

ビッグデータによる暗黒物質対消滅探査： 遠方銀河弱重力レンズ効果と ガンマ線背景放射の相関解析



白 崎 正 人

〈自然科学研究機構国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: masato.shirasaki@nao.ac.jp

複数の大規模な天文観測が暗黒物質の存在を明らかにしてきたが、その素粒子的な性質はいまだ謎に包まれている。筆者らは、天文観測より得られる大容量データを駆使し、暗黒物質の素粒子的な性質を制限するための統計手法を研究してきた。本稿では、基本的な素粒子的性質の一つである対消滅を例に挙げ、銀河撮像観測とガンマ線観測の統計解析により、いかに暗黒物質対消滅に迫るかにについて紹介する。筆者らは、Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Surveyによる弱重力レンズ信号とFermi Large Area Telescopeによるガンマ線背景放射の相関解析を世界に先駆けて行い、既存のデータには相関がないことを示した。この測定結果と構造形成による理論モデルの比較から、暗黒物質対消滅に関する独立な制限を与えることに成功した。将来銀河撮像観測においては、幅広い質量の暗黒物質の対消滅について重要な示唆が得られることが期待される。

1. 暗黒物質の存在

天文観測において、電磁波で観測できない物質の存在を初めて指摘したのはFritz Zwickyである。1933年に公表された論文¹⁾のなかで、Zwickyはかみのけ座銀河団に含まれる銀河のスペクトルを測定し、ドップラー効果により期待される銀河の速度を推定した。さらに、かみのけ座銀河団にポリアル定理を適用し、それぞれの銀河を系内に保持しておくのに必要な銀河団全体の質量を見積もった。結果として、力学的に見積もられた銀河団質量と銀河団内の銀河の光度の比（質量光度比）をとると、太陽系近傍の質量光度比の約400倍も大きく、銀河団には、少なくとも可視光では見えない何らかの物質がないと、銀河一つひとつを局所的にとどめておくことができないことがわかった。

Zwickyは銀河団内の目には見えない物質を暗黒物質と呼び、彼の指摘以降、現在に至るまで暗黒物質についての観測的示唆はいくつもある。近傍銀河の中性水素観測から得られる銀河回転曲線、宇宙マイクロ波背景放射の角度スペクトルなど、銀河団に限らず極めて幅広い距離スケールで暗黒物質の存在が示唆されている。

近年では、光では見えない暗黒物質の分布を見積もる方法として、本稿のキーワードの一つである重力レンズ現象がよく用いられている。銀河撮像観測における遠方銀河の弱重力レンズ解析は、観測対象の天体がどのような状態にあるかを仮定せずに、直接的に視線方向の物質分布を見積もることのできる強力な手法であり、21世紀に入り急速に発展してきた。

2. 重力レンズ現象

一般相対論によると、宇宙に広がる物質の空間分布が重力源となり時空をゆがめ、ゆがめられた時空内を通過する光子の軌跡は変更を受ける。この現象は重力レンズ現象と呼ばれ、視線方向に位置する重力源が高密度であればあるほど、その効果は大きい。重力レンズ現象は背景天体の像を円弧状にまで変形させる場合もあるが、大抵の場合、重力レンズ現象による像のゆがみは極めて小さい。本稿で着目する重力レンズ現象は、一つひとつの像のゆがみが小さい場合で、弱重力レンズと呼ばれる。

2.1 弱重力レンズ

弱重力レンズによる像のゆがみは、元々の背景天体の位置ベクトル β 、弱重力レンズを受けて観測される位置ベクトル θ として、以下の 2×2 行列により定量化される。

$$A_{ij} = \frac{\partial \beta^i}{\partial \theta^j} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

ここで、 κ は収束率 (convergence)、 γ は歪み率 (shear) と呼ばれ、弱重力レンズ解析における基本量である。円形の像の背景天体を考えると、収束率は像の拡大と縮小、歪み率は像の変形を記述していることがわかる (図1)。

非一様な時空における測地線方程式から、収束率と歪み率はともに視線方向の重力ポテンシャルの2階微分に依存することが示される。特に、収束率はポアソン方程式により視線方向の物質密度と関連づけることができ、

$$\kappa(\theta) = \int_0^{z_{\text{source}}} dz W_\kappa(z) \delta_m(\theta, z), \quad (2)$$

と書き表すことができる。ここで、 z は赤方偏移であり、 z_{source} は遠方天体の赤方偏移、 $\delta_m(\theta, z)$ は赤方偏移 z における物質分布の空間揺らぎである。式(2)の積分内のカーネル部分 $W_\kappa(z)$ は、

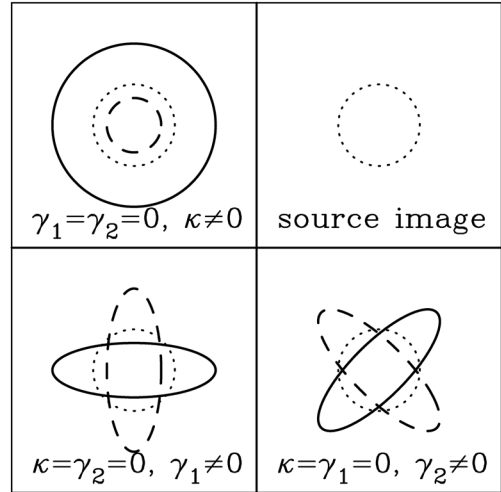


図1 重力レンズの基本量. 右上パネルの点線は重力レンズ効果を受ける前の円形の像. その他のパネルでは、収束率もしくは歪み率のいずれかが0でない場合を示している. 実線が正、波線が負の場合に対応している.

遠方天体と重力源の距離、宇宙の平均物質密度に依存する。

つまり、弱重力レンズ解析の基本量は、宇宙の膨張史 (天体までの距離) と宇宙の物質進化 (物質密度分布) の二つの宇宙論的な情報を富に含んでいる。これこそが、多くの将来銀河撮像観測で、弱重力レンズ解析が宇宙論研究の主要研究目的に位置づけられている要因である。

2.2 解析手法

銀河撮像観測における弱重力レンズ解析の手法とその応用について、簡単に述べておく。まず、多くの銀河撮像観測における直接の観測量は、銀河の形状の扁平度合いを表す楕円率である。銀河の楕円率は、弱重力レンズにおいては歪み率の推定量になっている。歪み率と収束率はともに重力ポテンシャルの2階微分に依存していたので、これらの間にはフーリエ空間上で単純な関係がある。典型的な地上望遠鏡による銀河撮像観測では、銀河の楕円率は0.4程度のばらつきをもつ。一方で、予想される弱重力レンズ起因の楕円率

は、大きくても0.1程度であり、個々の銀河だけ見ている弱重力レンズ信号を検出することは極めて困難である。このような事情から、多数の背景銀河を使った統計解析により弱重力レンズ信号を検出する方法がさまざま提案されてきた。

最もよく用いられる統計手法は、離れた2点の銀河の楕円率の角度相関を測ることである。この2点相関は、収束率の2点相関と関連しており、ひいては物質分布がどのスケールに群れ集まっているか（クラスタリング）を調べる有力な統計手法となっている。この手法では、特に銀河団（～Mpc）から大規模構造（100 Mpc）のスケールにわたる物質分布のクラスタリングを測定できる。2000年に四つの独立な研究グループが1平方度程度の銀河撮像観測により、銀河楕円率2点相関の検出を報告して以降²⁾⁻⁵⁾ これまでに多くの観測により、異なる2点の銀河楕円率が相関していることが示されてきた。

154平方度を確保している現存する最大の重力レンズサーベイCanada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS) は、銀河楕円率2点相関を分離角1分から5度の範囲で精密に測定し、宇宙の平均物質密度と物質密度揺らぎのクラスタリングの強さについて興味深い制限を示している⁶⁾。すばる望遠鏡の新カメラHyper Suprime-Cam (HSC) による銀河撮像計画では、さらに精密な物質分布の測定が可能である。

他には、銀河団のような天体に注目し、背景銀河の楕円率が天体の中心からどのように分布するかを調べる解析もよく行われる。このような解析は、例えば銀河団の周りの物質分布を測定するのに利用される⁷⁾。

3. ガンマ線背景放射

上記の弱重力レンズ解析は、宇宙の物質分布を明らかにする点においては非常に優秀であるが、

暗黒物質の素粒子的な性質を探るという意味ではその有用性は限られている。例えば、暗黒物質の崩壊や対消滅といった反応には、弱重力レンズ解析は感度がない。そこで登場するのが、本稿二つめのキーワードであるガンマ線背景放射である。

ガンマ線背景放射とは、ガンマ線の波長域で銀河系内起源ではない全天をほぼ等方に満たす放射成分を指す。1970年代に、OSO-3衛星とSAS-2衛星が相次いでガンマ線による等方な放射成分の検出を報告した^{8), 9)}。現在までにコンプトン衛星に搭載されたEnergetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET)¹⁰⁾ やフェルミ (Fermi) 衛星のLarge Area Telescope (LAT) 観測装置¹¹⁾ が精力的にデータを蓄積し、ガンマ線背景放射の存在は確実視されている。最新の結果は、フェルミ衛星によるもので、ガンマ線背景放射のエネルギースペクトルは、100 MeVから820 GeVにわたり、べき型と指数的カットオフのスペクトルで表される^{*1)}。

3.1 起源

ガンマ線背景放射の起源については、いまだ不明な点が多い。

すぐに思いつくもっともらしい寄与としては、非常に明るい活動銀河核の一種であるブレーザーが挙げられる。これは、ガンマ線観測により検出される銀河系外天体の大半がブレーザーであるためである。観測できなかった暗いブレーザーからの放射の重ね合わせが背景放射だと解釈して、その寄与を見積もる研究はこれまでに盛んに行われている。観測されたブレーザーの数を再現する光度関数を作り、その光度関数を光度が暗い側まで外挿することで、ブレーザーからの寄与は見積もられる。必然的にモデルによる不定性が大きくなるが、現在の観測結果から示唆されるブレーザーからの寄与は、100%ではないだろうと考えられている¹²⁾。特に、ガンマ線背景放射の非等方性

*1) 指数的カットオフは、宇宙可視赤外背景放射と高エネルギーガンマ線との電子・陽電子対生成反応によるものだと考えられる。

の測定結果¹³⁾を考えると、ブレーザー単独でガンマ線背景放射を説明するのは厳しそうである¹⁴⁾。

ガンマ線観測により検出されたブレーザー以外の銀河系外天体の寄与も、もちろんあるかもしれない。例えば、星形成銀河や電波銀河はその候補である。しかし、これらの種族の検出数は、ブレーザーに比べると圧倒的に少なく、ガンマ線光度関数のような統計量を導くには至っていない。近傍の星形成銀河や電波銀河のガンマ線光度とその他の波長での光度の相関を使って、これらの背景放射への寄与を見積もる試みはあるが^{15), 16)}、現状ではやはり不定性が大きい。

まとめると、ガンマ線背景放射は、ブレーザー、星形成銀河や電波銀河からの放射の足し合わせにより説明可能かもしれないが、決定的なモデルはいまだないのが正直なところである。

3.2 暗黒物質対消滅

ガンマ線背景放射に寄与するその他の候補として、暗黒物質対消滅によるガンマ線放射がある。天文観測により示唆される暗黒物質の特徴^{*2}を満たす素粒子物理学が予言する暗黒物質候補としてWIMP (Weakly Interacting Massive Particles) が挙げられる。典型的なWIMPの例として、最も軽い電氣的に中性な超対称性粒子であるニュートラリーノがある。

WIMPは、宇宙初期には高温プラズマ中で対生成と対消滅を繰り返して熱的平衡状態にあったものの、宇宙膨張によりWIMPの密度が下がるとあるところで対消滅反応が止まり、熱浴との平衡から離脱し残存する。現在のWIMP残存量が、宇宙マイクロ波背景放射などの観測から示唆される暗黒物質平均密度に一致するためには、対消滅断面積が $\langle\sigma v\rangle\sim 3\times 10^{-26}\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$ 程度であることが予想される。この対消滅断面積はおおむね弱い相互作用による反応断面積と同程度であり、例

えばニュートラリーノの理論的に予測される対消滅断面積とよく一致する。この一致こそWIMPが暗黒物質の最有力候補としばしば言われるゆえんである。

さて、WIMP仮説に立った場合、暗黒物質は宇宙の高密度領域で対消滅しているはずである。よって、対消滅により生成されるガンマ線を探すことは、暗黒物質探査の有力な手法の一つである。暗黒物質は系外に広がっているはずであるので、暗黒物質対消滅のガンマ線背景放射の寄与が盛んに議論されてきた。観測されたガンマ線背景放射のエネルギースペクトルはべき型であるのに対し、暗黒物質対消滅起因のガンマ線エネルギースペクトルは通常山なりの形をとる。このことから、暗黒物質対消滅はガンマ線背景放射へ主要な寄与はしていないだろうと予想されている。この予想は背景放射強度の“平均値”を議論している限りもっともらしいが、さらに一歩進めて、背景放射強度の“非等方性”に注目するとどうなるだろうか。

暗黒物質対消滅に起因する背景ガンマ線の光子数 δn は、

$$\delta n(\boldsymbol{\theta}) = \int dz W_{\text{EGB}}(z) \delta_m^2(\boldsymbol{\theta}, z), \quad (3)$$

と書き表せる。ここで、式(3)の積分内の $W_{\text{EGB}}(z)$ は、暗黒物質の質量、対消滅断面積、1回の対消滅あたりのガンマ線エネルギースペクトルに依存している。弱重力レンズの場合(式(2))と異なり、暗黒物質対消滅による背景ガンマ線を見ると、観測量は物質密度揺らぎの2乗に依存する。暗黒物質は重力相互作用を通じて階層構造を形成し、結果として密度揺らぎ δ_m は極めて非一様になる。ゆえに、暗黒物質対消滅からくるガンマ線も天球面上で非等方に分布するはずであり¹⁷⁾、ガンマ線背景放射の非等方性は、暗黒物

^{*2} 代表的なものとして、重力以外の相互作用が弱いこと、非相対論的速度をもつこと(速度分散が小さく大規模構造を形成しうること)、寿命が宇宙年齢程度であることなどがある。これらの要請を満たす暗黒物質候補として、新素粒子以外には、例えば極初期宇宙に生成される原始ブラックホールがある。

質対消滅を探る新手法として近年注目を集めている。

4. 銀河撮像観測とガンマ線観測の 相関解析

ガンマ線背景放射の中に暗黒物質対消滅の痕跡はあるか？ この問いに答えるための単純な手法がある。第2章で述べたように、弱重力レンズ解析は暗黒物質分布を観測的に知る非常に強力な手法である。よって、ガンマ線背景放射が暗黒物質分布に関係があるかどうかを調べるには、ガンマ線背景放射が弱重力レンズ信号（～暗黒物質分布）と相関しているかを測定すれば良い。

4.1 単純な例 一単一銀河団一

まずは単純な例を考えよう。銀河系外にあって暗黒物質が高密度に集まっている領域（暗黒物質ハロー）として、銀河団を考える。銀河団は大きさが数Mpc、総質量が 10^{14} 太陽質量程度の宇宙

最大の重力束縛系である。銀河団内部の暗黒物質分布は、弱重力レンズ効果を通じて背景銀河の像をわずかにゆがめる。それと同時に、もし暗黒物質が対消滅しているなら、物質分布の2乗に比例した割合でガンマ線を放射しているはずである。図2は、典型的な銀河団がつくる遠方銀河像のゆがみ度合いと、暗黒物質対消滅によるガンマ線分布を表している。弱重力レンズ効果による像のゆがみは、銀河団を中心にした円の接線に並ぶことが期待される。一方で、暗黒物質対消滅は、密度分布の2乗に比例してガンマ線を放射するので、期待されるガンマ線分布は比較的中心に集積する（図2の銀河団のピリアル半径は8分程度である）。

よって、おおざっぱに言えば、ガンマ線背景放射が強い領域の周りに、図2に示したような遠方銀河像の楕円率の配置があるかどうかを調べることになる。

4.2 理論モデル

4.1節では、ある一つの銀河団サイズの暗黒物質ハローに着目したが、実際に観測されるガンマ線背景放射や弱重力レンズ信号には、さまざまな質量の暗黒物質ハローが寄与していることが予想される。さまざまな質量からの寄与を見積もるためには、構造形成理論ではよく知られた解析モデルであるハローモデル¹⁸⁾を参考にする。

ハローモデルでは、ある点での暗黒物質密度分布は、大小さまざまな暗黒物質ハローの周りの密度分布の重ね合わせで表す。このモデルでは、ある質量の暗黒物質ハローの存在量とクラスタリングの強さ、ハロー中心からの物質密度分布を与えれば、密度揺らぎに関する統計的な性質が決定される。暗黒物質ハローの存在量とクラスタリングについては、解析的アプローチと数値実験でよく研究されている理論モデルが存在する¹⁹⁾。一方、暗黒物質ハローの質量密度分布は、銀河団や銀河については観測データによる検証が行われていて、数値実験が示唆する密度分布とよく一致して

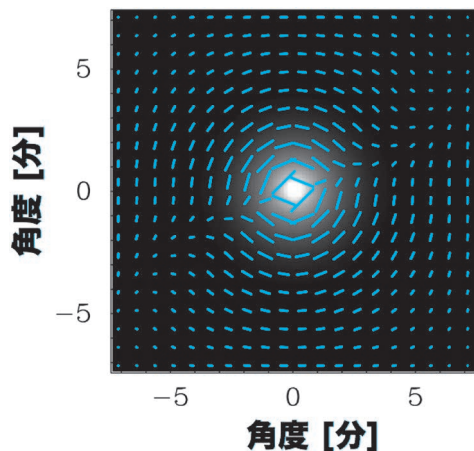


図2 典型的な銀河団が作る遠方銀河の弱重力レンズ効果と、暗黒物質対消滅によるガンマ線分布。白黒の2次元マップがガンマ線分布で、青線が背景銀河の像の向きと楕円率の大きさを表している。ここでは、 10^{14} 太陽質量の暗黒物質ハローが約540 Mpc（赤方偏移0.15）離れたところに位置していて、背景の銀河は約1,700 Mpc（赤方偏移1）の距離にあると仮定した。

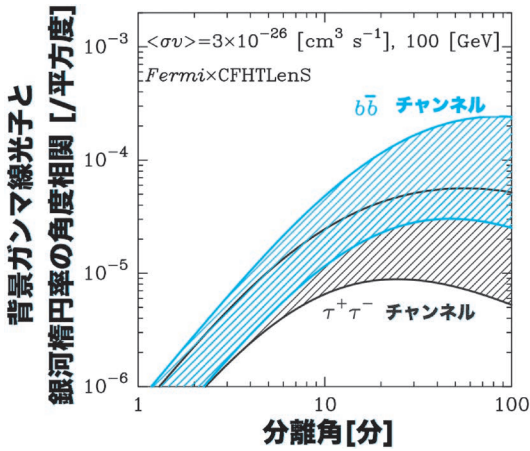


図3 背景ガンマ線光子数と銀河楕円率の角度相関の理論モデル。赤方偏移0.2-1.3の銀河と1-500 GeVのガンマ線光子を仮定。100 GeVの暗黒物質が、反応断面積 $\langle\sigma v\rangle=3\times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ で対消滅する場合。青色領域は暗黒物質がボトムクォーク/反ボトムクォークに、灰色領域はタウ粒子/反タウ粒子に対消滅する場合に対応する。各対消滅チャンネルでの角度相関の違いは、モデル計算で考慮する暗黒物質ハロー最小質量の違いを反映している。

いる²⁰⁾。これらの情報を総合的に組み合わせて種々の統計量を計算する試みは多方面で行われており、例えば銀河の角度相関は、ハローモデルでよく説明できることが示されている²¹⁾。

測定したい統計量である背景ガンマ線光子数と銀河楕円率の角度相関を、ハローモデルに基づき予測した結果^{22), 23)}を図3に示した。

背景ガンマ線の光子数は、暗黒物質が対消滅してどのような粒子が生成されるかに依存している。本稿では、以下の2種類の対消滅チャンネル (i) 暗黒物質→ボトムクォーク-反ボトムクォーク ($b\bar{b}$) (ii) 暗黒物質→タウ粒子-反タウ粒子

($\tau^+\tau^-$) を考える。

図3の斜線部は、ハローモデルの不定性を反映している。ハローモデルの不定性として、暗黒物質ハローの最小質量が挙げられる。図3では、最小質量として、 10^{-6} , 10^6 太陽質量の二つの場合^{*3)}をそれぞれ示してある。12桁の不定性を考慮しても、ハローモデルによる不定性は1桁程度である。また、10分角以下の相関が急峻に減少している効果は、フェルミ衛星によるガンマ線観測の角度分解能に関係している。フェルミ衛星による1 GeV以上の帯域でのガンマ線角度分解能は1度程度であり、残念ながら、図2に示しているような銀河団内部の相関を調べることは現状では難しい。現行の観測データで調べることのできる相関は角度スケールが1度以上のものであり、大規模構造が支配する領域である。

4.3 データ解析

観測データによる相関解析の測定は、CFHTLenSによって得られた5,669,414個の銀河の楕円率と、フェルミ衛星によるガンマ線観測を併用して行った。両者ともインターネットを介して自由にダウンロードできる^{*4)}。

背景ガンマ線光子と銀河楕円率の角度相関を測定するにあたって、はじめに打ち当たる壁は、いかにして背景ガンマ線光子を導出するかである。観測されたガンマ線光子は当然系内外の区別なく測定されているので、系外の背景ガンマ線光子数を見積もるには、系内ガンマ線光子を正確に推定しておく必要がある。系内ガンマ線の寄与は、大別すると2種類ある。一つは宇宙線陽子が系内分子雲にある原子核と破碎衝突を起こし、中性パイ粒子が生成され、その崩壊により生じるガンマ線

^{*3)} 10^{-6} 太陽質量は、典型的なWIMPの自由減衰長に対応する質量であり、 10^6 太陽質量は、バリオンのジーンズ質量と同程度である。自由減衰とは、粒子の速度分散に起因する自由運動で密度揺らぎの成長を減衰させる効果で、自由減衰長以下のスケールでの構造形成は抑制される。ジーンズ質量は、自己重力で収縮を始めるための質量の下限に対応する。

^{*4)} このような貴重なデータが公開されており、アイデアさえあれば面白い研究ができることにたいへん感謝している。筆者らの研究も、“実際のデータがあるんだから測定してみればいいじゃないか”と割と気軽に始めたところがなきにしもあらずである。

Fermi×CFHTLenS W1

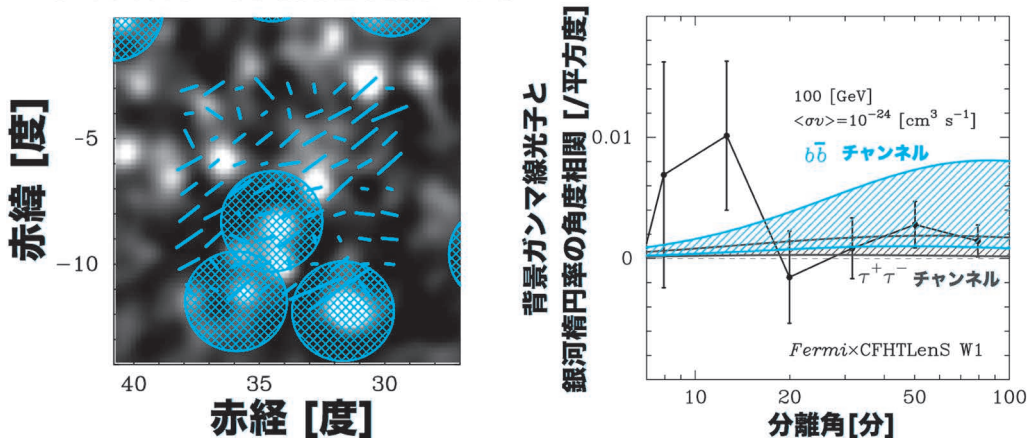


図4 (左パネル) Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS) による銀河楕円率と、フェルミ (Fermi) 衛星による背景ガンマ線光子数。背景のグレイマップがガンマ線光子数、青色の実線がCFHTLenS W1領域の銀河楕円率を表している。網かけ部分は点源マスク領域に対応する。視覚化のため、ガンマ線光子数は0.6度のガウシアンスムージング、銀河楕円率は1平方度での平均をとった。(右パネル) 背景ガンマ線光子数と銀河楕円率の角度相関の測定結果と理論モデル。誤差棒付きの点が実測値、斜線部分が解析モデルによる予測。ここでは、100 GeVの暗黒物質が、反応断面積 $\langle\sigma v\rangle=10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ で対消滅する場合を示している。実測値は、点線(相関なし)と統計的に有意な差はない。

である。もう一つは、系内放射場と高エネルギー宇宙線電子による逆コンプトン散乱の結果生じるガンマ線である。中性パイ粒子崩壊によるガンマ線は、21 cm線観測による原子ガス分布とCO分子の2.6 mm輝線観測による分子ガス分布を基に推定される。一方で、逆コンプトン散乱によるガンマ線光子は、系内放射場と系内の宇宙線伝播を数値実験でモデル化する手法が主流である^{*5}。

図4の左パネルに、系内成分のモデル化を基に導出した1 GeV以上の系外ガンマ線マップと、CFHTLenSによる銀河楕円率の1度角の平均値を示した。図中の青色の実線は銀河楕円率の向きと大きさを反映している。網かけの領域は、ガンマ線点源の影響を取り除くためのマスク領域であ

る。銀河撮像観測とガンマ線観測から得られる2種のデータの相関を示したのが、図4の右パネルである。実測値は誤差棒付きの点で示されており、角度スケール1分角から100分角の測定値のうち、10分角以上の領域を拡大して表示した。参考として、100 GeVの暗黒物質が $\langle\sigma v\rangle=10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ の反応断面積(標準的な値の30倍程度大きい!)で対消滅する場合の理論予測も示している。注意深く統計誤差を推定した結果^{23), *6}、CFHTLenSによる154平方度の観測領域で、有意な相関は見つからなかった。

4.4 比較と議論

4.3節での解析では、有意な相関を発見できなかった。しかし、測定結果を基に、4.2節の理論

*5 CFHTLenS観測領域が銀河面から離れていることを考えると、逆コンプトン散乱によるガンマ線光子は優勢ではないことが予想される。実際、CFHTLenS領域内の観測されたガンマ線分布は、原子ガスおよび分子ガス分布をよくトレースしている。

*6 ランダムに作成した銀河楕円率とガンマ線光子数による500回の模擬観測により推定した。模擬銀河楕円率は、観測された楕円率をランダムに回転させて、模擬ガンマ線光子数はポアソン過程により作成した。

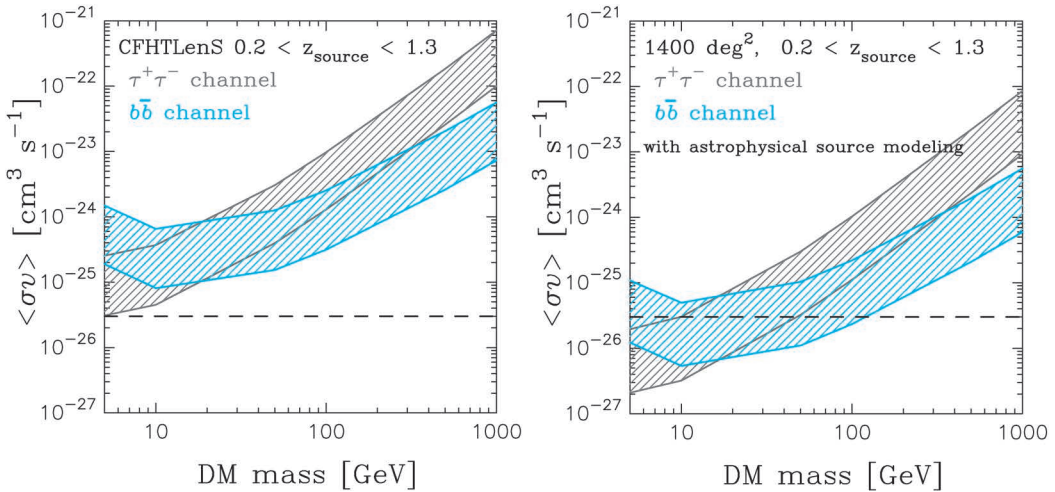


図5 (左パネル) 背景ガンマ線光子数-銀河楕円率の角度相関により得られた暗黒物質対消滅に関する上限. 横軸に暗黒物質の質量, 縦軸に対消滅断面積をとった. 2種類の対消滅チャンネル ($b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$) における制限を示している. 斜線部は解析モデルの不定性に起因している. (右パネル) 1,400平方度の銀河撮像観測とフェルミ (Fermi) 衛星のガンマ線観測の相関解析で期待される暗黒物質対消滅に関する上限. 理想的にプレーザーなどに代表される天体起源の相関をすべて差し引けた場合を示した. (両パネルとも, 文献23より引用).

モデルと比較することで, 暗黒物質の対消滅断面積に上限をつけることはできる. 図5の左パネルに, 相関解析の実測値から期待される暗黒物質対消滅に関する上限を示した. 本稿の仮定した理論モデルの不定性が1桁程度あるため, 上限といっても斜線部で示されている. 点線は, 現在の暗黒物質の平均密度を説明できる暗黒物質対消滅である. 筆者らの方法による制限は, 例えば近傍の矮小銀河のガンマ線観測²⁴⁾ からくる制限と比較すると, 1桁程度弱い制限になっている.

しかし, 話はここで終わりではない. 筆者らの利用した銀河撮像観測は, 154平方度の観測領域しかカバーできていないが, 将来銀河撮像観測では1,000平方度を超える観測が予定されている. 本稿で扱う相関解析の統計誤差は, 利用できるデータを増やせば増やした分だけ減らすことができる. 例えば, 10倍観測領域を大きくすれば, $\sqrt{10}$ (~3.2) 倍誤差棒を小さくできるのである.

さらに, 本稿での理論モデルでは, 暗黒物質対消滅によるガンマ線しか角度相関を生じさせないと暗に仮定していたが, 実際にはそうではない. 背景銀河の像をゆがめさせる前景の暗黒物質ハロー内にプレーザーなどの天体が住んでいれば, やはり角度相関は生じるはずであり, この寄与をモデル化して差し引くことで40-70%の制限の改善が見込める. 図5の右パネルには, HSCに対応する1,400平方度の観測領域で, 天体起源の相関を正しくモデル化できた場合の上限の予測を示してある. このような状況では, 幅広い質量範囲で標準的なWIMPの予言する対消滅反応断面積に上限がさしかかる^{*7}. HSCによる将来銀河撮像観測は, 暗黒物質対消滅の探査という興味深いトピックにも威力を発揮することが期待される.

5. まとめと将来への展望

本稿では, これまでの天文観測の大容量データ

*7 保守的な制限として, 天体起源の相関を差し引かずとも, 20,000平方度を確保すれば, 図5の右パネルと同等の上限が期待できる.

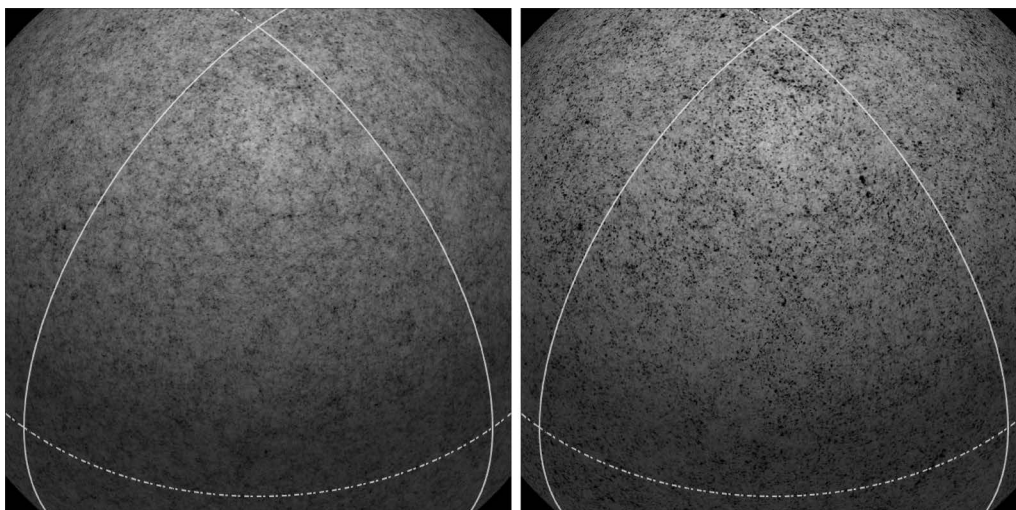


図6 数値実験による模擬重力レンズカタログ（左）と期待される暗黒物質対消滅によるガンマ線分布（右）の一例。左図のグレーマップは、弱重力レンズで観測される物質分布（黒い領域ほど高密度）、右図のグレーマップは、暗黒物質対消滅起因の背景ガンマ線強度（黒い領域ほど強い放射）を示している。中央の三角形の領域がおおよそ5,000平方度に対応する。

を駆使し、暗黒物質の素粒子的な性質の一つである対消滅を制限する統計手法を紹介した。CFHTLenSによる既存の最大規模の弱重力レンズデータと、フェルミ衛星による高精度ガンマ線観測の角度相関解析を世界に先駆けて行い、二つのデータに有意な相関は見られないことを示した。標準的な構造形成モデルを基にした理論モデルと、既存の観測データの相関解析の比較から、暗黒物質対消滅に関する独立な制限を導くことに成功した。本稿で紹介した統計手法は、近傍銀河のガンマ線観測による手法とは独立な手法であり、宇宙論的なスケールによる検証である。また、将来観測で本稿の統計手法を応用することで、暗黒物質対消滅に関して、極めて有用な制限が期待できる^{*8}。さらに、将来観測では、銀河中心のガンマ線超過の暗黒物質対消滅による解釈²⁵⁾の独立なテストも行うことが可能である。

本稿で取り上げた解析手法は、将来観測で興味深い示唆を与える可能性があるものの、残された問題もある。例えば、背景ガンマ線光子数の推定の系統誤差は、暗黒物質対消滅の反応断面積にして、 $\langle\sigma v\rangle\sim 3\times 10^{-26}\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$ 程度に対応するため、系内ガンマ線寄与のモデル化はよりいっそう重要性を増してくる。さらに、筆者らの解析では、観測できる宇宙が一つしかないことからくるサンプルバリエーションの効果は取り入れておらず、1,000平方度を超える解析では重要になるだろう。

これらの問題点を定量的に理解するために、全天にわたる模擬的な観測マップを作成することは非常に有用である（図6）。筆者らは、国立天文台CfCAのXC30システムを利用し、大規模な数値実験を行うことで、将来観測における暗黒物質対消滅の検出可能性を調査していく予定である。

また、本稿では、暗黒物質分布の指標として弱

^{*8} 本稿では、ガンマ線観測の進展は考慮していないが、フェルミ衛星は今後もガンマ線データを蓄積していく。ガンマ線観測の進展により、系内ガンマ線やガンマ線点源の理解は大きく発展し、暗黒物質対消滅の探査はさらに精密化されるだろう。

重力レンズを用いたが、他の方法論もある。銀河分布は宇宙の物質分布のよいトレーサーであることは知られているし、宇宙マイクロ波背景放射の統計解析から導かれる前景物質分布も良い候補である。あらゆる物質分布トレーサーを利用し、暗黒物質対消滅探査ならびにガンマ線背景放射の起源を明らかにできるかどうかは、非常に興味深い問題である。

暗黒物質の正体は何か。過去80年の天文観測が残したこの問いに、近い将来得られる1,000平方度を超える銀河撮像観測データとガンマ線観測データの詳細な統計解析が、答えてくれるかもしれない。

謝 辞

本稿で紹介した結果は、筆者の博士論文、および投稿論文²³⁾に基づいたものです。データ統計解析の計算の一部は、国立天文台 CfCA の XC30 を利用して行われました。指導教官である吉田直紀氏をはじめ、東京大学宇宙理論研究室、ビッグバン宇宙国際研究センター、カブリ数物連携宇宙研究機構の皆様には、たいへんお世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。最後に、本稿の執筆を薦めてくださった大栗真宗氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Zwicky F., 1933, *Helvetica Physica Acta* 6, 110
- 2) Bacon D. J., et al., 2000, *MNRAS* 318, 625
- 3) Kaiser N., et al., *ApJ*, submitted
- 4) Van Waerbeke L., et al., 2000, *A&A* 358, 30
- 5) Wittman D. M., et al., 2000, *Nature* 405, 143
- 6) Kilbinger M., et al., 2013, *MNRAS* 430, 2200
- 7) 大栗真宗, 2011, *天文月報* 104, 30
- 8) Kraushaar W. L., et al., 1972, *ApJ* 177, 341
- 9) Fichtel C. E., et al., 1973, *ApJ* 186, L99
- 10) Sreekumar P., et al., 1998, *ApJ* 494, 523
- 11) Ackermann M., et al., 2015, *ApJ* 799, 86
- 12) 井上芳幸, 2012, *天文月報* 105, 473
- 13) Ackermann M., et al., 2012, *Phys. Rev. D* 85, 083007
- 14) Cuoco A., et al., 2012, *Phys. Rev. D* 86, 063004
- 15) Ackermann M., et al., 2012, *ApJ* 755, 164

- 16) Inoue Y., 2011, *ApJ* 733, 66
- 17) Ando S., Komatsu E., 2006, *Phys. Rev. D* 73, 023521
- 18) Cooray A., Sheth R., 2002, *Physics Reports* 372, 1
- 19) Sheth R. K., et al., 2001, *MNRAS* 323, 1
- 20) Mandelbaum R., et al., 2006, *MNRAS* 368, 715
- 21) Zheng Z., et al., 2007, *ApJ* 667, 760
- 22) Camera S., et al., 2013, *ApJ* 771, L5
- 23) Shirasaki M., et al., 2014, *Phys. Rev. D* 90, 063502
- 24) Ackermann M., et al., 2014, *Phys. Rev. D* 89, 042001
- 25) Hooper D., Linden T., 2011, *Phys. Rev. D* 84, 123005

Probing Dark Matter Annihilation with Big Data: Cross-Correlation of Cosmic Shear and Extragalactic Gamma-Ray Background

Masato SHIRASAKI

Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Although an array of astronomical surveys have shown “evidences” of the existence of dark matter, physical properties of dark matter are still unknown. The authors investigated the statistical method to constrain on the nature of dark matter with big data taken from astronomical observations. In this article, we pay a special attention to dark matter annihilation and introduce the cross-correlation analysis of weak gravitational lensing signal and extragalactic gamma-ray background. We performed the first measurement of the cross-correlation by using the real data set obtained from Canada–France–Hawaii Telescope Lensing Survey and the Fermi Large Area Telescope. We found that the measured cross-correlation is consistent with a null signal. Comparing the result to theoretical predictions based on structure formation, we placed an independent constraint on dark matter annihilation. We also show that future lensing surveys will increase sensitivity to probe annihilation cross section and be useful to constrain on the canonical value of annihilation cross section for wide range of mass of dark matter.