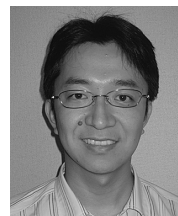


# 重力レンズ効果と観測的宇宙論

高田 昌 広

〈東京大学数物連携宇宙研究機構 〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: masahiro.takada@ipmu.jp



重力レンズ効果は、宇宙の全エネルギーの大部分を占める暗黒物質と暗黒エネルギーを「見る」ことを可能にする。遠方銀河像に隠れている重力レンズ情報を復元することで、これら暗黒成分の性質に迫ることができる。ここでは、重力レンズ効果を概観し、そのような方向性の研究について紹介する。

## 1. はじめに：宇宙のダークサイド

「宇宙は一体何でできているのだろうか？」誰でも一度は思ったことがあるような素朴な疑問の答えに、宇宙背景放射（以後単に **CMB**）に代表される近年の観測的宇宙論は迫りつつある<sup>1)</sup>。宇宙の全エネルギーのうち、どうやら約 **20%** が暗黒物質、約 **70%** は加速度宇宙膨張を引き起こす暗黒エネルギーで宇宙は満たされているらしいのだ。これら宇宙の暗黒成分、暗黒物質および暗黒エネルギーの性質、を解明することが現代宇宙論、物理学における最重要問題になっている。

暗黒物質の有力候補は、重く、冷たい（速度分散が小さい）、また他の粒子とは重力のみで相互作用する、あるいは相互作用が非常に小さい、未知の素粒子と考えられている。このような冷たい暗黒物質（以後単に **CDM**）を仮定したモデルに基づく構造形成シナリオは、観測されるさまざまな宇宙の構造形成過程の特性をうまく説明することに成功している<sup>2)</sup>。さらに、加速器実験などの地上実験が、いずれは暗黒物質の素粒子候補を発見するだろう（と言っているうちに残念ながら **LHC** は休止中であるが……）。

一方、もう一つの暗黒成分、暗黒エネルギーの性質については全く正体不明である<sup>3)</sup>。真空のエ

ネルギーは確かに有力な物理モデルであり、かの有名な物理学者アインシュタインが導入した「宇宙定数」のように振舞い、加速度膨張を引き起こしうる。しかし、真空のエネルギー密度を素粒子論的にナীবに評価すると、観測されている値より  $\sim 10^{120}$  倍も大きい値を与える大問題に直面する。あるいは、宇宙初期に加速度膨張（インフレーション宇宙）があったと信じられているが、そのインフレーション物理からの類推で、暗黒エネルギーも定数というよりは時間進化する動的なものではないかという提案もされている。しかし、このシナリオにも決定打がないのが現状である。

このように、暗黒エネルギーについては理論的な手がかりが不足している。また、宇宙膨張を通して姿を表す暗黒エネルギーを地上実験で探るのはきわめて難しいだろう。この現状における妥当なアプローチは、さまざまな宇宙論観測データが、暗黒エネルギーが定数（つまり宇宙項）とした場合と全く矛盾がないのか、あるいは宇宙膨張とともに時間進化するのか、という問題をまずは注意深く検証することである。このような観点からさまざまな将来計画が提案され、今後 **10年** (?) くらいの間は暗黒エネルギー探査が観測的宇宙論の研究の主流となると思われる<sup>4)</sup>。ここでは、

筆者が進めてきた研究成果とともに、重力レンズ効果の方法について紹介したい。

## 2. 重力レンズ効果と暗黒物質と暗黒エネルギー

目(電磁波)で見えない宇宙の「暗黒成分」を測定する方法として注目されているのが、重力レンズ効果と呼ばれる方法である<sup>9)</sup>。重力レンズとは、これもアインシュタインの一般相対論が予言する物理現象である。一般相対論では、物体周りの重力の強さは、空間の「曲がり具合」という幾何学的な概念で表すが、質量をもたない光でさえ、自分ではまっすぐ進んでいるつもりでも、物体の重力によりその進行方向が曲げられてしまうのである。さらに、今興味ある重力レンズ現象は、宇宙論的スケールを伝播する光の経路を議論するので、宇宙膨張は無視できない。この場合、重力レンズの強度というのは、おおざっぱに言って

$$(\text{重力レンズの強度}) = (\text{レンズ天体の質量}) \times (\text{宇宙論的距離の関数}) \quad (1)$$

と表せる。つまり、レンズ天体が電磁波で光っているかどうかにかかわらず、質量が大きくなるほど、重力レンズの強度は大きくなる。この原理により、レンズ天体の重力を支配している暗黒物質の空間分布を復元することが可能になる。さらに、レンズ天体の質量を固定したとしても、観測者-レンズ天体-光源間の距離が大きくなるほど、観測者にとって重力レンズ効果の強度は大きく見える。暗黒エネルギーの量を変えることは宇宙の膨張則に変更、つまり宇宙論的距離を変更することになるので、重力レンズ強度を変えることになる。このように、重力レンズの方法は宇宙の暗黒成分を「見る」手段になりうるのである。

## 3. 重力レンズ効果とすばる望遠鏡

### 3.1 すばる望遠鏡主焦点カメラ

実際の宇宙には、さまざまなスケールに豊かな

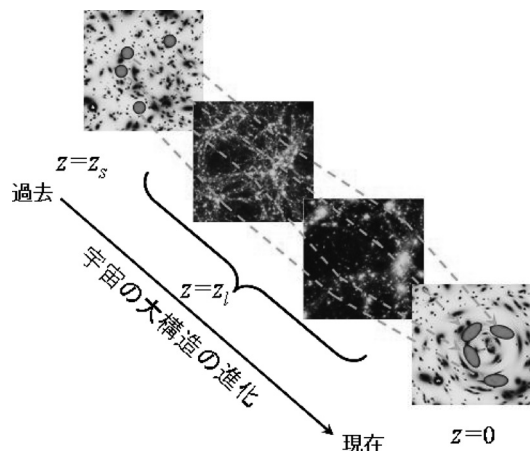


図1(a) 宇宙論的重力レンズ効果の概念図。遠方銀河像の形状は、手前の宇宙構造の重力レンズ効果によってゆがめられる。

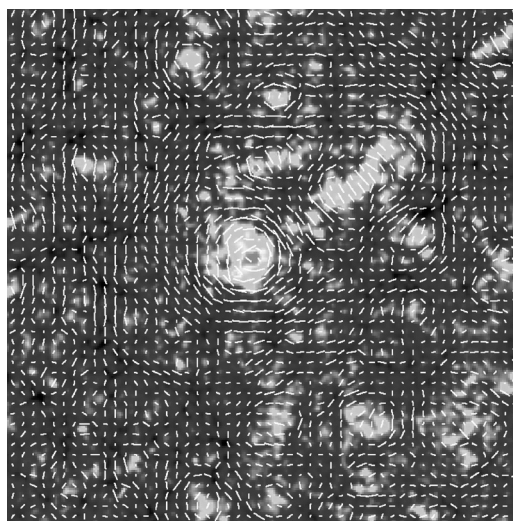


図1(b) 天球上に投影した重力レンズ場のシミュレーションの結果(天文台 浜名 崇氏提供)。1辺が約1度の領域で、カラースケールは2次元質量密度場、各点における短い棒は遠方銀河像がこの棒の方向に長軸をもつ楕円にゆがめられることを示す。棒の長さは重力レンズシアアの強度に比例する。中心の巨大銀河団の周りには、質量中心を取り囲むように背景銀河ゆがめられるのがわかる。

階層構造（天の川銀河，系外銀河，銀河団，大規模構造など）が存在するので，それぞれのスケールにおいて特徴的な重力レンズ現象が観測される．特に，日本が世界に誇るすばる望遠鏡の主焦点カメラ<sup>6)</sup>は，その広視野，集光力および高空間分解能のために，下に述べる重力レンズシアー効果を測定するには世界最高性能の装置である．

観測的に有限サイズの銀河が光源の場合の重力レンズ効果を考えよう．図 1(a) に示されているように，赤方偏移  $z_s$  にある銀河から発せられた光線の束は観測者 ( $z=0$ ) に到達する間， $z_1$  にある宇宙の階層構造を通過することで少しずつ重力レンズ効果を受ける．個々の光線の経路に沿って重力場は微妙に異なるため（つまり潮汐力により），それらを積分した結果は光線の束の形状を系統的にゆがめることになる．このことから，仮に天球上で完全な円の形の銀河があったとしても，観測される形状はゆがんだ楕円になってしまうことになり，これが弱い重力レンズシアーと呼ばれる効果である．

この誘発される楕円率の大きさが，重力レンズの強度に対応する．しかし，そもそも個々の銀河の形状が厳密な円であるはずはなく，観測的には銀河固有の楕円率（典型的に 30% 程度）から重力レンズの寄与（1–10%）を引き出さなくてはならない．まず，重力は遠距離力であることを思い出せば，宇宙の階層構造の重力場は背景銀河像に系統的な，互いに相関をもった楕円率のパターンを誘発することがわかるだろう．一方，銀河固有の楕円率は，異なる銀河間ではランダムな方向をもって分布していると考えられる<sup>\*1</sup>．したがって，多数の銀河像の楕円率を統計平均することにより，系統的なパターンをもつ楕円率の成分，すなわち重力レンズ成分だけを引き出すことができるのである．直感的な例として，銀河団がある領域を考えよう（図 1b 参照）．この場合は，質量集

中が大きい銀河団による重力レンズ効果が卓越するが，その周りには円周に沿ってゆがんだ背景銀河像の組織的なパターンが現れる．逆に，この組織的な楕円率パターンの測定から，モデルを仮定することなしに，質量分布を復元することが可能になる．同様に，宇宙の大規模構造も遠方銀河像に互いに「相関」をもった楕円率パターンを誘発し，これは後に述べる宇宙論的弱重力レンズ効果と呼ばれる．

このように重力レンズシアーの検出には，できるだけ多くの銀河像を統計解析する必要があり，すばる望遠鏡の集光力は強力である．さらに，銀河像を高精度で定量化する必要があり，また実際には大気シーイング効果あるいは光学系から生じる像ゆがみを星像 (PSF) の測定から正しく補正する必要がある．これには，マウナケア山頂における最高の天文観測条件および撮像における高空間分解能力が威力を発揮する．これらの理由で，すばる望遠鏡は，重力レンズシアーを測定するには世界最高の装置と言えるのである．

### 3.1 暗黒物質を見る—銀河団重力レンズ効果

この節では，私の研究人生にとって重要な研究の転換点になった，またすばるの威力に完全に魅了されてしまう契機になった私たちの「観測的」研究の結果について簡単に紹介したい．

銀河団は宇宙最大の自己重力系で，このため最大シグナルの重力レンズ効果が期待できる．また，銀河団の形成・進化過程には暗黒物質が本質的な役割を果たしているので，暗黒物質の性質を探るには絶好の実験場でもある．

大規模  $N$  体計算は，複雑な重力の非線形過程を正確に追従することを可能にするので，CDM 構造形成シナリオにおいて，いかに銀河団のような自己重力系が形成されてきたのか，あるいはその特性について調べる強力な手段である<sup>2)</sup>．このような  $N$  体計算に基づき，Navarro, Frenk, & White

\*1 解析に用いる銀河はほとんどが宇宙論的スケールで離れていて，物理的な相互関係はもたないと見なせる．

は大変興味深い提案をしている<sup>7)</sup>。銀河スケールから銀河団スケールにわたり、暗黒物質ハローの質量密度分布の動径プロファイルがある特徴的な関数形

$$\rho(r) = \frac{\rho_r}{(r/r_s)(r/r_s+1)^2} \quad (2)$$

で表せるというのである。このモデルは **NFW** モデルと呼ばれ、密度プロファイルが中心部では  $\rho \propto 1/r$  ( $r \rightarrow 0$  の極限で密度が発散するカスプ構造)、外側では  $\rho \propto 1/r^3$  のように振舞う特徴をもっている。ここで、 $r_s$  は密度プロファイルのべきが  $-1$  から  $-3$  に転移する半径を与えるパラメーターである。**NFW** モデルは二つのパラメーターで特定され、観測的にはビリアル質量 ( $M_{\text{vir}}$ ) と中心集中度パラメーター ( $c_{\text{vir}}$ : ビリアル半径と  $r_s$  の比) が用いられるのが通例になっている。

**NFW** モデルの起源については、明確な物理的な解釈はなされていない。また、宇宙論モデル依存性や  $N$  体計算の精度から生じる不定性なども指摘されている。ただ、等温モデルなどとは本質的に異なる **NFW** モデルのような密度プロファイルが **CDM** 構造形成シナリオで出現するという点については、その後の研究で確かめられている。本稿で強調したいのは、**NFW** モデルは暗黒物質粒子が「冷たい」という重要な仮定から導出されたことである。つまり、暗黒物質粒子の速度は構造形成における質量分布の凸凹（ゆらぎ）による重力起源のものが支配的で、暗黒物質自身が宇宙初期の熱的プラズマとの熱平衡の名残としてもつかもしい熱的速度が無視できることを暗に仮定している。このような冷たい暗黒物質の場合には、定性的には、暗黒物質粒子はハローの中

心部などの重力ポテンシャルの井戸に引き寄せられ、どんどん集合し、その結果としてカスプ構造が出現するとも考えられる。逆に、例えば、もし暗黒物質が有限質量ニュートリノのような熱く軽い粒子である場合は、一般的には非常に大きな熱的速度をもつので、ハローの重力場には閉じ込めることが難しくなり、**NFW** モデルのカスプ構造が現れないかもしれない。あるいは、暗黒物質粒子同士が無視できない自己相互作用をもっている場合も、ハローの質量分布に変更が生じる可能性も指摘されている<sup>8)</sup>。

このように、ハローの質量分布あるいは質量密度プロファイルを観測的に探ることで、暗黒物質の素粒子的性質に迫れる可能性がある。このような目的のもとで、すばる望遠鏡のデータを用い、われわれは最大質量級の銀河団 **Abell1689** ( $z = 0.18$ ) の重力レンズ効果を調べた<sup>9)</sup>。この銀河団は、宇宙最大のアインシュタイン半径<sup>\*2</sup>をもつことで有名で、重力レンズ研究には絶好のターゲットである。また、共同研究者のトム (**Tom Broadhurst**) たちは、ハッブル宇宙望遠鏡の **ACS** (**Advanced Camera for Surveys**) の高空間分解能データを用い、強い重力レンズ効果により 100 個以上の多重像になっている背景銀河を同定し、詳細な質量分布を復元することに成功しており、当時たいへんな注目を集めていた<sup>10), \*3</sup>。

しかし、ハッブル望遠鏡のデータは、銀河団の中心領域（半径で約 200 kpc 以内）に限られており、銀河団全体の質量分布を調べることはできない。一方、すばる望遠鏡は 8 m 級望遠鏡の中では最大視野を有しており、1 視野の観測で銀河団全体をカバーすることができる。つまり、ハッブル望遠鏡とすばる望遠鏡は互いに相補的で、銀河団

\*2 アインシュタイン半径の周辺あるいは内側の領域に、大きくアーク状にゆがんだ背景銀河、あるいは一つの背景銀河が多重像として観測される「強い」重力レンズ効果の現象が観測される。

\*3 余談になるが、筆者は、2004年4月1日に東北大天文学教室の助手として赴任したのだが、その当日にトムの談話会があり、サイエンスについても夜の飲み会でもいろいろな意味で意気投合し、この共同研究を立ち上げることができる幸運(?)にも恵まれた。

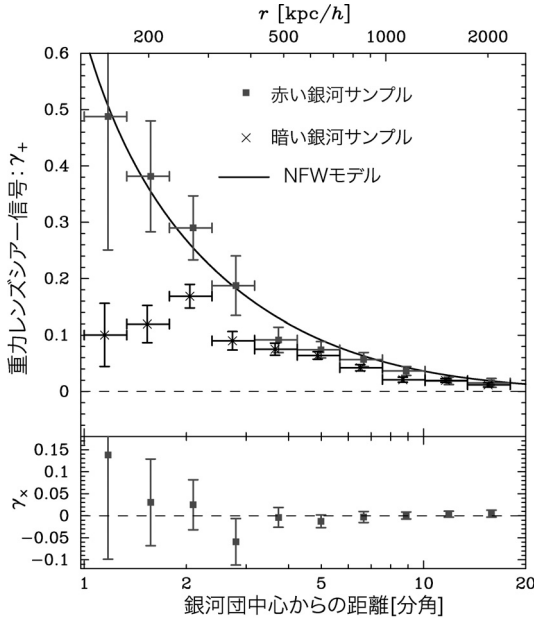


図2 銀河団 A1689 のすばるデータの重力レンズシアー解析の結果. 四角記号は背景の赤い銀河サンプルの結果を示し、重力レンズが予想するように背景銀河の楕円率が銀河団中心からの半径の関数とともに減少する. ×記号は暗い銀河サンプルを解析に使った場合の結果. レンズを受けていない(主に)銀河団のメンバー銀河を含むために、レンズ信号が薄められているのがわかる.

重力レンズ研究を進めるには最適な組み合わせなのである.

図2の四角記号は、A1689銀河団の中心からの半径の関数として、その半径周りの円殻内に含まれる背景銀河の楕円率を測定し、円周の接線方向に長軸をもつ楕円率成分の平均値をプロットしたものである. 図1bあたりで述べたように、重力レンズシアー効果により、銀河団周りにはこの楕円率成分の組織的な分布が期待される(ランダムな楕円率分布については、ゼロになるはずの量である). まず、すばるデータはこの重力レンズシアー信号を視野全体(半径で約20分角)にわたり、有意なS/N比で検出するのを可能にした. また、レンズ信号は銀河団中心部に近づくほど大きくな

り、重力の振舞いと一致する(より定量的な比較については後述する). 一方、円周の接線方向から45度だけ回転した方向に長軸をもつ楕円率成分は、重力レンズ効果では生じないので、この成分の測定は銀河固有の楕円率からの寄与あるいは測定法の系統誤差の指標になる. 測定結果は、エラーバーの範囲内でゼロ信号を示し、われわれの重力レンズ測定が十分信頼できることを意味している.

以前の研究と比較して、われわれの解析結果には重要な改善点がある. 以下に述べる手順で、より信頼性の高い背景銀河候補の銀河カタログを用いたことである. この領域で入手可能なすばるデータはVとi'バンドの撮像データだけであるので、銀河の赤方偏移を推定するには限界がある. そこで、まず色等級図上で狭い帯状の領域に集中的に分布する銀河団メンバーの早期型銀河を同定する. このメンバー銀河より赤く、暗い銀河は、高赤方偏移にある、つまり背景の早期型銀河である可能性が高い. 四角記号は、この赤い銀河カタログを使った場合の解析結果である.

一方、以前の研究では、統計精度をできるだけ向上させようという意図から、観測領域にあるすべての「暗い」銀河を重力レンズ解析に使うというのが通例であった. しかし、この銀河カタログは、銀河団のメンバー銀河あるいは手前の銀河を含んでいる可能性がある. もちろん、それらの銀河はレンズを受けていないので、重力レンズ解析の統計平均に含めると、見かけ上はエラーバーが小さくなるが、レンズ信号を過少評価してしまうことになる. この通常の方法による結果が×記号で示してあり、過去の研究をよく再現している(例えば、参考文献11). 赤い銀河カタログの結果と比較して、半径で4分角以内の領域で約2倍程度にも及びレンズ信号を過少評価していることがわかる. このようにわれわれの研究は、銀河カタログの選定の重要性を明確に指摘した. しかし、ここで強調すべきは、赤い銀河カタログの銀河数

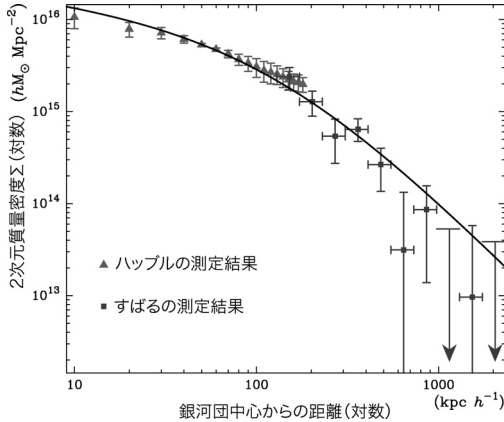


図3 図2に示される重力レンズシアー解析結果から復元された2次元質量密度プロファイルの結果。

は暗い銀河カタログよりも1/3程度も少なく、それにもかかわらず高いS/N比で重力レンズ信号を検出できたのは、すばる望遠鏡の良質なデータのためにはかならないことである。

図3は、上述の測定した重力レンズシアー信号から、2次元質量密度の動径プロファイルを復元した結果である。また、ハッブル望遠鏡の強重力レンズ測定結果も示してある。特筆すべきは、強弱の重力レンズ効果を組み合わせることで、観測的にはハッブルとすばるのデータを組み合わせることで、銀河団中心からの半径で10 kpcから2 Mpcの2桁に及ぶ範囲で質量分布を復元できたことである。まず、赤い銀河カタログのすばるの結果はハッブルの結果と重なる半径の領域で一致する。さらに、復元した質量密度プロファイルは半径とともに急勾配になり、NFWモデルの予言どおりである。実際に、復元した質量プロファイルはNFWモデルでよくフィットできる。このように、われわれの結果は、小スケールにおけるCDM構造形成モデルの理論予言が、実際の宇宙での観測結果と矛盾しないことを定量的に示したのである。しかし、一つの問題点として、観測結果を最もよく再現するNFWモデルは、理論が予言するよりも非常に大きい中心集中度パラメー

ターをもつこともわかった。

さらに、暗黒物質粒子の性質が全く相互作用をもたない、つまり自己重力系としては2体散乱が効かない無衝突系の場合には、ハローの形状は球対称ではなく、ひしゃげた形状をもっているのが自然である<sup>12)</sup>。われわれは、重力レンズから復元された質量分布と非球対称のハロー質量分布モデルを比較し、ハローの非球対称が上述の大きな中心集中度パラメーターを説明しうることも指摘した<sup>13)</sup>。

このように、重力レンズ観測量で銀河団を詳細に調べることで、小スケールにおけるCDM構造形成モデルのテスト、さらに暗黒物質の性質に迫れる可能性がある。われわれは、より均一な銀河団サンプル(現時点では約30個)に上述の方法を適用し、より無バイアスで信頼性の高い結論を出そうという国際共同研究プロジェクトを推進しており、近いうちにその初期成果を報告できると思う<sup>14)</sup>。

### 3.2 暗黒エネルギーを探る—宇宙論的重力レンズ効果

さて、次に宇宙論的重力レンズ効果と呼ばれる観測量で、暗黒エネルギーの性質を探る方法について簡単に紹介しよう。最初のほうに述べたように、宇宙の質量分布が一様でなければ必ず重力レンズ効果が起こるので、宇宙の大規模階層構造の重力場により、遠方銀河は必ず多少は重力レンズ効果の影響を受けている。これが宇宙論的重力レンズ効果と呼ばれる現象である。もちろん、この効果は非常に小さく、楕円率に換算して約1%程度の効果でしかない。それでも、多数(少なくとも100万個)の銀河像を統計解析することで、この効果も測定可能であり、2001年の初検出以降、理論的、観測的に活発に研究されている分野である<sup>15)</sup>。よく用いられる方法は、遠方銀河像の楕円率の相関関数を銀河間の角距離の関数として測定する相関関数法(宇宙論の王道!)である。宇宙のさまざまなスケールの階層構造は互いに相関を

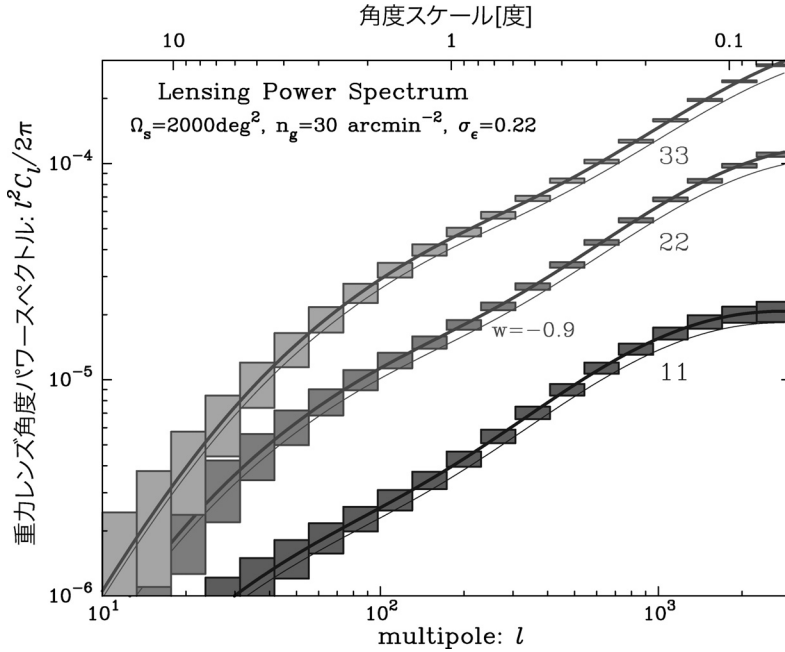


図4 すばる HSC カメラによる重力レンズサーベイで期待される宇宙論的重力レンズ効果の角度パワースペクトル（太線）とそのエラーバーを示す。多色撮像データを用い、角度パワースペクトルを赤方偏移の関数として測定できることを想定し、11, 22, 23, のラベルの順番でより高赤方偏移の銀河を重力レンズ解析に使った場合を示している。細い実線は、暗黒エネルギーの状態方程式が  $w = -0.9$  の場合を示す。

もちながら分布、進化しているので、その構造によって起こる重力レンズシア場的相关関数もゼロにならないのである。これまでに測定された結果は、銀河間の距離が小さくなればなるほど、その楕円率の間の相関強度は大きくなり、CDM 構造形成モデルの予言と矛盾しない。

この方法の利点は、CDM 構造形成シナリオの確立の歴史からもわかるように、CMB 観測で詳細に制限されている密度ゆらぎの初期条件から出発し、宇宙論パラメータの関数として、宇宙の大規模構造の進化史および統計的性質が正確に予言できることにある。この理由で、宇宙論的重力レンズ効果の方法は、宇宙論パラメータを制限する強力な手段の一つとして認識されている。

特に近年注目されているのは、重力レンズ強度を決める式 (1) からわかるように、大規模構造形成理論モデルを用いることで、重力レンズ強度の測定から宇宙の膨張則の情報を引き出すことがで

きる可能性である。暗黒エネルギーは、これら二つの量にも影響を与えるので、宇宙論的重力レンズ効果の測定から暗黒エネルギーの性質を探ることが可能になる。さらに野心的な試みとして、この方法は大規模構造形成における重力過程に敏感なので、数ある暗黒エネルギー探査法の中なかでは、「重力理論」を探る強力な手法になると考えられている。例えば、近年注目を集めている高次元宇宙モデルでは、宇宙論スケールにおける重力理論の変更により、暗黒エネルギーの必要性なしに加速度膨張が現れる可能性が指摘されているが、このような理論モデルをテストすることができる。

われわれは、世界中で計画あるいは実行されている大規模多色撮像サーベイを念頭に、宇宙論的重力レンズ効果の測定から、暗黒エネルギーの性質を制限する方法を提案している<sup>16)-18)</sup>。図4に示されているのは、後述するすばる大規模サーベイ

の将来計画で期待される宇宙論的重力レンズ効果の角度パワースペクトルと、その測定精度を調べたものである。この効果を赤方偏移の関数として測定することにより、宇宙論的制限が飛躍的に改善することができるかと期待される。例えば、計画しているすばる重力レンズサーベイでは、暗黒エネルギーの状態方程式  $w$  ( $w = -1$  であれば宇宙項) を、CMBと重力レンズ効果の結果だけを組み合わせ、 $1\sigma$  エラーで  $\sigma(w) \sim 0.03-0.05$  の精度で測定することを目指している<sup>4)</sup>。

#### 4. 今後の展望: Hyper Suprime Camera

前節までの議論で、宇宙論における重力レンズの有効性、また重力レンズ測定の際のすばるの威力について述べてきた。さらに、日本にとってたいへん良いニュースは、Hyper Suprime Camera (HSC) という計画<sup>19)</sup>が進行中であることである。これは、視野をさらに10倍程度大きくした新主焦点カメラを開発し、すばる望遠鏡に搭載するという計画である。すばるの高撮像能力を維持しつつ、この広視野カメラが実現すれば、大規模サーベイを圧倒的な時間的スピードで進めることができ、重力レンズの研究に基づく宇宙論的研究をさらに飛躍的に発展させることができるだろう。この計画は、日本、プリンストン大学、台湾との国際共同研究で進められている。つまり、このカメラによる大規模サーベイで、日本独自のサーベイデータで、日本人研究者が牽引し、世界最先端の天文学的研究を進めることができる一大チャンスなのである。

ここまで述べてきた研究で再認識したことは、当たり前であるが(理論能力の足りない私には)、おもしろいサイエンスは、世界一流のデータで可能になるということである。すばる望遠鏡開発にかかわった天文学者の偉大さを、運用10年近くたって今さらながら認識したのである。この意味で、HSCの成功には、これまでの観測家と理論家

という垣根をさらに取り払い、互いに密に協力しながら、この観測プロジェクトを推進する必要があると思う。このような大規模データは、あらゆる天文学研究を進めるうえで理想的なものであるが、個人的には研究人生をかけて取り組むには申し分ないほどの難解な暗黒エネルギー問題の解決のために、少しでも貢献したいと考えている。

さらに、「暗黒物質」や「暗黒エネルギー」問題は、すでに天文学だけの問題にとどまらないのは自明で、数学、物理学、天文学の分野にこだわらず、あらゆる学問的知識を総動員し、広い視野をもって取り組む必要があるだろう。もしかしたら、第2のアインシュタインが突然現れ、全く新しい究極の理論を提唱するかもしれない。それに備えて、すばる望遠鏡で可能な限りの理論を検証ができるように、理論準備、データ解析、共同研究体制を整える必要があり、それに貢献できるように頑張るつもりである。今後とも根拠のない樂觀主義でこのようなエキサイティングな宇宙論研究を楽しんでいきたいと思う。

#### 謝 辞

私の一連の研究成果は、多くの共同研究者の協力なしにはありえませんでした。これまでの共同研究者の方々に感謝いたします。特に、私の研究に大きな影響を与えて下さった二間瀬敏史教授、Bhuvnesh Jain 教授には謝意を表します。最後に、この受賞に対しまして、日本天文学会会員の皆様にお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Komatsu E., et al., 2008, arXiv: 0803.0547
- 2) 吉田直紀, 2006, 天文月報 99, 452
- 3) 辻川信二, 2007, 天文月報 100, 462
- 4) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭, 2007, 物理学会誌 673号
- 5) 「銀河 I」(シリーズ現代の天文学第4巻)の第8章5節, 谷口義明編, 日本評論社
- 6) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 7) Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1997, ApJ





- 490, 493
- 8) Yoshida N., Springel V., White S. D. M., Tormen G., 2000, ApJ 544, L87
  - 9) Broadhurst T., Takada M., Umetsu K., Kong X., Arimoto N., Chiba M., Futamase T., 2005, ApJ 619, L143
  - 10) Broadhurst T., et al., 2005, ApJ 621, 53
  - 11) Clowe D., Schneider P., 2001, A&A 379, 384
  - 12) Oguri M., Takada M., Umetsu K., Broadhurst T., 2005, ApJ 632, 821
  - 13) Jing Y.-P., Suto Y., 2002, ApJ 574, 538
  - 14) Okabe N., Takada M., Umetsu K., Futamase T. in preparation
  - 15) Hamana T., Miyazaki S., et al., 2003, ApJ 597, 98
  - 16) Takada M., Jain B., 2004, MNRAS 348, 897
  - 17) Takada M., White M., 2005, ApJ 601, L1
  - 18) Takada M., Bridle S., 2007, New Journal of Physics 9, 446
  - 19) Miyazaki S., et al., 2006, SPIE 6269, 9

## Gravitational Lensing and Observational Cosmology

Masahiro TAKADA

*Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8568, Japan*

Abstract: Weak lensing allows to “see” the dark side of our Universe, dark matter and dark energy, which constitutes most of its total energy today. Measuring lensing distortion effects on images of distant galaxies, we can explore the nature of these dark components. In this article we review the gravitational lensing phenomena and discuss the future prospects.