

## ガンマ線観測によるダークマター間接探索の現状と CTA 計画における今後の展望

荻野 桃子 (東京大学大学院 理学系研究科)

### Abstract

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、大気チェレンコフ望遠鏡アレイを用いて、20 GeV から 100 TeV 以上の領域に及ぶ超高エネルギーガンマ線の観測を行う国際共同プロジェクトである。このプロジェクトにより、高エネルギー天体での物理現象や宇宙の形成史の研究など様々な発展が予想されるが、その一つに、ダークマター対消滅からのガンマ線探索がある。昨年、ガンマ線観測衛星 Fermi-LAT のデータを用いた解析により、銀河中心に質量約 130 GeV のダークマターが存在するという可能性が示唆された。Fermi-LAT の観測は現在も続いているが、このエネルギー領域でのガンマ線探索に対してより大きい有効面積を持つ大気チェレンコフ望遠鏡での検証も有効である。これまでのチェレンコフ望遠鏡による観測では、H.E.S.S (High Energy Stereoscopic System) による銀河中心のガンマ線の観測・解析が、WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) 質量 1 TeV 付近における対消滅断面積の上限値に対する最も強い制限を与えている。さらに、観測エネルギー領域を広げ、感度を一桁以上向上させた CTA の実現により、ダークマターの検出がより現実的なものとなることが期待される。本レビューでは、イメージング大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) を用いたガンマ線観測によるダークマター間接探索の現状と、今後の展望について考察する。

## 1 Introduction

2012 年 9 月、ガンマ線観測衛星 Fermi-LAT のデータの解析から得られた 130 GeV の excess や、2013 年 4 月に報告された AMS の陽電子比測定によるダークマターの存在可能性の示唆など、近年の素粒子物理学界においてダークマター探索実験は日々進展を遂げている。

これらの分析結果が示すように、ダークマターが

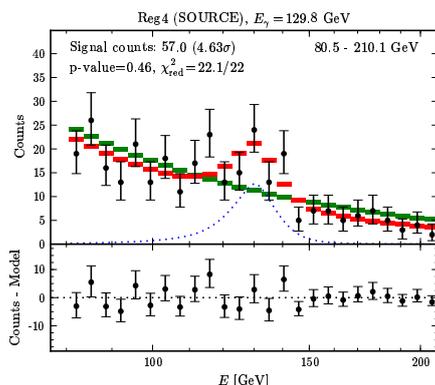


Fig. 1: Fermi-LAT の 130 GeV の excess (C. Weniger, 2012)

TeV 領域に及ぶような大きな質量をもつ場合、大気チェレンコフ望遠鏡を用いた銀河中心などのガンマ線観測によるダークマター探索は非常に有効であり、衛星では対応できないエネルギー領域の観測などにより、探索実験の進展に大きく貢献している。本レビューでは、ダークマターの最有力候補と考えられている WIMPs の間接探索の方法 (Section 2)、現時点でのチェレンコフ望遠鏡によるダークマター間接探索の成果と、それに対して CTA 計画で改良・改善が予定されている性能 (Section 3)、モンテカルロシミュレーションによる CTA の性能評価と期待される効果 (Section 4) について述べる。

## 2 ダークマターの候補とその間接的検出

WIMPs は、電氣的に中性であること、弱い相互作用と同じオーダーの対消滅断面積を持つときにダークマターの密度をうまく説明できることなどから、その有力な候補と考えられている。このときの対消滅断面積は

$$(\sigma_{ann}v) \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

である。

特に、超対称性理論における安定な粒子であるニュートラリーノは、ダークマターであるための要請を満たす上に、観測される領域は数 TeV であると予想されるため、多くのダークマター探索実験が実質的にニュートラリーノの検出を目指している。

ダークマターの間接探索では、銀河中心や矮小楕円銀河、銀河団周辺など、ダークマター密度が高いとされる領域における対消滅を観測対象とする。このとき、ダークマター粒子対 ( $\chi$ ) の対消滅レートは

$$\Gamma_{ann} \propto n_\chi^2 \langle \sigma_{ann}(v)v \rangle \quad (2)$$

で与えられ、 $\chi$  粒子の数密度  $n_\chi$  の二乗と相対速度  $v$  に比例していることがわかる。数値シミュレーションによれば、銀河中心で暗黒物質の数密度がカスプ状に高くなることが期待される（ただし、天体由来のバックグラウンドも多い）。

間接探索の中でも、特に宇宙や地球上の磁場の影響を受けず方向の情報を保ったまま飛来するガンマ線は、観測することでその起源を辿ることが可能であり、ダークマターの重要な性質の解明が期待される。方位角  $\Delta\Omega$  内のガンマ線の微分フラックスは

$$\frac{d\Phi(\Delta\Omega, E_\gamma)}{dE_\gamma} = B_F \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{(\sigma_{ann}v)}{2m_\chi^2} \sum_i BR_i \frac{dN_\gamma^i}{dE_\gamma} \cdot \tilde{J}(\Delta\Omega) \quad (3)$$

と書ける。ここで  $B_F$  は、固有フラックスの寄与を示す boost factor、 $m_\chi$  はダークマター粒子の質量、 $\sum_i BR_i \frac{dN_\gamma^i}{dE_\gamma}$  は分岐比  $BR_i$  の対消滅 1 回あたりの光子のフラックス、 $\tilde{J}(\Delta\Omega) = \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{los} ds \rho^2(s, \Omega)$  は astrophysical factor を表す。(los:line of sight) Eq.(3) のいくつかの因子についての議論は Section 4.2 で行う。

### 3 現行の IACT によるダークマター間接探索と CTA 計画における改良点

#### 3.1 IACT によるダークマター探索の現状

矮小楕円銀河をターゲットとした WIMPs の対消滅によるガンマ線の探索は、ナミビアに設置されて

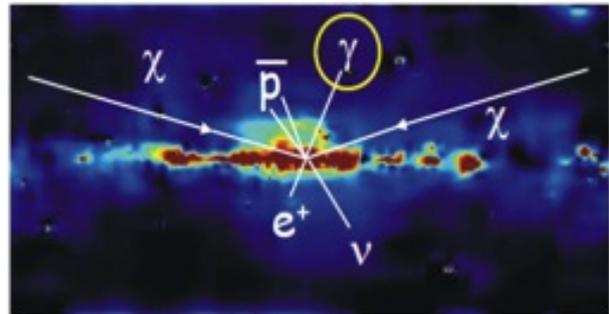


Fig. 2: ダークマターの対消滅によるガンマ線生成のイメージ (L. Bergström, 2012)

いる H.E.S.S やカナリア諸島の MAGIC、アリゾナ州の VERITAS といった現行の大気チェレンコフ望遠鏡によって精力的に行われている。Fig.3 からわかるように、いずれの望遠鏡も対消滅断面積への制限を与えてはいるものの、WMAP による CMB 観測から制限されているダークマターの存在領域 (図の赤い点) には感度が達していない。現時点では、H.E.S.S. が行った銀河中心からの WIMPs 対消滅信号の探索 (Fig.3) が、1 TeV 付近の対消滅断面積に対して最も強い上限値を与えている ( $\sigma_{ann}v$ )  $\sim 10^{-25} \text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 。

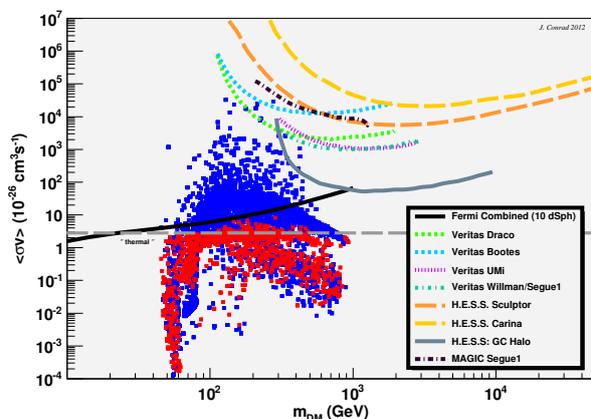


Fig. 3: 現行のダークマター間接探索実験による対消滅断面積の上限値の WIMP 質量依存性。(J. Conrad, 2012)

### 3.2 CTA の特徴と期待される効果

現在稼働中の IACT が TeV 領域に感度を持つことで Fermi-LAT の相補的な役割を果たしているのに対し、現在計画が進められている CTA は、以下のような点から IACT のダークマター検出器としての性能の向上が期待されている。

- 観測エネルギー領域の拡大：  
数十 GeV から数百 TeV という広範囲のガンマ線エネルギー領域が観測可能となり、Fermi-LAT と重複している低エネルギー領域に対してはより高い精度を示す。
- 観測エネルギー領域全体での感度の向上：  
スペクトルのより精細な観測が可能になり、従来の装置に比べダークマターの検出・同定の能率が向上する。
- 視野角の拡大：  
従来の  $5^\circ$  から  $10^\circ$  まで拡大し、均一な感度を実現することで角度分解能を改善し、銀河団のような広範囲に及ぶソースのより効率的な観測と空間的非等方性の検証が可能となる。
- エネルギー分解能の改善：  
ダークマター対消滅から期待されるカットオフ、またはラインを持つエネルギースペクトルをより精度良く測定することが可能であり、ダークマターの質量と対消滅断面積を正確に決定できる。

## 4 モンテカルロシミュレーションによる CTA の性能評価

### 4.1 astrophysical factor

Eq.(3) で用いられた astrophysical factor  $\tilde{J}$  の値から CTA の性能評価を行う。Fig.4 は、有効観測時間 100 時間で  $5\sigma$  の信頼度で対消滅を検出するのに必要な  $\tilde{J}$  の最小値の WIMPs 質量依存性を示している。検出するために必要な  $\tilde{J}$  の値は、矮小楕円銀河の場合で  $10^{21} \text{GeV}^2 \text{cm}^{-5}$  であるが、この質量領域に感度を持つ Fermi-LAT ではその徴候は検出されていない。

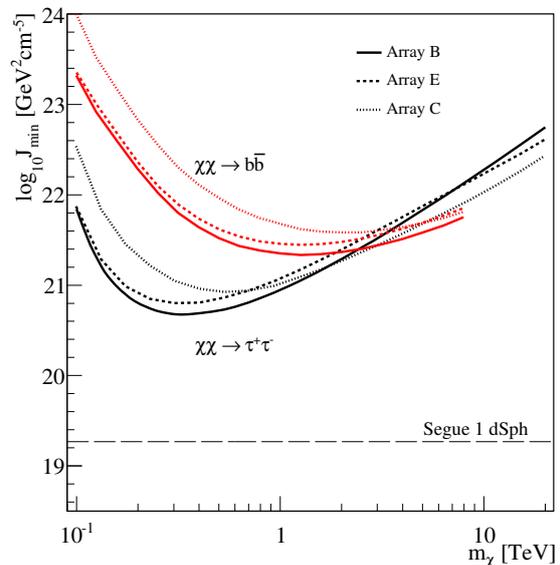


Fig. 4: 信頼度  $5\sigma$  の検出に求められる  $\tilde{J}$  の最小値の WIMPs 質量依存性 (有効観測時間  $T_{obs} = 100$  時間、B・C・E はそれぞれ望遠鏡アレイの配置の方法) (M. Doro et al. 2013)

### 4.2 対消滅断面積

ダークマターの対消滅断面積への制限により高い精度を求めるには、装置の性能を向上させることはもちろん、バックグラウンドとなるイベントを確実に除去することが必要となる。特に、高エネルギー天体が多く分布している銀河中心は、ガンマ線イベントが多い分バックグラウンドの寄与も大きくなるが、解析したい信号とバックグラウンドの適切な分類さえできれば、ダークマター対消滅のを観測できる可能性はかなり高まるといえる。ここではまず、銀河中心から飛来したイベントの分類方法 (Ring Method) について述べる。

#### 4.2.1 Ring Method

解析に用いるイベントとバックグラウンドとして排除するイベントとは、その由来する領域 (source region / background region) によって判別する。その判別方法の一つである Ring Method による観測領

域の分類を Fig.5 に示す。赤い星印は銀河中心、青い星印は CTA の視野中心方向であり、銀河中心から銀緯  $b$  だけシフトした位置に配置されている。内径  $r_1$ 、外径  $r_2$  の円環は、等しいアクセプタンスをもつ領域を示している。この円環と銀河中心を中心とする半径  $\Delta_{cut}$  の円とが重なりあう領域 (図の青い部分) を signal region、円環の残りの領域 (図の赤い部分) を background region として扱う。銀河中心から  $\pm 0.3^\circ$  以内の領域 (図の黄色い部分) はそのどちらにも分類しない。候補となるアレイ B、E をある等しい FOV に配置し、ダークマターの信号の信頼度が最大になるようにパラメータ  $b$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $\Delta_{cut}$  を決定する。

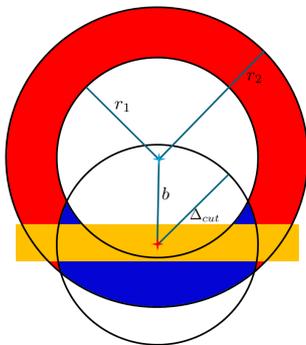


Fig. 5: Ring Method (M. Doro et al. 2013)

#### 4.2.2 対消滅断面積への制限

Fig.6 に、CTA が銀河中心で与えると予想される対消滅断面積の WIMPs 質量依存性のグラフを示す。図の黄緑色のラインが CTA による銀河中心の観測シミュレーションの値である。Fig.3 と比べて感度が明らかに向上し、ダークマターの存在が示唆されている領域に到達していることがわかる。

## 5 Summary and Outlook

CTA は、観測エネルギー領域の拡大や角度・エネルギー分解能の向上など、現在行われているダークマター間接探索実験と比較して性能が大きく改善される。また、南北のサイトに設置される望遠鏡アレイによって銀河の様々な領域や高エネルギー天体を観測することで、未解決・未知の問題が多く残るダーク

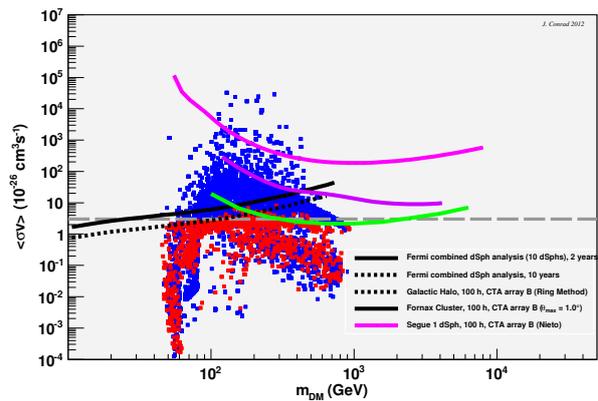


Fig. 6: CTA が対消滅断面積に与える制限 (黄緑色のライン) (J. Conrad. 2012)

クマターの実態の究明に重要な役割を果たすはずである。CTA によるダークマター探索の感度をさらに向上させるために、モンテカルロシミュレーションにより

- ハドロンのシャワーの排除
- 天体由来のガンマ線の排除
- 大気中で高エネルギーガンマ線と同様の電磁シャワーを生成する高エネルギー電子の排除

の最適化を行い、その解析方法と有効性を MAGIC によって検証する予定である。

## Reference

- M. Doro et al. (CTA Consortium) *Astroparticle Physics* 43(2013)189-214
- L. Bergström. *Astroparticle Physics* 43(2013)44-49
- C. Weniger. *JCAP* 08(2012)007
- A. Abramowski et al. (H.E.S.S. Collaboration) *PRL* 106, 161301 (2011)
- B.S. Acharya et al. *Astroparticle Physics* 43(2013)3-18
- A.M. Hillas. *Astroparticle Physics* 43(2013)19-43
- T.P. Li, Y.Q. Ma. *Astrophys. J.*, 272 (1983)
- J. Conrad. arXiv:1210.4392
- L. Bergström. private communication