

暗黒物質分布を観測するための 大規模構造による重力レンズ効果

高田 昌 広

〈国立天文台理論天文学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: mtakada@th.nao.ac.jp

宇宙の階層的な大規模構造による重力レンズ効果は、暗黒物質の分布を直接観測する唯一の手段になり得る。私達は最近、構造形成を定量的に理解するのに不可欠な暗黒物質の密度揺らぎのポワースベクトルを観測的に再構築する目的で、宇宙背景放射の温度ゆらぎ場への重力レンズ効果を用いる方法を提案している。その方法論と宇宙論的な意義について議論する。

1. ビッグバン宇宙論と宇宙の大規模構造

銀河、銀河団、超銀河団さらには銀河分布のフィラメントやボイド構造等で観測されているように、宇宙は複雑で豊かな階層的な大規模構造を持っている。膨張宇宙においてこの階層構造が、どの様に形成されてきたのかという問題を解明することは、観測的宇宙論における最重要課題の一つである。現在最も有力なシナリオは、宇宙初期に存在する振幅の微小な密度ゆらぎが、その自己重力の不安定性により成長し、現在の構造が形成されたとするものである。実際に、1989年に打ち上げられたCOBE衛星は、かつて宇宙が高温高密度で熱平衡状態にあった時の名残りである宇宙背景放射(CMB)の温度分布に、現在の構造の種と考えられている0.001%という微小な振幅の温度揺らぎが存在することを初めて検出した¹⁾。しかしながら、同時に、光(電磁波)では直接観測できない暗黒物質が宇宙の約90%の質量を占めていることを認めないと、CMBや大規模構造等の様々な観測結果を説明できないことも分かっている。つまり、宇宙の構造形成史をより定量的に解明するためには、この暗黒物質の分布やその進化を何とかして観測的に明らかにすることが必要不可欠なの

である。もちろん、この目的で2dF²⁾やSDSS³⁾の大規模プロジェクトは、かつてない大量でかつ統計的に完全な銀河の赤方偏移サーベイを進行させているが、やはり銀河分布から暗黒物質の分布を推定する際には、両者の分布の関係を仮定するバイアス問題と呼ばれる不定性をどうしても取り除くことはできない。

そこで、近年大きな注目を集めている方法が、宇宙の大規模構造による弱い重力レンズ効果である⁴⁾。なぜなら、アインシュタインの一般相対性理論により、光源から発せられた光の経路は、介在する質量を持つ全ての物質による重力場によって曲げられるため、この効果を使う方法のみが暗黒物質の分布を直接「観測」することを可能にするからである。昨年、幾つかの独立なグループによって、遠方銀河の像がこの重力レンズ効果により系統的に歪められている現象が、統計的に有意に検出されたのは記憶に新しいだろう^{5), 6)}。この検出は、確かに宇宙の構造形成のシナリオに対して新しい独立な制限をつけることに成功しているが、まだ系統的誤差を含んでいる可能性があり、さらなる観測的・理論的両面からの検証が強く望まれる。本稿では、同様な目的のもう一つの手法として、私達が提案しているCMB温度揺らぎへの重力レンズ効果を用いる方法を、その宇宙論的な意義も解説

しながら紹介したい^{7), 8), 9), 10)}. 上記の遠方銀河の方法と対比して、CMB 温度揺らぎを観測量として用いる方法には強調すべき2つの利点がある。それは、CMB は宇宙が誕生して約30万年後の姿なので赤方偏移の不定性がないという点と、後述するように、妥当な仮定の下では、実際には観測できない重力レンズを受ける前のCMB 温度揺らぎの統計的性質等が、宇宙論パラメーターという言葉で理論的に正確に予言できる点である。この理由で、CMB を用いる方法から得られる制限は、理論的な不定性がなく、より信頼性が高いものになることが期待されるのである。

さて、本題に入る前に、宇宙の膨張則を記述する宇宙論パラメーターの観測による決定の現状と将来の展望について少し触れたい。なぜなら、重力レンズ効果は、今興味ある大規模構造中の密度揺らぎの大きさに依存するだけでなく、光源から我々のところまで光が伝播する間に密度揺らぎがどのくらい進化するかという問題や、光が膨張宇宙の中でどのように伝播するかという問題を通して、宇宙論パラメーターにも依存するからである。この理由により、検出された遠方銀河の像歪みから宇宙論的な制限を得るための現状の作業仮説は、まず確からしい構造形成のモデルを仮定し、その後で、観測されたレンズ効果から、典型的な暗黒物質の密度揺らぎの振幅と密度パラメーターへの縮退した制限を得るという方法がとられている。さて、宇宙論パラメーターを決定する最も信頼性が高い手段は、やはりCMB 温度ゆらぎの角度異方性の理論モデルと観測の比較であろう¹¹⁾。昨年、カリフォルニア工科大学を中心としたグループは、南極で行った非常に精度の高い気球実験BOOMERANGの結果を報告した¹²⁾。全天の約2%という小さな領域のデータにも関わらず、高角度分解能でCMB 温度揺らぎの角度異方性を解析したため、宇宙の幾何は殆んど平坦であるという結果を今までにない信頼性で得ることに成功している。余談ではあるが、このニュースを初めて聞

いたときには、やはりインフレーションはあったのかと大変感動したのを今でも鮮明に覚えている。さらに精度の高い測定を目指し、今年の日本文時間7月1日にNASAはCMBを全天に渡り観測する人工衛星MAPの打ち上げに成功し、またヨーロッパではより感度、角度分解能が良いPlanckと呼ばれる衛星計画(2007年)が進められている。このことから、少なくとも10年以内には主要な宇宙論パラメーターは数%の精度内で決定されことは疑う余地がない。それゆえに、その後は、まさに重力レンズ効果を使って、階層構造の各スケールにおける暗黒物質の密度揺らぎの振幅を直接制限することが可能になる時代がくと筆者は考えるのである。

2. 暗黒物質の密度揺らぎのパワースペクトル

宇宙の階層構造を定量的に説明するために必要な本質的な物理量は何であろう? それは、暗黒物質の密度揺らぎ場のフーリエ係数から計算されるパワースペクトル $P_\delta(k) (\equiv \langle |\delta_k|^2 \rangle)$ と呼ばれる量である¹³⁾。この量は、銀河の分光スペクトルから連想してもらえれば良いのかもしれないが、各々の波数モード k (あるいは波長スケール)での平均的な密度揺らぎの振幅を与える量である。すなわち、このパワースペクトルは階層構造の各スケールでの暗黒物質のクラスタリングの度合いを表す最も単純な統計量なのである。また、その時間進化は、振幅が1より小さい線形的な密度揺らぎのスケールに対しては宇宙論パラメーターという言葉で解析的に記述でき、あるいは、非線形な揺らぎに対しても物理過程が重力のみであるという単純さから、数値シミュレーションを用いることにより正確に計算できるのである。個人的な見解としては、暗黒物質のパワースペクトルが観測的に再構築できて始めて、それと観測される銀河などの天体の分布とを比較することにより、暗黒物質の重力場中でどのようにバリオンのガスの物理過程が働

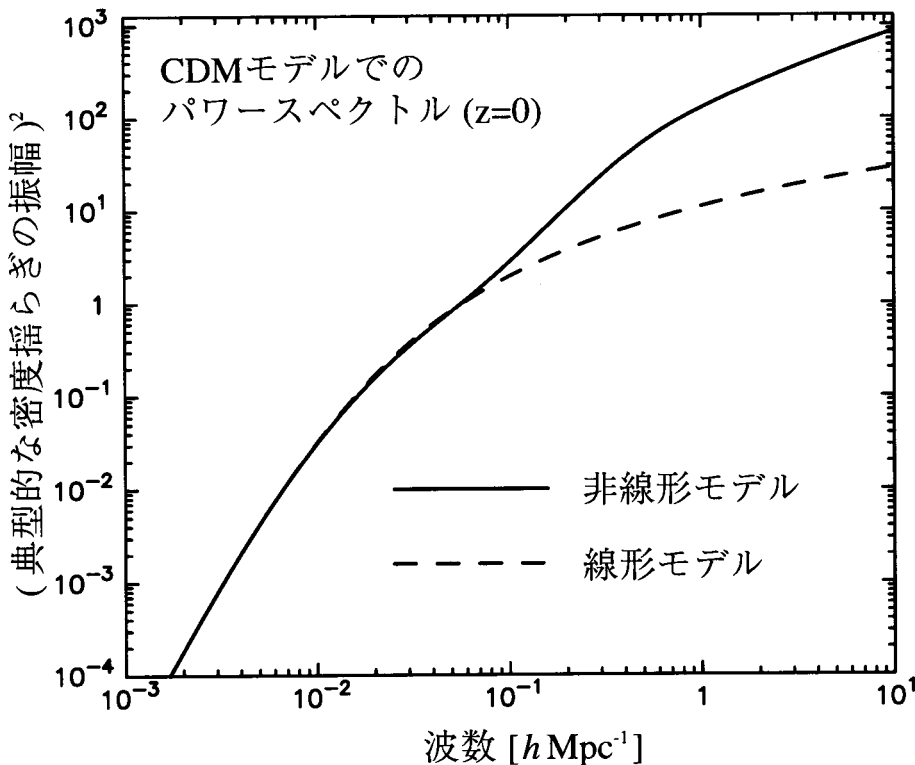


図1 CDMモデルの密度揺らぎのパワースペクトル

き、各々のスケールで天体が形成されていくのかというバイアス問題も、統計的にはであるが「観測的」に解決できるのではないかと考える。

一方、暗黒物質がどのような未知の素粒子なのかという問題は、未だ宇宙論だけではなく素粒子物理学においても最大の謎である。実験的な証拠はまだ何もないが、最有力候補は、運動エネルギーが小さい冷たい暗黒物質モデル（コールドダークマター：CDM）である。そのシナリオは、まずより小さなスケールの構造が形成され、その後で、それらを含んだより大きなスケールの構造が形成されていくというものである。図1は、このCDMモデルで理論的に期待される典型的なパワースペクトルから計算された各波数スケールでの密度揺らぎの振幅を与える量をプロットしたものであり、小スケール（ k が大きい）ほどその振幅が大きい

ことが分かる。話が多少それるが、近年スーパーカミオカンデでニュートリノに質量があることが発見され、興奮的に紙面を賑わしているが、その質量が 0.01eV 以下であるとする残念ながら暗黒物質の候補粒子にはなれないことが示されている¹⁴⁾。

3. 宇宙背景放射への大規模構造形成の痕跡：重力レンズ効果

本稿の主題は、大規模構造によるCMB温度ゆらぎに対する重力レンズ効果であるが、他にも、CMB光子が最終散乱面から我々のところまで約150億年もかけてはるばる旅してくる間に、介在する構造は様々な2次的な効果を及ぼし、観測されるCMBマップ上にその進化の痕跡を残している。例えば、銀河団中の高温電子は逆コンプトン散乱によりスニャーエフ・ゼルドヴィッチ効果を引き起

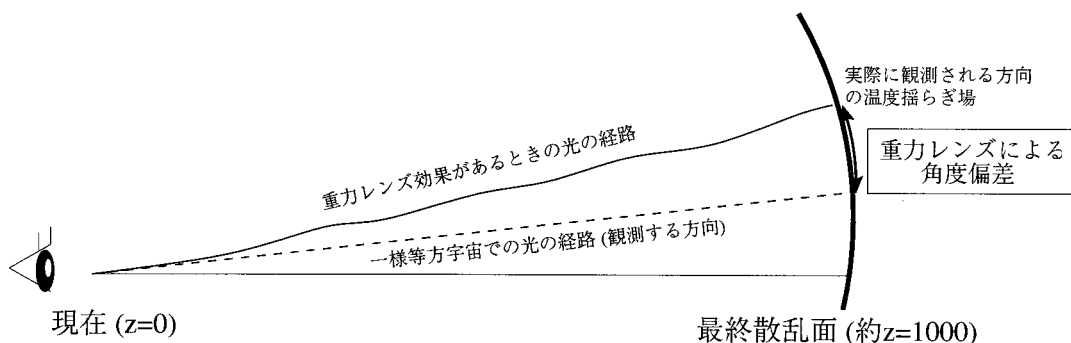


図2 最終散乱面から発せられた光線の経路に対する大規模構造による重力レンズ効果の模式図。

こすことは既に観測で確かめられている。また、赤方偏移 $z > 5$ で起っているはずの宇宙の再イオン化過程と密接に関連して、銀河間の電離ガス雲はドップラー効果に基づく2次的な温度揺らぎを誘発しているはずである。この様に、晴れ上り時以前に生成された温度揺らぎの空間パターンは宇宙論パラメーターに非常に敏感であるだけでなく、より精度の高いCMB温度揺らぎの観測は、他の方法では達成し得ない高赤方偏移までの構造の形成史に関する様々な貴重な情報をあたえる手段になる得る。この目的の研究は、次世代の主要な観測的宇宙論のテーマの一つになると予想される。この観点で、日本が推進するALMA計画の観測を用いれば、他の観測装置では達成し得ない高角度分解能で構造形成に関わる様々な物理状態を明らかにすることができるはずであり、実現が強く望まれる。

さて、重力レンズ効果の話に戻ろう。一般相対性理論によれば、重力レンズとは重力場ポテンシャルの視線方向と直交する成分の勾配に依存して光の進路が曲げられる現象である。1 Mpc以上の宇宙論的スケールでの重力ポテンシャル Φ は、物質分布の密度揺らぎ δ によって誘発され、以下のポアソン方程式に従うことが示されている¹⁵⁾。

$$\Delta\Phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \delta \quad (1)$$

ここで、 G は重力定数、 a はスケール因子で $\bar{\rho}$ は宇宙の平均密度である。結果として、重力レンズ効果がある場合には、観測されるCMB温度揺らぎ Δ^{obs} は次のように表せる。

$$\Delta^{\text{obs}}(\vec{\theta}) = \Delta^{\text{int}}(\vec{\theta} + \vec{\alpha}(\vec{\theta})) \quad (2)$$

ここで、 Δ^{int} はレンズ前の揺らぎ場であり、 $\vec{\alpha}$ は重力レンズ効果による角度偏差である。つまり、図2で示されるように、我々が天球上である方向のCMBの温度揺らぎ場を観測したとしても、実は晴れ上り時の別の位置の揺らぎ場を観測していることになるのである。その大規模構造による角度偏差は、典型的な Λ CDMモデルでは約1分の角度スケールにも達するのは驚きであろう。また、広がった光源から発せられた光線束のそれぞれの経路を比べれば、それらの角度偏差の違いから、その光源の像は変形して観測されるはずである。これが、昨年幾つかのグループで検出された遠方銀河の像の歪み現象である。典型的なモデルでは、 $z = 1$ にある約1分の大きさを持つ仮想的な円形の光源に対して、その歪み効果は約1%程度の微小な楕円率を引き起こす。この意味で、検出された信号にはまだ大気のシーイングなどによる系統的誤差が含まれている可能性が完全に払拭されていないと筆者が考えるのである。

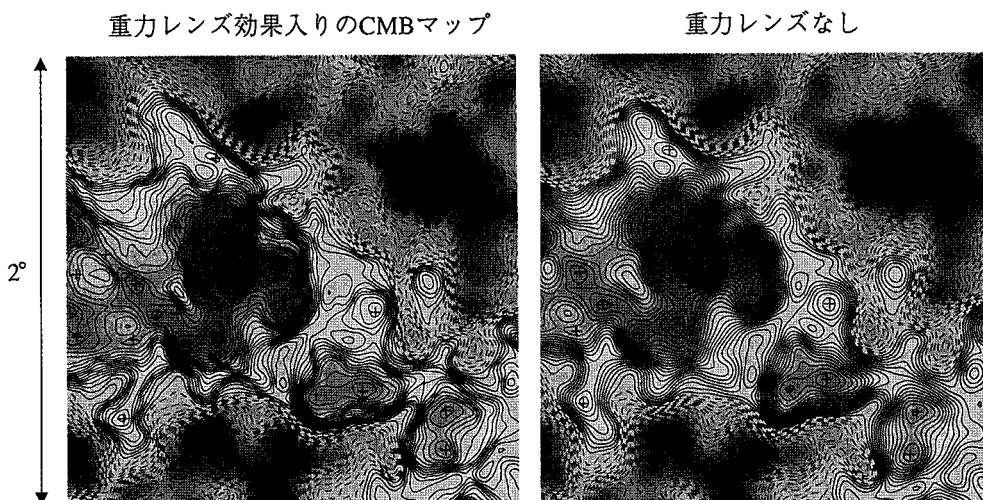


図3 重力レンズ効果なしと考慮したCMB温度揺らぎ場の疑似マップの比較. クロス印は、マップ上の局所的な極大値点を表す. 等高線は、衛星計画 Planck で期待される1ピクセルあたりのノイズレベルの 1σ ごとに描かれている.

逆に、その角度偏差や像歪みを観測量から引き出す事ができれば、介在する暗黒物質のクラスタリングの情報を再構築できるはずであり、これが今回紹介する方法の原理である。図3は、構造形成に対してCDMを仮定したときの重力レンズ効果を取り入れたCMBの温度揺らぎマップとレンズなしのマップの数値シミュレーションの結果を比較したものである。クロス印は温度揺らぎの局所的な極大値点を表し、明らかにこれらの角度位置は両者のマップ上で数分スケールでずれていることが分かるだろう。また、等高線の形状を比較すると、レンズ効果入りのマップ上では、より等高線が密集している領域が重力レンズ歪み効果により顕著に変形しているのが分かる。今回は紙面の関係から、特にその極大値点の角度位置のずれから重力レンズ効果を引き出す方法について紹介する^{7), 8)}。

このとき注意すべきは、我々が衛星等で観測できるのは重力レンズ効果入りのCMB温度揺らぎのマップだけであり、それから重力レンズ効果の情報を引き出す方法を考えなければならないという致命的になりうる問題である。この問題を解決するた

めに、私達はレンズ前のCMB揺らぎの統計的性質がガウシアンランダム統計に従うという仮定を用いることにした。この仮定は詳細は省略するが、CMBの観測結果が支持するインフレーションモデルの自然な帰結であり、妥当だと考える。また、現在までにそれを覆すような観測事実の報告もない¹⁶⁾。ガウシアン統計理論は、任意のCMBの統計量が2次の統計量(角度パワースペクトル)によって予言できるという極めて有効な手段であることが示されている¹⁷⁾。つまり私達の戦略はこうである。レンズを受ける前のCMB温度揺らぎ場の統計的な性質は、ガウシアン統計理論に基づき宇宙論パラメーターだけの関数であるCMBの角度パワースペクトルから予言でき、その理論モデルと観測される重力レンズ効果こみの温度揺らぎマップの結果を比較することにより重力レンズ効果による「非」ガウシアン信号を引き出すという方法論である。また、重力レンズ効果があつたとしても、宇宙論パラメーターは観測される角度パワースペクトルから正確に決定できることが示されていることも付け加えておく¹⁸⁾。

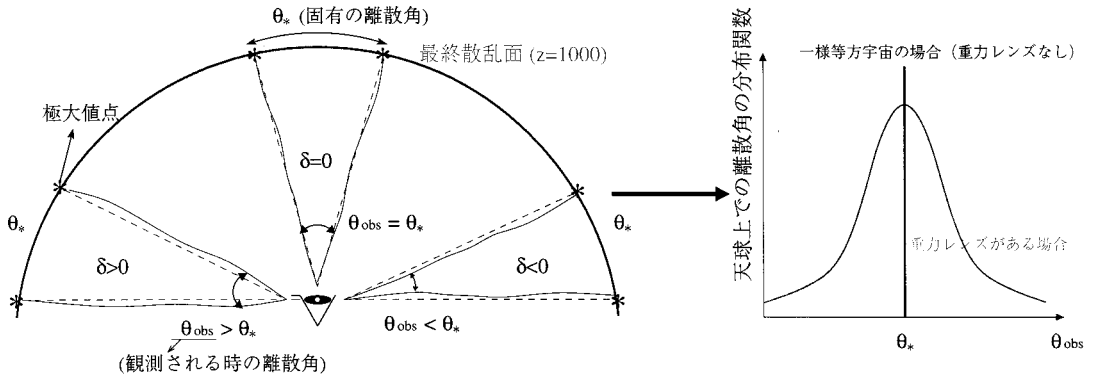


図4 2つの極大値点の間の離散角に対する重力レンズ効果の模式図。

4. CMB マップ上の極大値点の分布に対する重力レンズ効果

いよいよ、私達が提案した重力レンズ効果を引き出すための新しい方法に移ろう。上述の重力レンズ効果による角度偏差を引き出すためにCMBマップ上の「目印」として温度揺らぎの極大値点を考えるのであるが、それらの各々の角度偏差を引き出すことは不可能である。レンズを受ける前の本来の位置が分かり得ないからである。そこで、以下に述べる理由で2つの極大値点の組が宇宙論パラメーターの関数で与えられる特徴的な離散角で分布している傾向があることに着目し、その離散角を重力レンズ効果の角度偏差の情報を引き出す指標として用いることにした。

そもそもCMB温度揺らぎマップ上で極大値点をつくる本質的な物理過程は、光子とバリオンの音波振動である¹¹⁾。例えば、晴れ上り時以前にコンプトン散乱を通して結合している光子とバリオンの混合流体が、暗黒物質のつくる重力ポテンシャルの井戸の底に落ちようとする、自身の(輻射)圧力によってその運動は反発を受け、結果としてその流体はポテンシャル井戸のまわりで振動することになる。従って、音波振動の圧縮あるいは希薄な状態のときにちょうど宇宙が晴れ上がっ

たとすると、CMB温度が光子の数密度に比例するため、それらはCMBマップ上で極大値点あるいは極小値点として観測されるのである。音波振動の波長は宇宙論パラメーターで決まり、それを晴れ上がり時までの角径距離を通して見たときの角度スケールも宇宙論パラメーターにしか依存しないのである。つまり、天球上である極大値点のまわりには、その特定の角度スケールで離れているところに別の極大値点を見つける確率が高いことになる。そして、それらの極大値点の組は重力レンズ効果によって、その特徴的な離散角とは異なる様々な角度で観測されることになり、「効率的」に重力レンズ効果を引き出せることを期待したのである。

図4に示されるように、より簡単化した3つの典型的な例を考えよう。ある一つの音波振動の波長に対応する角度スケールで離れて天球上に分布する多数の極大値点の組を考える。もちろん、実際の極大値点は様々な波長の温度揺らぎの重ね合わせによって形成されていることに注意されたい。ある組から発せられた光線の経路は、最終散乱面から我々のところまで到達する間に、暗黒物質が平均より密集した領域(すなわち密度ゆらぎが正)を伝播してくるとすると、それらは重力レンズの集光効果のために本来の角度スケールより大きな離散角で観測されることになるだろう。一方、密度

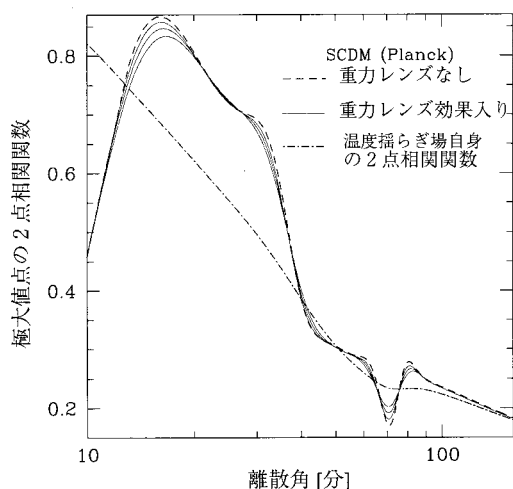


図5 CMB 極大値点の2点相関関数への重力レンズ効果 (実線)。4本の実線は、暗黒物質の密度揺らぎの振幅が大きいほど、重力レンズ効果によるスムージングの効果が大きいことを示している。比較のため、点破線は通常温度揺らぎ場の2点相関関数を表している (便宜上200分で振幅を一致させている)。この理論計算では、衛星計画 Planck の装置で期待される角度分解能と感度を考慮している。SCDMとは、宇宙項の寄与を考えない標準的なCDMモデルである。

揺らぎが平均的にゼロや負の領域を伝播してくる光線の組は、本来の離散角あるいはそれより小さな角度スケールで観測されるはずである。この様に、天球上で唯一の角度スケールで観測されるはずの組が、重力レンズ効果によって様々な角度スケールで観測されることになる (図4参照)。結果、観測される離散角の平均は本来の角度になり、その分散がその角度スケールで典型的な大規模構造の密度揺らぎの振幅の分散に制限を与えることができるのである。

この考えに基づき、極大値点の分布を記述する最も基本的な統計的指標である極大値点の2点相関関数 $\xi_{pk-pk}(\theta)$ への重力レンズ効果を定量的に調べた。2点相関関数とは、ある1つの極大値点に着目したとき、そこから角度 θ だけ離れた位置に別の極大値点を見つける一様分布からのずれとしての度合いを表すものである (一様分布ならば $\xi_{pk-pk}(\theta) = 0$ である)。結果は、図5に示されている。まず、重

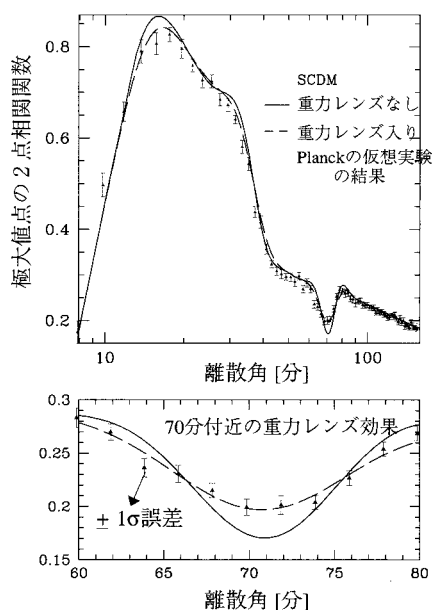


図6 Planck の装置性能を想定して仮想実験をした結果。全天の75%のデータを想定したときに期待される測定誤差を考慮した典型的な重力レンズ効果を含む極大値点の2点相関関数。誤差棒は、 $\pm 1\sigma$ を表す。下図は、70分付近の結果を拡大したもの。

力レンズなしの極大値点の2点相関関数を見てみよう。期待されたように、温度揺らぎ場自身の2点相関関数と比較して、極大値点の2点相関関数の形は、その組が特徴的な離散角で分布していることを反映して、より顕著な振動型の形状をしている。これに対して、上記の理由で重力レンズ効果は、その関数形にスムージング効果として現れる。例えば、約70分角スケールでの2点相関関数の凹型のくぼみの深さはレンズ効果により減少している。図を見て、何だ重力レンズ効果は小さいと思われるかもしれない。しかしながら、予定されているCMB観測は、今までにない精度で行われるので、この効果の検出可能性の問題を調べることは極めて興味深い。そこで、私達は図3で示されたような擬似的なCMBマップのシミュレーションを実行し、CMB観測の仮想的な実験を試みた。このとき、観測の角度分解能とピクセル毎の検出器のノイズ

参考文献

- 1) Smoot G. F., et al., 1992, ApJ, 396, L1
- 2) <http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>
- 3) <http://www.sdss.org/>
- 4) 例えば, Batelmann M., Schneider P., 2001, Phys. Rep., 340, 291
- 5) van Waerbeke L., et al., 2000, A&A, 358, 30
- 6) Wittman D., et al., 2000, Nature, 405, 143
- 7) Takada M., Komatsu E., Futamase T., 2000, ApJ 533, L83
- 8) Takada M., Futamase T., 2001, ApJ 546, 620
- 9) Schmalzing J., Takada M., Futamase T., 2000, ApJ 544, L83
- 10) Takada M., 2001, ApJ, in press
- 11) 例えば, 杉山 直 1999, パリテイ 7月号, 49
- 12) de Bernardis P., et al., 2000, Nature, 404, 955
- 13) 例えば Peacock J. A., 1999, Cosmological Physics, Cambridge Univ. Press.
- 14) 例えば, Fukugita M., Liu G.-C., Sugiyama N., 2000, PRL 85, 4674
- 15) Futamase T., 1996, PRD, 53, 681
- 16) 例えば, 小松英一郎 2001, 博士論文(東北大学)
- 17) Bond J. R., Efstathiou G. P., 1987, MNRAS, 226, 655
- 18) Seljak U., 1996, ApJ, 463, 1
- 19) Tyson A., Wittman D., Angel J., 2000, astro-ph/0005381

Gravitational Lensing Effect due to Large-Scale Structure as a Probe of Dark Matter Distribution

Masahiro TAKADA

Division of Theoretical Astrophysics, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo, 181-8588

Abstract: Gravitational lensing effect due to the large-scale structure of the universe can be a unique method for measuring the dark matter distribution. We have recently investigated the weak lensing effects on temperature fluctuations field in the cosmic microwave background and proposed that the effects can be a method for observationally reconstructing the dark matter power spectrum that is an essential quantity in understanding the structure formation. Here, we discuss the methodology and the cosmological meaning.