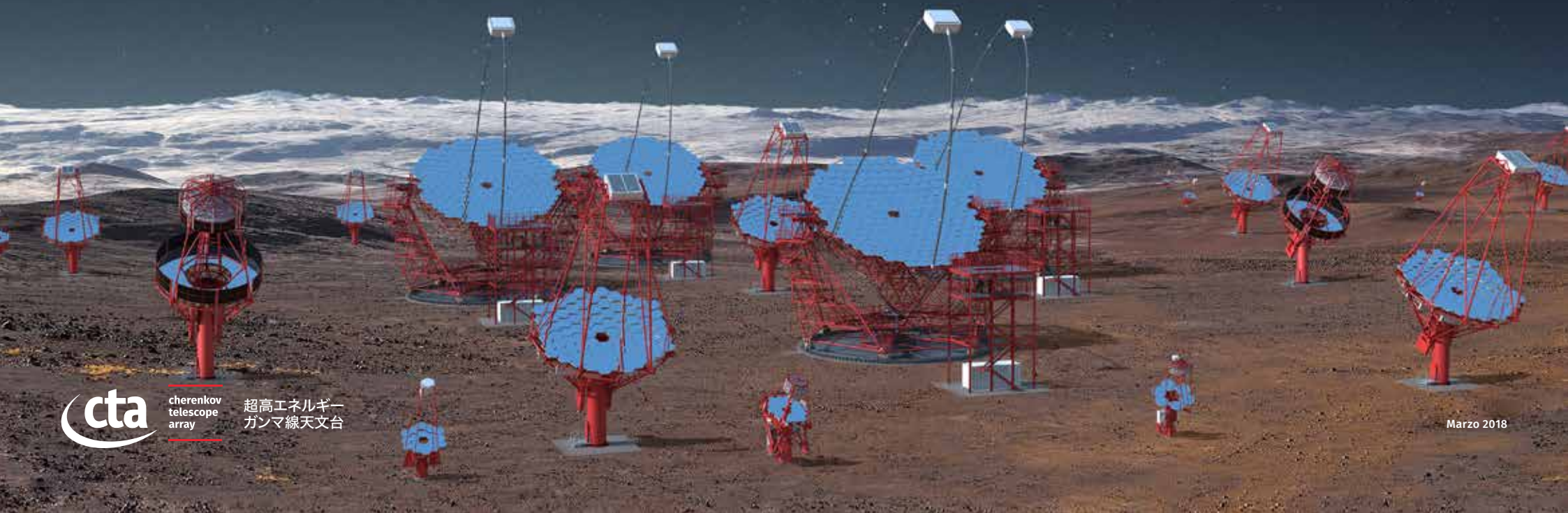




宇宙の高エネルギー現象を解き明かす

Cherenkov Telescope Array (CTA) プロジェクト



cherenkov
telescope
array

超高エネルギー
ガンマ線天文台

Marzo 2018

Contents (目次)

高エネルギー天文学の発展 3

光の観測者 4-5

電磁波スペクトル 4-5

ガンマ線の誕生 6-7

高エネルギーフロンティアを超えて 8

- 相対論的宇宙線粒子の起源と、その役割についての理解 9-10
- 極限宇宙の研究 11
- 物理学フロンティアの探究 12-13

チェレンコフ光を用いたガンマ線の検出 14-15

激しい宇宙を探索する二つの眼 16-17

放射から新発見までの長い道のり 18-19

次世代の高エネルギー観測装置の建設 21

Small-Sized Telescope (小口径望遠鏡) 22-23

Medium-Sized Telescope (中口径望遠鏡) 24-25

Large-Sized Telescope (大口径望遠鏡) 26-27

CTAカメラによる光の検出 28

データ取得から発見に至るまで 29

天文台の運営 30

期待される性能 31

世界規模のコラボレーション 32

すべての人たちのために 33

国際的支援のもとに 34

雲の上にそびえる、カナリア諸島(スペイン)、ラ・パルマ島の岩山。南米チリ、アタカマの広く、荒涼とした砂漠。この2カ所に、**世界最大かつ最先端の地上ガンマ線望遠鏡**が設置されることになりました。

image credit:
Daniel López,
カナリア天体物理研究所

天文学者たちは長期にわたり、このような素晴らしい星空の下、銀河（銀河系）の神秘に触れ、その謎を解き明かすことにより、宇宙を理解しようと努めてきました。次世代ガンマ線望遠鏡であるチェレンコフ望遠鏡アレイ（Cherenkov Telescope Array, CTA）は、これまで知られていなかった激しく活動する天体の存在を明らかにし、高エネルギー宇宙物理学の世界に革命をもたらすと期待されています。

CTAと同じ種類の地上ガンマ線望遠鏡には、ナミビアにあるH.E.S.S.望遠鏡、ラ・パルマにあるMAGIC望遠鏡、アリゾナにあるVERITAS望遠鏡の三つがあり、2003年から高エネルギーガンマ線の計測を続けてきました。その結果、10個ほどしか知られていなかった強いガンマ線を出す天体が、すでに150個以上も発見されています。CTA計画では、北半球と南半球で合わせて100基以上の望遠鏡を設置する予定で、これまでにない高い精度と高い感度により、観測可能な天体数を10倍に増やすとともに、宇宙物理学における最も複雑で、重要な謎のいくつかを解決できると期待されています。CTA計画は、人類の宇宙のフロンティアを切り開くだけではありません。高エネルギー宇宙の観測から得られた成果を、天文学および素粒子物理学といった広い分野の物理学者コミュニティに初めて提供できる機会にもなるのです。

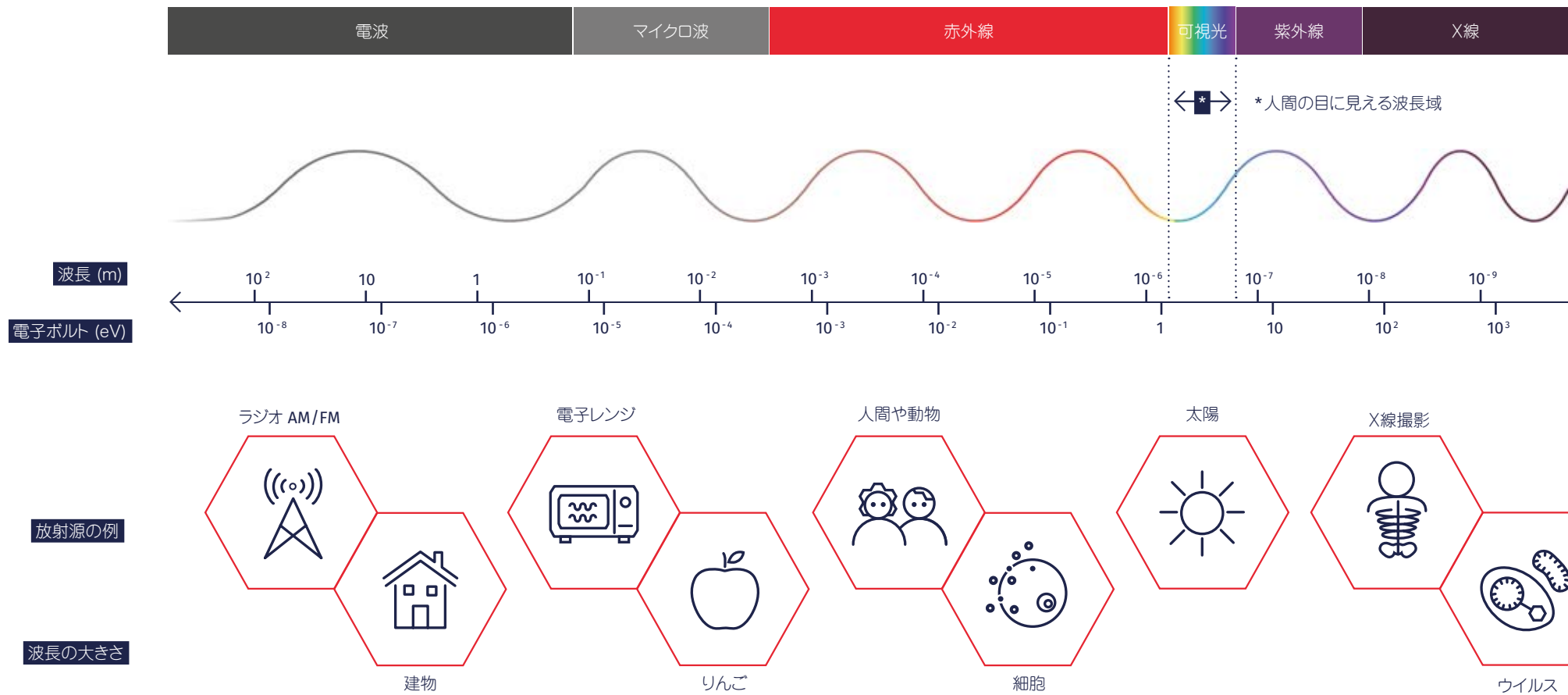
最先端 高性能 高い機動性

次なる進化に向けて...



目に見える遠方の星、惑星、その他の天体からの光は、電磁波スペクトルのほんの一部を占めるに過ぎません。天体から放たれた光のほとんどは、人間の目では見ることができないのです。

電磁波スペクトル

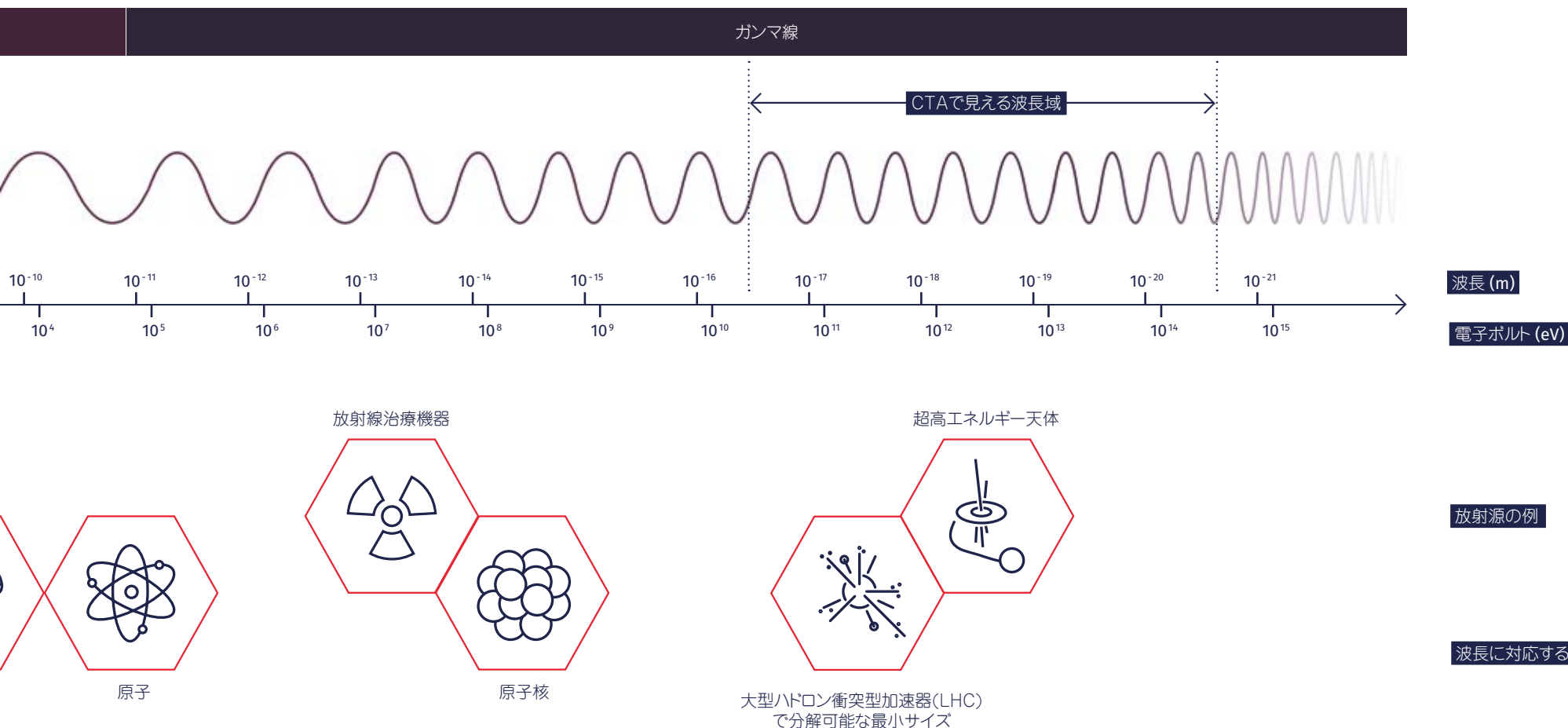


電磁波の全スペクトルは、電波とマイクロ波のような低域周波数帯から、赤外線、可視光線および紫外線のような中域周波数帯、さらにはX線やガンマ線といった高域周波数帯まで幅広くあります。とくに、ガンマ線の周波数帯は非常に広く、上限がどこまであるのかはよくわかりません。

実際、CTAが検出するガンマ線は、可視光線の約10兆倍ものエネルギーを持つと予想されます。

私たち人類は、17世紀初頭から光学望遠鏡によって夜空の星を観察し、宇宙の美しい姿を明らかにしてきました。さらに科学者たちは、いろいろな種類の望遠鏡で幅広い周波数帯の光を捉え、天体で起きている物理現象の解明を進めてきました。CTAは、宇宙で最も高いエネルギーの天体を観測できるため、最も激しく、そして不思議な天体現象の解明に貢献できると期待されています。

こうした宇宙からのメッセージが人類にもたらすものは何でしょうか...

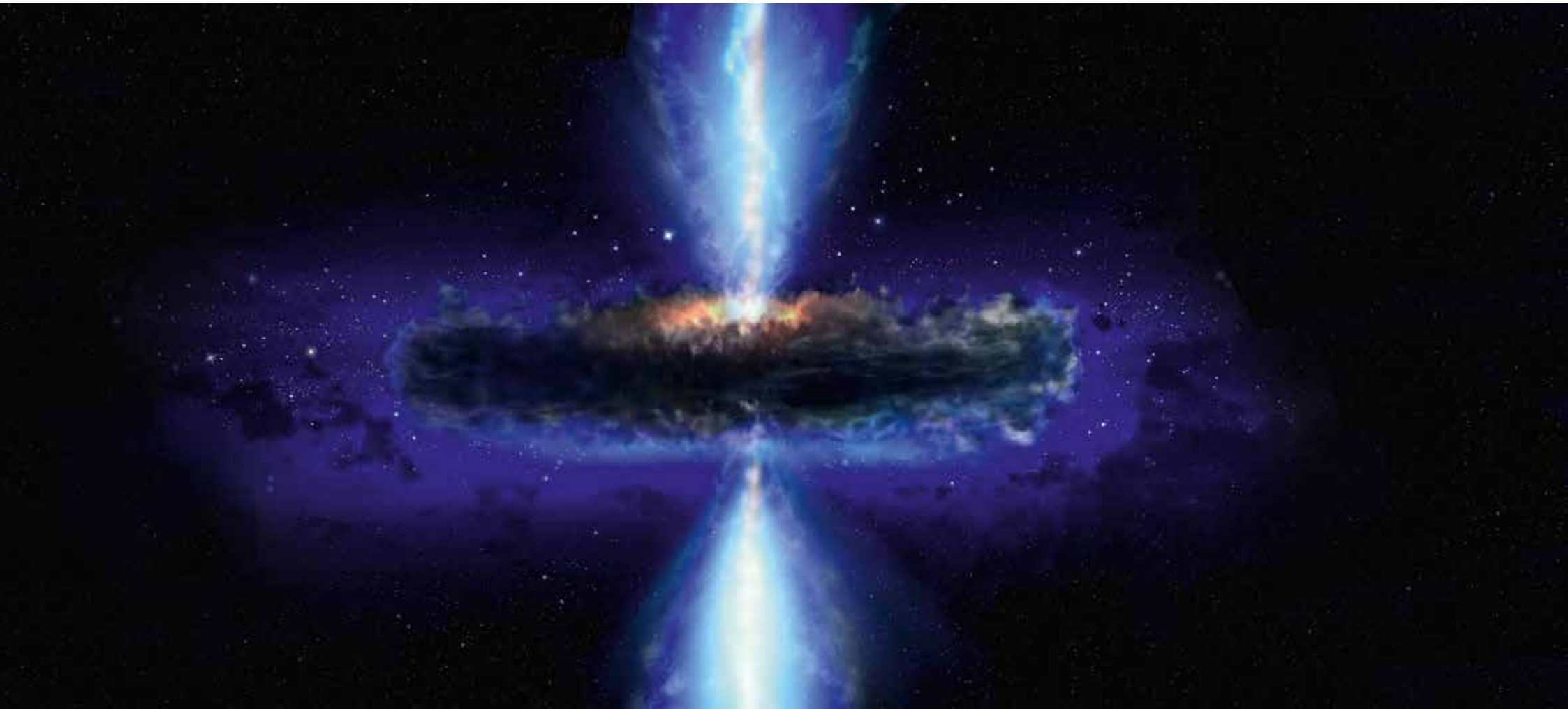


ガンマ線の誕生

数十億光年離れた銀河の中心には、太陽の10億倍もの質量を持つ超大型ブラックホールがあり、その周りを物質とガスから成る超高温な円盤が取り囲んでいることがわかっています。この円盤が激しく回転すると、円盤は周囲の星よりも明るく輝き、銀河をも軽く飛び越すほど高エネルギーのジェット流を放出します。

ガンマ線は、このような極限的な環境の中で生成されることが知られています。

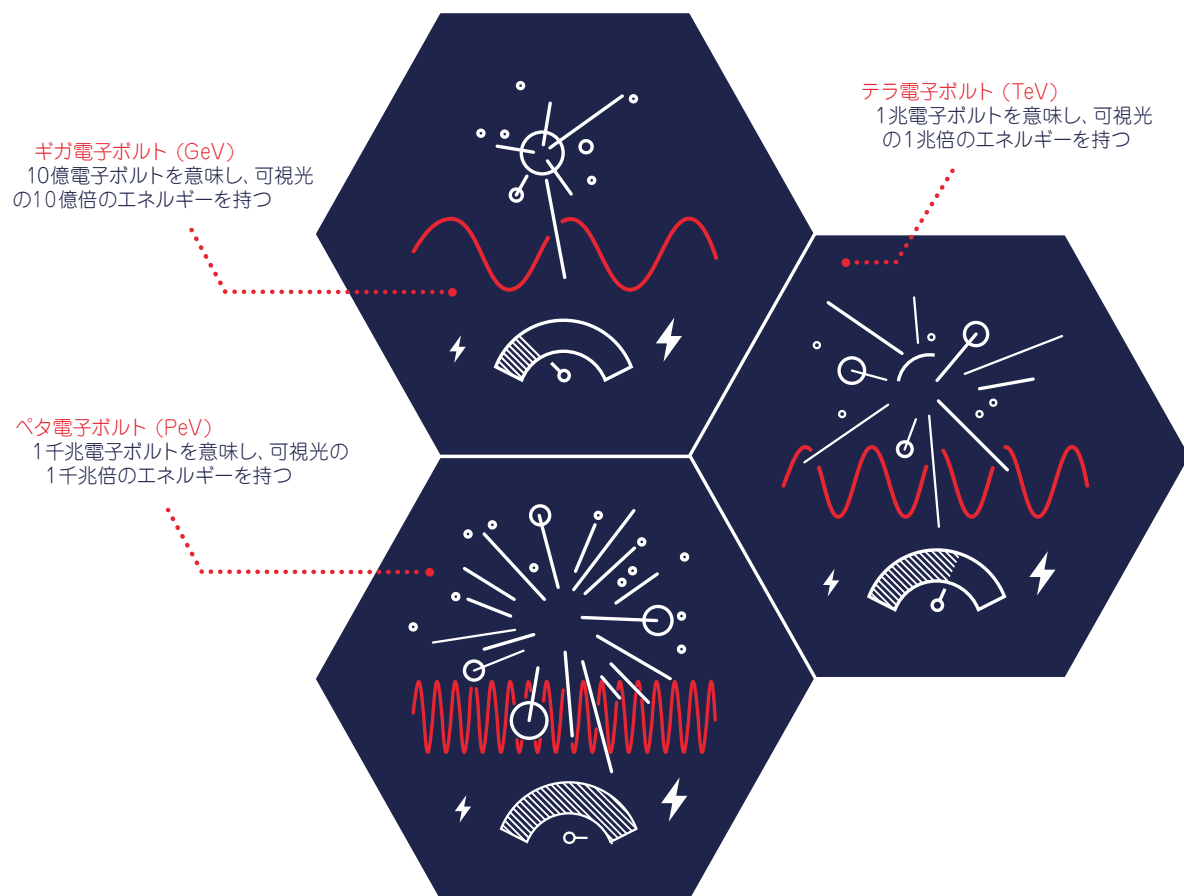
image credit:
ESA/NASA



しかし、このような超大型ブラックホールでさえ、ガンマ線を直接、放出しているわけではありません。ガンマ線は、激しい天体現象に伴う極限環境の中で加速された原子核より小さな粒子（陽子または電子など）によって放出されています。また、爆発や強力なジェット流といった現象は、粒子をほぼ光の速さにまで加速しますが、これらの粒子が極限環境の内外、または星間空間中に存在する物質や光子と衝突することでも、ガンマ線は放出されます。これらのガンマ線は真っ直ぐに進み、遥か遠くの銀河まで届くので、こうしたガンマ線を検出することにより、ガンマ線がどこで生成されたのかを知ることができるのです。

CTAは、銀河系内の天体のうち、超新星爆発の残骸（超新星残骸）、超高密度天体が急速に回転することで生成される星雲（パルサー星雲）、連星系や大規模集団中の恒星などを観測する予定です。また、銀河系外の天体としては、星形成銀河や、大質量ブラックホールが中心に存在する銀河（活動銀河核）、銀河団を観測する予定です。

天体のほかにも、暗黒物質の発見や、特殊相対性理論の破れ、宇宙の超空洞（ボイド）の正体について、確かな情報が得られる可能性があります。



CTAは、最大300 TeVのエネルギーまで観測が可能のため、電磁スペクトルの上限値を押し上げ、宇宙に関する全く新しい視点をもたらすことが期待されます。電子ボルト (eV) とは、一般的に使用されるエネルギーの単位ですが、CTAが検出するガンマ線は、数十億から数兆 eVのエネルギーが想定されています。

高エネルギーフロンティアを超えて

もしも人類の祖先が、水平線を越えて航海し、遠くの国と交流を持たなかったら、どんな世界になっていたでしょうか。新しいことに疑問を持ち、それらに挑む勇気を持たなければ、私たちの世界、そして宇宙に対する理解は、今よりも遥かに浅くなっていたでしょう。



最近の観測で少しずつ明らかになって来たことですが、地上ガンマ線天文学は、多くの未知の可能性を秘めた新しい分野です。天体に関する知識に加え、CTAの優れた性能を駆使すれば、新しいガンマ線天体の発見だけでなく、基礎物理学や宇宙物理学における多くの謎の解決にも貢献できるはずです。

CTAは、宇宙物理学と基礎物理学における幅広い問題に取り組むことができる稀有なプロジェクトであり、高エネルギー宇宙の世界に革新をもたらすことが期待されています。

CTAを用いた研究テーマは、主に次の三つが挙げられます。

- I. 相対論的宇宙線粒子の起源と、その役割についての理解
- II. 極限宇宙の研究
- III. 物理学フロンティアの探究



CTAの研究内容について、詳しく知りたい方はこちらをどうぞ。

I. 相対論的宇宙線粒子の起源と、その役割についての理解

地球は、高エネルギーの陽子、および原子核から成る宇宙線の放射に常にさらされていますが、これらの宇宙線の起源や生成機構は完全には解明されていません。

銀河系内における宇宙線の加速機構は、世界最高エネルギーの粒子加速器である欧州共同原子核研究機構（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）より、はるかに高いエネルギーまで陽子や電子を加速することができます。しかし、宇宙線は電荷を持っており、宇宙空間中の磁場の影響でランダムに軌道を変えるので、その起源を探ることはほぼ不可能とされてきました。

一方、高エネルギー宇宙線の加速によって生成されるガンマ線は電荷を持たないため、磁場によってその軌道を曲げられることはありません。したがって、ガンマ線を検出することで、その生成源となる現象のイメージや、ガンマ線を生成する高エネルギー宇宙線についての情報を得ることができます。

CTAがカバーする、幅広いエネルギー範囲と世界一の角度分解能により、われわれは、銀河系内外の宇宙線源を探し出し、星の形成や銀河の進化の過程で起きている物理過程、さらにそこから生成される宇宙線について知ることができるのです。

CTAは、最大8度に及ぶ視野を持ち、高い機動力も併せ持っているため、広い宇宙領域を素早く探索し、ガンマ線を放出している天体を探し出すことができます。

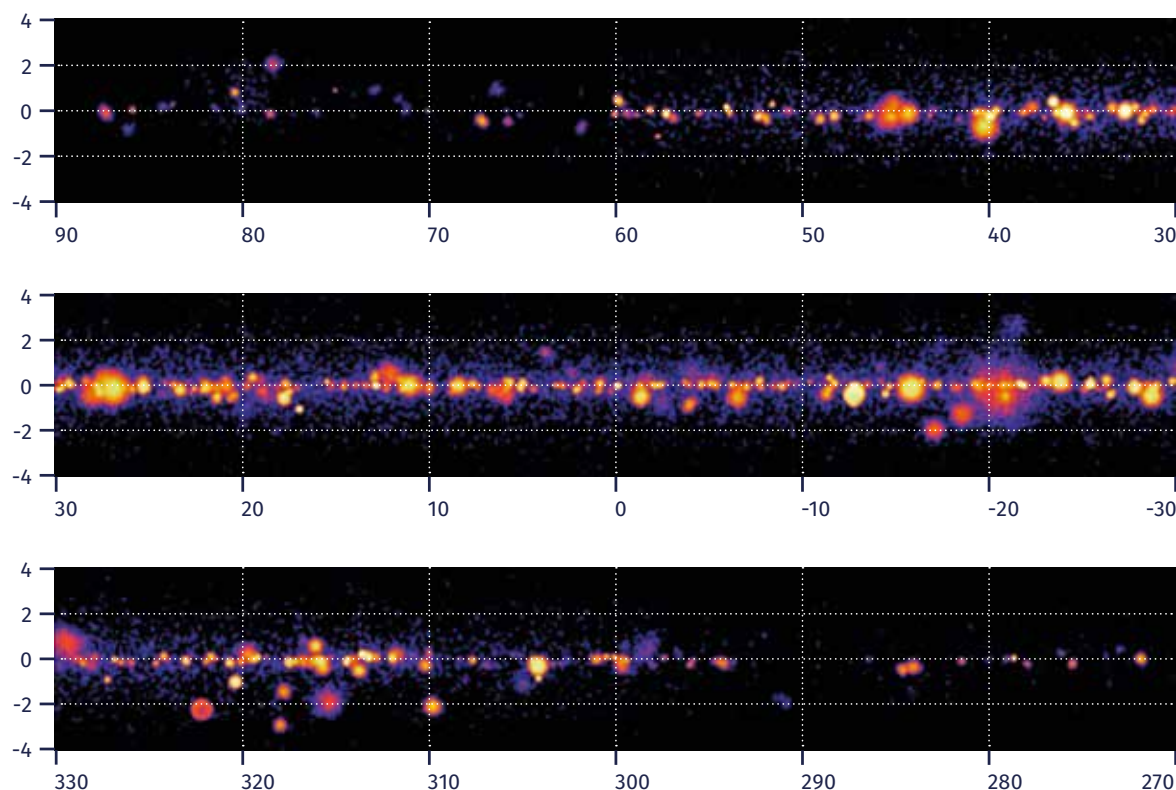
Target 1 銀河系 私たちの天の川銀河を調査

天の川は約200億個の星で出来ている回転円盤に例えられ、約9万光年の長さで1千光年の厚みがあります。銀河系の質量の大部分が集中する銀河面は、この厚みの真ん中にあり、ここに大部分の星が存在しています。

CTAでこの銀河面を調べることで、400個以上のガンマ線天体が見つかると考えられています。これらの大部分はこれまでのガンマ線観測では見つかっていない天体で、粒子を最高エネルギーにまで加速する物理過程、さらに粒子が加速場所からどのように移動してきたかについても知ることができます。粒子を高エネルギーにまで加速する天体の正体に迫ることで、天の川に多く存在するとみられる宇宙線の起源をつきとめることができるのです。

x = 銀経（度）

y = 銀緯（度）



左図: シミュレーションによって得られた、CTAの銀河面観測の画像。

CTAは、1分角に近い角度分解能を持つので、多くの宇宙線源を明らかにし、超相対論的粒子がこれらの天体内外にどのように分布しているのかを解明することができます。

image credit:
NASA/ESA/A. Fruchter/ERO

Target 2 大マゼラン雲 銀河系から最も近い銀河

銀河系の衛星である大マゼラン雲（Large Magellanic Cloud, LMC）は、銀河系から最も近い銀河の一つであり、星形成領域、星団、パルサー星雲、超新星残骸といった天体を含む特徴的な銀河です。

CTAでLMCを観測することにより、宇宙線が星間物質へ放出されてから銀河を脱出するに至るまでの道筋を解明できると考えられています。



大マゼラン雲の可視光およびH.E.S.S.望遠鏡によるガンマ線画像と、シミュレーションで得られたCTAによるガンマ線画像の比較

Target 3 銀河団 新たな発見の宝庫

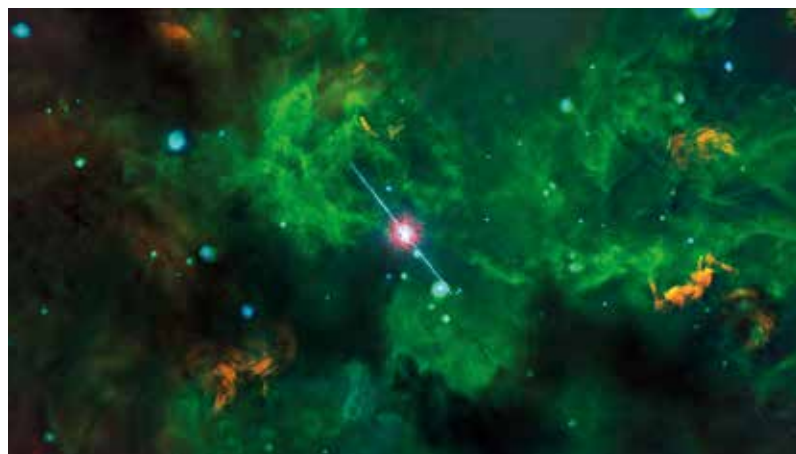
銀河団には数千もの銀河が存在しますが、ここでは銀河団の形成過程や、いくつかの銀河の中心に見られる活動銀河核（Active Galactic Nuclei, AGN）によって加速される宇宙線の存在が予測されています。宇宙線は、銀河団内の冷却流を抑制する上で重要な役割を果たすと考えられていますが、その確証は得られていません。

CTAが観測を計画する銀河団の一つに、熱い物質の“泡”を放出するAGNを含む銀河団“Hydra A”があります。宇宙線はこの“泡”が生成される際に、副次的に加速され则认为されており、ガンマ線も同じ仕組みで放出されている可能性があります。CTAがこれらのガンマ線を検出することができれば、この“泡”における宇宙線の加速と、ガンマ線が銀河の進化において果たす役割を知ることができます。

CTAが検出するガンマ線は、地球を周回する観測衛星によって検出されるX線またはガンマ線のエネルギーを、遥かに超えるエネルギーを持っています。このようなガンマ線は、宇宙で最も激しい環境における物理過程の情報を含んでいます。

とくに、大きな星が一生を終えて爆発するときに生まれるブラックホールや

中性子星は、とくに興味深い天体です。今までにブラックホールのジェット流からのガンマ線が多く検出されていますが、この放出機構は完全には解明されていません。CTAの性能により、これまでにない高い精度でこの問題にアプローチできる可能性があります。



Target トランジェント天体 未知の情報が多く、予測できないほど激しく活動

宇宙には、大規模かつ予測不可能な形で、爆発やフレアといった激しい活動を見せる天体が多く存在しています。これらは電磁波スペクトルの全体で観測され、時間変動は数ミリ秒から数年まで幅広く分布しています。こうしたトランジェント天体と呼ばれるものの多くは、高エネルギーガンマ線の放射が顕著であることが知られており、宇宙線、ニュートリノまたは重力波などの発信源である可能性が高いです。トランジェント天体は科学的にも興味深い天体であり、宇宙の極限的な物理環境に存在する中性子星やブラックホールなど、相対論的でコンパクトな天体が引き起こす壮絶な現象に関連していると考えられています。

CTAは超高エネルギー（Very-High Energy, VHE）ガンマ線に対して非常に優れた感度を持つため、宇宙のトランジェント天体の中で起きている物理を解明するだけでなく、全く新しい種類のトランジェント天体を発見する可能性をも秘めています。

CTAは、20 GeVというエネルギー下限値を持っており、遠方の宇宙におけるトランジェント天体を、これまでにない精度で検出することができます。



image credit:
NAOJ; NAOJ; ESO/A. Roquette;
ESO/L.Calçada

III. 物理学フロンティアの探究

CTAは10%のエネルギー分解能を持つので、暗黒物質を構成する粒子同士の対消滅と関係があるスペクトルの特徴や輝線を見つけることができます。

CTAは、ガンマ線望遠鏡の感度と検出可能なエネルギー領域を大幅に改善することにより、基礎物理学における発見、すなわち新たな宇宙の基本法則の発見をもたらすと期待されています。

具体的には、暗黒物質の発見やアクシオンのような粒子の存在を確かめ

ること、さらにアインシュタインの特殊相対性理論の破れを検証できる可能性があります。このことはすなわち、CTAが素粒子物理学と宇宙論に革命をもたらす可能性があることを意味します。

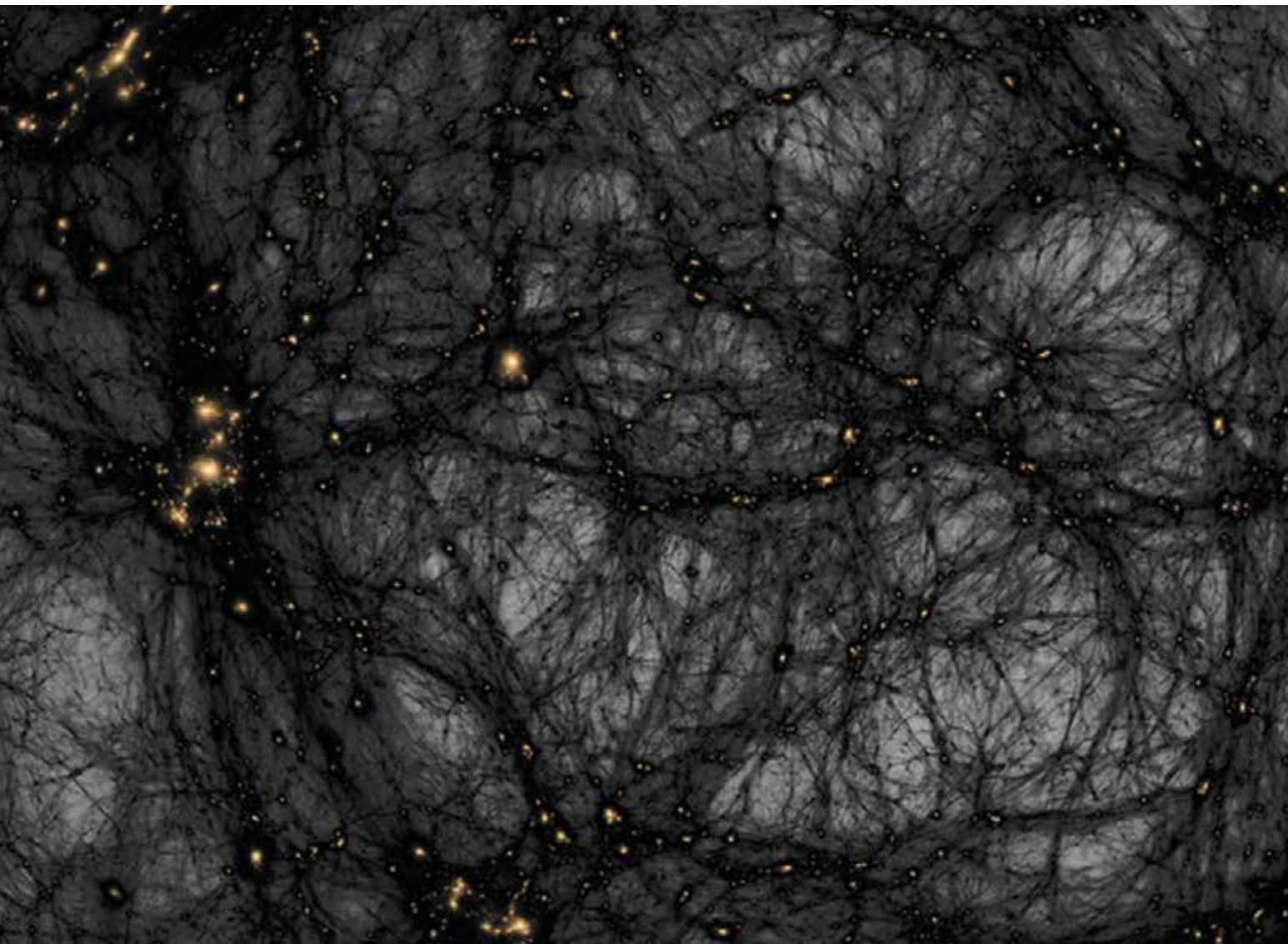
Target 1 暗黒物質 現代科学における最も大きな謎の一つ

暗黒物質は、宇宙の質量の多くの部分を占めると考えられていますが、その正体は現代科学における最も大きな謎の一つです。暗黒物質は、その重力作用によって存在が予測されており、通常の物質よりもはるかに多く存在すると考えられていますが、その性質についてはほとんど解明されていません。

CTAは、これまでにない高い感度で暗黒物質の発見に力を発揮し、未知の暗黒物質の素粒子物理学および宇宙物理学の性質の研究に大きく貢献できる可能性があります。

暗黒物質を構成する粒子は、弱い相互作用をする重い粒子（Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs）であると考えられていますが、CTAは、この粒子同士が相互作用して対消滅するときに生成されるガンマ線を検出することで、暗黒物質を発見を試みようとしています。暗黒物質の密度が非常に大きい場所、例えば銀河系の中心で、こうした対消滅がどれほど頻繁に起きるか、どこでその信号を探すべきかについては、理論モデルによって予測されています。しかし、稼働中のほかの検出器は、モデルによって予測される信号を検出するのに十分な感度を備えていません。これに対し、CTAは、十分な感度を有しており、フェルミ衛星やCERNの大型ハドロン衝突型加速器（LHC）、または地下深部にあるWIMPsの直接探査機による暗黒物質の探索と相補的な役割を果たします。これにより、今後10年以内に、暗黒物質という宇宙の大きな謎の一つを解決できる可能性があるのです。

image credit:
アメリカ自然史博物館

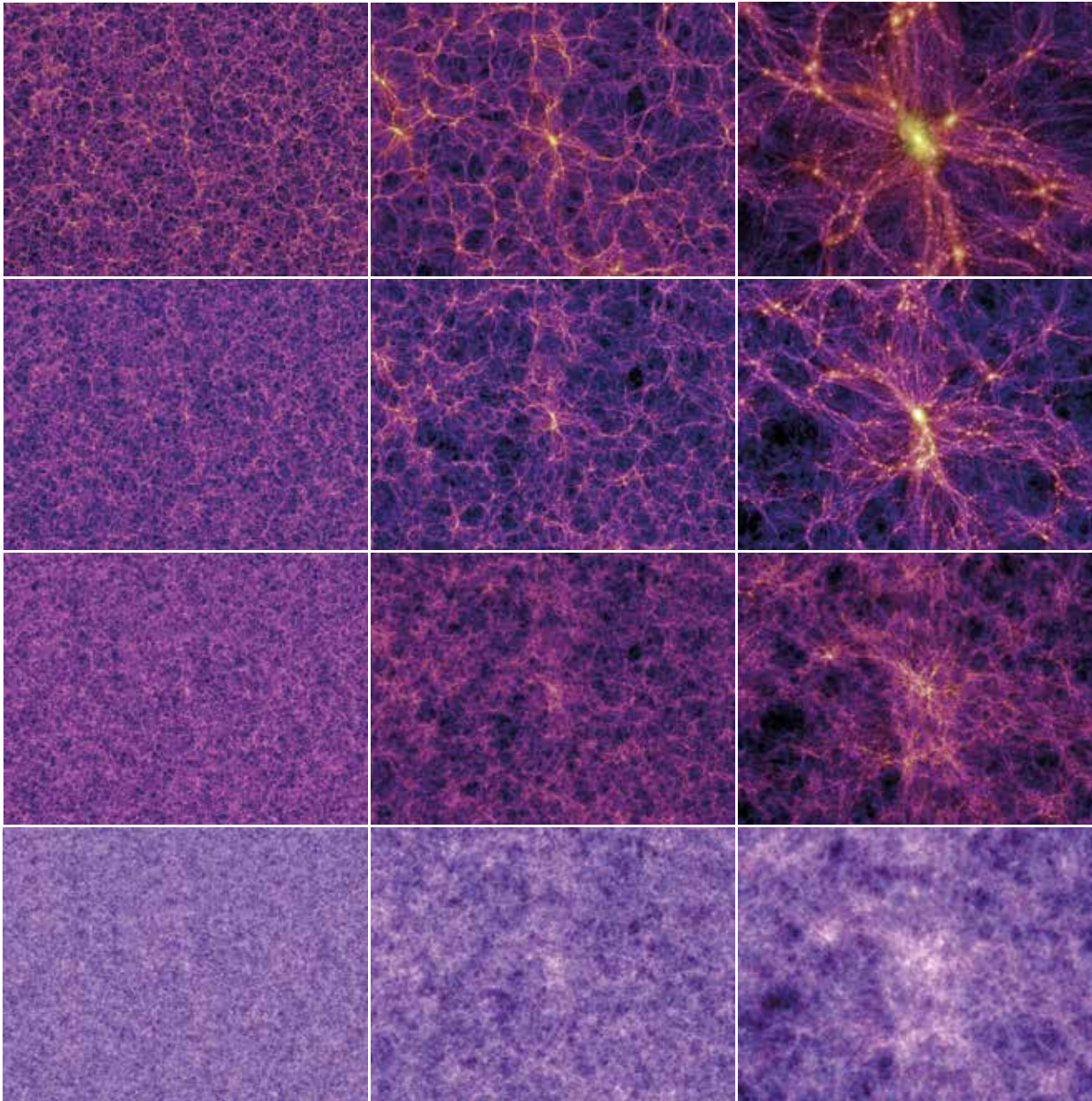


Target 2 銀河間のボイド (超虚空) 宇宙の未開拓領域

宇宙空間の大部分は何もない状態に近いとされています。物質は銀河団、超銀河団、フィラメント構造に集中しており、これらは巨大なボイドで隔てられています。このボイドが本当に空っぽなのかについては多くの議論があります。ボイドには、宇宙のはじまりの瞬間の痕跡が含まれていると考えられているからです。

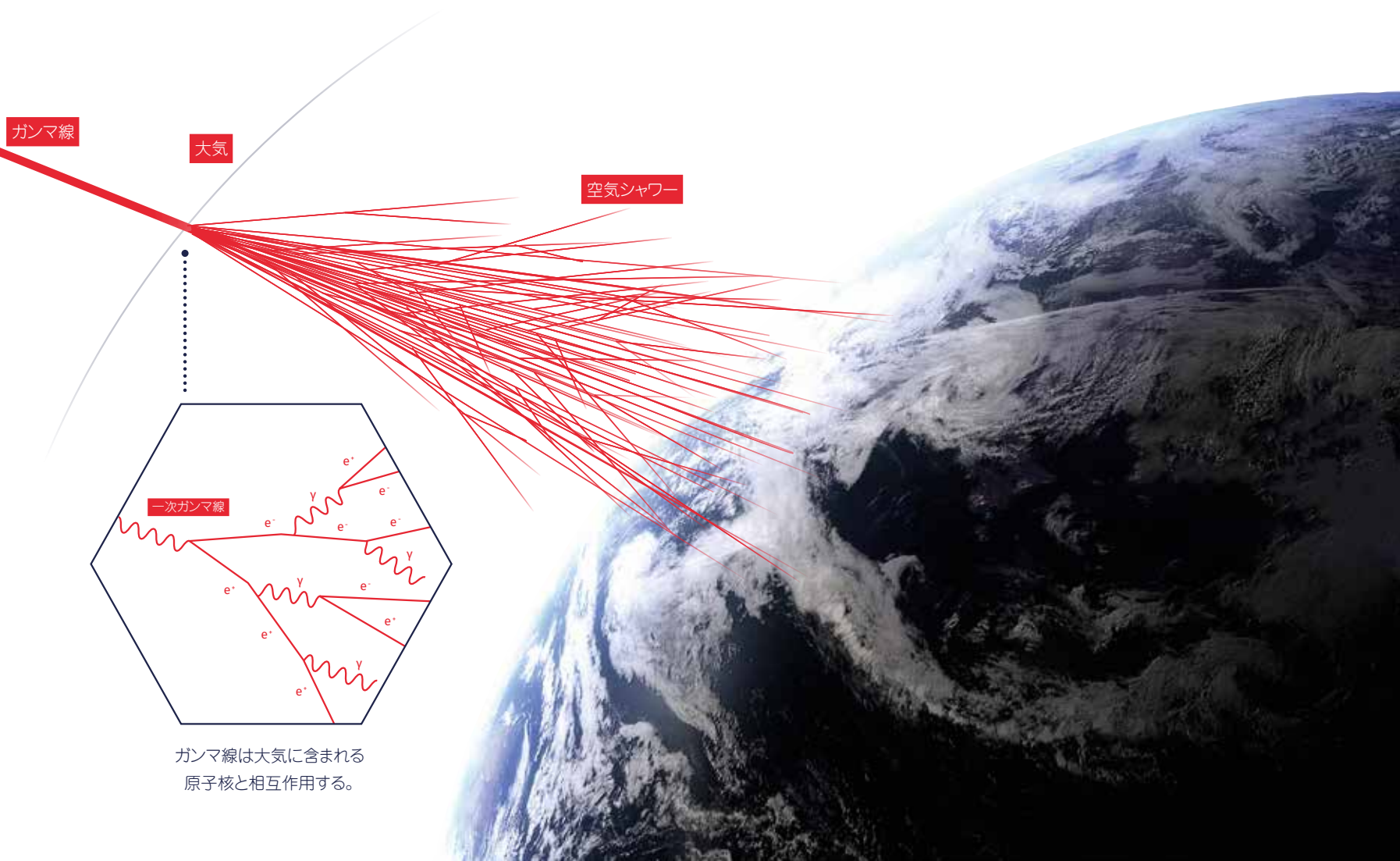
このボイドを調べるため、CTAは銀河団間の空間に存在することがわかっている銀河系外背景光 (Extragalactic Background Light, EBL) を調査します。EBLとは、宇宙の誕生以来、すべての銀河によって放出された光のことで、星がいかに形成されたかを知る手がかりが含まれているとされています。ガンマ線がEBLと衝突すると、スペクトル中に特定の痕跡が残ります。ガンマ線が相互作用すると、これらは二次粒子のカスケードおよび低エネルギーのガンマ線を生成します。これらのガンマ線の分布は、宇宙空間中の小さな磁場の影響を受けますが、この磁場をCTAで観測することにより、宇宙がどのように形成されたかについての洞察を得ることができるのです。

image credit:
マックス・プランク
宇宙物理学研究所



チェレンコフ光を用いたガンマ線の検出

ガンマ線がどのようにして生まれるのかについては、これまでの研究で多くのことがわかってきましたが、CTAは一体どのようにしてこれらのガンマ線を検出し、その起源について詳しく知るのでしょうか。実はCTAはガンマ線を直接検出することはできません。ガンマ線が地表まで到達することはないからです。



ガンマ線は大気に含まれる
原子核と相互作用する。

遠い宇宙の彼方からやってきたガンマ線は、地球の大気と相互作用し、空気シャワーと呼ばれる粒子のシャワーを生成します。どんな物質も真空中の光よりも速く進むことはできませんが、エネルギーの非常に高い荷電粒子が大気中に入ると、屈折率によって速度が落ちた光よりも速く進むことができます。この時、エネルギーの非常に高い粒子は、音速を超える航空機によって作られた衝撃波のように、青色の“チェレンコフ光”を放出します。チェレンコフ光は、1934年にロシアの物理学者パベル・チェレンコフによって発見されました。

ガンマ線によるチェレンコフ光は、直径 250 m という広い領域にわたって

放射されますが、チェレンコフ光は数億分の1秒程度しか持続しません。これは人間の肉眼で観測するにはあまりにも微弱ですが、CTAの望遠鏡が備える巨大な集光鏡や高感度の光センサーを駆使すれば検出することができます。チェレンコフ光がCTAの望遠鏡に到達すると、鏡がチェレンコフ光を反射し、この光をカメラで捉えることで、ガンマ線の痕跡を見つけることができます。カメラはこうした微かな光にも敏感に反応できるよう、非常に高性能の検出器を備えており、検出された光は電気信号に変換され、デジタル化されて転送され、画像として記録されます。



CTAの動作について、
詳しく知りたい方は
こちらをどうぞ。



激しい宇宙を探索する二つの眼

地球の大気に入射したガンマ線からの空気シャワーを捉えることは、「**干し草の山の中から一本の針を探す**」という古いことわざに例えられるほど難しいことです。

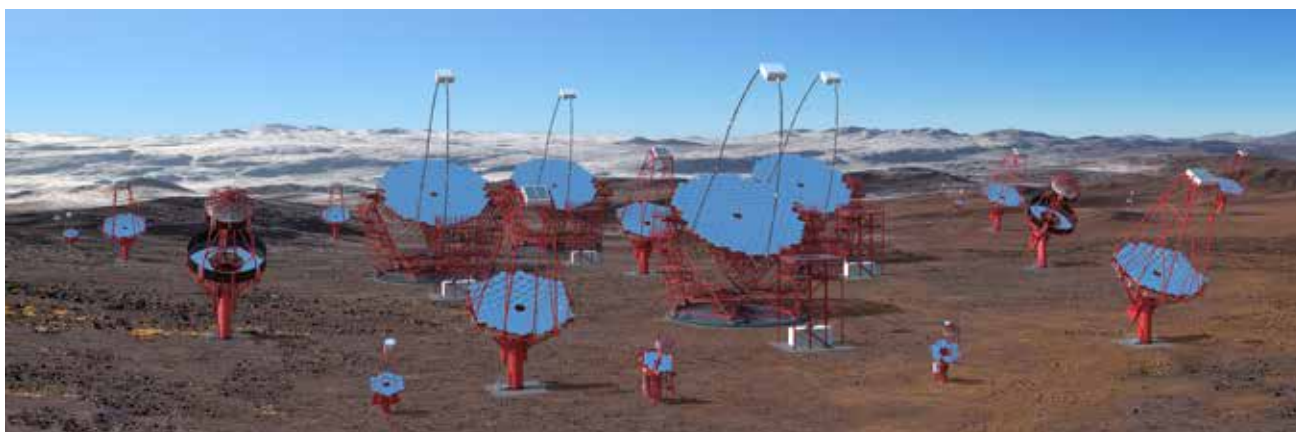


image credit:
Gabriel Pérez Díaz, IAC/Marc-André Besel, CTAO

ガンマ線が到来する頻度は、明るい天体からの場合、1平方メートルあたり、1年に一つ。暗い天体からの場合、1世紀に一つです。CTAは、ガンマ線の検出能力を向上させるため、100個以上の望遠鏡を北半球と南半球のアレイに分割して設置し、全天を観測できるようにする計画です。

北半球サイト

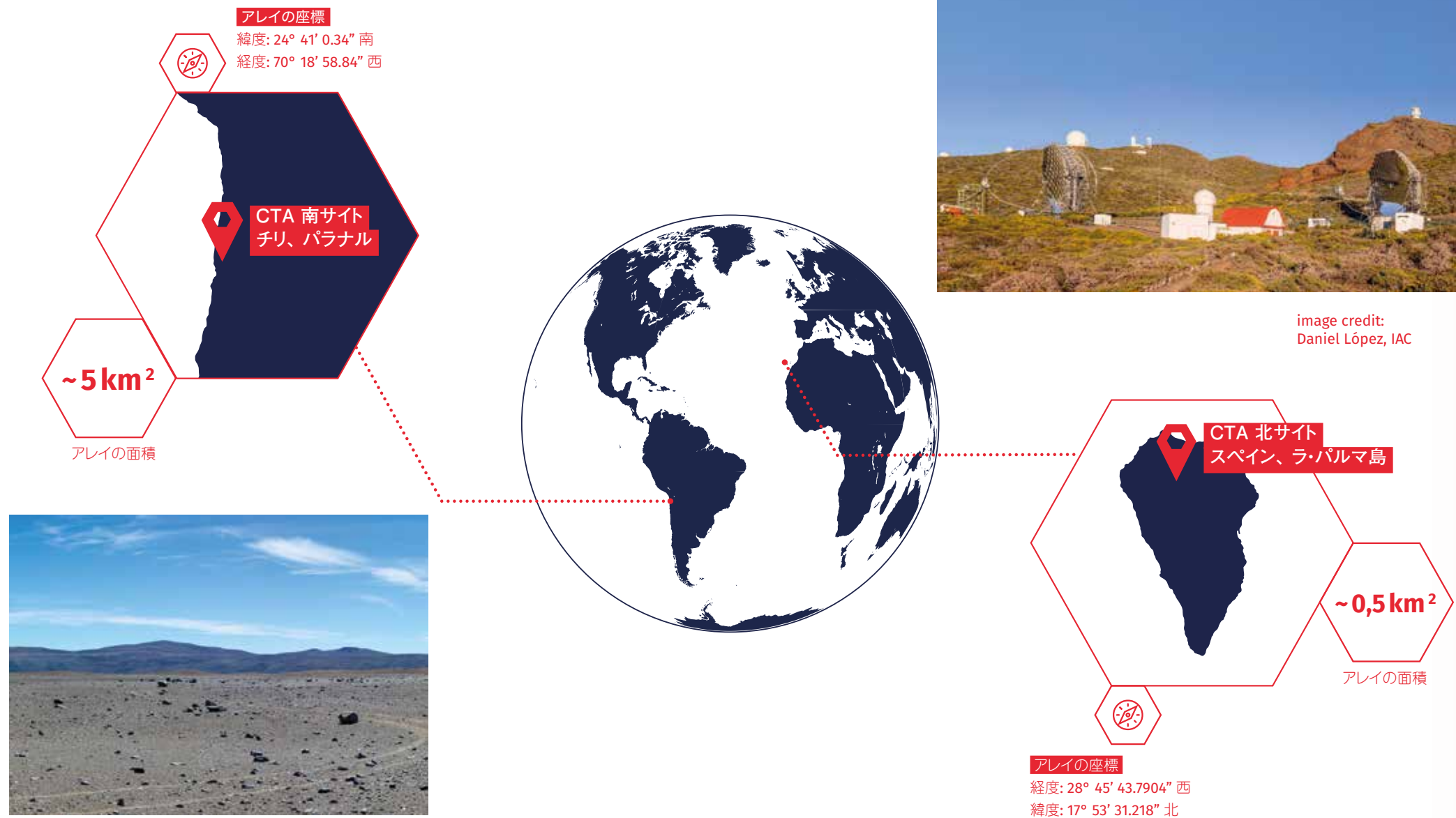
CTAの北半球サイトは、スペイン領・カナリア諸島のラ・パルマ島にあるロケ・デ・ロス・ムチャチョス天文台の中に位置しています。現在は活動していない火山噴火口の縁で、標高2,200メートルの高原です。ここには、CTAと同じガンマ線観測用のMAGIC望遠鏡2基がすでに稼働しています。北半球サイトのCTAアレイは、19基の望遠鏡で構成され、20 GeVから 20 TeVまでのエネルギー領域に焦点を当てた観測をする計画です。

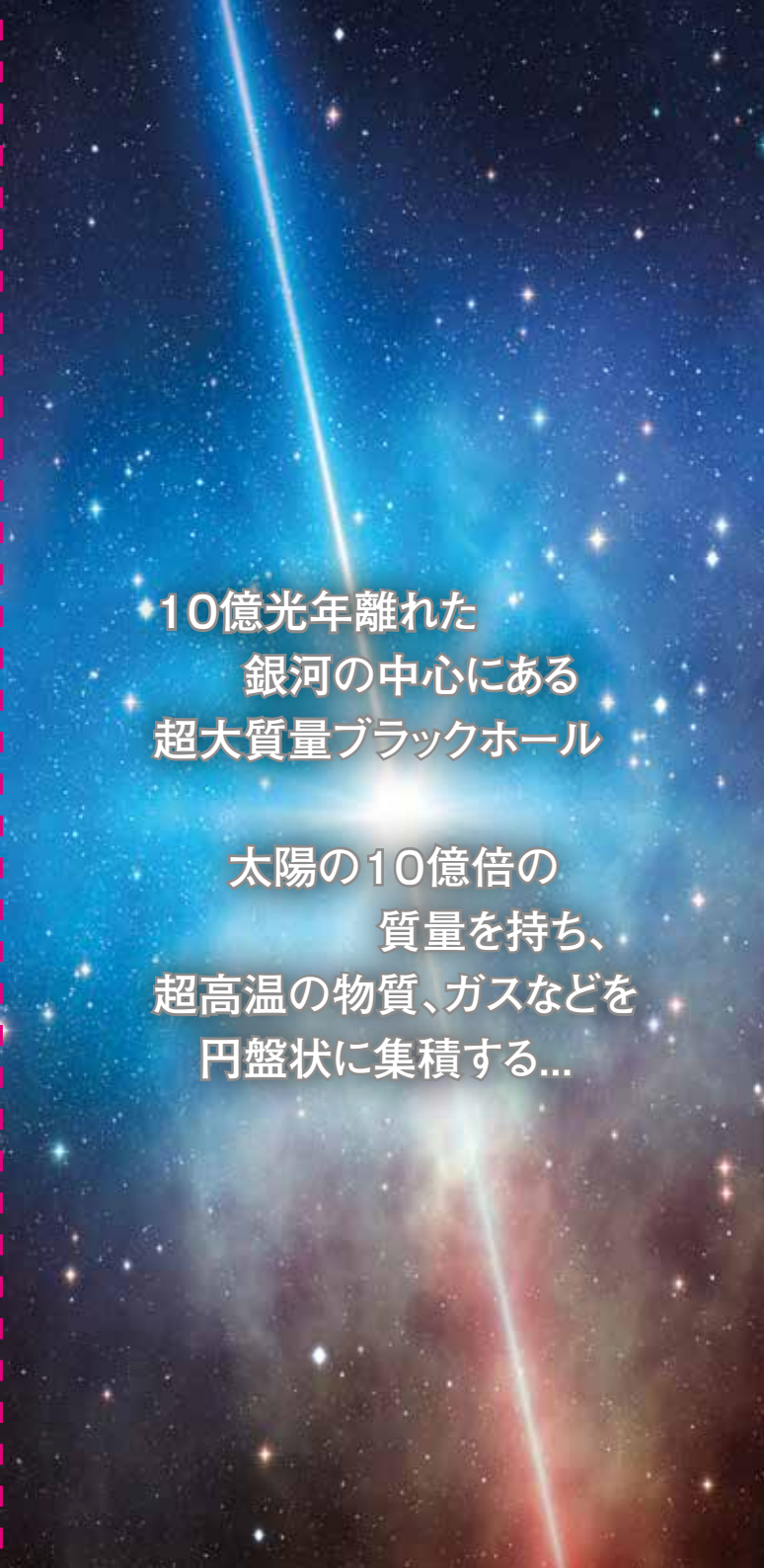
南半球サイト

CTAの南半球サイトは、南米チリ・アタカマ砂漠にあるヨーロッパ南部天文台（ESO）のパラナル天文台から南東10キロも離れていない位置にあります。このサイトは、地球上で最も乾燥しており、最も孤立した地域の一つであると考えられています。南半球サイトのアレイは、99基の望遠鏡を5平方キロの広さに配置するもので、CTAが予定する全エネルギー領域にあたる 20 GeVから 300 TeVまでの観測を行う計画です。

望遠鏡群(アレイ)のサイト位置

17





★ 10億光年離れた
銀河の中心にある
超大質量ブラックホール

太陽の10億倍の
質量を持ち、
超高温の物質、ガスなどを
円盤状に集積する...



超大質量ブラックホール

降着円盤

電磁放射



cherenkov
telescope
array

放射から 新発見までの 長い道のり

cherenkov telescope array

衝撃波

粒子加速

X線

電波

10億年後に地球に到達

高エネルギーガンマ線

地球の大気

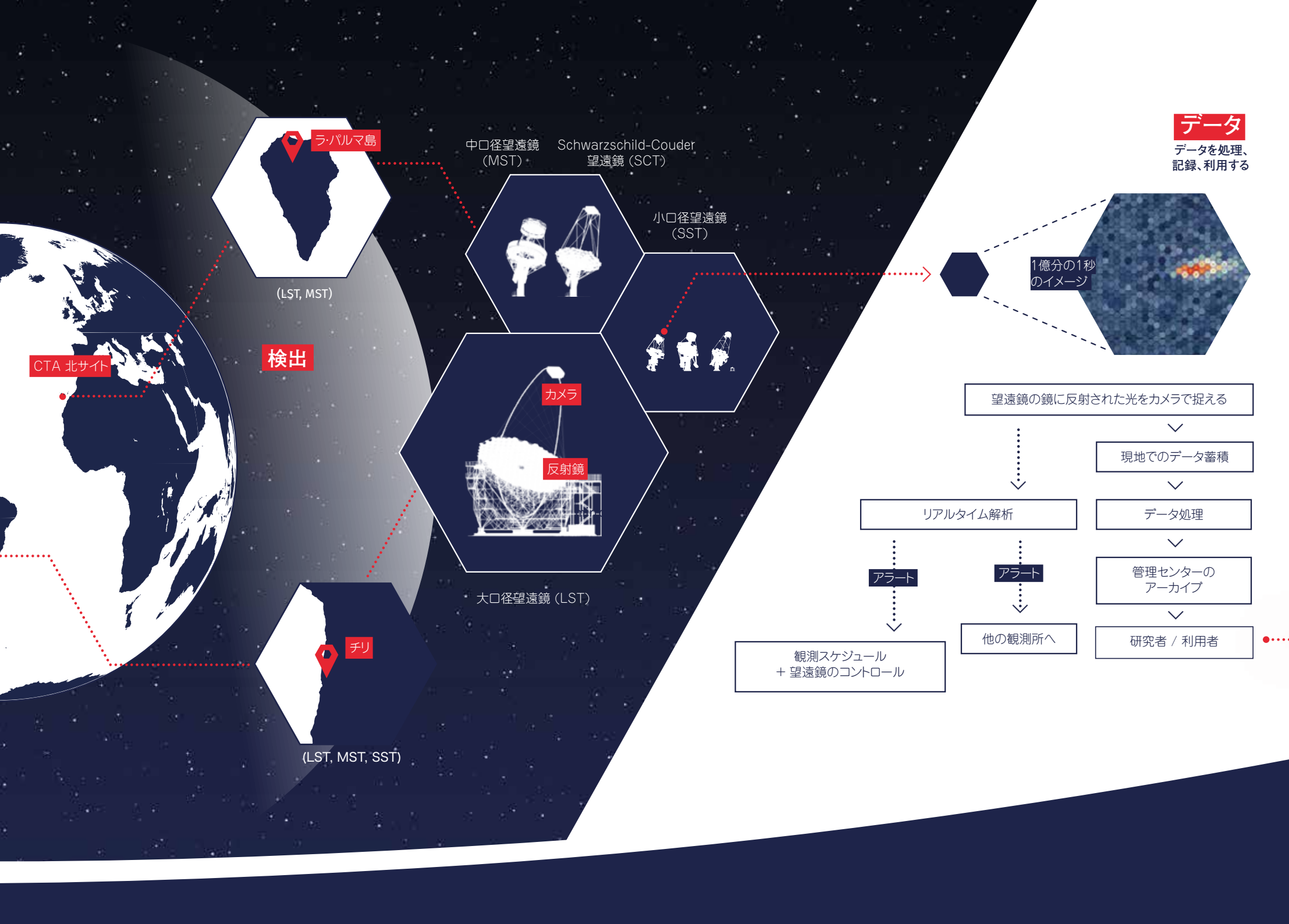
空気シャワー

CTA 南サイト

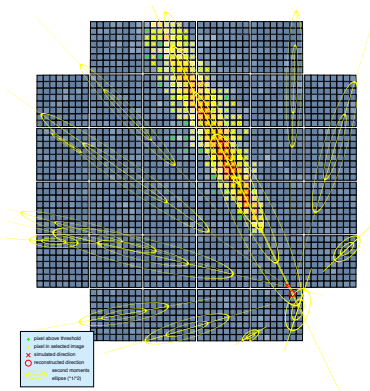
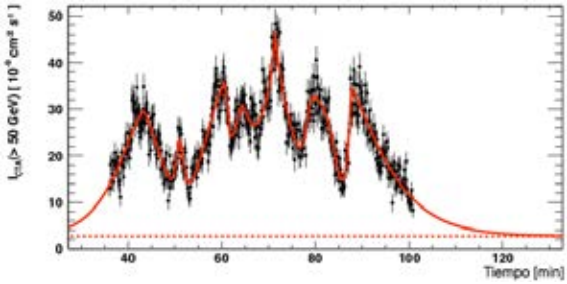
ガンマ線が大気と相互作用する

チェレンコフ効果





新たな発見



シャワーの再構築

website
facebook
twitter

www.cta-observatory.org
facebook.com/ctaobservatory
[@CTA_Observatory](https://twitter.com/CTA_Observatory)

A vertical cosmic background featuring vibrant nebulae in shades of orange, red, and green, with numerous bright stars scattered throughout. The text is overlaid on the left side of the image.

cherenkov telescope array

最先端
高性能
高い機動性

世界中で開発されたCTA技術

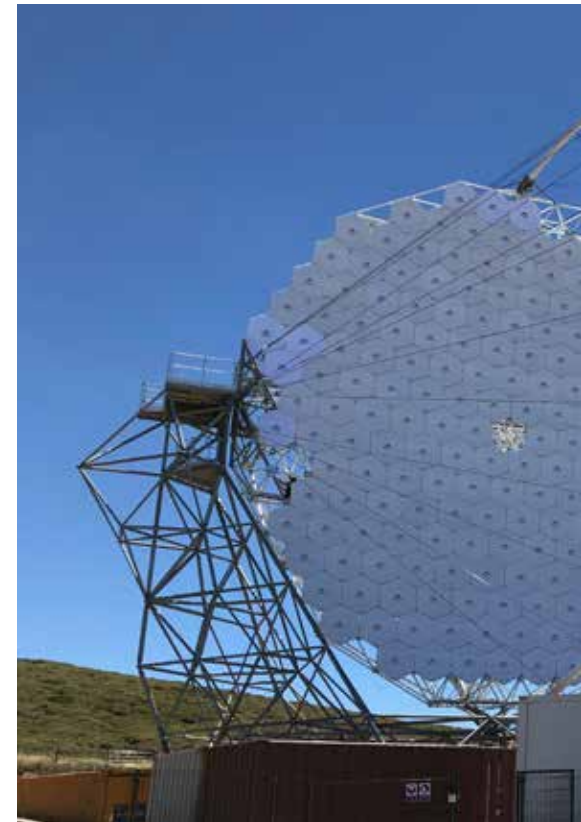


image credit:
CTA Collaboration

現在稼働中の地上望遠鏡は、高エネルギー宇宙への扉をわずかに開き、私たち人類に**未知の世界**を垣間見せてくれました。

CTAは、さらにこの扉を大きく開け放ち、**全く新しい宇宙の姿**を明らかにしてくれると期待されます。これは偉大なる躍進と言えます。

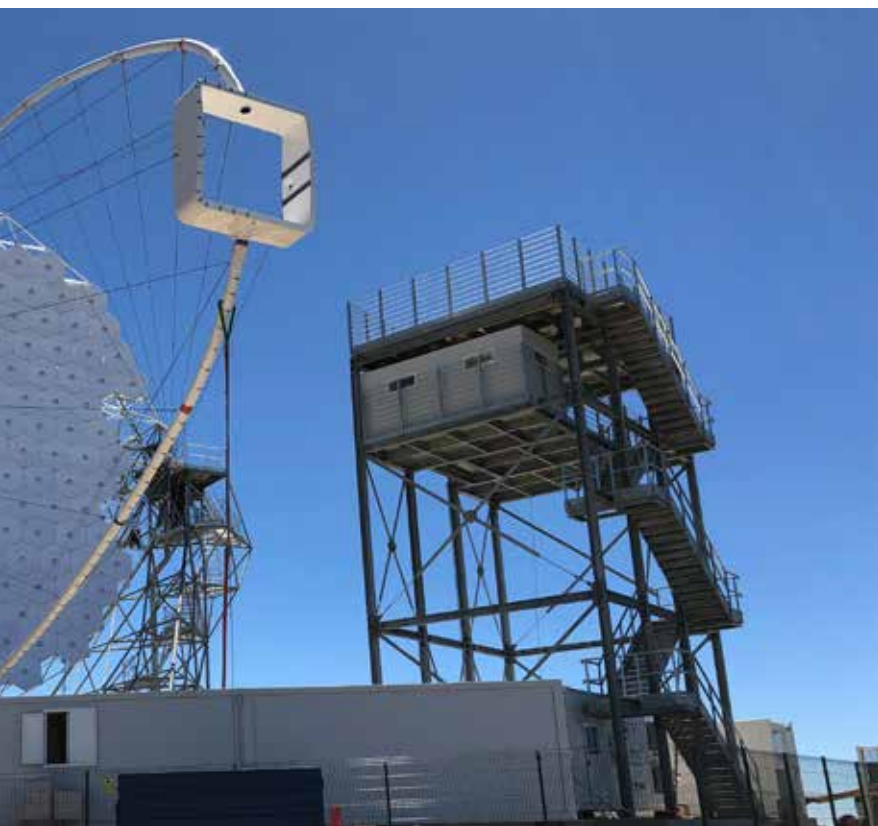
世界中の科学者と技術者たちが、CTAを計画し、次世代の観測装置を作るために10年以上努力を続けて来ましたが、どのようにして、こうした偉業を成し遂げようとしているのでしょうか。この疑問に簡単に回答するなら、知識と資源を総動員して最新鋭のチェレンコフ望遠鏡を完成させ、それをこれまでにないほど大量に設置するということなのです。

CTAの建設計画は大変、順調に進んでいます。2018年現在、大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) を含む全ての望遠鏡でプロトタイプが完成し、各サイトで最初の望遠鏡建設に向けたインフラ整備が進められています。

CTAが目指すエネルギー帯域である 20 GeV から 300 TeV をカバーするためには、3種類の望遠鏡が必要です。中心となる 100 GeV から 10 TeV のエネルギー帯域については、南半球と北半球の両サイトに40台の中口径望遠鏡 (Middle-Sized Telescope, MST) を設置する計画です。また、8台のLSTと70台の小口径望遠鏡 (Small-Sized Telescope, SST) は、それぞれエネルギー帯域を 100 GeV 以下、10 TeV 以下に押し広げます。

望遠鏡はそれぞれのエネルギー帯域をカバーするためアレイ内に配置されます。検出に大きな鏡を必要とする低エネルギーガンマ線イベントは、比較的頻繁に起こるため、近接した少数のLSTで検出します。一方、小さい鏡でも検出できる高エネルギーイベントは極めて稀なため、数キロメートルに渡って多数のSSTを配置する必要があります。MSTの広いエネルギー帯域はCTAのエネルギー領域の中域をカバーします。

CTAの3種類の望遠鏡は、可視光のエネルギーの数百億倍から数百兆倍の広いエネルギー帯域をカバーします。
(20 GeV から 300 TeV まで)



CTAの観測装置について、詳しく知りたい方はこちらをどうぞ。

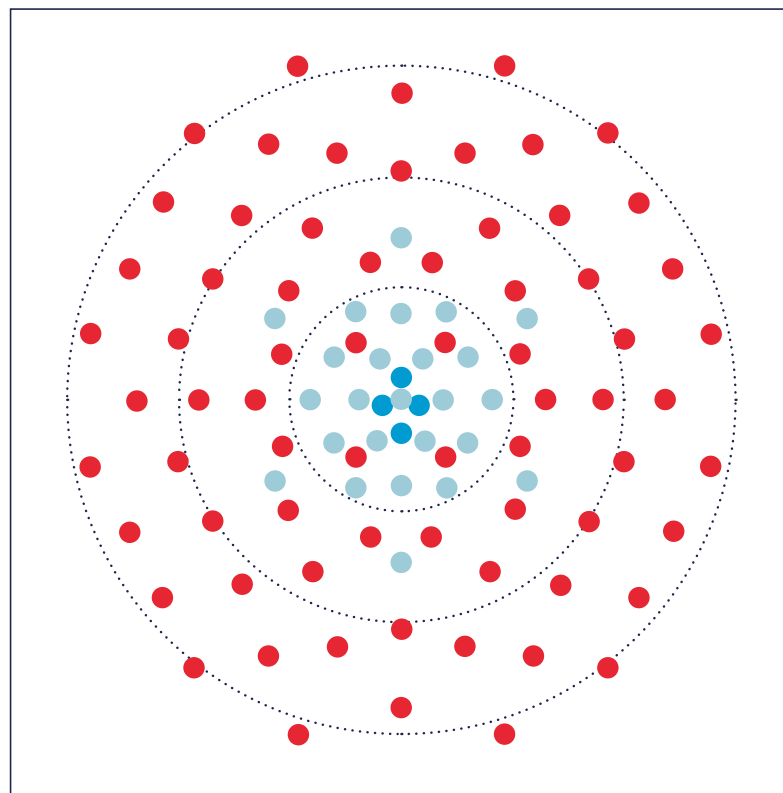


Small-Sized Telescope (小口径望遠鏡)

小口径望遠鏡 (Small-Sized Telescope, SST) は**三種類の望遠鏡の中で最も数が多く**、南半球のアレイでは**数平方キロの範囲に展開される計画**です。

南半球のアレイ **70基のSSTで構成**

CTAでは高反射率の分割鏡(直径90 cm から 2 m)を7000枚以上用いて、チェレンコフ光をカメラに集光します。



- Small-Sized Telescope (小口径望遠鏡), (SST)
- Medium-Sized Telescope (中口径望遠鏡), (MST)
- Large-Sized Telescope (大口径望遠鏡), (LST)

1000 m

点線の円の半径: 400 m, 800 m, 1200 m

超高エネルギーガンマ線による空気シャワーは、大量のチェレンコフ光を生成させるため、**最も高いエネルギーのガンマ線に感度を持つ**SSTの出番です。SSTの反射鏡は直径約4mで、8-9度という広い視野を持っています。現在3種類のSSTが試作されて試験中ですが、一つは一枚の鏡を用いた設計で、残り二つは二枚の鏡を用いた設計になっています。

SST-1Mは、直径4m、焦点距離5.6 mの六角形の反射鏡を使っています。プロジェクトチームは、**チェコ、アイルランド、ポーランド、スイス、そしてウクライナ**で構成されており、プロトタイプの試験がポーランドのクラクフで進められています。

SST-2M ASTRIは、二枚の鏡を用いたSchwarzschild-Couder構造の望遠鏡です。直径 4.3 mの主鏡は六角形に分割され、1.8 mの副鏡は一枚鏡となっています。**イタリア、ブラジル、南アフリカ**のチームがASTRIの設計に参加しています。2016年にイタリアのセラ・ラ・ナーブでプロトタイプの試験が行われ、2017年にチェレンコフ光が初めて検出されました。1905年にSchwarzschild-Couder構造が提唱されてから初めて、その能力が実証されたことになります。

SST-2M GCTも二枚の鏡を用いた設計の望遠鏡です。光学系の構造はASTRIとよく似ていますが、GCTの方が軽量なのが特徴です。4 mの主鏡と2 mの副鏡はそれぞれ六枚の花びら型に分割されており、観測しないときは折り畳んで保護することができます。GCTは、**オーストラリア、フランス、ドイツ、日本、オランダ、イギリス**のチームによって開発が進められています。プロトタイプの試験はフランスのムドンで行われ、2015年にCTAのプロトタイプの中では初めてチェレンコフ光の検出に成功しました。

SSTの主な仕様

エネルギー領域 1-300 TeV

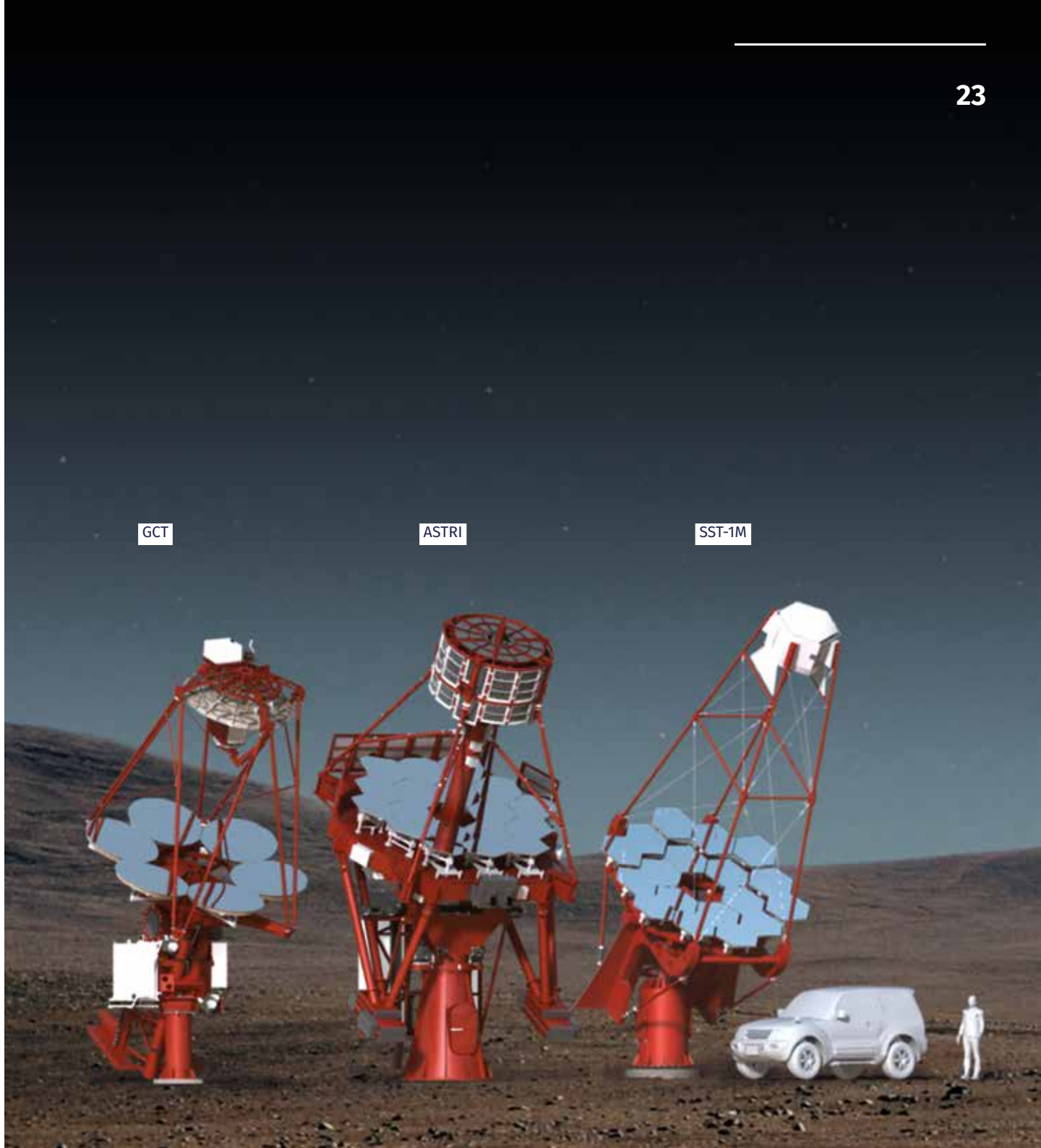
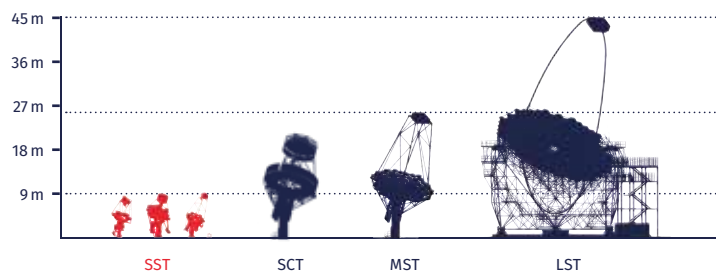
構造および光学上の仕様	ASTRI	GCT	SST-1M
反射鏡の形状	2-Mirror Schwarzschild- Couder	2-Mirror Schwarzschild- Couder	Davies-Cotton
反射鏡の直径	4,3 m	4 m	4 m
焦点距離	2,15 m	2,28 m	5,60 m
総重量	19 t	11 t	8,6 t

カメラの仕様

検出器のタイプ	シリコン 光検出器	シリコン 光検出器	シリコン 光検出器
ピクセル数	2,368	2,048	1,296
視野	10,5°	8,3°	8,8°

(数値は推定値です。)

大きさの比較



Medium-Sized Telescope (中口径望遠鏡)

中口径望遠鏡 (Middle-Sized Telescope, MST) は、南半球では25基、北半球では15基が、アレイの中心及びLSTの周囲に配置されます。MSTはCTAの主力で、CTAのエネルギー帯域の中間領域を担うことになります。

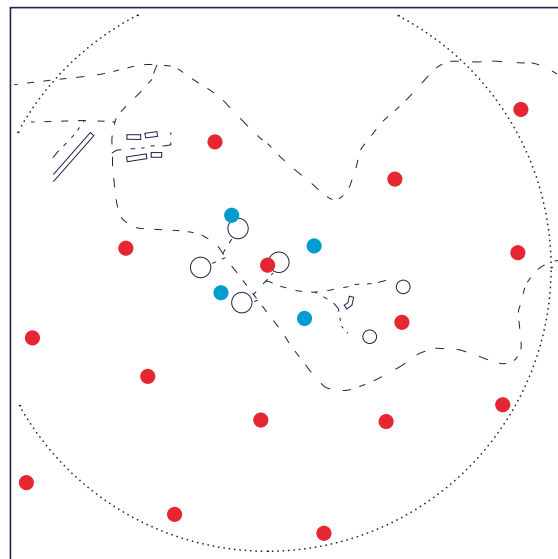
MSTの鏡の直径は 11.5 mで、カメラのデザインには2種類あります。視野は7.5-7.7度と広く、宇宙からやって来るガンマ線を迅速に探索することができます。オーストリア、ドイツ、フランス、ブラジル、ポーランド、スペイン、スイス、イタリアの研究所と大学の国際協力により設計され、建設が進んでいます。プロトタイプは2012年にベルリンに設置され、性能試験が行われて来ました。

二枚の鏡を用いたSchwarzschild-Couder望遠鏡 (SCT) が、MSTのも

う一つの選択肢として提案されています。SCTの二枚の鏡を用いた光学システムは、集光能力が向上するように設計されており、より詳細な画像を得るのと同時に、微かな光でも検出することができます。

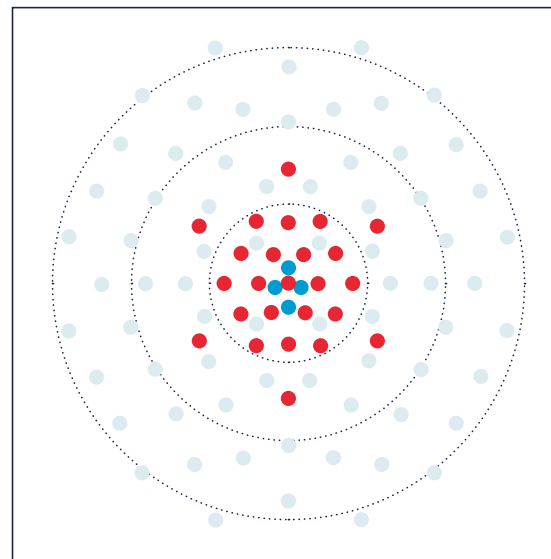
設計は2006年から、SST-2MおよびMSTのグループに加え、ドイツ、イタリア、日本、メキシコ、アメリカの研究所が協力して進めてきました。プロトタイプは、アリゾナのホイップル (Whipple) 天文台にあります。

北半球のアレイ 15基のMSTで構成



点線の円の半径: 400 m

南半球のアレイ 25基のMSTで構成



点線の円の半径: 400 m, 800 m, 1200 m

- Small-Sized Telescope (小口径望遠鏡), (SST)
- Medium-Sized Telescope (中口径望遠鏡), (MST)
- Large-Sized Telescope (大口径望遠鏡), (LST)

MST と SCT の主な仕様

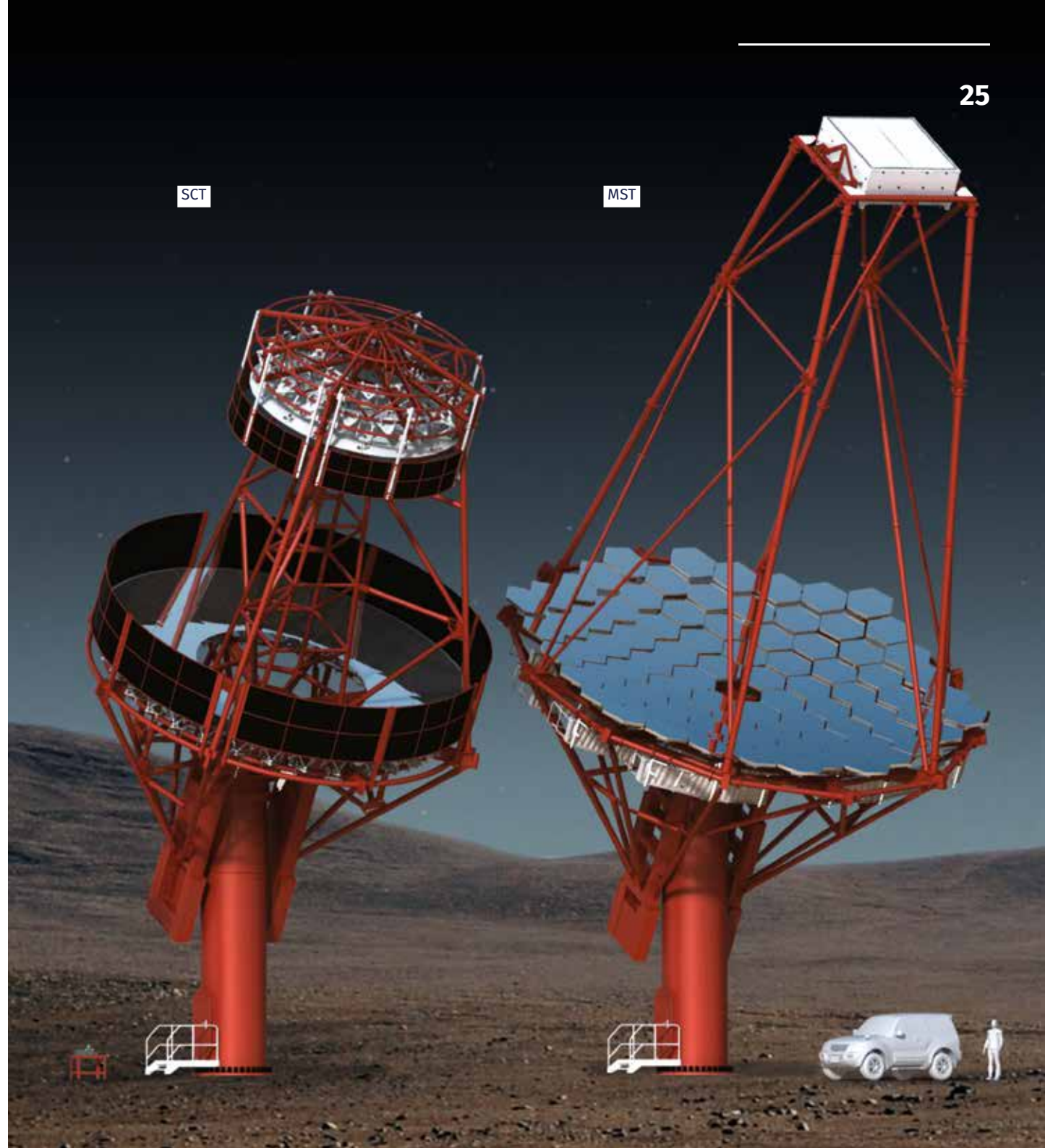
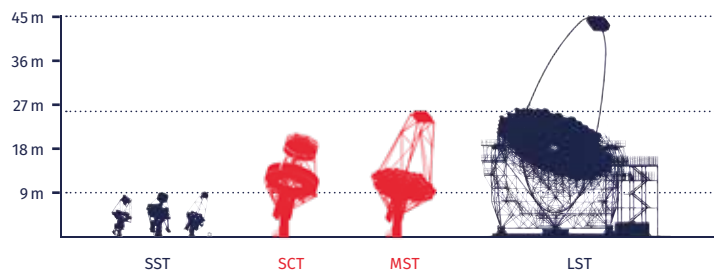
エネルギー領域 80 GeV - 50 TeV

構造および光学上の仕様	MST	SCT
反射鏡の形状	Modified Davies-Cotton	2-Mirror Schwarzschild-Couder
反射鏡の直径	11,5 m	9,7 m
焦点距離	16 m	5,6 m
総重量	82 t	80 t

カメラの仕様	FlashCAM	NectarCAM	SCT カメラ
検出器のタイプ	光電子増倍管	光電子増倍管	シリコン 光検出器
ピクセル数	1.764	1.855	11.328
視野	7,5°	7,7°	7,6°

(数値は推定値です。)

大きさの比較



Large-Sized Telescope (大口径望遠鏡)

南北両サイトのアレイの中心に、それぞれ**4台の大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST)**が、建設される計画です。

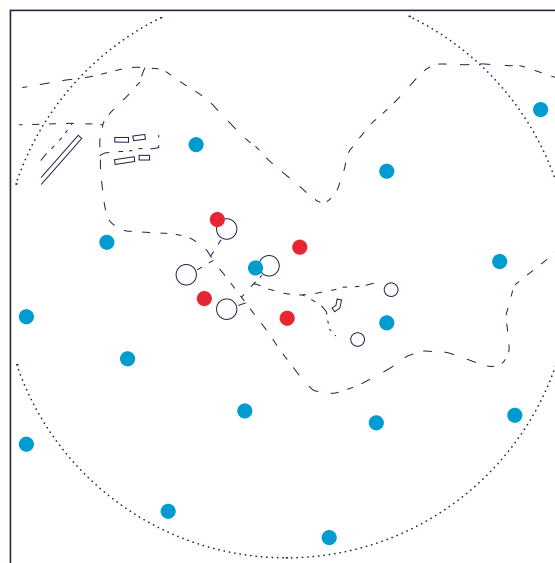
高さ 45 m、重さ 100 t のLSTは、CTAで最大の望遠鏡ですが、なぜこれほどまでに大きいのでしょうか。それは、低エネルギーのガンマ線が生成するシャワーは小さく、チェレンコフ光の光量も少ないため、光を捉えるために大きな反射鏡が必要となるからです。

LSTの反射鏡は直径 23 mで放物面を形成しており、カメラの視野は4.5度です。しかし、大きいからといって機動性が低いわけではありません。**わずかな時間しか光を放出しない低エネルギーガンマ線の信号を検出するため、**

この巨大な望遠鏡は、素早く向きを変えられるように設計されています。目標の天体の方向が決まれば、LSTは素早く方向を変え、20秒以内に新しい目標を捉えることができます。

設計・建設には、**ブラジル、クロアチア、フランス、ドイツ、イタリア、日本、ポーランド、スペイン、スウェーデン**の200人以上の科学者と技術者が携わっており、プロトタイプがラ・パルマ島のCTA北半球サイトに完成しました。

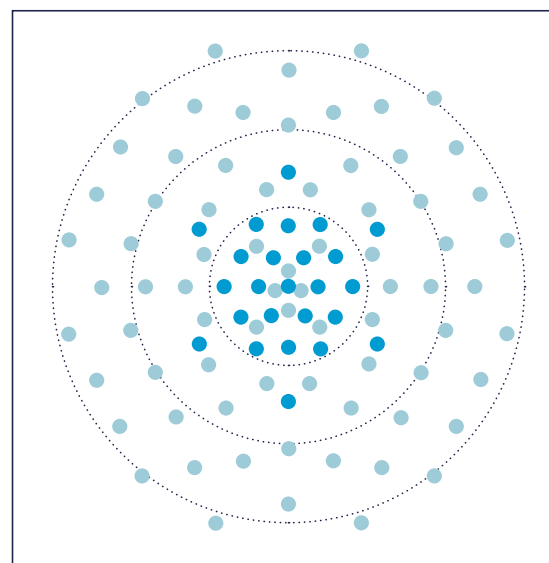
北半球のアレイ **4基のLSTで構成**



250 m

点線の円の半径: 400 m

南半球のアレイ **4基のLSTで構成**



1000 m

点線の円の半径: 400 m, 800 m, 1200 m

- Small-Sized Telescope (小口径望遠鏡), (SST)
- Medium-Sized Telescope (中口径望遠鏡), (MST)
- Large-Sized Telescope (大口径望遠鏡), (LST)

LST の仕様

エネルギー領域 20 GeV - 3 TeV

構造および光学上の仕様

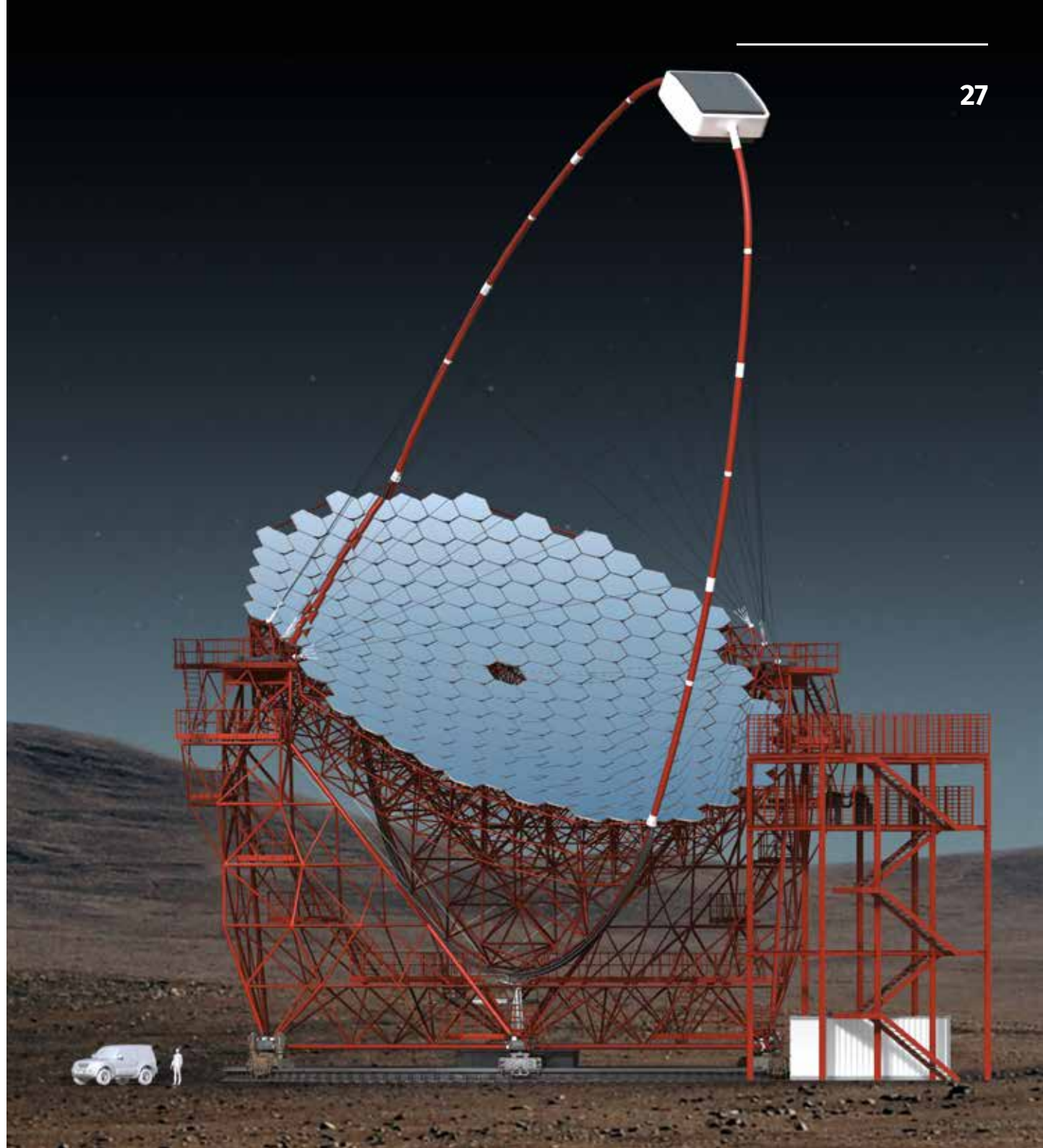
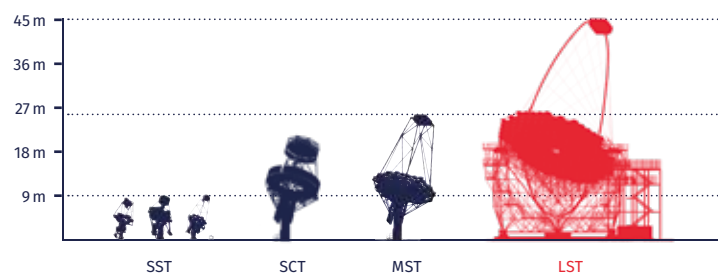
反射鏡の形状	放物面
反射鏡の直径	23 m
焦点距離	28 m
総重量	103 t

カメラの仕様

検出器のタイプ	光電子増倍管
ピクセル数	1.855
視野	4.3°

(数値は推定値です。)

大きさの比較



CTAカメラによる光の検出

ガンマ線が空気シャワーを生成した時に生じる微かな青いチェレンコフ光は、
わずか**数十億分の1秒**しか光を放ちません。

CTAに搭載されるカメラは、超高速光検出器であるPMTまたはSiPMを使用し、合計20万画素以上の画像を得ることに貢献できます。

CTAの反射鏡はこの光を集めますが、これを検出するのはカメラの役割です。カメラの設計は望遠鏡の種類によっても異なりますが、短時間の微かなチェレンコフ光を検出しようとしている点は同じです。

宇宙線やガンマ線が地球の大気と衝突したときに生じる短い光を検出するためには、望遠鏡のカメラは通常のデジタルカメラより、およそ100万倍も高速でなければなりません。これを実現するため、高速のデジタル化とトリガー技術が用いられ、シャワーの画像を1秒に10億回の速さで記録します。これは一つひとつの光子を見分けられるほど高速です。

カメラ内では、光電子増倍管 (Photomultiplier tube, PMT) またはシリコン光検出器 (Silicon Photomultiplier, SiPM) が設置されており、光を電気信号に変換し、さらにデジタル信号に変換・転送し、シャワーの画像として記録します。SiPMは、月が明るいときでも機能するセンサーで、CTAが月明かりの下でチェレンコフ光を捉える効率を向上させることができます。どちらも、従来の観測装置に用いられているセンサーより、効率的かつ高度なものに改良されています。

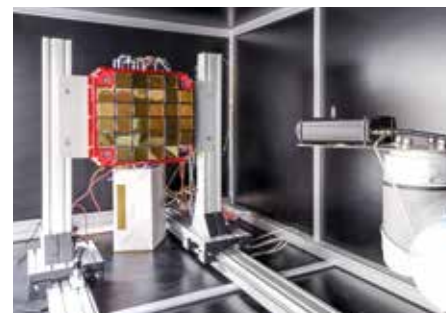
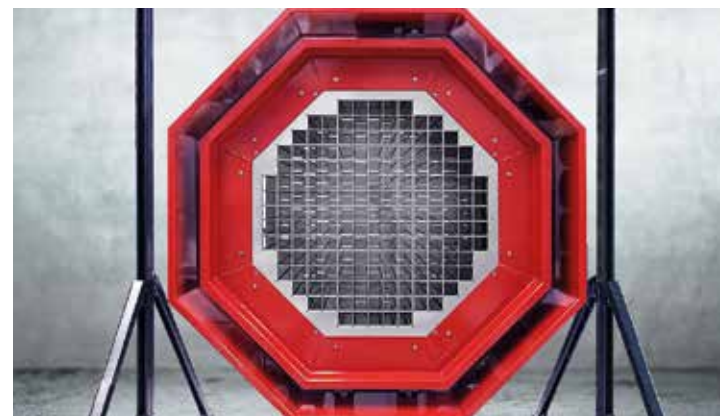
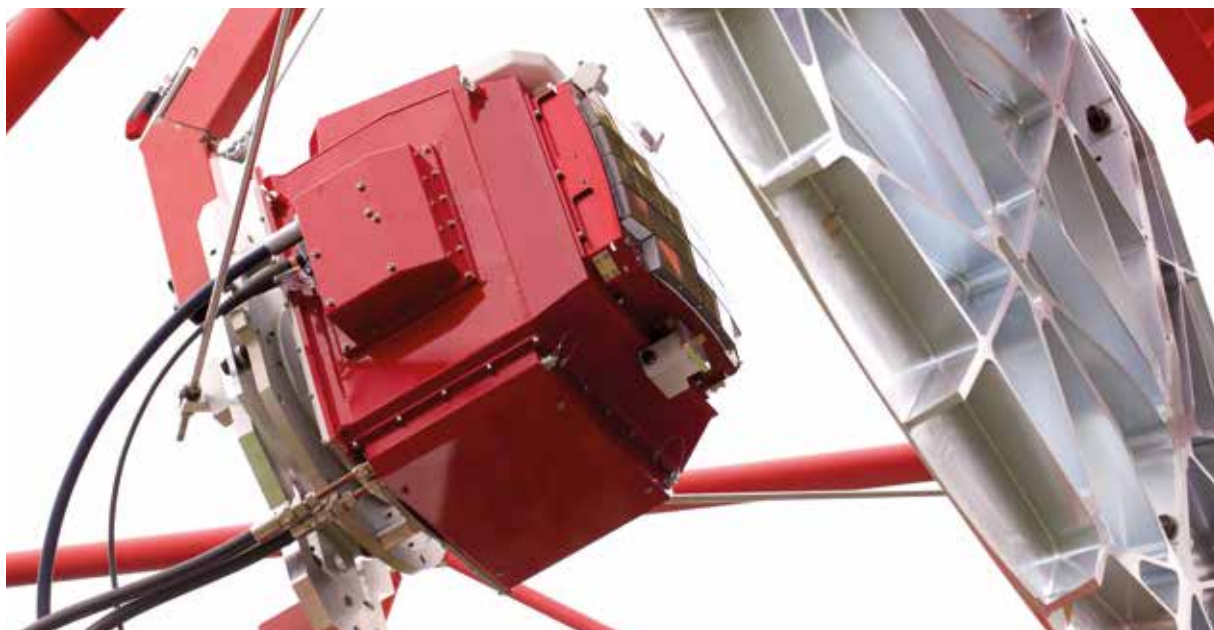


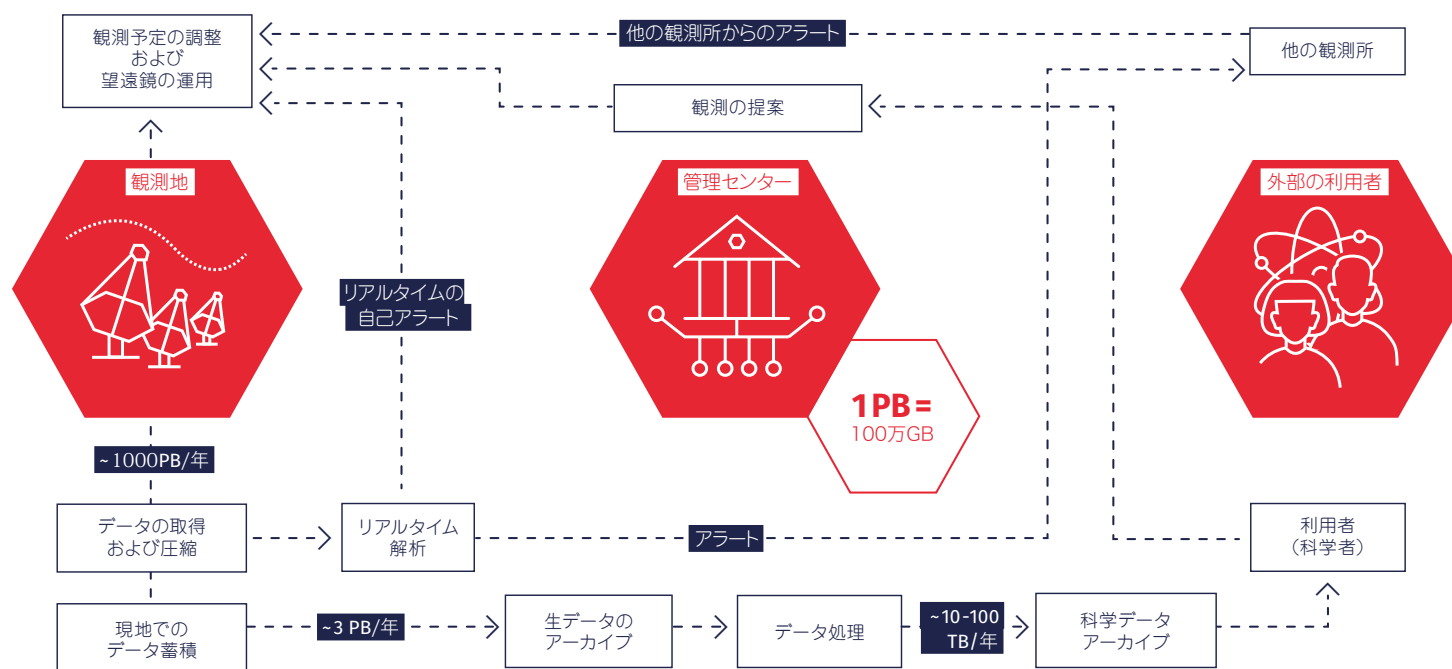
image credit:
奥村暁, CTA Collaboration

望遠鏡でシャワーのチェレンコフ光画像が記録されると、リアルタイムで行われる解析の前に、**余分な「ノイズ」が除かれ、データ量が小さくなります。**

もしリアルタイムの解析で予期せぬガンマ線信号が発見されると、アラート（警報）が出て、CTAの観測予定が変更されるとともに、ほかの観測所にも連絡が発信されます。この即時アラートシステムにより、CTAとその提携研究機関が、重要な天体現象を見逃さない仕組みとなっています。処理された画像は中央の計算機システムに送信され、さらに解析された後に保管されます。

較正された画像データは、個々のガンマ線の情報を再構成するために用いられます。ガンマ線のエネルギーと方向は天文台を利用する科学者たちに提供され、これを使うことで、スペクトルや光度曲線、天体の画像が得られます。CTA科学データ管理センター（Science Data Management Centre, SDMC）はドイツ・ツォイテンにあるDESYのキャンパスに設置されており、データ処理と長期管理、またSDMCを利用する科学者に対するデータやツールの提供、支援などを行います。

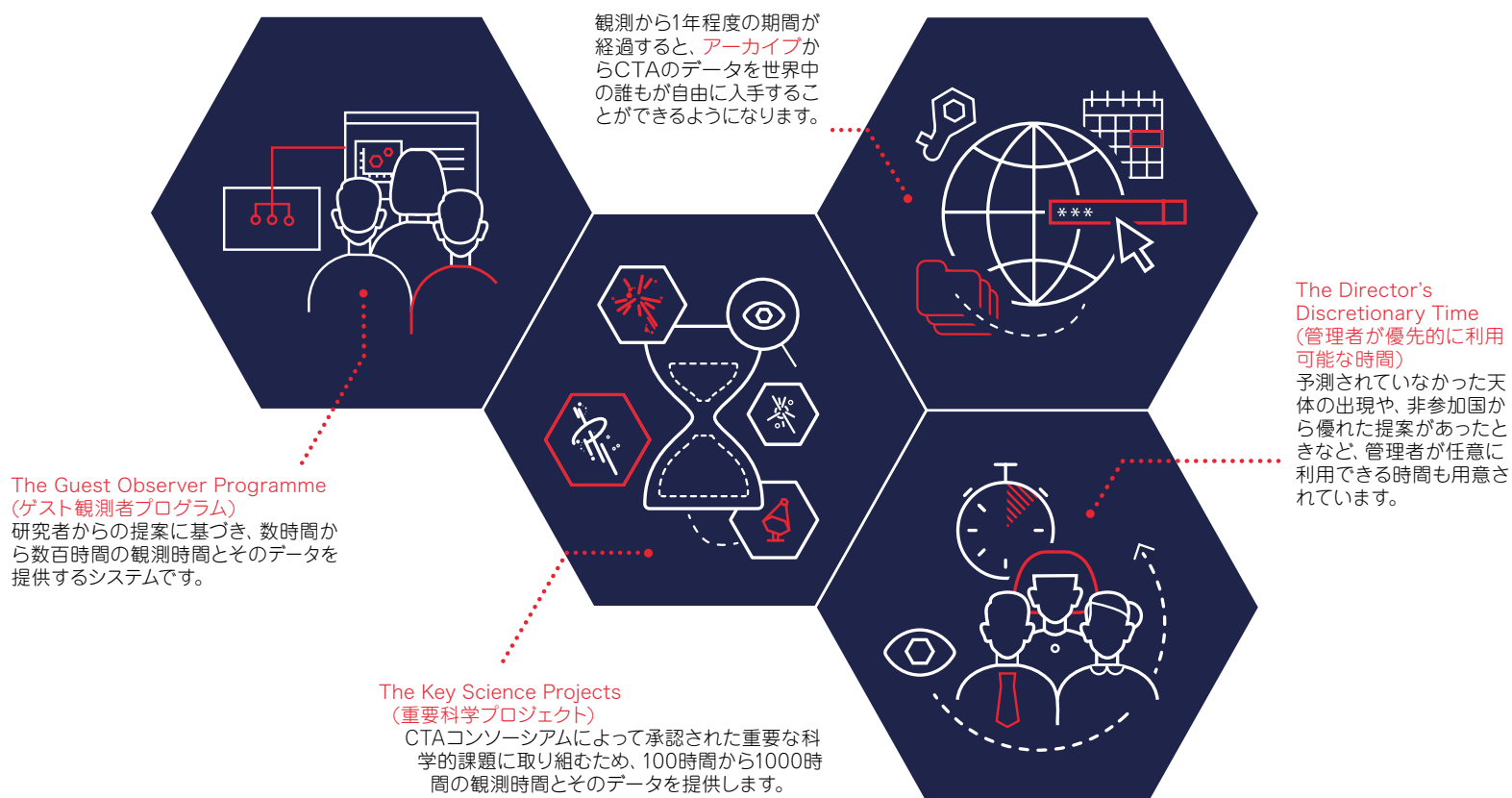
CTAはビッグデータを扱うプロジェクトです。最初の5年間の稼働で得られるデータ量は約100ペタバイト(PB)にも上ると予想されています。



CTAは高エネルギー天文学施設としては、**世界中の宇宙・素粒子物理学の研究機関に開かれた初めての地上ガンマ線天文台となります。**

イタリア・ボローニャのINAFに設置されるCTA本部が、天文台の包括的な運営を担う中央管理局となり、観測はオペレータによって行われます。得られたデータは較正、圧縮された後、解析ツールと共に、宇宙物理学では一般的なファイル形式で研究責任者に提供されます。

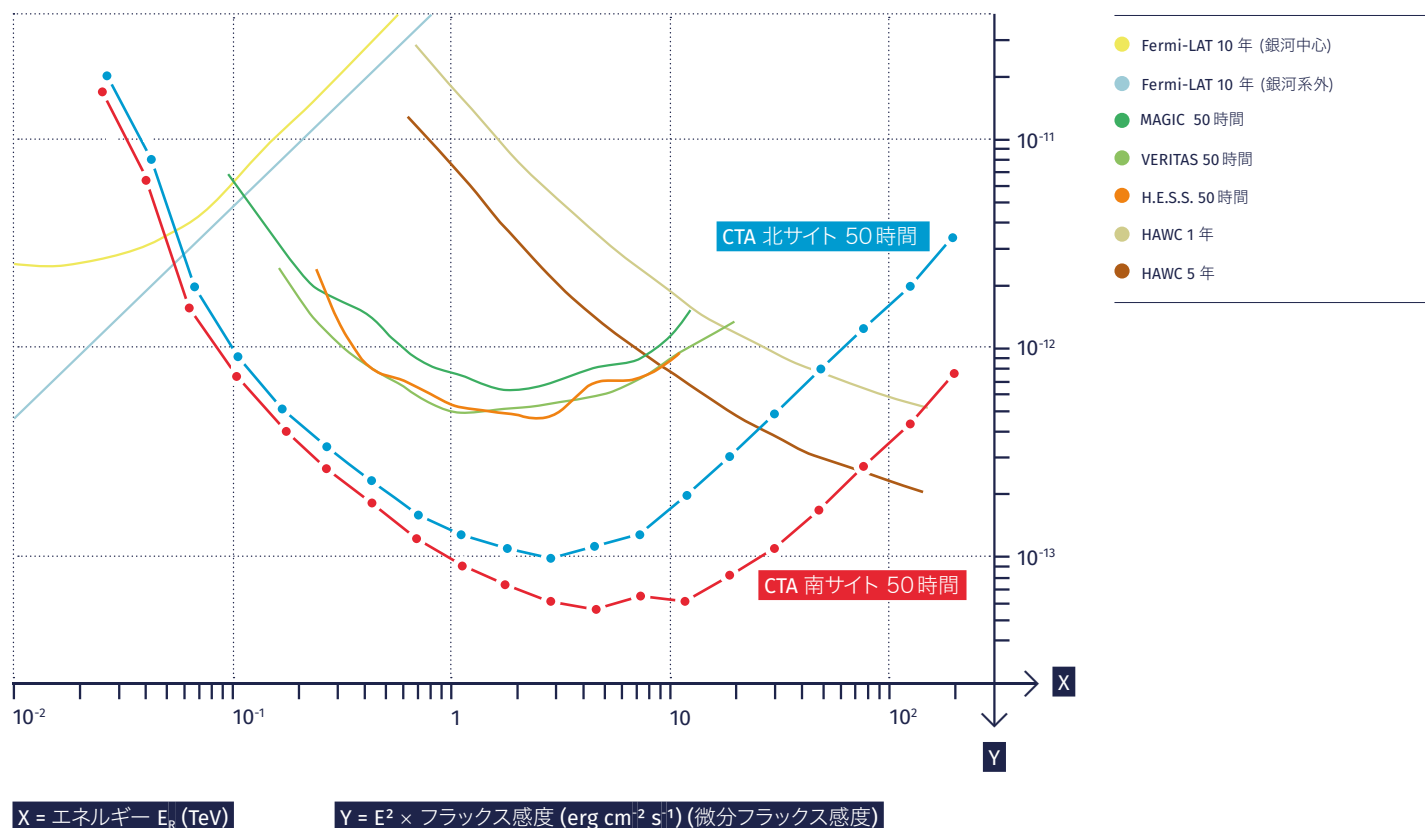
一定期間が過ぎると、データはCTAデータアーカイブを通じて公開され、一般利用ができるようになります。CTAの観測時間とデータの提供方法には、いくつかのオプションがあります。



20 GeVから300GeVという広いエネルギー帯域に感度を持つCTAは、電磁波スペクトルのフロンティアを切り拓き、**全く新しい宇宙の姿**を見せてくれるはずです。

CTAの基本的な性能を評価するために、コンピューターシミュレーションが用いられます。大気中での粒子シャワーの発達、チェレンコフ光の伝播、望遠鏡による集光、電子回路でのデータ処理までの一連の流れがモデル

化され、シミュレーションで評価されます。CTAは既存装置の10倍の感度を有しており、X線よりエネルギーの高い領域では最も高感度の観測手段となることが期待されています。



左の図はCTAの性能を、いくつかの現行のガンマ線観測装置と比較したものです。北半球のCTA (CTA North) と南半球のCTA (CTA South) について、50時間の観測で有意に測定できるフラックスをエネルギーごとに示しています。

CTAの性能について、詳しく知りたい方はこちらをどうぞ。



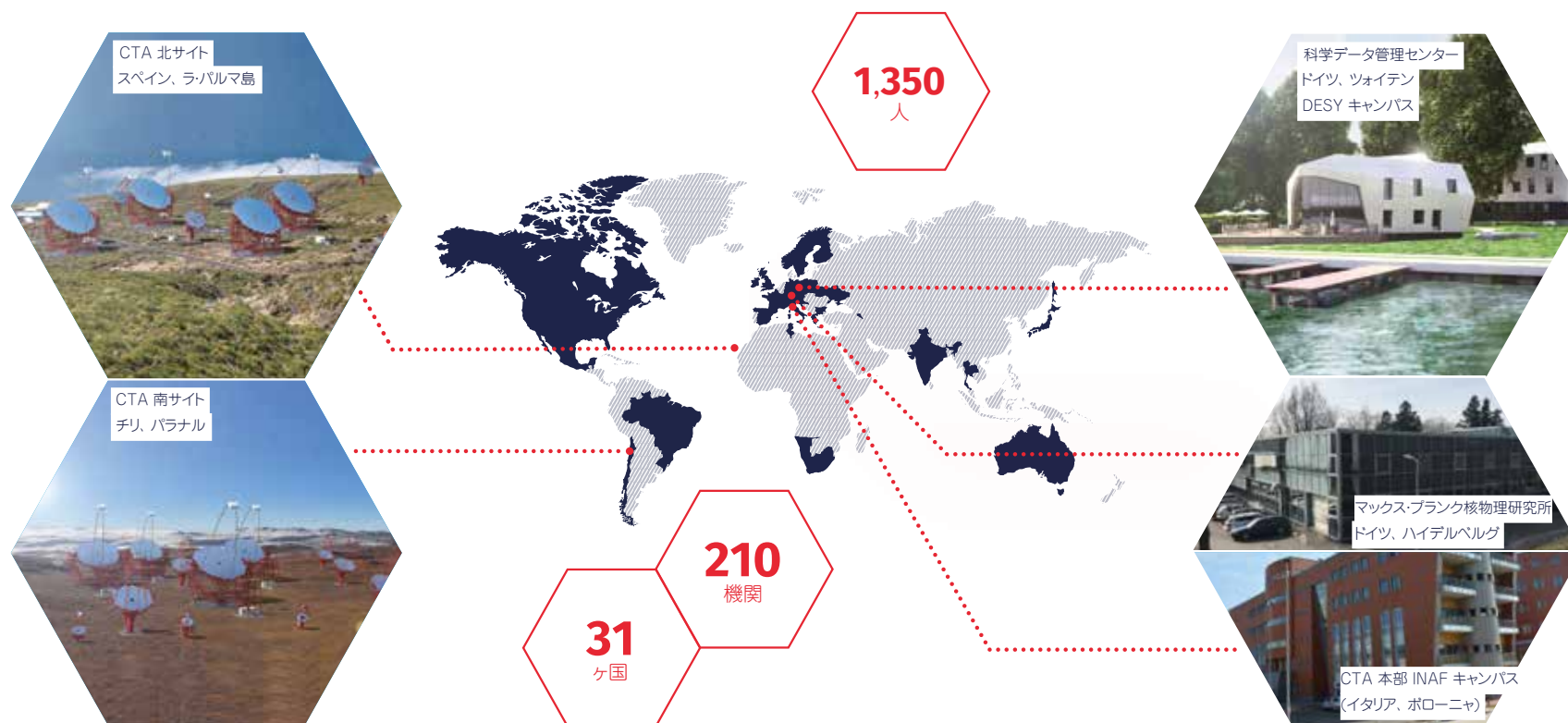
世界規模のコラボレーション

拠点のヨーロッパから、アメリカ、アジア、アフリカ、オーストラリアへ。

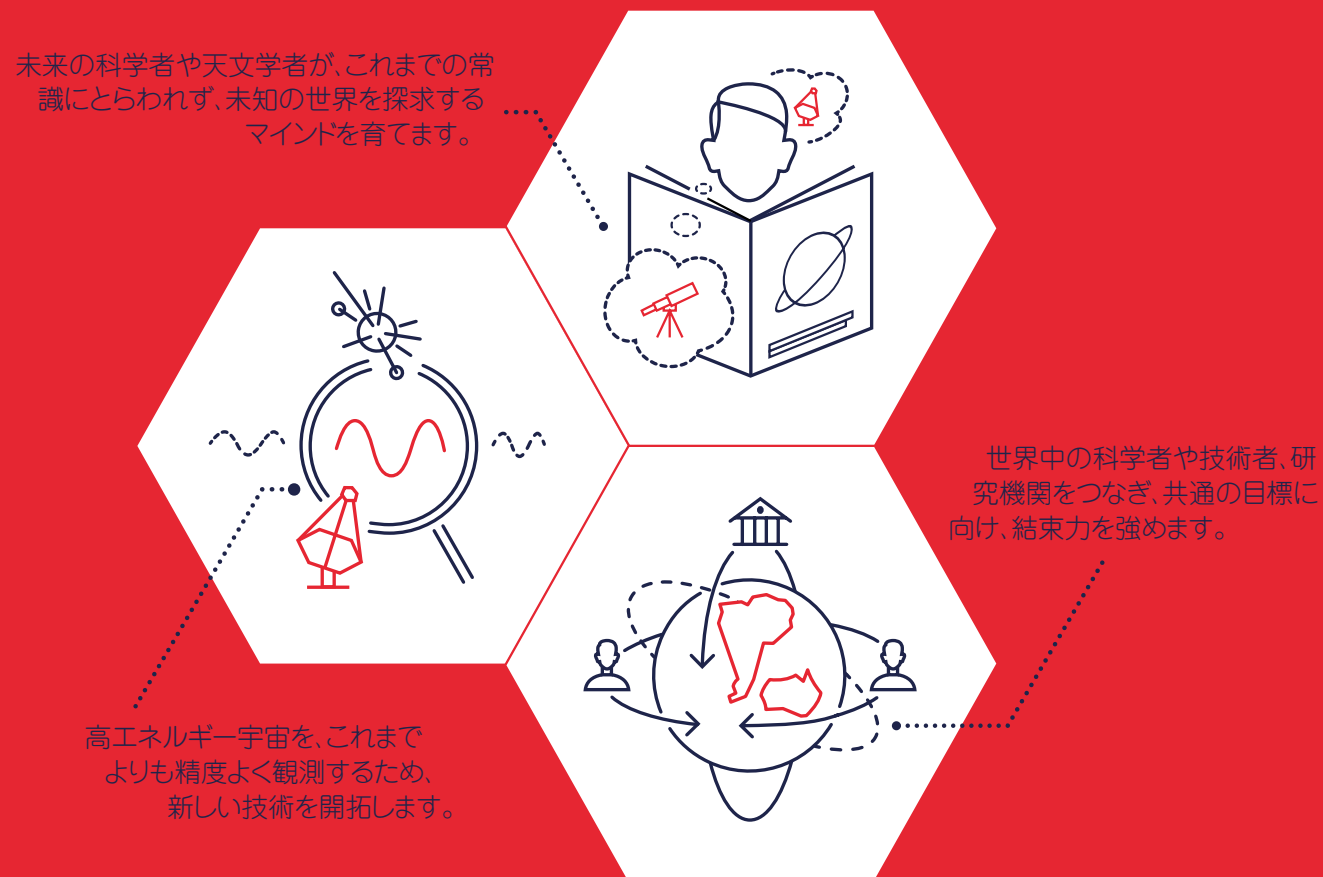
CTAコラボレーションは世界中に広がっています。

2008年に設立されたCTAコンソーシアムは、CTAの発見に対する期待が高まるにつれて少しずつ大きくなり、31カ国、210機関の1350人で組織されています。こうした科学者と技術者たちからなるグループが、CTAの科学的・技術的な開発に取り組んでいます。

CTA建設の計画・実行を管理するCTAO gGmbHとそのプロジェクトオフィスは、法人評議会と13カ国（2018年1月現在）の会員で構成されています。



CTAは高エネルギーのフロンティアを開拓し、すべての人たちのために宇宙の謎を解明しようとしています。
CTAには単に科学のための実験装置という以上の価値があります。
素粒子物理や宇宙物理学において新しい発見をする価値を超える真の価値があるのです。



CTAは、世界中の組織・機関からの支援の下で、順調に計画が進められてきました。CTAは、CTAコンソーシアムのメンバーによる部品の現物提供によって建設され、コンソーシアムはCTAO gGmbHの法人メンバーと会員から研究費の支援を受けています。それに加えて、このプロジェクトは以下の組織から経済的支援を受けています。

The European Union's Seventh Framework Programme
([FP7/2007-2013] [FP7/2007-2011]) under Grant Agreement 262053.

The European Union's Horizon 2020 research and
innovation programs under agreement No 676134.



Co-funded by the
Horizon 2020
Framework Programme
of the European Union



CTA の出資団体について、詳しく知りたい方は
こちらをどうぞ。

www.cta-observatory.org/about/funding-sources



最先端 高性能
高い機動性
次なる進化を始めよう...

Contact Information

Cherenkov Telescope Array Observatory gGmbH
Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg
Germany

e-mail info@cta-observatory.org
phone +49-6221-516471
website www.cta-observatory.org
facebook facebook.com/ctaobservatory
twitter @CTA_Observatory

Japanese Version (日本語への翻訳)

PR Office, Institute for Cosmic Ray Research
The University of Tokyo (東京大学宇宙線研究所 広報室)

e-mail icrr-pr@icrr.u-tokyo.ac.jp
phone +81-4-7136-5148
website www.icrr.u-tokyo.ac.jp
www.cta-observatory.jp (CTA-Japan)



超高エネルギー
ガンマ線天文台