

宇宙マイクロ波背景放射の弱い重力レンズを用いた宇宙論：現状と将来の展望



並河 俊 弥

〈京都大学基礎物理学研究所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: namikawa@yukawa.kyoto-u.ac.jp

宇宙空間に放たれた光は、銀河・銀河団などで構成される宇宙大規模構造の重力場に影響され、われわれに届くまでにその軌跡が曲げられる。その結果、本来の像や揺らぎの空間パターンは歪んで観測される。これを重力レンズと呼ぶ。今後の大規模観測は、これまで困難であった“弱い”重力レンズによる僅かな歪みを精密に測定できる。本稿では、特に宇宙マイクロ波背景放射（CMB）における弱い重力レンズの観測に焦点を当て、期待される宇宙論の進展、その測定方法や、CMB全天観測衛星であるPlanckによる重力レンズ観測の現状などを、筆者の研究も交えて紹介する。

1. はじめに

1.1 さらなる宇宙論観測の必要性

現在われわれがもつ宇宙の基本的な描像は、観測の進歩によって確立されてきた。特に、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）^{*1}、Ia型超新星、大規模構造といった観測により、宇宙は非常に良い精度で平坦であること、そして、宇宙を占めるエネルギーのほとんどは正体のわからない「暗黒物質」と「暗黒エネルギー」と呼ばれるもので担われているという事実は、驚くべき精度をもって確かめられてきた。今後の宇宙論は、こうした現在の理解を踏まえたうえで、今まで困難であった、より本質的な課題に挑むことができる。

宇宙論最大の謎の一つとなっている暗黒エネルギーは、宇宙の加速膨張を説明する現象論的モデルとして導入されたが、その起源や性質など基本的なことがわかっていない。また、われわれが観

測する宇宙には銀河・銀河団など多種多様な構造が存在するが、それらの元となる宇宙初期の揺らぎの生成機構（インフレーション理論など）の基礎となる物理理論はいまだ明らかになっていない。素粒子標準模型では、ニュートリノは質量ゼロの粒子として扱われるが、ニュートリノ振動実験はニュートリノの質量の存在を示唆する。宇宙大規模構造の進化はニュートリノ質量の大きさに依存するため、ニュートリノ質量の測定は、素粒子物理学・宇宙論双方において重要となる。これらの問いに答えることは、われわれの現在の理解を大きく超えた新たな物理を導くうえで重要だと考えられる。

現状では、観測結果と無矛盾な数多くの現象論モデルが提案され、それらが乱立している。今後、これらを検証・解明し、宇宙に対する理解を深めるには、さらなる宇宙論観測が不可欠となっている。実際、世界中では多くの大規模な宇宙論

^{*1} 宇宙初期の高温高密度の状態からしばらくの間は、光子は電子と電磁相互作用による散乱を繰り返していたため、自由に進むことができない。宇宙が冷え、電子が陽子に束縛されるようになると、光子は自由に進むようになる。これを宇宙の晴れ上がりと呼び、この時期からわれわれまで飛んできた光を観測したものが宇宙マイクロ波背景放射である。

観測が実行され、計画されている。日本でも、これらに先駆けた科学的発見を目標に、LiteBIRD (CMB観測) やSuMIRe (銀河サーベイ) など、世界からも注目を集めるような宇宙論観測が行われようとしている。それらのうち、少なくとも次の10年で目覚ましい成果を上げると期待している観測の一つが弱い重力レンズである。

1.2 弱い重力レンズ

銀河から放たれた光、宇宙の晴れ上がりから飛んできたCMB光子など、宇宙空間を進むあらゆる波は、大規模構造などが作る重力場による時空の歪みの影響で、その軌跡が曲げられる。これを重力レンズと呼ぶ。そのうち、“弱い”重力レンズと呼ばれる現象では、例えばCMB光子の軌跡が曲げられることで、CMBの揺らぎの空間パターンが僅かに歪められる(図1)。弱い重力レンズにより、観測される銀河の像も同様に僅かに歪められる。

弱い重力レンズの観測は、宇宙論への応用という観点でさまざまな利点をもつ。大規模構造の観測から、宇宙論的な情報をもつ物質全体の空間分布を得る手段の一つとして、銀河などの空間分布を利用するものがある。大雑把には、銀河の分布は物質全体の分布とほぼ一致していると考えられ

る。しかし、実際には銀河形成の詳細などにも影響され、正確な推定は困難となる。一方、物質全体が作る時空の歪みを直接測れる弱い重力レンズは、銀河の空間分布を用いる方法と比べると、より正確に物質全体の情報が引き出せる。また特に、CMBに対する重力レンズは、その大部分が、重力による非線形成長が影響し始める前の重力ポテンシャルによって起こっていると考えられる。したがって、CMBの弱い重力レンズの理論予想において、正確な取り扱いが困難な非線形成長による不定性も少ないと考えられる。

以降では、まず、CMBの弱い重力レンズを用いることでどのような宇宙論的進展が見込めるかについて簡単にレビューする。次に、どのように測定するか、筆者の研究を中心に紹介する。また、Planckをはじめとした現在の観測的現状について述べる。

2. CMBの弱い重力レンズの観測から期待される宇宙論の進展

2.1 ニュートリノ質量・暗黒エネルギー

暗黒エネルギーの性質やニュートリノ質量の大きさは、宇宙大規模構造の進化、したがってそれにより作られる重力場と密接に関連づいている。暗黒エネルギーの性質は、宇宙の膨張則に影響を与える。膨張率が大きくなると、物質間の重力に比べて引き離す速度が勝り、構造は成長しづらくなる。構造が成長しなければ、その分重力ポテンシャルも浅くなり、結果として観測される重力レンズは弱くなる。逆に膨張率が小さければ構造は成長しやすくなり、重力ポテンシャルは深く、重力レンズが強くなる。

ニュートリノ質量も、以下の物理プロセスで重力レンズに影響を与える*2。ニュートリノは暗黒物質と異なり、小さい空間スケールで見ると速度分散が無視できず飛び回っている。このため、

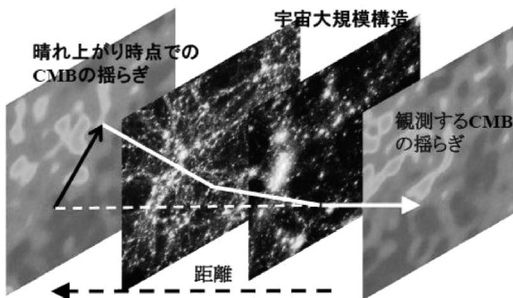


図1 CMBの揺らぎのパターンが重力レンズにより歪む様子。点線の方向から到来し観測された光子は、実際には晴れ上がりのときには黒矢印だけシフトした点で放たれたものである。

*2 ニュートリノ質量が宇宙の構造形成に与える影響は、文献18において日本語で解説されている。

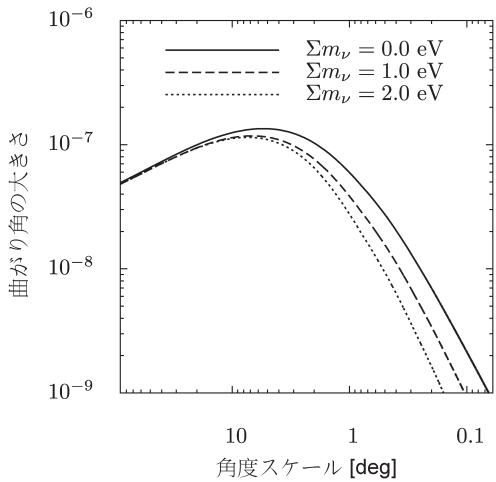


図2 ニュートリノ質量が曲がり角の角度パワースペクトルに与える影響. ニュートリノ質量の検出には、小角度スケールの角度パワースペクトルの測定が重要となる.

小さいスケールでは、ニュートリノ自身の揺らぎはほとんど成長しない。ニュートリノは全物質の一部の質量を担っており、ニュートリノの揺らぎが成長しない分だけ重力ポテンシャルが浅くなる。その結果、観測される重力レンズにも影響を与える。実際には、ニュートリノは、宇宙の温度が低下して、熱的速度によるエネルギーが静止エネルギーより小さくなる時期から物質として扱えるようになり、この時期も観測に影響する。

上述の効果は重力レンズ効果の測定で検証できる。宇宙論では、統計量として角度パワースペクトルがよく用いられる。角度パワースペクトルとは、例えば平面上に温度地図が与えられたとき、それを平面座標に対してフーリエ分解した量（以降、フーリエ波数 l に対応するフーリエモードを Θ_l とする）の2乗期待値を表す。CMBの弱い重力レンズでは、温度地図の代わりに、曲がり角に対する角度パワースペクトルを測定する*3。図2では、三世代のニュートリノ質量の総和 Σm_ν に応じて、観測量である曲がり角の角度パワースペ

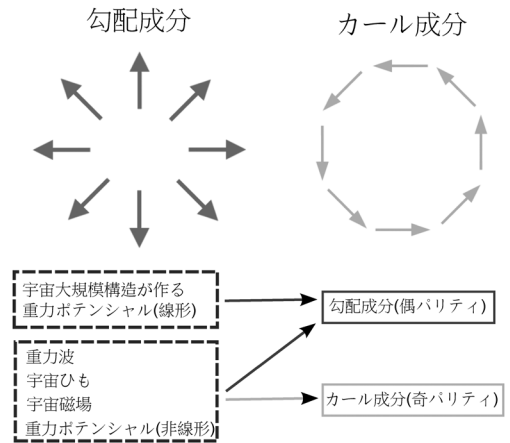


図3 曲がり角のパリティ分解. 偶パリティを勾配成分、奇パリティ成分をカール成分と呼ぶ.

クトルがどのように影響を受けるか示したものである。この計算には公開コード¹²⁾を利用している。小角度スケールでは、ニュートリノ質量の総和が重くなるほど揺らぎがかき消されるため、重力レンズ効果が弱くなり、小角度スケールにおける曲がり角の角度パワースペクトルが減衰する。この影響から、ニュートリノ質量の総和が推定できる。

2.2 重力波・宇宙ひも・宇宙磁場

CMBの弱い重力レンズ効果は、二次元面上のベクトルである曲がり角により特徴づけられた(図1)。この曲がり角は、図3のように、パリティに対して二成分に分解でき、放射状のものを勾配成分(偶パリティ)、渦状のものをカール成分(奇パリティ)と呼ぶ。

カール成分は奇パリティをもつ重力場から生じるため、大規模構造が作る(線形の)重力ポテンシャルのようなスカラー量からは生じない。一方、宇宙初期に生成された重力波、宇宙初期の相転移で生じ得る宇宙ひも、宇宙に存在する磁場などは、奇パリティをもつ重力場を生成し、それにより引き起こされる重力レンズでは、カール成分

*3 厳密には、後で述べるように、カール成分が存在する場合、曲がり角の大きさではなく勾配成分・カール成分それぞれの角度パワースペクトルを測る。

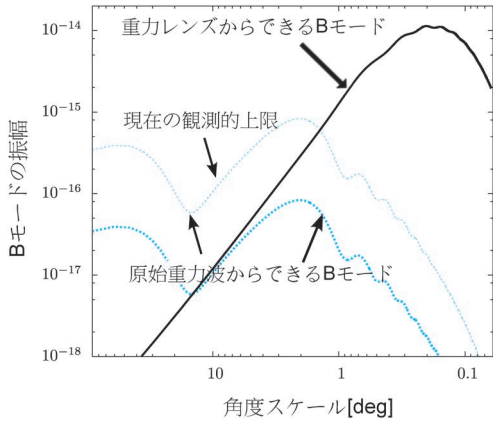


図4 原始重力波から作られるBモード偏光の角度パワースペクトル（青点線），および重力レンズによって生成されるBモード偏光による寄与（黒線）．二つの緑線は，現在の観測の上限*4，および，さらにその10%の振幅の場合を描いている．

が生じる．したがって，カール成分の観測は，重力波や宇宙ひも，磁場などを探る有効な手段だと考えることができる．

2.3 Bモード偏光を用いた原始重力波探査

宇宙の初期段階で起こったとされるインフレーションは，銀河・銀河団などの構造の種となる密度揺らぎを生成すると同時に，重力波（原始重力波）の生成を予言する．この原始重力波を捉えることで，インフレーション理論の直接検証ができる．新たな観測的視点から初期宇宙に迫ることができる．原始重力波はCMBの偏光度分布にBモード偏光と呼ばれる渦上のパターンを残すため，このBモード偏光の観測は原始重力波を検証する方法として世界的に注目を浴びている．現在，原始重力波によって生じたBモード偏光は未検出であり，このシグナルの検出は今後の宇宙論観測における最大の目標の一つとなっている．

ただし，一つ大きな問題となるのが，重力レンズから生じるBモード偏光である．図4は，原始重力波，重力レンズ由来のBモード偏光を比較し

たものである．大角度スケール以外の大部分は重力レンズ効果に埋もれてしまう．今後の観測で制限がより厳しくなった場合，重力レンズの影響を引き去る必要が出てくる¹⁰⁾．

3. CMB観測からの重力レンズ測定：推定法の構築と観測の現状

前節の宇宙論的な動機があり，高角度分解能をもつCMB観測を利用した重力レンズ効果の推定が，近年注目を浴び始めている．重力レンズの推定では，レンズ再構築^{17), 9), 7), 8)} (Lensing reconstruction) と呼ばれる方法がよく利用される．レンズ再構築とは，観測した（重力レンズを受けた後の）CMBの温度・偏光地図から，重力レンズによる曲がり角（すなわち二次元ベクトル場）の地図を作成する方法である．

本節では，まずレンズ再構築について簡単に説明する．そのうえで，従来の手法が抱える問題点について解説し，それらを克服する方法として最近の筆者の研究で提案した手法を紹介する．また，CMBの弱い重力レンズ観測の現状とも絡めて説明する．

3.1 推定量 (estimator)

ここではまず，重力レンズなどの推定で基本となる「推定量 (estimator)」とは何かについて簡単に説明する．いま，大量の赤と白の玉が袋に入っていて，全体に対する赤玉の割合 r を推定したいとする．ヒントとして，「玉を一つ取って色を調べもとに戻す」ことを N 回（ただしある程度十分な回数）許されている．これは，重力レンズ効果を，重力レンズを受けたCMBの揺らぎから推定するのと同じ状況設定となる．すなわち，われわれは現実の宇宙を一度だけしか観測（玉を N 回取ること）できないが，それから得られた情報をもとに重力レンズの強さ（赤玉の割合）を推定したい．

*4 正確には，Bモード観測からの上限ではなく，温度とEモード偏光（偏光の向きのパターン）における原始重力波の割合に対して上限が観測的に得られており，これから予測されるパワースペクトルが描いてある．

玉の場合、赤玉をN回中n回引いたとすると、赤玉の割合は直感的に

$$\hat{r} = \frac{n}{N}, \tag{1}$$

として「推定」するのがよさそうである。実際、この「推定量」の期待値は

$$\langle \hat{r} \rangle = \frac{\langle n \rangle}{N} = \frac{Nr}{N} = r, \tag{2}$$

となる*5。この性質を不偏性と呼ぶ。一方、われわれはこの操作を一度しか行えない。このような状況では、 \hat{r} がrと全然異なる値をとることも確率的にありえてしまう。そこで、r周りの値を確率的にとりやすい推定量が良い。

レンズ再構築でも、玉の場合と同様に、不偏性を満たす推定量を以下のように構築する。重力レンズを受ける前の温度揺らぎは、その統計分布が到来方向に依存せず、等方的だと考えられている。この場合、温度揺らぎのフーリエモード Θ_l は、異なるフーリエモード $\Theta_{l'} (l' \neq l)$ と相関しないことが示される。一方、重力レンズを受けると、各点で温度揺らぎの位置のずれ方が異なるため、非等方に歪められる。この結果、重力レンズを受けた温度揺らぎのフーリエモード $\tilde{\Theta}_l$ は、異なるフーリエモードとの相関が生じる。すなわち、二つの異なるフーリエモードの積の期待値は

$$\langle \tilde{\Theta}_l \tilde{\Theta}_{l-L} \rangle = \phi_l f_{l,L} \quad (l \neq 0). \tag{3}$$

ただし、Lは任意、また曲がり角を $d(\hat{n}) = \nabla \phi(\hat{n})$ とおいた（このときの ϕ が勾配成分の厳密な定義である）。 $f_{l,L}$ は温度揺らぎの角度パワースペクトルの関数であり、ここでは既知とする。式(3)から、例えば

$$f_{l,L} \hat{\phi}_{l,L} = \tilde{\Theta}_l \tilde{\Theta}_{l-L}, \tag{4}$$

で定義される推定量 $\hat{\phi}_{l,L}$ は期待値 ϕ_l をもつ（不偏性を満たす）。さらに、各Lに適当な重み $w_{l,L}$ を

付けて和を取ったもの

$$\hat{\phi}_l = \sum_L w_{l,L} \hat{\phi}_{l,L}, \tag{5}$$

を考えれば、情報が足し上げられることでさらに ϕ_l 周りでのばらつきを抑える推定量が構成できる。これにより得られた推定量 $\hat{\phi}_l$ は、曲がり角の勾配成分である ϕ_l の推定量となる。

3.2 カール成分の推定

ここで、われわれの研究¹⁴⁾について紹介したい。これまでの多くの研究で利用されてきた推定法は、曲がり角が ϕ の勾配で与えられる特別な場合のものである。しかし、一般にはカール成分も存在し、式(3)の右辺に、カール成分に起因する項が加わる。このため、文献2では、カール成分の存在により、上述した従来の推定法はバイアスされる（不偏性を満たさない）ことが主張されていた。

われわれの研究では、まずこの問題点に着目し、勾配・カール成分が両方存在する、より一般的な条件下での推定量を定式化した。その結果、文献2の主張の誤りを指摘し、勾配・カール成分の推定量は、パリティの違いによりそれぞれ分離され、カール成分が存在する状況下でも従来の推定法は不偏性を示すことがわかった。

また、われわれの研究以前でのカール成分の推定量は、すべて球面の曲率を無視したものとなっている。しかし、原始重力波や宇宙ひもが作るカール成分は大角度スケールでシグナルが大きくなり¹⁶⁾、球面の曲率を考慮した推定量を用いることが要求される。そこでわれわれは、そのような近似なしでの推定量の定式化も行った。

Planckは、この研究で得た推定量を使うことでカール成分の推定を行い、その結果を公表している¹⁾。今のところ、カール成分のシグナルは0と無矛盾であり、宇宙ひもなどの存在を示唆する結果は得られていない。

*5 ここでは、赤玉をN回中n回とる確率に対する期待値であり、その確率分布は二項分布となる（この場合、rは最尤推定量でもある）。Nが十分大きく、rが0や1と十分離れた値をもつとすれば、正規分布で近似できる。

3.3 平均場バイアス

勾配・カール成分の推定量を導出するさい、重力レンズがない場合には異なるフーリエモードの相関は存在せず、揺らぎはガウス統計に従うことを仮定していた。しかし現実の観測に応用する場合、この仮定はすぐに破綻する。例えば、重み関数 f_{IL} に含まれる角度パワースペクトルには本来不定性がある。また、除去しきれなかった点光源の寄与、非等方なビームを用いたスキャン、さらには地球の固有運動といったさまざまな影響によって、異なるフーリエモードは互いに相関する。この余分な寄与により、推定量は不偏性を満たさず、バイアスされたものとなる。これを平均場バイアス (mean-field bias) と呼んでいる。

銀河面・点光源マスクの場合でも同様に平均場バイアスが生じる。この平均場バイアスを補正するさい、角度パワースペクトルなど不定性のある情報が必要となるので、結果的に補正した量に不定性が伝播する。特に、マスクによる平均場バイアスの寄与は大角度スケールで大きく、得たいシグナルに比べて卓越しており、補正により伝播する不定性もその分大きくなる。

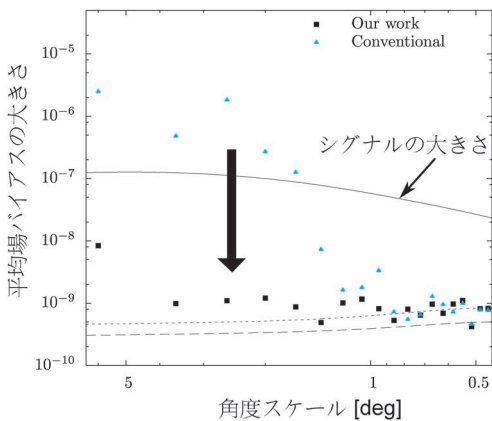


図5 マスクによる平均場バイアス。縦軸は平均場バイアスの大きさを表す。実線は重力レンズのシグナルを表す。また、われわれ、および従来の推定量に対するモンテカルロ・シミュレーション由来のノイズをそれぞれ点線、破線で示す。

われわれの研究¹⁵⁾では、これを回避する方法として、マスクに対する推定量を作ることで、角度パワースペクトルに含まれる不定性が伝播しづらい勾配成分の推定量を改めて構築した。図5では、モンテカルロ・シミュレーションをもとに、マスクの存在で生じる平均場バイアスを、従来の方法とわれわれの方法で比較したものである。点線、破線はそれぞれ有限のシミュレーション回数によって生じるモンテカルロシミュレーション由来のノイズを表す。平均場バイアスは、従来の方法 (Conventional) と比べ、われわれの手法 (Our work) を用いると大きく減少し、モンテカルロ・シミュレーションに由来するノイズレベルまで下げられている。

3.4 勾配・カール成分の角度パワースペクトルの推定法と現状

レンズ再構築では、勾配・カール成分の地図を作ることが目的であったが、宇宙論的に興味のある量は、それらの統計量 (角度パワースペクトルなど) である。ここでは、われわれの研究¹⁵⁾をもとに、勾配・カール成分の角度パワースペクトルの推定方法について簡単に紹介する。

単純には、レンズ再構築の方法で得た勾配・カール成分の地図から角度パワースペクトルを求めればよさそうである。しかし、勾配・カール成分の推定量の角度パワースペクトルには、もともと光源であるCMBの揺らぎがもっている4点相関 (Gaussianバイアスと呼ばれる) で生じる余分な寄与も含まれるため、この寄与を補正する必要がある。GaussianバイアスはCMBの温度・偏光揺らぎの角度パワースペクトルで記述されるため、従来の方法では、CMBの角度パワースペクトルの測定に基づいてGaussianバイアスの補正を行っていた。しかし、CMBの角度パワースペクトルの不定性は、Gaussianバイアスの補正にも不定性が伝播し、結果として勾配・カール成分の角度パワースペクトルの推定にバイアスが生じる。特に、Gaussianバイアスの大きさが、本来

得たいシグナルに比べて大きいのが問題である。

そこでわれわれは、より正確な Gaussian バイアスの推定量を導出した。この推定量は、重力レンズによって生じる4点相関に対する最尤推定となっている。この推定量を用いれば、正確に推定できるだけでなく、勾配・カール成分の角度パワースペクトルの精度も向上する。勾配・カール成分の角度パワースペクトルの推定は、重力レンズによってできるガウス統計の歪みをもとに推定しているとも考えられる。

ここで、勾配成分の角度パワースペクトルの測定の現状について述べる。2011年、Atacama Cosmology Telescope (ACT) のチームによって、CMBの温度揺らぎの観測データから、レンズ再構築を利用して勾配成分の角度パワースペクトルが測られた。これを皮切りに、2012年にはSouth Pole Telescope (SPT), 2013年はACT, Planckのデータから検出が行われている。図6は、ACT, SPT, およびPlanckそれぞれで推定された勾配成分の角度パワースペクトルを示す。ACTやSPTでは従来の方法で測定しているため、マスクなど

による平均場バイアス由来の不定性が大きい大角度スケールの結果は示されていない。一方、Planckチームは、われわれが提案した方法に基づいて角度パワースペクトルを推定している。また、平均場バイアスの影響を受けにくいわれわれの推定量を用いた系統誤差のテストも行っている。その結果、大角度スケール ($L < 10$) では、我々と従来の方法それぞれで測定した角度パワースペクトルに食い違いが生じることがわかっているが、正確な原因はよくわかっていない。このため、勾配成分の角度パワースペクトルを用いて宇宙論の解析を行うさいは、保守的に $L > 40$ のデータを利用している。

4. まとめと将来の展望

CMBの弱い重力レンズは、宇宙論の推定においてすでに重要なものとなっている。実際、重力レンズの情報を加えれば、CMBの観測データだけを用いても、暗黒エネルギーの存在が強く示唆される。これは、晴れ上がり以降の重力場の情報をほとんどもたない温度揺らぎに対し、重力レンズに含まれる重力場の情報が相補的な役割を果たし、縮退を解くことによる。また、つい最近、SPTチームは、偏光観測のデータから重力レンズ効果が作るBモード偏光の検出に成功したと報告している⁶⁾。系統誤差の吟味など慎重になる必要がある一方、このデータを用いた宇宙論的示唆などの結果が期待される。

今後、CMBの弱い重力レンズを測定し、さらに宇宙論への応用を行ううえでカギとなるのは、小角度スケールでのBモード偏光観測である。現在までのところ、Bモード偏光の検出は、SPTからのみであるが、今後の偏光観測は、より高精度でBモード偏光を推定できるようになる。直近で楽しみなのは、上の偏光観測であるSPT, PolarBear, ACT, 2014年に公表予定であるPlanckの偏光データを使った解析などである。その後は、それらをアップグレードした観測が予定され、現在と比較

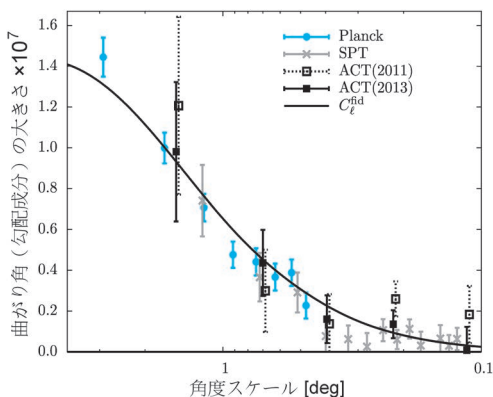


図6 ACT^{3), 4)}, SPT⁵⁾, Planck¹⁾ それぞれで測定された重力レンズの角度パワースペクトル。実線は、Planckの温度揺らぎの角度パワースペクトルから推定した宇宙論パラメーターから予想される重力レンズの角度パワースペクトル。ACTに関しては、2011年、2013年の観測データによる結果が公開されている。

にならないほど精度が向上すると期待される。

これらのデータが実際に得られた場合、どの程度の宇宙論的示唆が得られるのかも気になるところとなる。これに関しては、Fisher解析に基づいた簡単な理論予測が行われている。ニュートリノ質量和を例に挙げると、Planckの偏光データを加えれば約0.1 eV、現状の地上偏光観測であれば約0.06 eVの精度で検証できると考えられている¹¹⁾ (いずれも 1σ)。また、Subaru Hyper Suprime-Camによる銀河の弱い重力レンズなども組み合わせれば、さらに約0.04 eVの精度による検証が予想される¹³⁾。素粒子実験によるとニュートリノ質量和は少なくとも0.05 eV以上であることを考えると、宇宙論観測からニュートリノ質量が検出される日も近いかもしれない。

ただし、これらの見積もりは、実はさらに改善の余地があることに注意したい。ここまで述べてきた方法は、勾配、カール成分の一次までの寄与をとるなど、問題を線形化して推定量を構築している。これは、実際の解析に非常に便利である一方、レンズ再構築の精度を犠牲にしている。特に、Bモード偏光からのレンズ再構築では、線形化して得た上述の推定法を用いることで重力レンズに関する大部分の情報をロスする^{7), 8)}。線形化を行わない最尤推定に基づく方法を用いれば、今後の高精度Bモード偏光データを用いることで、重力レンズの検出精度、それによる暗黒エネルギーの性質やニュートリノ質量の検証、原始重力波の検出精度の飛躍的な向上が期待される。CMBの弱い重力レンズの測定自体、つい最近になってようやく実現してきたものであり、今後の展開には大きな期待が寄せられている。

謝 辞

本稿は筆者の博士論文、および筆者らの投稿論文^{14), 15)}をもとに執筆したものです。これらの研究を完成させるうえで、博士課程において多くの貴重な助言をしていただいた樽家篤史氏、指導教

官だった須藤靖氏に感謝いたします。また、共同研究者であるDuncan Hanson氏、高橋龍一氏、山内大介氏、本稿を執筆するうえで貴重なアドバイスをして下さった齊藤遼氏、杉村和幸氏に御礼申し上げます。最後に、本稿の執筆を勧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) Planck Collaboration, Ade P., et al., submitted
- 2) Cooray A., et al., 2005, PRD 71, 123527
- 3) Das S., et al., 2011, PRL 107, 021301
- 4) Das S., et al., 2013, submitted
- 5) van Engelen A., et al., 2012, ApJ 756, 142
- 6) Hanson D., et al., Hanson D., et al., 2013, PRL 111, 141301
- 7) Hirata C. M., Seljak U., 2003, PRD 67, 043001
- 8) Hirata C. M., Seljak U., 2003, PRD 68, 083002
- 9) Hu W., Okamoto T., 2002, ApJ 574, 566
- 10) Kesden M., et al., 2002, PRL 89, 011304
- 11) Lesgourgues J., et al., 2006, PRD 73, 045021
- 12) Lewis A., et al., 2000, ApJ 538, 473
- 13) Namikawa T., et al., 2010, JCAP 1012, 027
- 14) Namikawa T., et al., 2012, JCAP 1201, 007
- 15) Namikawa T., et al., 2013, MNRAS 431, 609
- 16) Yamauchi D., et al., 2012, JCAP 1210, 030
- 17) Zaldarriaga M., Seljak U., 1999, PRD 59, 123507
- 18) 斎藤 俊, 2011, 天文月報104, 406

Cosmology with Weak Lensing of Cosmic Microwave Background: Recent Progress and Future Prospects

Toshiya Namikawa

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Weak gravitational lensing is a deflection of photons emitted from bright sources by gravitational fields of the large-scale structure. This leads to distortions in images of galaxies or spatial pattern of CMB anisotropies. Cosmological observations in the next decade will have a potential to measure lensing effect with high precision enough to probe property of dark energy, mass of neutrinos, and so on. In this article, based on our recent studies, the recent progress including Planck results and future prospects are discussed.