

## 次世代高エネルギーガンマ線望遠鏡による銀河面サーベイ

DANG VIET TAN (茨城大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは口径の異なる大中小3種類の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を配置した超高エネルギーガンマ線天文台で、現在の望遠鏡の十倍深い感度を達成し、観測できるエネルギー帯を 20 GeV から 100 TeV 以上へ拡大することを目指す国際共同実験計画である。現在世界で 31 カ国、1200 人を超える研究者達が参加している。CTA 計画で狙う主要なサイエンスは、Key Science Project (KSP) として策定されており、銀河系内・系外サーベイ、銀河中心、大マゼラン星雲などの観測戦略が立案され、議論が進んでいる。その中でも銀河面サーベイ計画 (Galactic Plane Survey: GPS) は、重要な観測戦略の1つとして検討されている。GPS では、銀経が  $-60^\circ$  から  $60^\circ$ 、銀緯は  $-3^\circ$  から  $3^\circ$  までの銀河面を 3 mCrab の感度で観測する計画である。シミュレーションを元に見積もられたそう観測時間は 250 時間である。GPS では主に視野の広い CTA 中・小口径望遠鏡アレイが重要な寄与をすると期待されている。しかしながら、視野が相対的に小さい CTA 大口径望遠鏡でも、*Fermi* ガンマ線宇宙望遠鏡のエネルギー帯とオーバーラップのある低いエネルギー帯でどのような寄与ができるかを調査し、観測戦略を練る必要がある。私はこの問題をシミュレーションにより調べている。本講演では、GPS 計画についての紹介を行い、日本チームが主に開発を行っている CTA 大型望遠鏡が果たす役割について検討状況を報告する。

## 1 Introduction

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画 (図 1) とは大きさの異なるチェレンコフ望遠鏡を百台近く並べた超高エネルギーガンマ線天文台で、現在の望遠鏡の十倍深い感度を達成し、観測できるエネルギー領域を 20 GeV から 100 TeV 以上にすることを目指す国際共同実験計画である。現在世界で約 31 カ国、千人を超える研究者達が参加している。CTA 計画が実現すれば、千を超える天体が観測され、銀河系内外の様々な高エネルギー天体の活動や銀河の形成の進化、さらには暗黒物質などの研究に新展開をもた

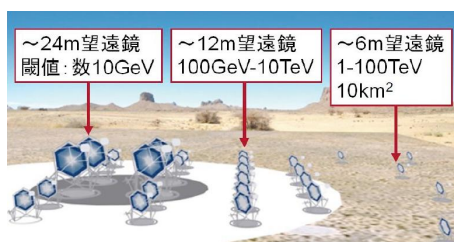


図 1: CTA の完成想像図 [1]。

らすと期待されている。日本チームでは、主に CTA の大型望遠鏡の開発が集中的に進められている。

CTA 計画で狙う主要なサイエンスは、Key Science Project (KSP) として策定されており、銀河系内・系外サーベイ、銀河中心、大マゼラン星雲などの観測戦略が立案され、議論が進んでいる。その中でも銀河面サーベイ計画 (Galactic Plane Survey: GPS) は、重要な観測戦略の1つとして検討されている。図 2 は H.E.S.S. 望遠鏡アレイによって銀河面をサーベイした結果である。H.E.S.S. のような現在の解像型チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope: IACT) と比べて CTA は感度、視野、角度分解能などが改善されるため、CTA による銀河面サーベイはより効率的に調べられると期待される。図 3 は TeVCat カタログによる既知の Very High Energy (VHE) ガンマ線ソースマップである。CTA の南サイトは H.E.S.S. と、北サイトは VERITAS/MAGIC とほとんど同じ範囲をカバーする。一方、図 3 のように VHE ガンマ線ソースの半分がほぼ銀河面上にあるため、多く新しい VHE ガンマ線ソースの検出が可能

になるはずである。図 4 は  $\log N(> S) - \log S$  関係 (天体のフラックス  $S$  とそのフラックス以上をもった天体の数  $N$  との関係) を表している。現在の IACT は 50 mCrab (1 Crab は 1 TeV 以上で  $2.26 \times 10^{-11}$  photons/cm<sup>2</sup>/s) までの感度を達成し、銀河面上の約 70 個の天体を検出している。もし CTA が実現されれば、数 mCrab レベルの約 300 個のソースの検出が期待できる。

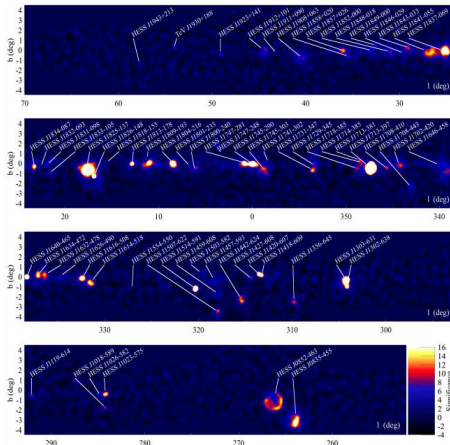


図 2: H.E.S.S. による銀河面の内側サーベイ [2]。銀経が 260° から 70° で銀緯が -4° から 4° の範囲である。現在の IACT は 50 mCrab までの感度を達成し、約 70 個の天体を検出している。

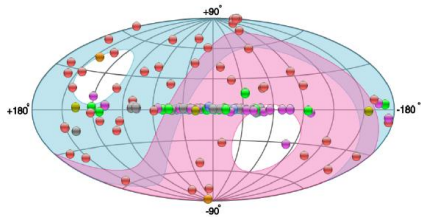


図 3: TeVCat カタログによる既知の VHE ガンマ線ソースマップ [3]。色付けの範囲は H.E.S.S. (ピンク) と VERITAS/MAGIC (ブルー) サイトによる観測可能な範囲である。白い部分は天頂角 50° 以上の観測領域を表している。丸印はソースの位置を表す: 超新星残骸 (緑)、パルサー風星雲 (赤紫色)、連星 (黄色)、活動銀河核 (赤)、スターバースト銀河 (オレンジ)、未同定天体 (灰色)、他 (青) である。

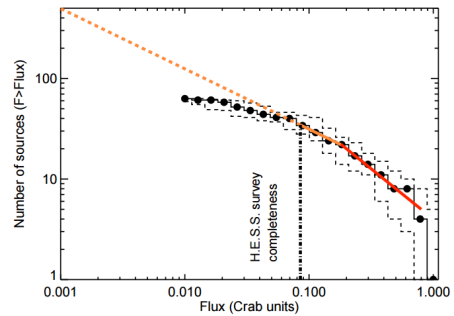


図 4:  $\log N(> S) - \log S$  関係 [4]。

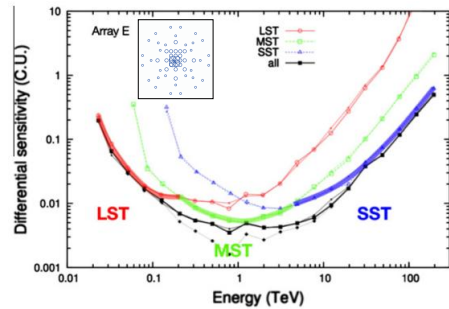


図 5: CTA の感度曲線 [5]。

我々は現在、GPS で行う銀河面サーベイについての戦略を練っており、CTA フルアレイのシミュレーションを元に評価を行ってきた。フルアレイの望遠鏡配置も膨大なモンテカルロシミュレーションによって最適化が行われている段階であり、その候補の一つであるアレイ E と呼ばれる配置での感度曲線を図 5 に示す。大口径望遠鏡 (LST) が低エネルギー領域 (赤線)、中口径望遠鏡 (MST) が中間のエネルギー領域 (緑線)、小口径望遠鏡 (SST) が高エネルギー領域 (青線) をカバーしている。これらの 3 種類の望遠鏡を合わせて感度を 10 倍改善することができ、広いエネルギー領域をカバーすることが可能になる。実際、CTA は現在の IACT と同じ範囲の銀河面サーベイを同じ 250 時間観測で少なくとも 5 mCrab を達成することがシミュレーションで確認されている。

約 5° の視野を持つ LST と比較すると、MST と SST の視野は広く、それぞれ ~ 8° と ~ 10° である。銀河面サーベイにおける新天体の発見には、MST/SST が重要な寄与をすると期待されている。しかしながら、視野が相対的に小さい LST でも、Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡のエネルギー帯 (20 から

100 GeV) とオーバーラップのある低いエネルギー帯でどのような寄与ができるかを調査し、観測戦略を練る必要がある。GPS において LST が入っている場合には低エネルギー側で感度が高いサーベイできる一方、視野が小さいため各ポインティングの間隔が狭くなり多くの観測時間が必要となってくる。逆に、LST が入っていない場合は各ポインティングの間隔が広くでき、LST は別の KSP に使えることも考えられる。本研究は LST がどのような役割を果たすかを調べ、GPS には LST を使うべきかを検討することが目的である。

## 2 シミュレーション方法

CTA のフルアレイと LST が入っていないアレイの Instrument Response Functions (IRFs) を用いてシミュレーションを行い、得られた結果を比較することで、LST が果たす役割を明確にする。現在、CTA による銀河面サーベイの観測計画は ctools というシミュレーションソフトが使われている。ctools は CTA データ解析のために開発されているソフトウェアパッケージである。この ctools で CTA の IRFs を用いて CTA の観測のシミュレーションを行う。IRFs は、モンテカルロ シミュレーションによって得られた 50 時間観測に対応したものが使われる。IRFs には CTA の有効検出面積と Point Spread Function などの情報が入っている。これを使って銀河面を模擬したソースマップをサーベイする。ソースのモデルには以下のようなものを採用している。銀河面の拡散ガンマ線モデル ( $\pi^0$  崩壊や逆コンプトン散乱によるもの) や超新星残骸やパルサー風星雲などのソースをモデル化したマップがある。一方、銀河系外からの一様なガンマ線放射も考慮されている [5]。図 6 は過去に ctools で銀河面サーベイをシミュレーションした結果の図である。ここでは銀河面の同緯度  $0^\circ$  を単一行で掃くポインティング法が使われていた。

最近、複数行の等間隔のポインティング法を使うことで (図 7)、より銀河面を広く掃き、かつ均一な感度のサーベイを行うことが計画されている。1 ポインティングの観測時間は約 9.5 時間で、250 箇所のポインティングの位置が銀河面に沿って設定され

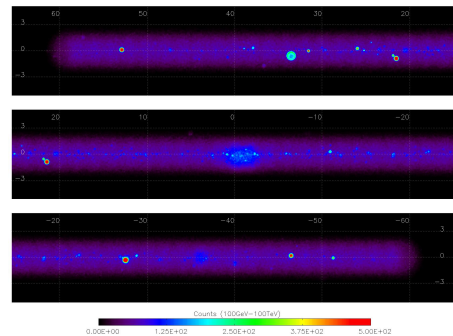


図 6: ctools による銀河面サーベイ [3]。このシミュレーションには H.E.S.S. の VHE ソースマップに基づいた超新星残骸とパルサー風星雲のソースが考慮されている。

る。サーベイするには南北サイトの両方が使われている。今回のシミュレーションでは ctools-0.9.0 の最新版 (2015 年 5 月 22 日) を用いた。

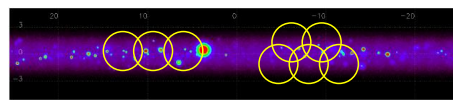


図 7: サーベイ方法 [3]。黄色の丸がポインティングと視野を表す。左側は過去に使われた単一行で銀河面を掃くポインティング法で、右側は現在使われている複数行等間隔のポインティング法である。

## 3 シミュレーション結果

まず、第 1 段階として、LST がある時とない時の CTA アレイの銀河面での感度違いを理解するため、スペクトルが柔らかい天体の場合に銀河面サーベイのシミュレーションを行ってみることにした。具体的な天体の 1 例として HESS J1458-608 という TeVCat 天体を選んだ。この天体の位置は銀経が  $317.75^\circ$  で、銀緯が  $-1.7^\circ$  である。サイズは  $0.17^\circ \times 0.17^\circ$  と広がったソースで、フラックスは 60 mCrab である。1 TeV 以上のスペクトルのべき指数は 2.8 である。図 8 は現在の HESS J1458-608 のスペクトルである。赤点は Fermi 衛星で得られたデータ点で、青点は H.E.S.S. で得られたデータ点である。観測は 1 TeV 以下のス

ベクトルのべき指数は 2.8 から変化していると推測できる。本シミュレーションでは、テストのため低エネルギー側もべき指数は 2.8 として、LST がある時とない時の違いを確認することにした。

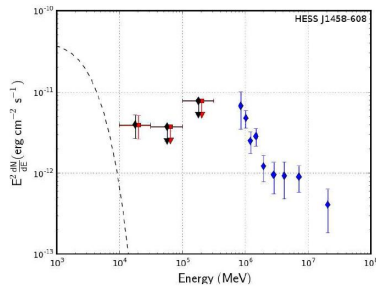


図 8: HESS J1458–608 のスペクトル [6]。

シミュレーションでは簡単のために銀河面の拡散ガンマ線モデルと HESS J1458–608 のモデルのみを仮定した。サーベイはこの天体の周りの 5 ポインティングだけにした (図 7 参考)。それ以外のポインティングは関わらないので省いた。ポインティングのサーベイは南サイトがカバーする領域にあるため、CTA の IRFs は南サイトの Aar としてモンテカルロシミュレーションによって作られたものを使用することにした。図 9 はシミュレーション結果で、50–100 GeV のエネルギー帯のガンマ線のためのマップである。上側は LST ありの場合で、下側は LST なしの場合である。各場合の範囲は銀経が約 311° から 324° で、銀緯が約  $-5^\circ$  から  $5^\circ$  である。LST がある場合とない場合のマップの違いは、LST の影響が反映されていると考えられる。

## 4 今後

本研究の現段階では 5 ポインティングのサーベイでシミュレーションした 50–100 GeV の範囲で LST がある時とない時の違いが確認できた。これからスペクトルの違いをみることで定量的に評価し、発表ではこの結果を述べる。低エネルギー側のスペクトルが *Fermi* の観測と矛盾しないものを仮定した場合にどうなるかについても調べる。また、発表では銀河面サーベイを全体的にシミュレーションして両方の違いについて議論する。

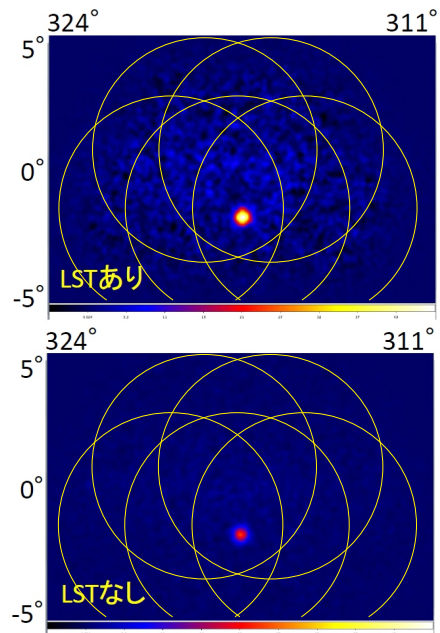


図 9: HESS J1458–608 のシミュレーションの結果。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台から他の関連団体までのご支援に感謝いたします。

## Reference

- [1] CTA- Japan Consortium, 「Cherenkov Telescope Array 計画書」, [http://www.cta-observatory.jp/Documents/2014/CTA-Japan\\_LOI\\_20140715.pdf](http://www.cta-observatory.jp/Documents/2014/CTA-Japan_LOI_20140715.pdf), 2014.
- [2] S. Carrigan, et al., for the H.E.S.S. collaboration. “The H.E.S.S. Galactic Plane Survey - maps, source catalog and source population”, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), 2013 (arXiv:1307.4690).
- [3] G. Dubusa, et al., for the CTA Consortium. “Surveys with the Cherenkov Telescope Array, Astroparticle Physics”, 43, 317–330, 2013.
- [4] M. Renaud, “Latest results on Galactic sources as seen in VHE gamma-rays”, Very High Energy Phenomena in the Universe, 3–12, 2009.
- [5] Jim Hinton, et al., “A New Era in Gamma-Ray Astronomy with the Cherenkov Telescope Array, Astroparticle Physics”, 43, 1–356, 2013.
- [6] F. Acero, et al., “Constraints on the Galactic Population of TEV Pulsar Wind Nebulae Using *Fermi* Large Area Telescope Observations”, The Astrophysical Journal, 773, 1–81, 2013.