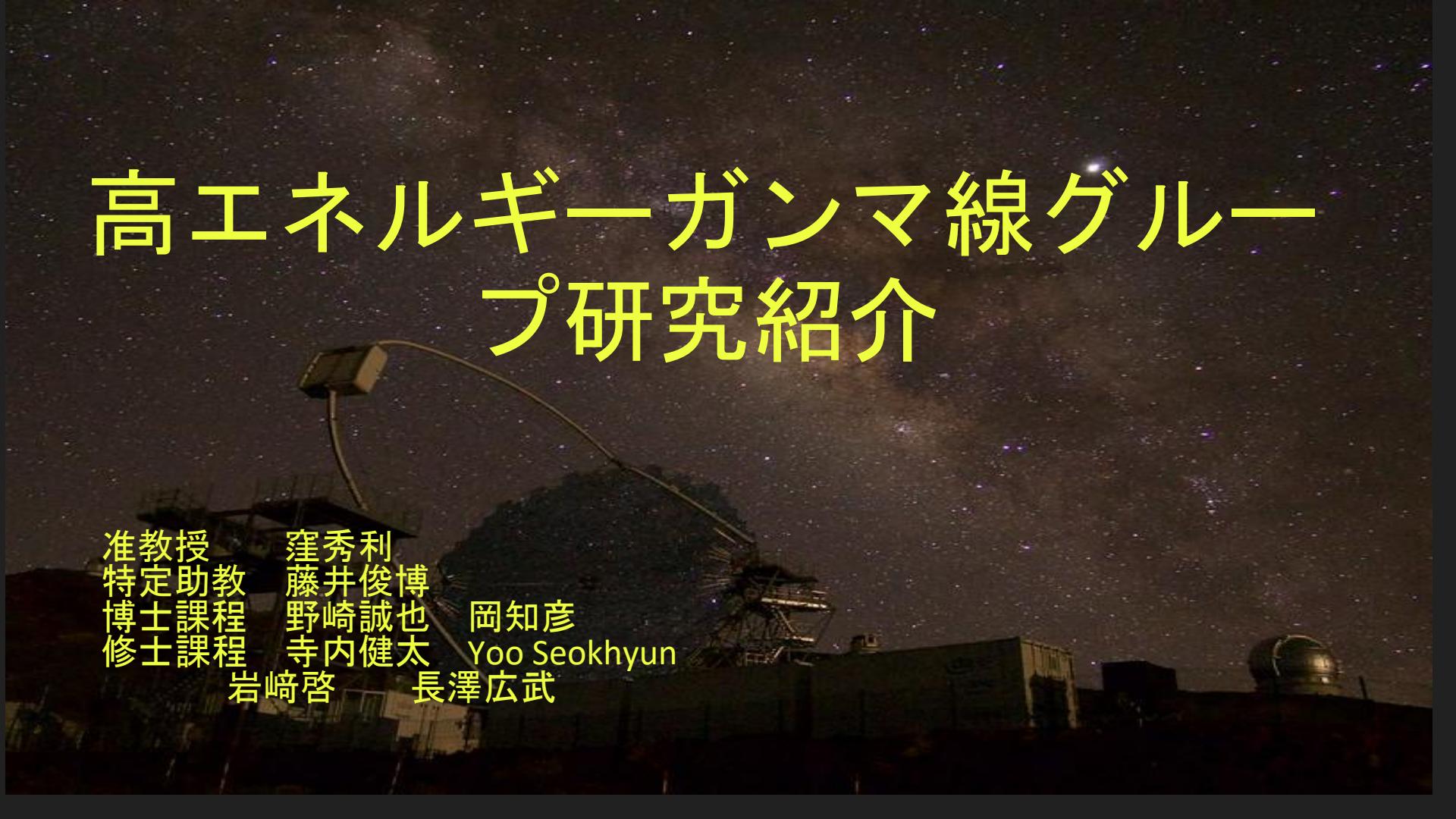


# 高エネルギーガンマ線グループ研究紹介

准教授  
特定助教  
博士課程  
修士課程

窪秀利  
藤井俊博  
野崎誠也  
寺内健太  
Yoo Seokhyun  
岩崎啓  
長澤広武



# 高エネルギーガンマ線の観測対象

巨大ブラックホール

[https://www.gizmodo.jp/2016/08/post\\_664929.html](https://www.gizmodo.jp/2016/08/post_664929.html)

ガンマ線ジェット

[https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/1879/?s\\_cid=bpn\\_Sch](https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/1879/?s_cid=bpn_Sch)

パルサー

<https://blog.goo.ne.jp/mobarider/e/1e6b4d438ae8160fbfd64df5284d8fc>

ダークマター探索

<https://wired.jp/2017/05/16/visible-dark-matter/>

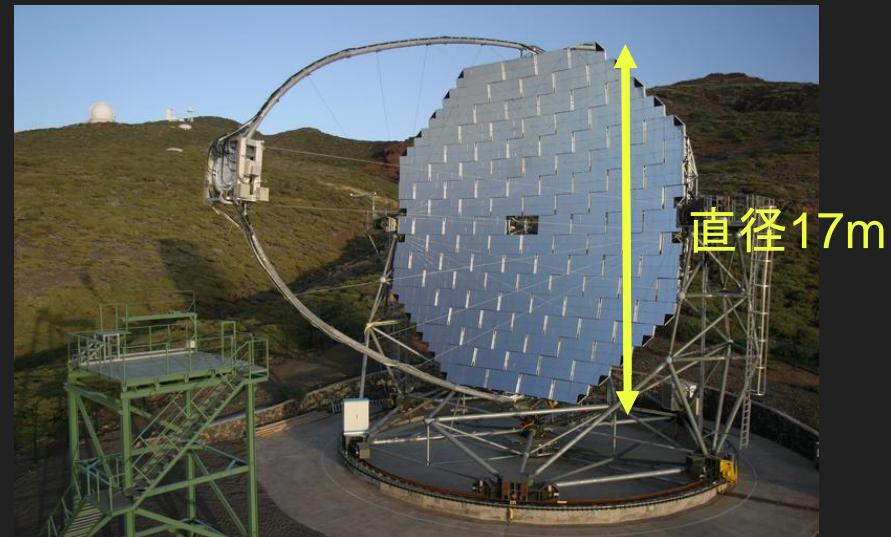
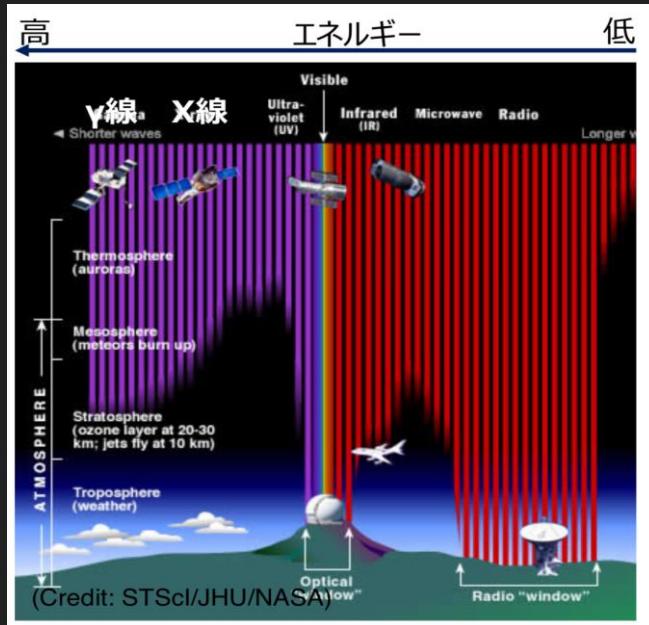
SCALE  
50 million  
LIGHT YEARS

超新星残骸

<https://astropics.bookbright.co.jp/a-supernova-remnant-w49b>

# 高エネルギーガンマ線観測

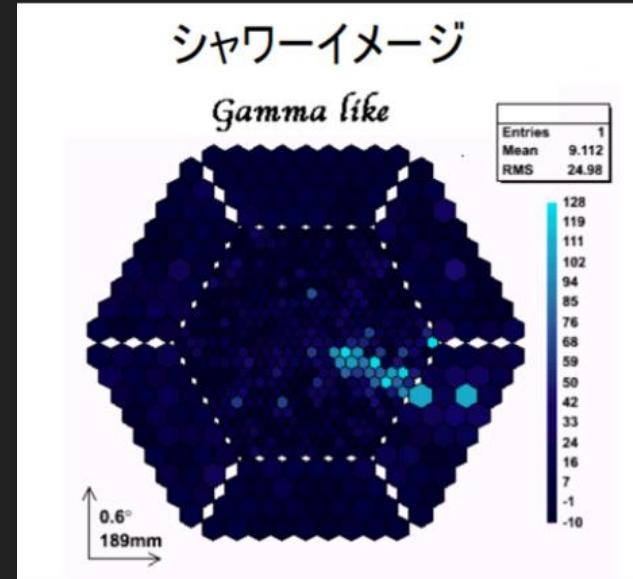
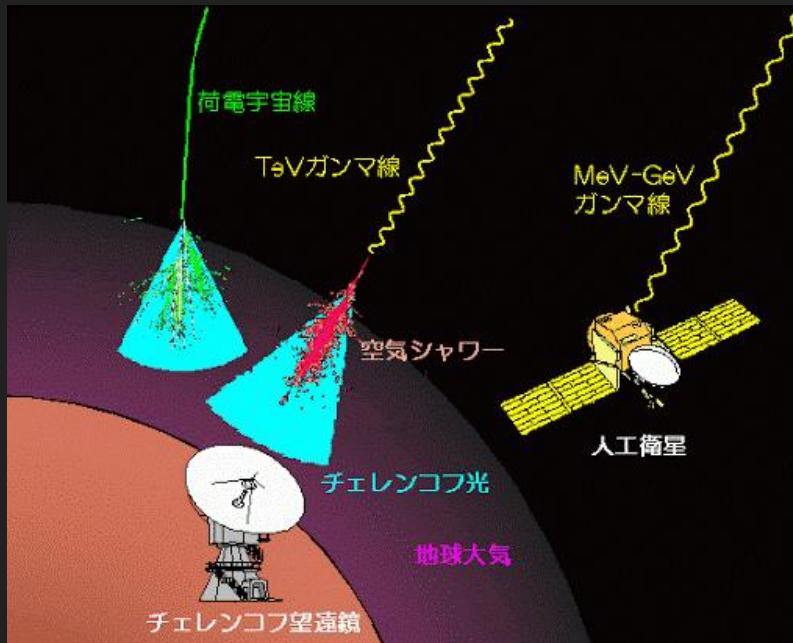
- ・X線やガンマ線は大気に吸収されて、地上まで届かない
- ・高エネルギーガンマ線は衛星で飛ばせるほど小さい検出器では捉えられない  
→地上に大きな検出器（大気チレンコフ望遠鏡）



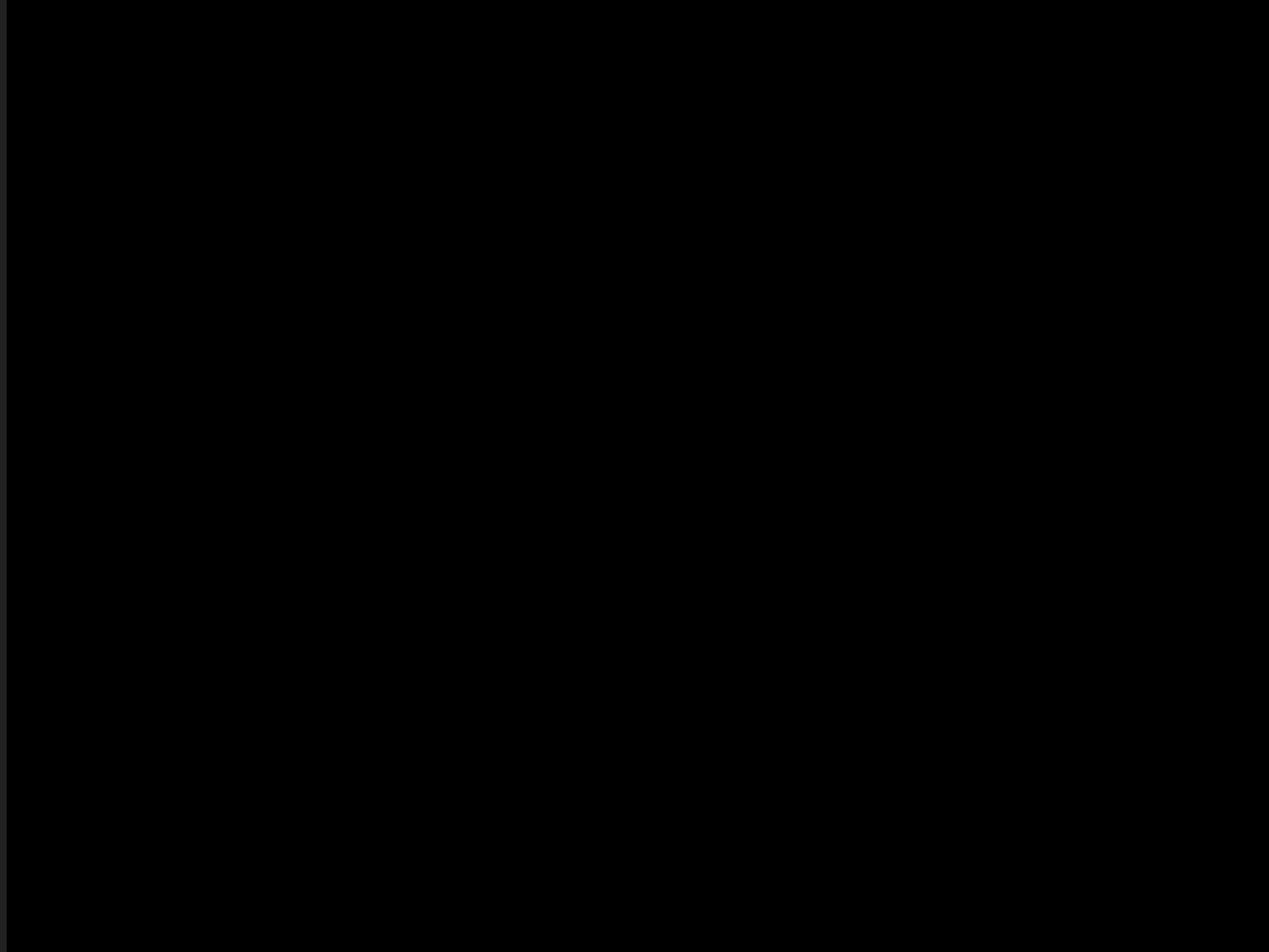
MAGIC望遠鏡  
(スペイン・ラパルマ島)

# 解像型大気チエレンコフ望遠鏡

地球大気との反応を経て放出される二次的な光（チエレンコフ光）を検出し、  
ガンマ線のエネルギーと到来方向を再構成



空気シャワー



# MAGIC望遠鏡

## (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope)



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

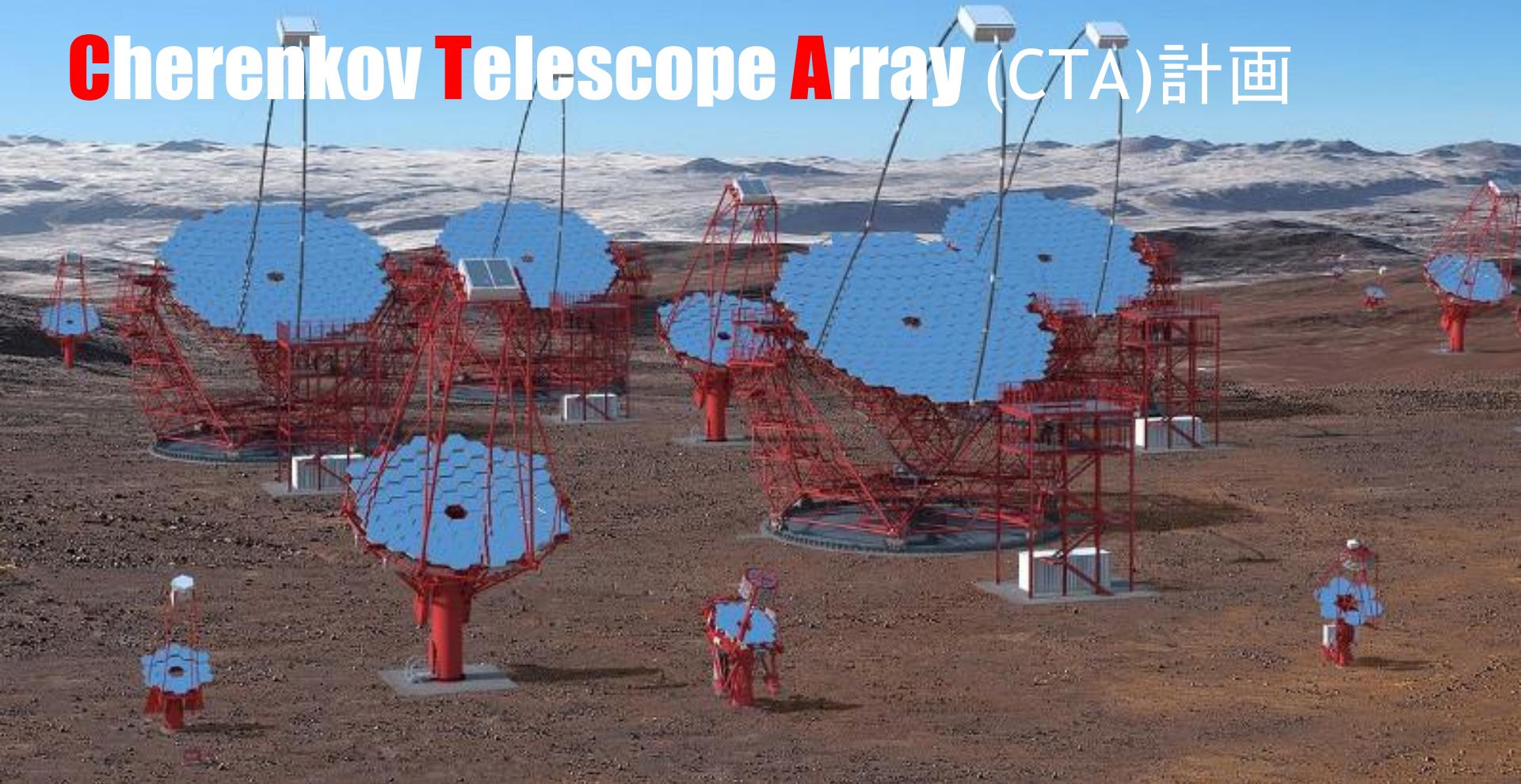


人工光が届かないよう標高～2000mに設置



- ・日本からは東大、京大、東海大などが参加（隔週でミーティング）

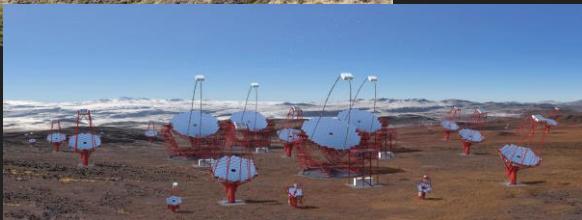
# Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画



# CTA 計画

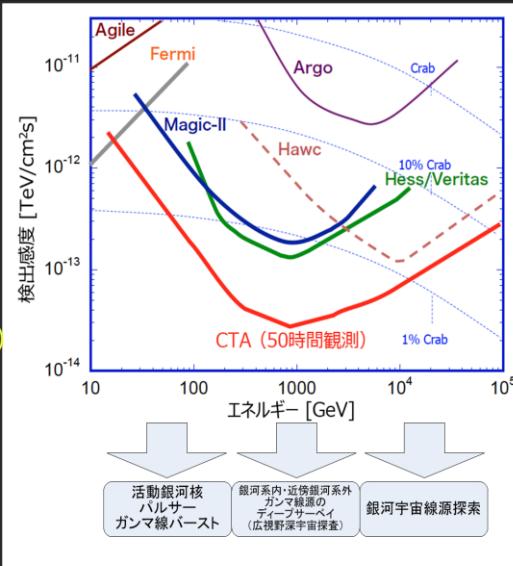


南サイト →  
(チリ・  
ナミビア砂漠)



←去年5月に行われた  
CTA国際会議の  
グループ写真

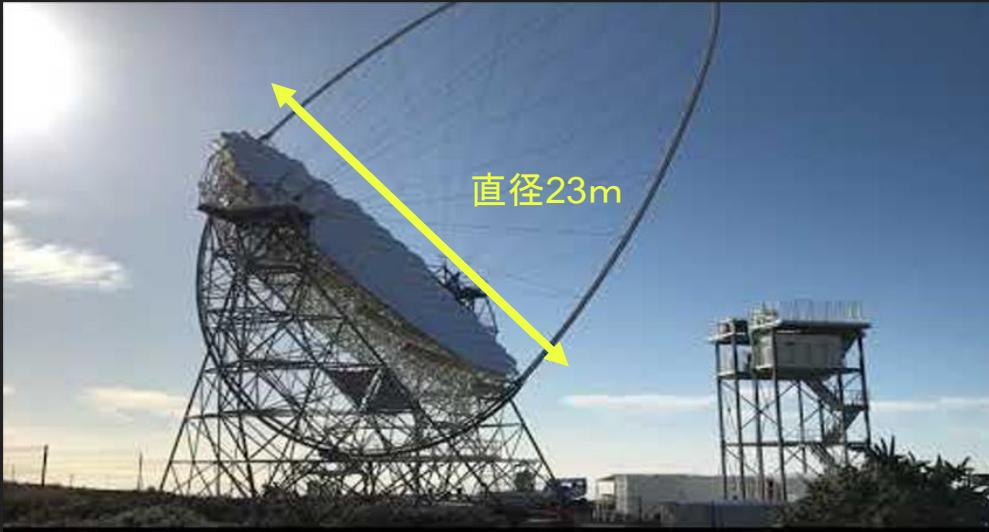
- 世界 31ヶ国 約 1500人  
(日本120名) が参加する  
超巨大プロジェクト



- 大中小のチエレンコフ  
望遠鏡を計 118基設置  
(従来 4~5基)

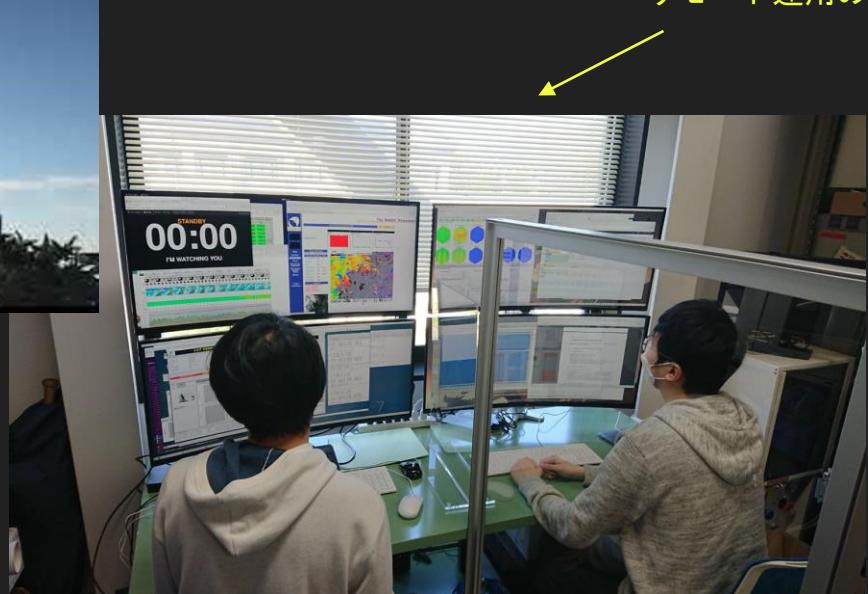
➢ 有効面積を拡大し、  
従来より感度 10倍  
を達成！

# LST 1 [ Large - Sized Telescope ]



- ・2018年10月から試験運転
  - ・CTAでは最速20秒で  
180°回転可能
- =>突発天体をとらえる

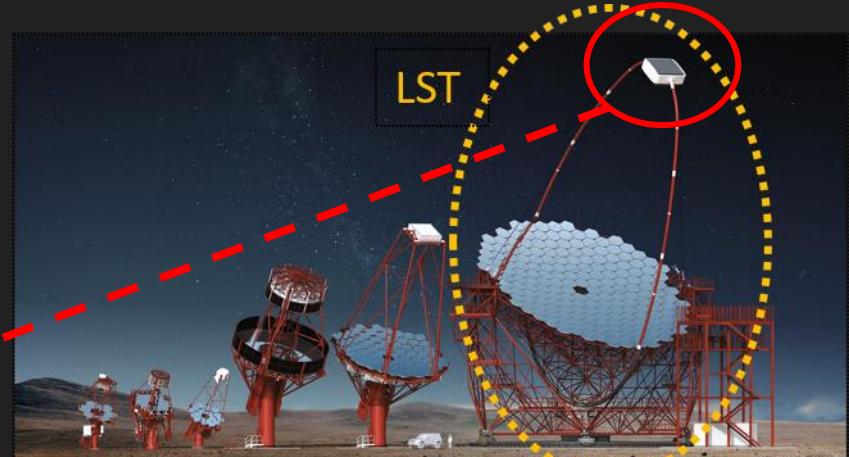
リモート運用の様子



注：現在はコロナの影響で、研究室から  
リモート観測をしています。

# 光検出器モジュール

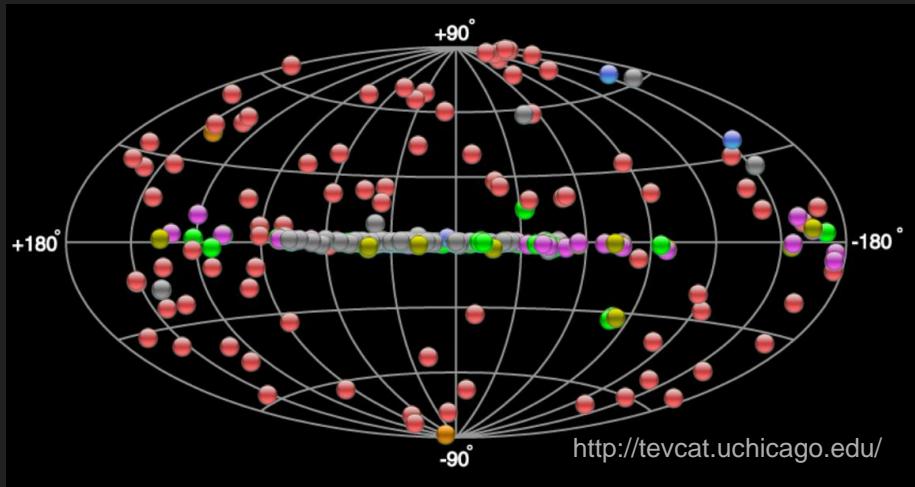
京大チームは大型望遠鏡(LST)の心臓とも  
言える光検出器モジュールの開発を担当  
⇒世界の第一線で活躍中！



# CTA: 今後の展望

< 建設・観測スケジュール >

- ・ 2010-2020年 プロトタイプ望遠鏡  
開発・建設
- ・ 2016年 北サイト建設開始  
(2021年からLST2-4建設)
- ・ 2018年 LST1試験運転
- ・ 2021年 南サイト建設開始  
(2023年から望遠鏡建設)
- ・ 2024年 北サイト・アレイ観測
- ・ 2026年 南サイト・アレイ観測



## CTAの研究対象

- ① 宇宙線の起源・加速・伝搬
- ② 高エネルギー天体の性質解明
- ③ 活動銀河、ガンマ線バーストからの  
ガンマ線を使った宇宙論的研究
- ④ 銀河中心、矮小銀河からの暗黒物質の  
対消滅、崩壊ガンマ線の探索

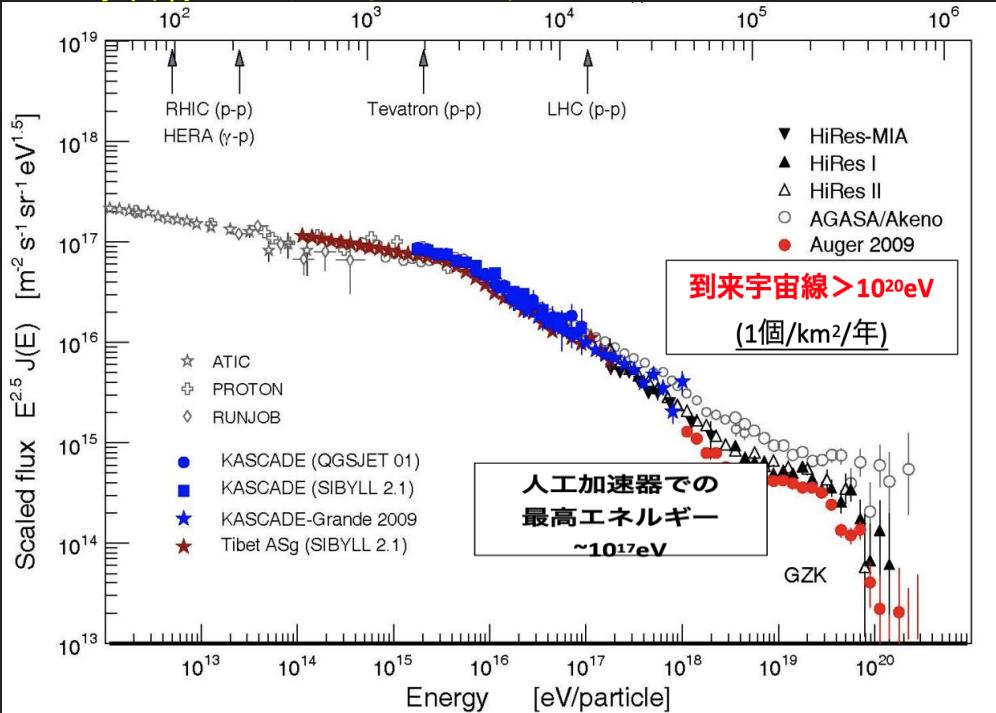
-FAST project-

# 最高エネルギー宇宙線観測実験

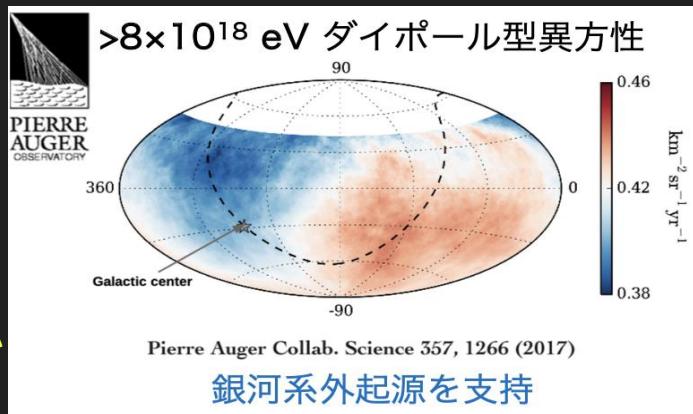
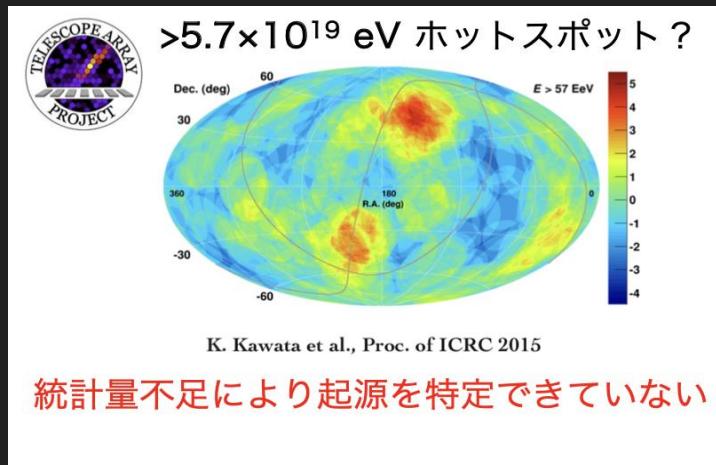


# 最高エネルギー宇宙線

## 宇宙線のエネルギースペクトル



- 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のか
- 宇宙磁場で曲がりにくく、  
宇宙線起源との相関が期待→新たな物理、次世代天文学



# FAST project

## Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes

現在行われている観測手法では  
予算などの面から有効面積を  
大きくすることは難しい



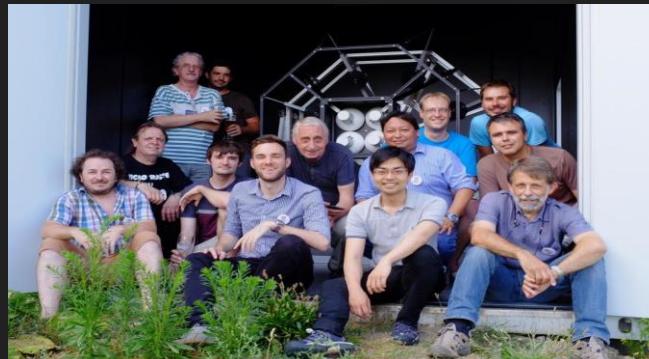
地表粒子検出器

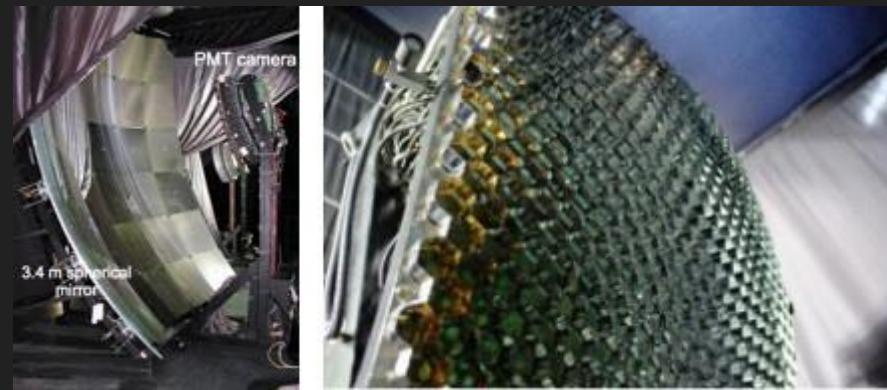


大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡の低コスト化  
アレイ状に配置し観測

現在行われている実験の有効面積  
より一桁大きい面積をめざす





現在の大気蛍光望遠鏡



新型の大気蛍光望遠鏡

観測事象を増やし最高エネルギー宇宙線に近づく！！！！！

# 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

とても楽しい  
研究室です  
ぜひ一緒に  
研究しましょう



左 寺内さん 右 YOOさん



長澤(1週間前)



藤井特定助教



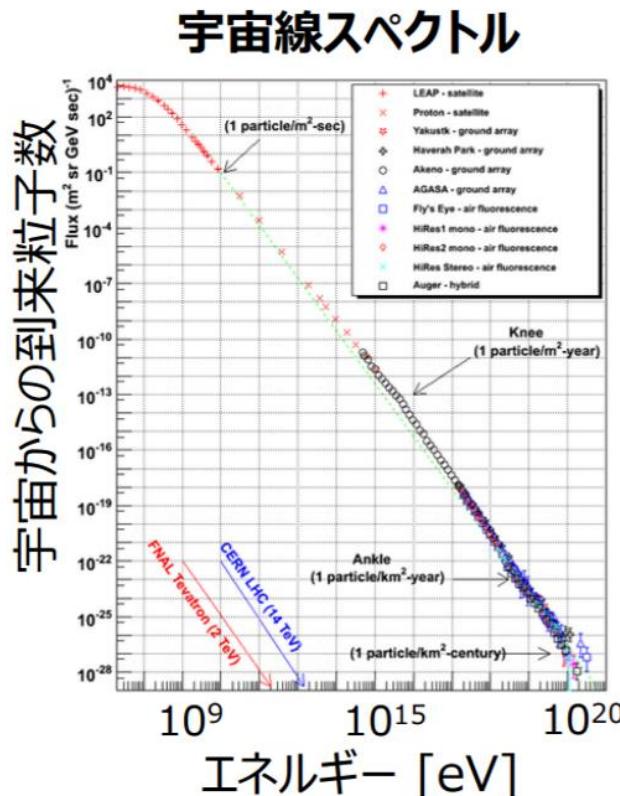
岩崎(高2)



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)

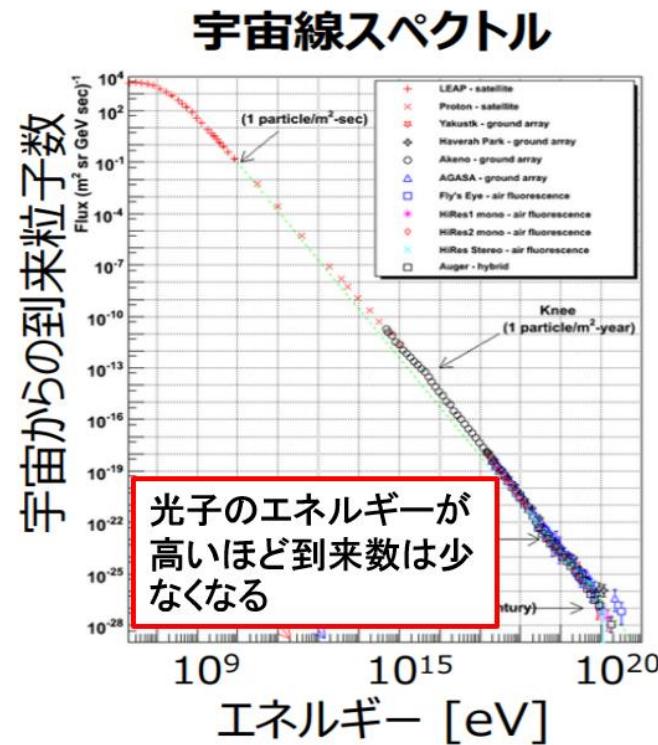
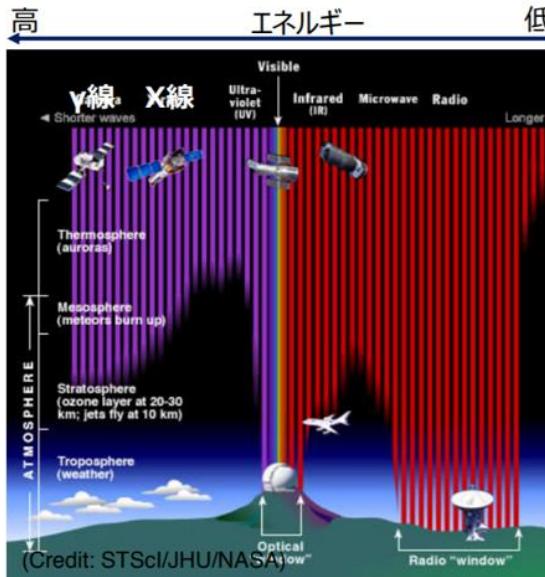


宇宙線から放射された高エネルギー  
ガンマ線は曲げられずに地球に到来する

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

# 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(>数十GeV)は衛星で飛ばせるほど小さい検出器では検出できない



## 2. 高エネルギー天体の性質の解明

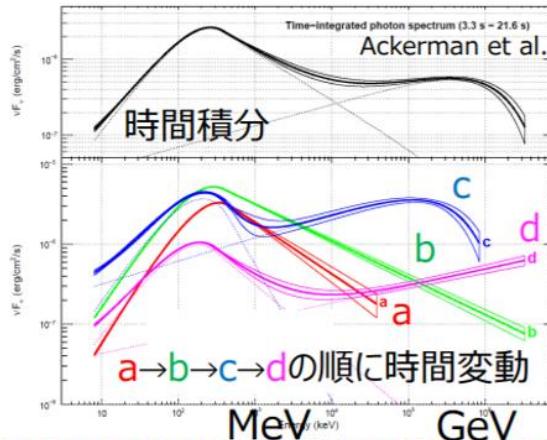
### ガンマ線バースト (GRB)

宇宙最大の爆発現象  
中心からは高速のジェットを放出



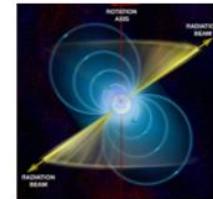
- ・中心駆動天体
- ・放射機構
- ・ジェットの形成機構
- などが未解明

あるGRBのエネルギースペクトル



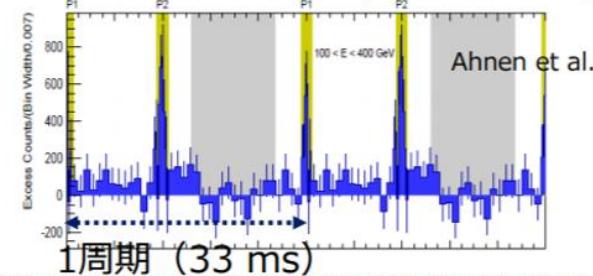
### パルサー

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)

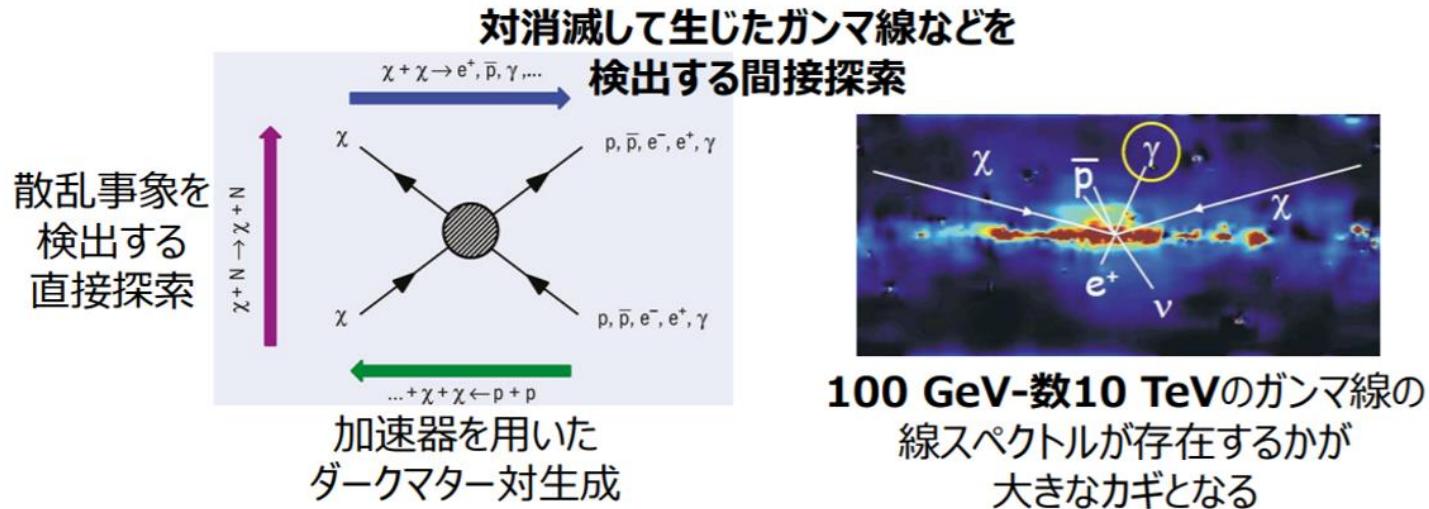
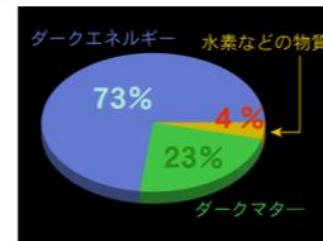


激しい高エネルギー天体现象の  
謎に迫る

### 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



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)

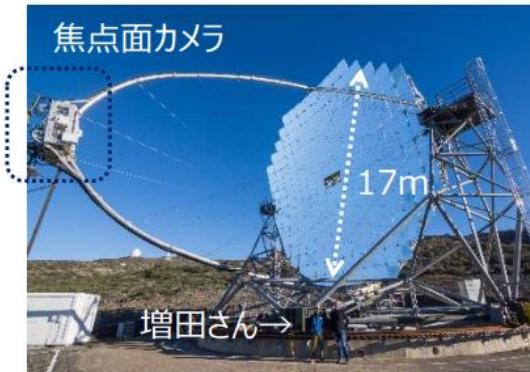
年に~1回  
運用シフト（約1か月）に参加



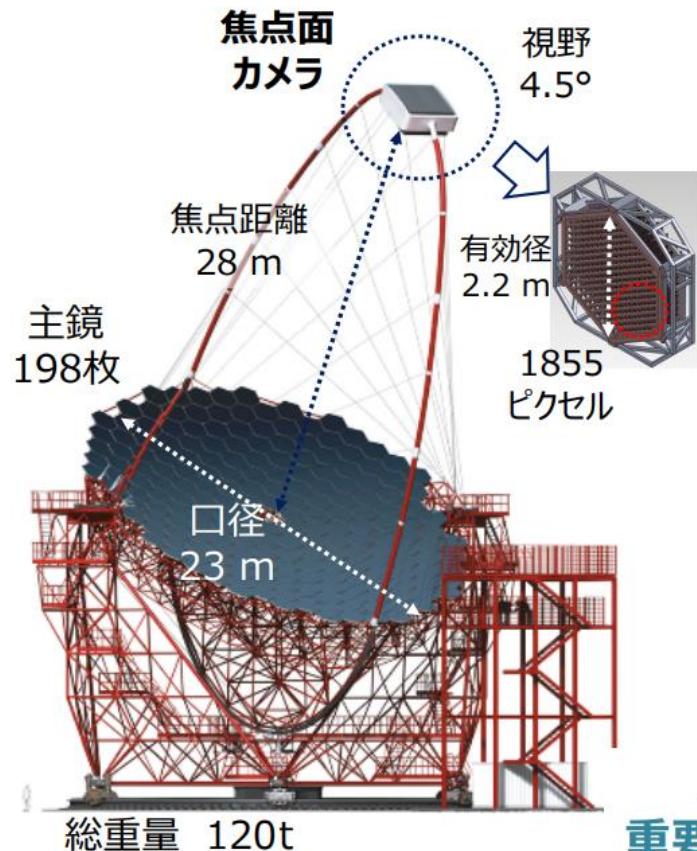
運用シフト中の様子



人工光が  
届かないように  
標高~2000m  
に設置



# 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



信号読み出し回路

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！

# CTA大口径望遠鏡の作動

---

---



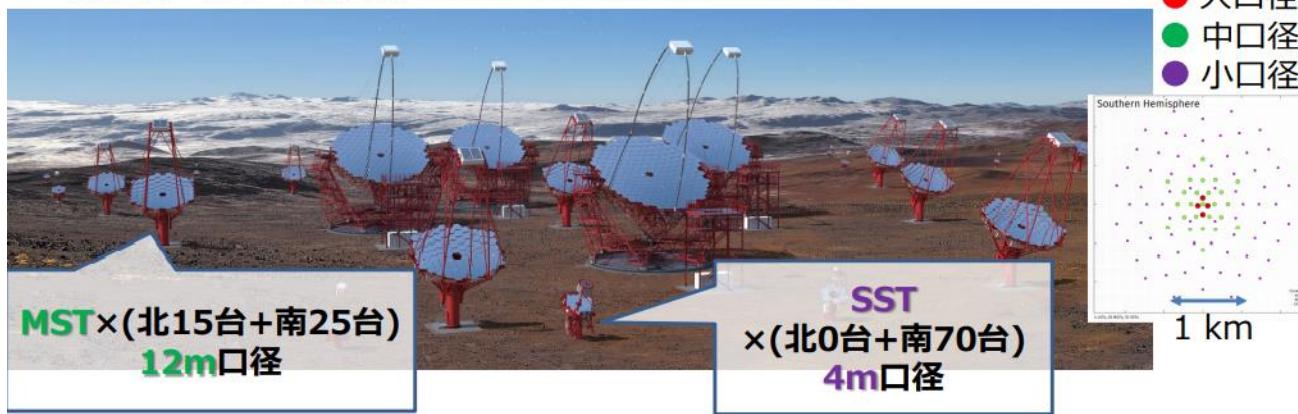
CTAでは最速20秒で180° 回転可能 => 突発天体を捉える

# 完成予想図

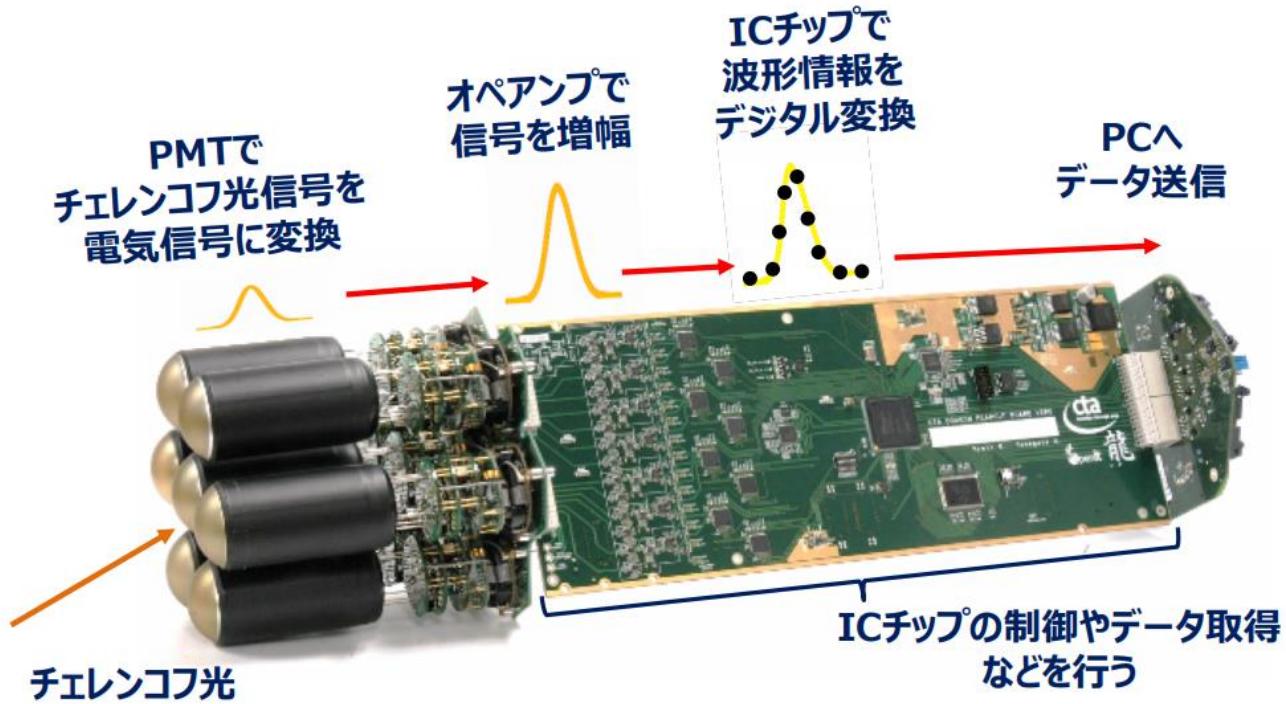
## ・北サイト（スペイン・ラパルマ島）



## ・南サイト（チリ・パラナル）



## 光検出器モジュール



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~

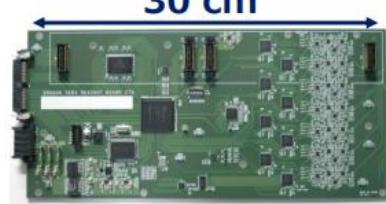
ver.1



ver.2



ver.3



ver.4



大口径望遠鏡1号機用 増田



大口径望遠鏡2-4号機用 野崎



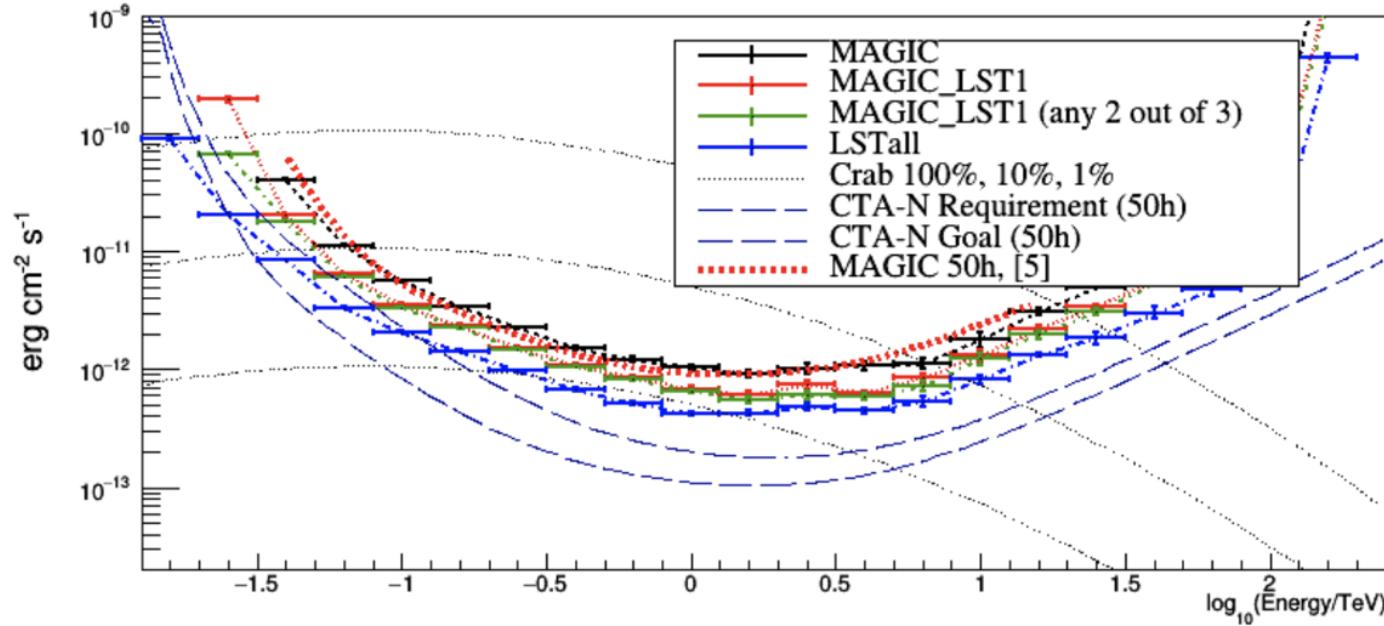
回路図設計、  
基板レイアウト、  
動作ロジック作製、  
動作試験  
⇒ 全て自分で作る

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)

## 4. CTA-LSTの感度

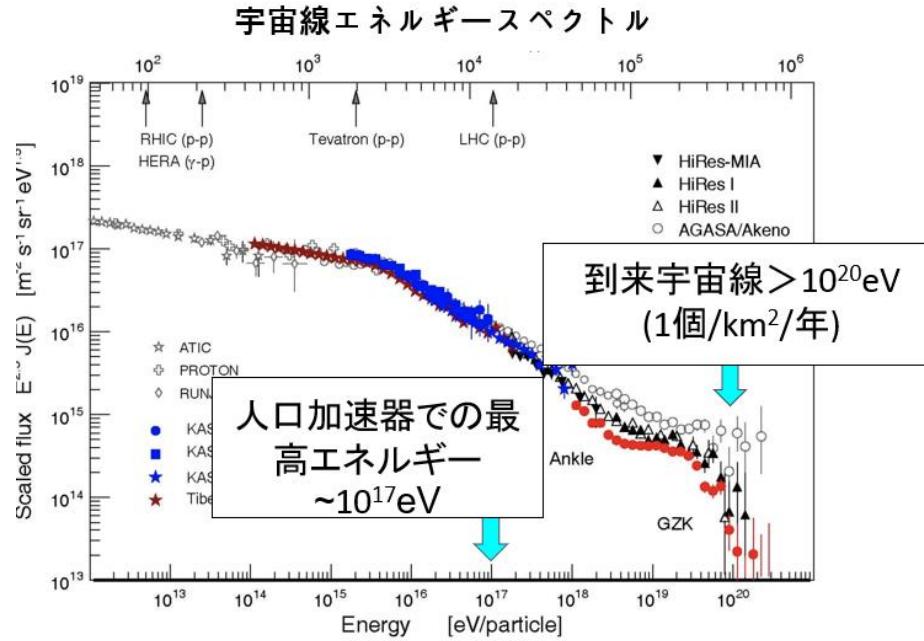
F. Di Pierro et al. ICRC 2019,  
arXiv:1907.07508

Differential Sensitivity



- ✓ 最前線で活躍しているMAGIC望遠鏡より良い感度を目指す
- ✓ 今までよりもっと良い感度をもつ大気チエレンコフ望遠鏡で宇宙を探索

# 5. 最高エネルギー宇宙線の起源を解明



- 最高エネルギー宇宙線はどこでどのような加速をされるのか？
- 加速器未到達領域で、標準モデルは？

より高いエネルギー領域で新物理を探索



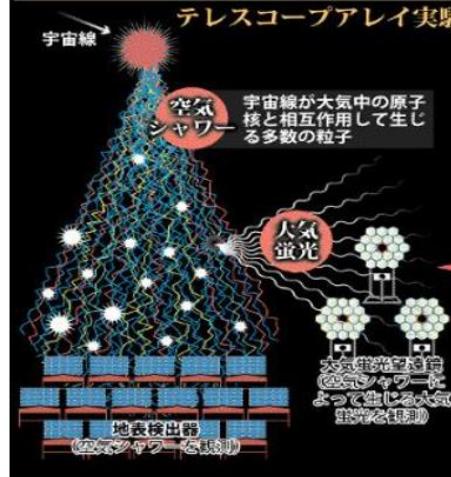
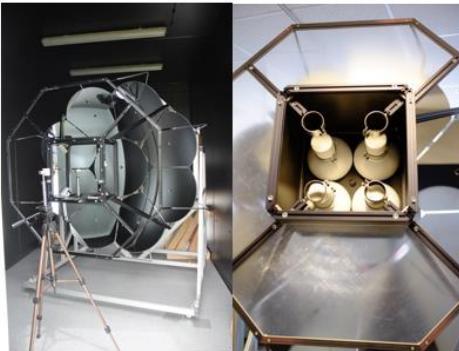
# 6. 最高エネルギー宇宙線観測



宇宙線が作る大気シャワーを南北半球で2種類の機器で観測

地上水チエレンコフ検出器

新型大気蛍光望遠鏡



大気蛍光とは？

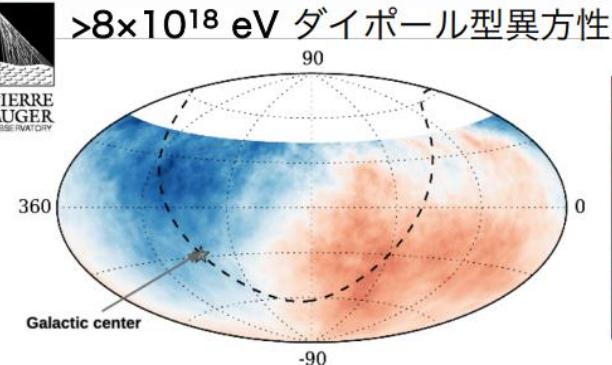
荷電粒子とぶつかって  
励起された大気の窒素分子が  
脱励起するときに放射する光  
(紫外線)

2種類の観測器を南北半球(ピエールオージュ、アルゼンチン)と北半球(テレスコープアレイ、ユタ州)の2サイトで展開

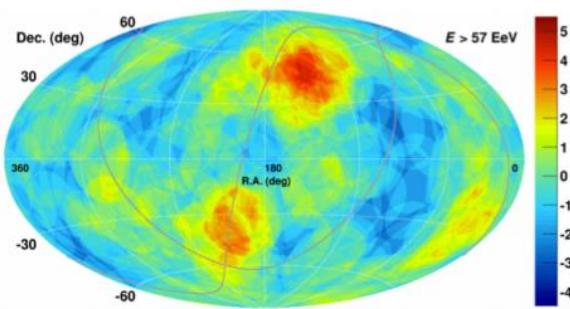
# 未だ黎明期にすぎない極高エネルギー宇宙線天文学



PIERRE  
AUGER  
OBSERVATORY



$>5.7 \times 10^{19} \text{ eV}$  ホットスポット？



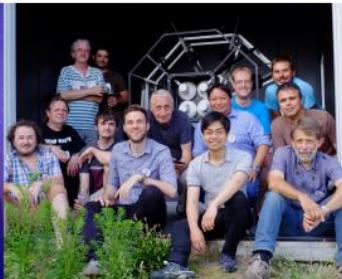
Pierre Auger Collab. Science 357, 1266 (2017)

銀河系外起源を支持

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

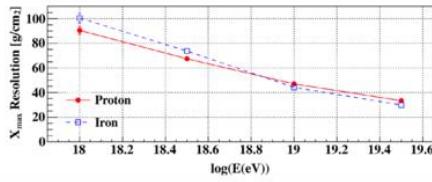
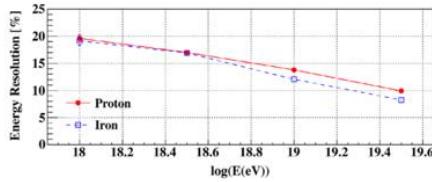
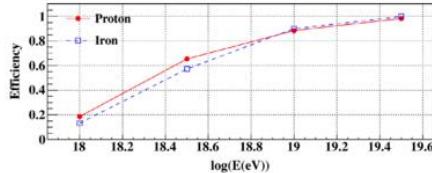
## Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)



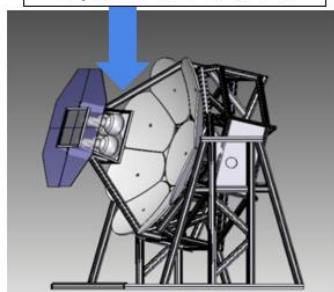
新型望遠鏡を開発中

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

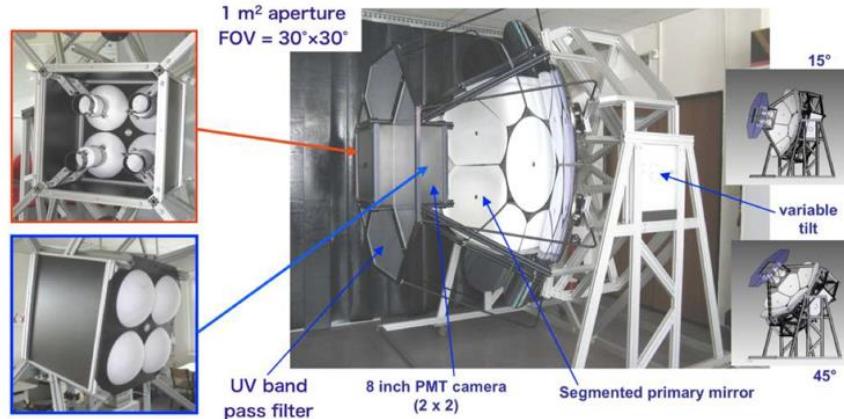
# 7. 新型大気蛍光望遠鏡



4本のPMTが入る



- 大気蛍光(紫外線)を夜に観測、一次到来宇宙線を再構成
- FOV=30° × 30° => 12基で360° カーバー
- 最高エネルギー側での感度を最適化



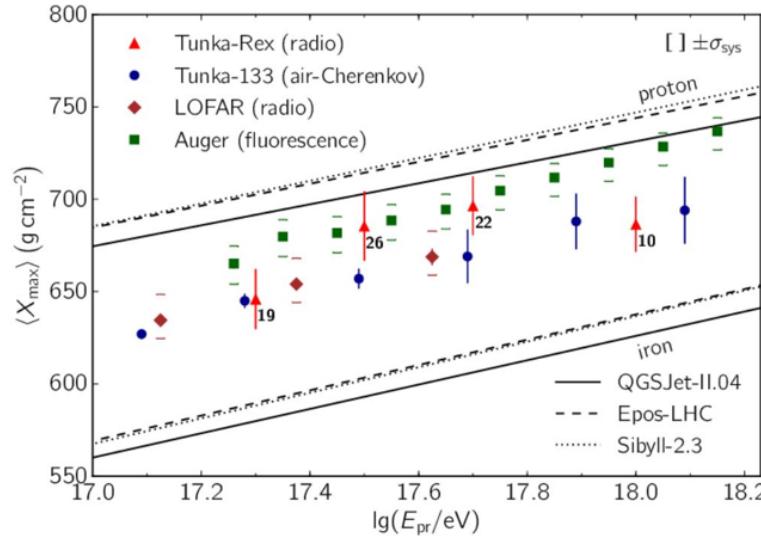
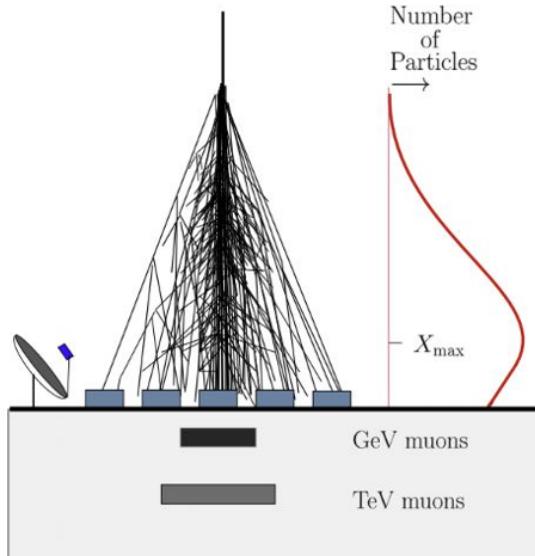
✓ より広い場所に多く設置するには低コスト化が必要  
⇒ 1.6m口径の小さい光学系と4本のPMTカメラで低コスト化

# 8. 化学組成と $X_{\max}$

$X_{\max}$ とは？

→シャワーが作る粒子の数が一番多い時の大気の深さ

L.A. Anchordoqui / Physics Reports 801 (2019) 1–93



下の方に近づくほど重たい粒子