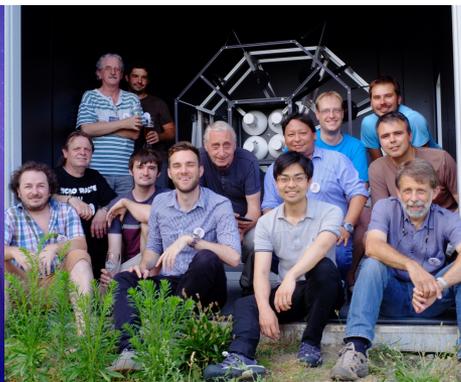
$>5.7 \times 10^{19}$  eV ホットスポット？



K. Kawata et al., Proc. of ICRC 2015

統計量不足により起源を特定できていない

## Fluorescence detector **A**rray of **S**ingle-pixel **T**elescopes (**FAST**)



新型望遠鏡を開発中

宇宙線の年間観測数を10倍にし、極高エネルギー宇宙線天文学を全盛期へ