

論文の内容の要旨

Probing Cosmic Dark Matter and Dark Energy with Weak Gravitational Lensing Statistics

(弱重力レンズ統計を用いた暗黒エネルギーと暗黒物質の観測的検証)

氏名 白崎 正人

最新の観測により、我々の宇宙の組成や膨張史が明らかになりつつある。複数の観測結果に基づく標準的な宇宙モデルは Λ CDM 模型と呼ばれている。これは、現在の宇宙のエネルギー組成の 96% が、暗黒物質と暗黒エネルギーで構成されているとするモデルであり、暗黒物質と暗黒エネルギーの物理的な性質については、未だ不明な点が多い。宇宙の暗黒成分の性質を制限するために、世界中で大規模な観測計画が複数予定されている。これらの観測計画の中核をなしているのが、重力レンズ解析である。重力レンズとは、銀河などの天体の像が、宇宙空間に存在する物質分布によりゆがめられる現象である。一般に重力レンズによる天体像のゆがみはわずかであるが、ゆがみを統計的に解析することにより、視線方向に存在する物質分布を復元することができる。復元された物質分布には、宇宙の暗黒成分に関する豊富な宇宙論的情報が含まれているため、重力レンズ解析は宇宙論研究の新手法として、21 世紀に入りより活発に研究されてきた。

重力レンズ解析により復元された物質分布から、どのような手法を通じて宇宙の暗黒成分についての情報を得るかについては、決定的なアプローチが未だ確立されていない。少なくとも、従来の宇宙論研究における標準的な統計量である 2 点統計のみでは、重力レンズ現象の含む宇宙論的情報を全て引き出せないことが知られていた。これは、重力レンズ現象が、重力による物質分布の非線形成長に支配されていることに起因している。重力非線形成長により、物質分布の統計的な性質が非ガウスのになり、結果として重力レンズの観測量も非ガウス性を示す。

本論文では、重力レンズ解析を通じて宇宙の暗黒成分に関する理解を深めることを目的に、異なる 2 つの重力レンズ統計手法の有用性と応用可能性について調査した。

まず、暗黒エネルギーの物理的な性質を制限することを目的に、物質分布の非ガウス性に起因する宇宙論的情報に注目した。非ガウス性に関する情報を引き出す最も単純なアプローチは、2 点統計より高次の統計量を利用することである。そこで、我々は、高次統計量としてミンコフスキー汎関数という統計量に着目した。この統計量は、重力レンズ解析で復元された 2 次元物質分布マップのある閾値に対して、(1) 閾値以上を占める領域の割合、(2) 閾値での等高線の長さ、(3) 閾値での等高線の曲率で定義される。ミンコフスキー汎関数には、2 点統計以上の多点統計の情報が自然に組み込まれている。我々は、重力による物質分布の非線形成長を正確に取り入れることのできる重力レンズシミュレーションを発展させ、シミュレーション内で、実際に観測される銀河の三次元位置情報と像のゆがみ情報を同時に組み込む手法を開発した。この手法により作成された重力レンズ模擬カタログには、重力による非線形性と複雑な観測効果を同時に含めることができる。このシミュレーション結果を利用して、多数の重力レンズ模擬観測を実行し、ミンコフスキー汎関数の有用性を調査した。結果として、観測に含まれるマスク領域による銀河の非一様な角度分布などの観測効果を加味しても、ミンコフスキー汎関数は宇宙モデル依存性をもつことがわかった。さらに、模擬観測の結果をもとに、将来観測におけるミンコフスキー汎関数を用

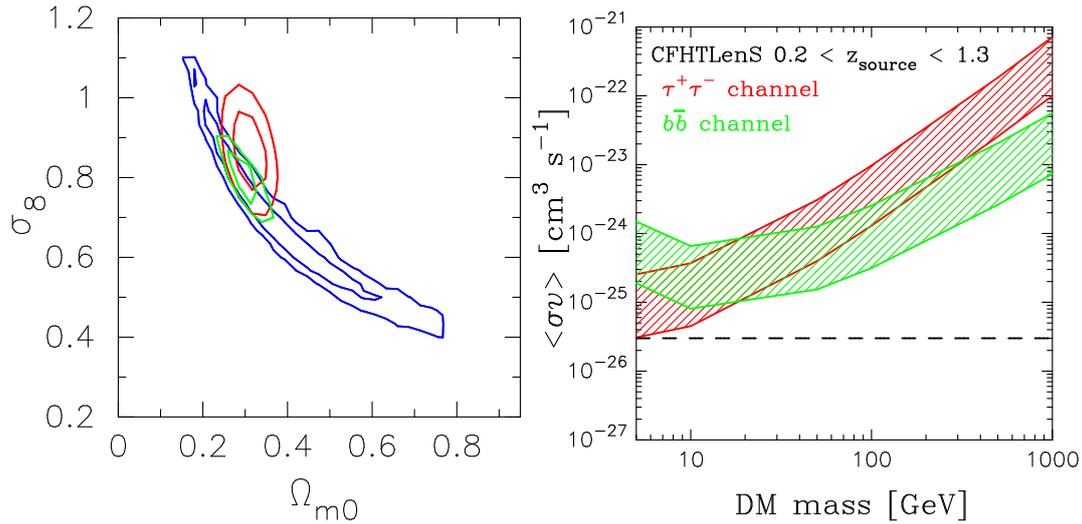


図 1: (左) Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey の重力レンズ解析による宇宙モデルの制限。横軸に現在の宇宙における暗黒物質の平均密度、縦軸に物質分布のゆらぎの大きさに関するパラメータをとっている。実線で囲まれた領域が、68%と 95%の信頼度で許されるパラメータ領域で、色の違いは異なる統計量を用いたことに対応する。青線が基本統計量の 2 点相関関数を用いた場合、赤線は高次統計量の一つであるミンコフスキー汎関数を用いた場合、緑線は両者のくみあわせによる制限をあらわす。(Shirasaki & Yoshida, 2014, ApJ, 786, 43 より引用)

(右) Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey による重力レンズデータと、Fermi 衛星ガンマ線観測によるガンマ線光子数の相関解析による暗黒物質対消滅への上限 (68%信頼度)。横軸に暗黒物質の質量、縦軸に暗黒物質対消滅の反応断面積をとっている。各々の実線は、暗黒物質のある対消滅チャンネルについて、反応断面積の上限を示している。緑線は暗黒物質がボトムクォーク/反ボトムクォークに対消滅した場合で、赤線はタウ粒子/反タウ粒子に対消滅した場合である。同じ対消滅チャンネルでも 2 種類の上限があるのは、本論文中で用いた理論モデルの不定性に起因している。黒の点線は、宇宙論観測で示唆される暗黒物質の現在の平均密度を説明できる対消滅反応断面積である。(Shirasaki, Horiuchi & Yoshida, 2014, Phys. Rev. D 90, 063502 より引用)

いた宇宙モデルの制限可能性を Fisher 解析を通じて明らかにした。統計誤差の範囲では、ミンコフスキー汎関数は、2 点相関関数より厳しく宇宙モデルを制限できることを示した。すばる望遠鏡の新カメラ Hyper Suprime Cam (HSC) による銀河撮像観測においては、ミンコフスキー汎関数だけを用いて暗黒エネルギーの状態方程式パラメータを 25 %の統計精度で制限可能である。一方で、銀河の形状測定や測光的赤方偏移の不定性に起因した系統誤差を評価し、HSC による将来観測では系統誤差と統計誤差が同程度になりうることもわかった。また、Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS) により得られた観測データと我々の模擬カタログの結果の比較から、ミンコフスキー汎関数と 2 点相関関数の組み合わせにより、宇宙論パラメータの縮退が解け、制限が向上を示した (図 1 左)。

重力レンズ現象は、視線方向に存在する物質分布を復元できる一方で、重力レンズの単独解析では暗黒物質の対消滅といった素粒子的な性質まで明らかにすることはできない。暗黒物質の対消滅は有力なガンマ線源になりうるため、暗黒物質の対消滅を探るには、暗黒物質の密度分布を観測的に再構築できる重力レンズ解析と、ガンマ線観測を組み合わせることが本質的である。我々は、理論的に提唱されていた重力レンズ観測とガンマ線観測の相関解析を、世界に先駆けて実観

測データに適用した。Fermi 衛星によるガンマ線観測と CFHTLenS による重力レンズ観測の相関解析は、ヌルシグナルと整合的であることが分かった。観測結果と大規模構造形成の理論モデルの比較から、暗黒物質の対消滅に関する独立な制限を示した (図 1 右)。本研究で得られた制限は、近傍の矮小銀河のガンマ線観測による暗黒物質対消滅の制限に及ばないものの、将来の重力レンズ観測では、観測視野が広がり統計誤差が抑えられることで、近傍銀河によるものと同等の制限が期待できる。我々の手法は、ガンマ線分布が系外にある暗黒物質分布といかに関連しているかに基づいており、銀河系近傍の矮小銀河による制限とは異なる距離スケールによる暗黒物質対消滅の検証に役立てられる。