

ガンマ線での暗黒物質探査における 矮小楕円銀河の空間広がりの効果



廣 島 渚

〈理化学研究所 数理創造プログラム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: nagisa.hiroshima@riken.jp

宇宙のエネルギー成分の約26%を占める暗黒物質の正体は未だによくわかっていない。素粒子論的な動機付けから Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) と呼ばれる新粒子が有力な候補の1つであり、質量 GeV-TeV 程度の WIMP が現在の宇宙で対消滅した際に放出されるガンマ線の観測を通じその兆候を探査する動きが近年活発化している。有力な探査領域として暗黒物質密度が高く、かつ天体活動が不活発な矮小楕円銀河と呼ばれる系が注目されている。実際、フェルミ衛星の観測からすでに質量 $O(10)$ GeV 以下程度の WIMP の対消滅断面積には厳しい制限が付いている。次世代のチェレンコフテレスコープアレイ (CTA) 実験では質量 TeV 以上の WIMP に対する感度が大幅に向上し、さらに、機器の角度分解能が向上するため従来点源のように見えていた矮小楕円銀河は空間的に分解できるようになる。本研究では空間的な矮小楕円銀河の広がり が CTA での探査の際に与える影響を明らかにした。

1. はじめに

本稿のテーマは暗黒物質探査である。宇宙論によれば、我々を作っているような物質とは異なる物質成分が我々の宇宙の全エネルギー密度の約4分の1を占めている¹⁾。銀河の回転曲線²⁾や弾丸銀河団³⁾などの宇宙物理学的な観測事実も光らない質量の存在を示唆する。我々の宇宙には見えない質量が相当量あることについては専門家の間で共通理解となっているが、その正体については未だによくわかっていない。素粒子標準理論の拡張などの動機付けともあいまって種々の候補が日々提案されている状態である。ここでは、暗黒物質が標準理論の粒子と重力以外の相互作用もする新粒子であるという仮定の元で話を進めさせていこうと思う。

重力以外の相互作用を認めることで標準理論粒

子と暗黒物質粒子が“反応する”という過程が可能になる。典型的な反応のパターンを説明するために図1を用意した。まず、図1の矢印aのような時間の流れ（あるいは反応方向）を考えるとこれは標準理論粒子同士が衝突して暗黒物質を生成する過程に相当する。図1の矢印bを反応方向と

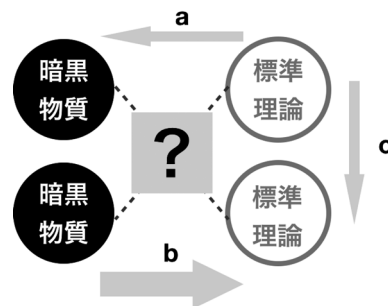


図1 暗黒物質探査の3手法を示す概念図。本研究のアプローチはbであり、加速器の実験はa、直接探査実験はcに相当する。

考えれば暗黒物質粒子が衝突して標準理論粒子をつくる過程となる。図1の矢印c, 縦方向を時間の流れにとると, これは暗黒物質粒子と標準理論粒子が衝突する過程を表す。暗黒物質探査においてはこれらの矢印a, b, cいずれかの反応を探していくことになる。過程aは加速器実験での暗黒物質探査に相当し, 対して過程bは標準理論粒子の観測を通じて暗黒物質を“間接的に”探すので間接探査と呼ばれる。過程cは暗黒物質粒子と標準理論粒子の散乱を“直接”測るので直接探査である。それぞれの手法に利点があり, これらを組み合わせ探査が進められているがこれまで暗黒物質たる新粒子の兆候は見つかっていない。近年, 加速器実験や直接実験ではアプローチしづらい $\mathcal{O}(10)$ GeV以上の領域^{*1}での間接探査が活発化している。間接探査においては(1)どんな種類の暗黒物質を, (2)どの標準理論粒子を探索針として, (3)宇宙のどこで探すか, という3項目を考えて戦略を立てることが必要である。項目(1)は直接探査や加速器の実験でも共通するが, 項目(2), (3)は間接探査に特徴的な部分である。本稿では(1)弱い相互作用をする粒子(Weakly Interacting Massive Particle, 以下WIMP)を, (2)高エネルギーガンマ線光子を使って, (3)矮小楕円銀河(dwarf spheroidal galaxy, 以下dSph)の中で探すという試みを紹介する。

1.1 WIMP

様々な新粒子が暗黒物質候補として提案されており, その中でも最有力と目されるのがWIMPである。WIMPは基本的には2つのパラメータ, 暗黒物質粒子の質量と標準理論粒子への対消滅反応の断面積で特徴付けられるシンプルなモデルである。宇宙初期の非常に高温高密度な時期にはWIMPと標準理論粒子は同じ熱浴中にあり, 図1のa, b両反応によって熱平衡が保たれる。ここで, 過程bの反応率は(暗黒物質密度 n_{DM} の2乗) \times (標

準理論粒子への対消滅断面積 $\langle\sigma v\rangle$)に比例する。宇宙が膨張し温度が下がるに従い粒子は非相対論的になり, 個数密度 n_{DM} も下がっていく。おおよそ反応率が宇宙の膨張率を下回るところで過程bが停止し(freeze-outなどと呼ばれる)暗黒物質の個数が固定する。ここで弱い相互作用に相当する対消滅断面積 $\langle\sigma v\rangle\sim\mathcal{O}(10^{-26})\text{ cm}^3/\text{s}$ を仮定しさえすれば, 宇宙の温度がGeV-TeVの頃に自然に暗黒物質の個数が固定して現在の宇宙での暗黒物質密度が自然に説明される⁴⁾。この値は正準対消滅断面積などと呼ばれ, 1つの目安となる理論的な予言値である。WIMPが対消滅して生成する標準理論の粒子はモデルの詳細に依存し, 様々なパターンやその組み合わせが考えられる。以下では大まかにクォーク対, ウィークボゾン対, あるいはレプトン対に対消滅する場合を想定して話を進める。

1.2 高エネルギーガンマ線での探査

冒頭で述べたように, 暗黒物質は見えない質量成分である。それをガンマ線光子で探すことについて説明を補足する。観測する光はその帯域と強度で特徴付けられるので, “見えない”ということはすなわち“各観測装置の帯域で観測感度以下である”と言い換えられる。すなわち, 装置の感度を向上すること, あるいはこれまでとは異なるエネルギー帯域で観測を行うことにより, 暗黒物質に起因した光を見つけられる可能性がある。

WIMPの対消滅に起因して期待されるガンマ線スペクトルの例を図2で示した。図2ではWIMPの対消滅により $\bar{b}b$ クォーク対が生成される場合を仮定しており, 各線はそれぞれ質量の異なるWIMPの場合に相当する。横軸が放出されるガンマ線のエネルギー E_γ , 縦軸は各エネルギーでの放出光子数 dN_γ/dE_γ である。放出光子の最高エネルギーはWIMPの質量で決まり, 対消滅先の粒子種がスペクトルの形を決める。一番単純な例はWIMP

*1 以下, オーダー X の量であることを示すために $\mathcal{O}(X)$ の表記を用いる。

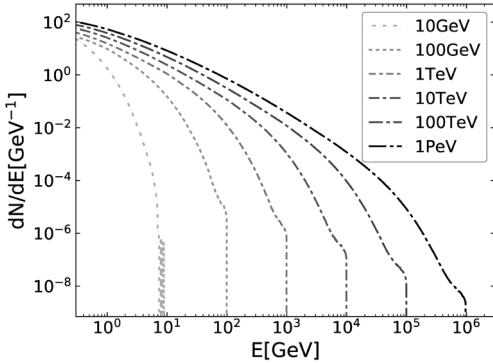


図2 WIMPが $\bar{b}b$ に対消滅する場合に期待されるガンマ線光子数分布 dN_γ/dE_γ . 各線は暗黒物質の質量が異なる場合に対応し、10 GeVから1 PeVまで1桁刻みで示した。

が直接光子に対消滅する際に期待される輝線スペクトルであり、この時には輝線のエネルギーとWIMPの質量が一致する。それ以外の粒子の場合には対消滅により生成した粒子のハドロン化の過程が重要となる。ハドロン化の際に生成した π^0 粒子の崩壊でガンマ線が放出され、 π^0 粒子の生成量がスペクトルの概形を決めている。図2で示した $\bar{b}b$ クォークへの対消滅では、WIMP質量が $\mathcal{O}(1)$ TeVの場合30個程度の π^0 粒子が生成する。Wボゾンに対消滅する場合もクォークへ対消滅する場合とほぼ同数の π^0 粒子が放出される。一方、レプトン対 ($\tau^+\tau^-$ など) の場合には放出される π^0 粒子の個数が数個程度であり1個の π^0 粒子当たりのエネルギーは高くなる。この場合、図2の $\bar{b}b$ クォーク対が生成する場合と比べガンマ線の光子数分布はより高エネルギー側にかたよったものとなる。

間接探査の際のプロープ粒子としてはガンマ線の他にニュートリノや荷電宇宙線なども用いられそれぞれに利点がある。ガンマ線の特徴は、上述のように直接ガンマ線光子を生成する場合に限らずWIMPの対消滅時には必ず放出されると期待できる点である。さらに、生成したガンマ線は伝播途中で曲がることなくまっすぐに地球まで届くため、伝播のモデルに起因した不定性などが生じることほとんどない。ガンマ線観測を通じ効率

的にWIMP探査を進めることができるのである。

1.3 矮小楕円銀河 (dSph)

ここまで、WIMPという有力な候補粒子がいて、特に質量がGeV-TeV以上の領域を探る際にガンマ線観測が有効な手段であるというところまで述べた。以下でWIMPの対消滅で期待されるガンマ線のフラックスを考えてより具体的に戦略を立てていく。期待されるガンマ線のフラックスは(1回のWIMP衝突で生成するガンマ線光子数)×(衝突回数)を観測視線に沿って積分したものであり、衝突回数は(個数密度の2乗、 n_{DM}^2)×(対消滅断面積 $\langle\sigma v\rangle$)と表せる。式を用いれば

$$\phi_\gamma = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} d\Omega \int ds \int dE_\gamma \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} n_{\text{DM}}^2 \langle\sigma v\rangle \quad (*)$$

$$= \frac{1}{8\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{m_{\text{DM}}^2} \int dE_\gamma \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} \cdot J$$

$$J = \int_{\Omega} d\Omega \int ds \rho_{\text{DM}}^2 \quad (**)$$

ここで ds は視線に沿った積分を表し、式変形の際には個数密度 n_{DM} と質量密度 ρ_{DM} の関係 $n_{\text{DM}} = \rho_{\text{DM}}/m_{\text{DM}}$ を使っている。(*), (**)式は素粒子物理学のモデルで決まる部分と暗黒物質の空間分布に依存する部分を切り分けた表現となっている。(**)式がJ因子と呼ばれる量で、これは(暗黒物質密度の2乗、 ρ_{DM}^2)を視線・立体角について積分したものである。(*), (**)式からJ因子が大きいほど、すなわち視線上の暗黒物質が多いほど対消滅に起因したガンマ線フラックスが大きくなり、それはWIMPモデルの詳細に依存しないことがわかる。観測されるガンマ線フラックス ϕ_γ はわかっているJ因子の値を用いることでモデルのパラメータ、すなわち対消滅断面積 $\langle\sigma v\rangle$ および質量 m_{DM} と直接対応付けられる。

WIMPの濃いところから高いガンマ線フラックスが期待できるとはいえ、そのフラックスはこれまでに見つかっている天体起源のガンマ線フラックスよりもずっと小さい。例えば、天の川銀河の中心ではJ因子が $\sim 10^{21} \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}$ 程度まで

高くなるなどの示唆があるが⁵⁾、この領域は天体起源のガンマ線フラックスも非常に高く、データを解析して微弱なWIMP対消滅に起因したシグナルを探索するのが非常にむずかしい。少し視点を変え、銀河中心よりは小さいがJ因子がそれなりに大きくかつ天体起源のガンマ線放射が少ない領域を観測することが考えられ、矮小楕円銀河 (dSph) と呼ばれる天の川の衛星銀河が具体的なターゲットとして注目されている。これまでの可視光観測で候補段階のものを含め数10個程度の矮小楕円銀河が見つかり、その星運動データからこれらは質量光度比が太陽の1,000倍にもなる“見えない質量”を大量に保持した系であることが示唆される。J因子は $\mathcal{O}(10^{17-19}) \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}$ 程度と見積もられる。また、矮小楕円銀河は星形成が不活発な系でこれまで内部にガンマ線源として確立した天体が見つかっていない。従って、矮小楕円銀河からのガンマ線が検出できればそれは暗黒物質のシグナルである可能性が高く、WIMP探索において銀河中心と相補的な役割を果たす観測対象であるといえる。今後可視光でのサーベイ観測が進み、より暗く、見つけにくいような矮小楕円銀河も見つかるようになると期待できることも重要である⁶⁾。

2. これまでのガンマ線観測での成果

矮小楕円銀河に着目したWIMP探索の先行研究としてフェルミ衛星の成果⁷⁾を紹介する。フェルミ衛星は全天をモニタリングしており、2015年の結果では15の矮小楕円銀河について6年分の観測データを解析してWIMPの対消滅断面積に厳しい制限を付けている。この解析は15の矮小楕円銀河についてデータをスタックし、ガンマ線フラックスの上限値をWIMPの対消滅断面積の上限に焼き直したものである。例えば、 b クォークに対消滅するWIMPについては質量 $m_{\text{DM}} \lesssim 100 \text{ GeV}$ の領域で対消滅断面積が正準断面積以下に制限された。各対消滅モードで期待されるガンマ

線スペクトルそれぞれについての解析が行われ、レプトン対、ウィークボゾン対、クォーク対それぞれの場合に $m_{\text{DM}} \lesssim (10-100) \text{ GeV}$ の領域で正準断面積以下のところまでWIMP対消滅の兆候が見られないことがわかっている。

3. 次世代のガンマ線観測実験での期待

フェルミ衛星による矮小楕円銀河の観測で、およそ質量100 GeV以下のWIMPについて理論的な目安値に相当するガンマ線シグナルが見つからないことがわかった。より重たいWIMPの探索には大気チェレンコフ望遠鏡を用いた地上での高エネルギーガンマ線観測が有効である。MAGIC⁸⁾、H.E.S.S.⁹⁾、VERITAS¹⁰⁾などが現在運用中であり、主に質量100 GeV以上のWIMP対消滅断面積に制限を付けている。今後数年のうちにはチェレンコフテレスコープアレイ (Cherenkov Telescope Array, 以下CTA) の本格運用が開始し、従来の大気チェレンコフ望遠鏡よりも1桁以上感度の良い観測が実現する見通しである。さらに、角度分解能も向上し1 TeVのガンマ線に対しては約0.03度の角度分解能が実現すると期待できる。これは矮小楕円銀河の大きさよりもずっと小さい。フェルミ衛星による観測の場合には矮小楕円銀河は点源と仮定できたが、CTAによる矮小楕円銀河の観測では暗黒物質対消滅に起因して空間的に広がりを持ったガンマ線放射が期待できるようになる。

4. 手法

以上が前置きであり、ここから本題に移る。重要なのは (i) 暗黒物質を探す上でガンマ線観測が有効であること、(ii) 先行研究ではフェルミ衛星の矮小楕円銀河観測により質量 $\mathcal{O}(10) \text{ GeV}$ 以下程度のWIMPについては対消滅断面積が正準断面積以下まで制限されていること、そして (iii) 今後地上からのガンマ線観測を通じ質量TeV以上のWIMP探索が拡大する見通しであり、その

際に矮小楕円銀河から期待される暗黒物質対消滅ガンマ線は空間的な広がりを持つこと、である。果たして、質量TeV以上のWIMPを矮小楕円銀河中に見つけられる期待はどのくらいあって、その際に矮小楕円銀河からのガンマ線放射の空間分布はどのような影響を与えるだろうか？

この評価に必要な要素は3つある。1つ目は矮小楕円銀河の暗黒物質密度分布、(**)式の ρ_{DM} およびその視線・立体角積分値(J因子)である。2つ目は暗黒物質の対消滅で期待されるガンマ線のスペクトル、(*)式のエネルギー積分に対応する部分である。3つ目は(*)式の左辺、観測(されるであろう)ガンマ線のフラックスである。本研究では以下のように将来実験での検出可能性を評価した。

矮小楕円銀河から期待される暗黒物質対消滅ガンマ線の空間的な広がりには暗黒物質の空間分布 ρ_{DM} で決まる。 ρ_{DM} はガンマ線データからWIMPのパラメータを決める際にはわかっているべき量である。しかしながら、矮小楕円銀河は暗く不活発であるため密度分布 ρ_{DM} のヒントを与えてくれる星が少ない。そのため密度分布の不定性が大きく、ガンマ線の観測結果を暗黒物質のパラメータに焼き直す際にもこの不定性が直接効いてしまう。本研究では暗黒物質密度分布のモデルの違いがCTAで探査可能なWIMPの対消滅断面積のパラメータ範囲にどう影響を与えるかを検証するため、りゅう座矮小銀河(Draco dSph)に注目して解析を行った。りゅう座矮小銀河は最もよく調べられている矮小楕円銀河の1つであり、複数の先行研究で密度分布のモデルが提案されているためこれらを比較して検出可能性の密度分布依存性を調べることが可能である。本研究では球対称を仮定した暗黒物質密度分布 ρ_{DM} のモデルを16個集めることができた。各モデルが予言するJ因子は $J \sim O(10^{19}) \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}$ 程度で一致しており既知の矮

小楕円銀河の中でかなり大きい方である。

密度分布はいくつかのパラメータで特徴付けられる。最も大きな区分けは中心部での動径方向依存性、 $\rho_{DM} \propto r^{-\gamma}$ と表す時の指数 γ である。本研究で取り扱ったモデルにはNFW¹¹⁾、Burkert¹²⁾など*2が含まれており、NFWの場合には $\gamma=1$ 、Burkertでは $\gamma=0$ である。指数 γ の値が大きいほど中心部で急激に暗黒物質密度が増大する空間分布となっており、 $\gamma=0$ の場合中心部は密度一定のコアとなる。NFW、Burkertの場合に加え指数 γ のコアに外縁部で指数関数的カットオフの入ったモデルについても解析を行っており、本研究で解析したモデル全体で指数 γ は0から1.5までの値をとっている。他には密度分布全体の規格化や、ハローの外縁部での動径方向依存性、また、中心と外縁を特徴付ける長さスケールなどが密度分布を決めるパラメータとなっている。

2つ目、暗黒物質の対消滅から期待されるガンマ線のスペクトルについては、先行研究にならって**b**クォーク対($b\bar{b}$)、 τ レプトン対($\tau^+\tau^-$)、Wボゾン対(W^+W^-)の3通りを仮定した。**b**クォークへ対消滅する際のガンマ線スペクトルは図2に示した通りである。そして3つ目のガンマ線フラックスである。本研究ではCTA望遠鏡による500時間の観測を想定した。CTAを含め大気チェレンコフ望遠鏡の観測はあらかじめ見るべき領域を定めなければならない点で全天サーベイ型のフェルミ衛星の場合と異なっていることに注意しておく。

解析に用いたのはCTAの運用開始に先駆け用意された学術的研究用のシミュレーションデータである。シミュレーションで生成したデータからりゅう座矮小銀河を中心に4度四方の領域を切り出し、エネルギー・空間についてまとめ、尤度比検定にかけるというのが一連の解析手続きになる。尤度比検定で比べる仮説は“暗黒物質のシグ

*2 NFWはJulio. F. Navarro氏, Carlos S. Frenk氏, Simon D. M. White氏の3名, BurkertはAndreas Burkert氏により提案された密度分布であり、共に暗黒物質の分布として広く用いられている。

ナルはない”のか、あるいは“各密度分布のモデルから期待される空間的広がりをもって（各対消滅モードの）暗黒物質シグナルがある”のか、である。シミュレーションデータの生成を含む一連の解析にはCTA運用開始後の解析を想定して開発されているctoolsという公開ソフトウェア¹³⁾を利用した。空間分布と対消滅スペクトルのモデルについてはそれぞれ別に用意をしておき、期待されるWIMP起源のガンマ線フラックス上限値を求めている。

5. 結 果

図3で本研究で得られたCTAによるWIMP対消滅断面積の探查可能範囲を示す。横軸が暗黒物質の質量 (TeV) であり、縦軸は対消滅断面積 (cm³/s) である。各線はガンマ線フラックスの2σ上限値から焼き直したもので、CTAでガンマ線が検出できなかった場合、各線の上側が棄却領域となる。つまり、暗黒物質の対消滅断面積が線の上側にある場合、CTAでその対消滅に起因したガンマ線のシグナルを捉えることが可能である。本研究ではりゅう座矮小銀河について16個の異なる暗黒物

質密度分布を仮定してガンマ線フラックスの上限値を求めており、その中で最も厳しい上限を出した特定のNFWのモデルの結果を淡青の短い破線で、最も緩い制限を与えた（コア+指数関数カットオフ）のモデルの結果を濃青の長い破線で表した。他の14個のモデルで得られた上限値は網掛け領域の中にあり、Burkertとラベルされた破線がその一例である。網掛け領域内のモデルにはNFW, Burkertを仮定してスケール長の異なるものや、内側での指数γの異なるものなどが含まれている。最も強い制限と弱い制限を与えた2つのモデルで期待される上限値の違いから、りゅう座矮小銀河をCTAで500時間観測して得られる暗黒物質対消滅断面積の制限が密度分布のモデルに依存して1桁程度の違いが生じることがわかる。りゅう座矮小銀河の観測を想定した場合、1つの目安である正準断面積あと1桁程度のところまで探查が可能といえる。今後もっと矮小楕円銀河の観測が進めば、本研究で例として用いたりゅう座矮小銀河よりも良い系が見つかるかもしれない。

図3からは他にもわかることがある。本研究で解析した中で最も厳しい制限を与えたNFWのモデルではJ因子がJ_{strongest} = 10^{19.15} GeV² cm⁻⁵、中心部の動径依存性はγ=1である。対して、最も弱い制限を与えたコア+カットオフのモデルではJ因子がJ_{weakest} = 10^{18.56} GeV² cm⁻⁵、γ=0である。式(*)からガンマ線フラックスの上限が同じとき断面積の制限はJ因子に反比例するが、2つの密度分布モデルで得られた制限の比は1桁程度でありJ因子の比J_{strongest}/J_{weakest} ≈ 3.9よりも大きい。これは得られるガンマ線フラックスの上限自体が密度分布に依存して変わっていることを意味する。空間的な広がりがある天体を解析する際には点源の場合と異なり観測領域の良さがJ因子の大きさだけでは決められないということである。例えばJ因子が同じであれば、指数γが小さいなど中心集中度の高い密度分布の方が制限は良くなる。point sourceとラベルされた細い破線は最も厳しい制限を与

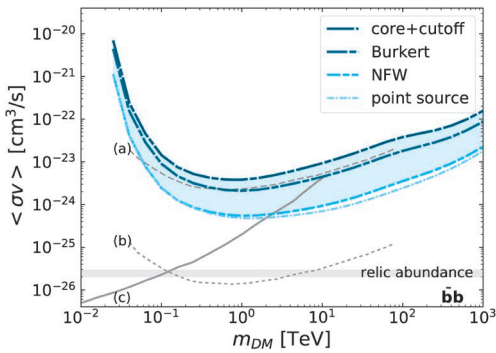


図3 CTAで500時間りゅう座矮小銀河を観測して期待されるWIMP対消滅断面積の制限。対消滅先としてはbクォーク対(bb)を仮定した。各線の上側が2σで棄却される。図のrelic abundanceと示された領域が正準断面積に相当し、現在の宇宙の暗黒物質質量を説明する際の目安値となる対消滅断面積である。参考文献14より月報のスタイルに合わせて掲載している。

たNFWモデルの場合と同じJ因子 $J_{\text{strongest}} = 10^{19.15}$ GeV² cm⁻⁵の点源を仮定した解析の結果であり、空間的な広がりを考慮した解析結果との違いから、点源を仮定することで上限値が過大評価されてしまうことがわかる。

比較のため、図3にはいくつかの線を加えている。(a), (b)の線はCTAで天の川の中心を500時間観測した際に期待される制限である¹⁵⁾。天の川の中心についても矮小楕円銀河の場合同様に暗黒物質の密度分布には大きな不定性があり、期待される制限はモデルの違いで2桁程度変わりうる。(c)の実線はこれの中で唯一実際の観測データに基づくもので、2章で紹介したフェルミ衛星の矮小楕円銀河観測から得られた制限⁷⁾である。銀河中心での予測からも、将来観測で質量TeV以上のWIMPの性質に迫るためには観測領域の暗黒物質分布をきっちりと理解しておく必要があるといえよう。

6. ま と め

本研究では暗黒物質の中でも最有力候補であるWIMPに焦点を当て、将来のガンマ線観測CTAでの検出可能性を議論した。J因子の大きな領域、すなわちWIMPの濃いところを観測することで対消滅に起因した高いガンマ線フラックスが期待できる一方で、J因子が大きくとも天体からのガンマ線放射が卓越している場合には暗黒物質のシグナルを検出するのは難しくなる。暗黒物質について包括的な理解を得るためには矮小楕円銀河のような暗黒物質密度が比較的高く、かつガンマ線源となる天体が見つかっていない系の観測が重要となる。矮小楕円銀河は暗いため暗黒物質分布が決めにくく、ガンマ線観測からWIMPの粒子的性質を導出する際に必要となる暗黒物質の空間分布についてモデルが多数存在する。CTAでは従来に比べて角度分解能が大幅に向上するため矮小楕円銀河の空間的な広がりおよびその内部での暗黒物質分布を考慮することがより一層重要にな

る。本研究では最もよく調べられているりゅう座矮小楕円銀河を例にとり、先行研究で得られている複数の密度分布を仮定してCTAで探査可能な対消滅断面積の比較を行った。その結果、密度分布のモデルに依存して探査可能な断面積は約1桁の範囲で変わりうるということがわかった。さらに、J因子の大きさだけで観測領域の良さは決まらず、暗黒物質の中心集中度が検出可能性に影響を与えることを明らかにした。

暗黒物質の正体に迫るためには天文・宇宙物理学的手法を駆使して良い観測領域を選定し、その領域内の暗黒物質の空間分布を求めることが必要である。今後、可視光観測の進展により既知のものよりJ因子の高い矮小楕円銀河が見つかる可能性も高く、矮小楕円銀河でのWIMP探査はさらに加速していくと期待できる。観測の進展により良いターゲットとなる矮小楕円銀河が見つかり、その暗黒物質密度分布も明らかになり、暗黒物質の正体解明が進むことを期待して本稿の結びとしたい。

謝 辞

本稿の内容は博士論文の一部として行った研究に基づいている。詳しい内容については2019年に筆者らが発表した投稿論文¹⁴⁾をご参照いただけると幸いである。本稿の執筆にあたっては論文の共著者である林田将明氏(立教大学)、郡和範氏(高エネルギー加速器研究機構)、および編集を担当してくださった滝脇知也氏(国立天文台)に沢山のご助言をいただいた。この場をお借りして深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 松原隆彦, 2010, 現代宇宙論-時空と物質の共進化-(東京大学出版会)
- 2) van Albada, T. S., et al., 1985, ApJ, 295, 305
- 3) Clowe, D., et al., 2004, ApJ, 604, 596
- 4) Steigman, G., et al., 2012, Phys. Rev. D, 86, 023506
- 5) Matias, P., et al., 2014, JCAP, 06, 024
- 6) Albert, A., et al., 2017, ApJ, 834, 110

7) Fermi-LAT Collaboration, 2015, Phys. Rev. Letters, 115, 231301
 8) <https://magic.mpp.mpg.de/> (2019.12.02)
 9) <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/> (2019.12.02)
 10) <https://veritas.sao.arizona.edu/> (2019.12.02)
 11) Navarro, J. F., et al., 1997, ApJ, 490, 493
 12) Burkert, A., 1995, ApJ, 447, L25
 13) Knödseder, J., et al., 2016, A&A, 593, A1
 14) Hiroshima, N., et al., 2019, Phys. Rev. D, 99, 123017
 15) CTA Consortium Collaboration, Acharya, B. S., et al., 2019, WORLD SCIENTIFIC

Search for γ -Ray Signals from Dark Matter Annihilations in Extended Dwarf Spheroidal Galaxies

Nagisa HIROSHIMA

RIKEN iTHEMS, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: The nature of dark matter, which is a non-baryonic matter component occupying $\sim 26\%$ of the total energy density of the Universe, is still unknown. One of the strongest candidates from particle physics is a so-called Weakly Interacting Massive Particle (WIMP). High-energy γ -ray emissions from WIMP annihilation are expected in GeV-TeV corresponding to the WIMP mass hence we can expect to detect them in current and future γ -ray observations. Dwarf spheroidal galaxies are well-motivated object to search for WIMP signals that we can expect little contaminations from astrophysical γ -rays keeping large γ -ray flux from WIMP annihilations. Observations of dwarf spheroidal galaxies by the *Fermi* satellite have already constrained the annihilation cross-section to be smaller than that of the canonical value for those of $m_{DM} \lesssim \mathcal{O}(10)$ GeV. In future, we can probe heavier WIMPs of $m_{DM} \gtrsim \mathcal{O}(1)$ TeV with ground-based very-high-energy γ -ray experiments such as Cherenkov Telescope Array (CTA). Different from the satellite observations, we can resolve dwarf spheroidal galaxies as spatially extended sources in a ground-based experiment. Considering observations using CTA, we investigate how the spatial extension of target dwarf spheroidal galaxies affects the feasibility of detecting WIMP annihilation signals in them.