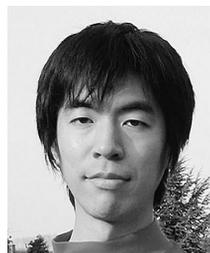


銀河分布の非等方性から探る 宇宙の構造形成：カイザー vs. 神の指

日影千秋

〈名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 〒464-8602 愛知県名古屋市中種区不老町〉

e-mail: hikage@kmi.nagoya-u.ac.jp



宇宙の加速膨張の起源解明を目指して、世界各国で大規模な銀河サーベイ計画が進行している。宇宙大構造の重力成長に伴う銀河の速度場によって、赤方偏移から距離を見積もった銀河分布が変形する現象は赤方偏移変形と呼ばれる。大スケールでの赤方偏移変形は「カイザー」効果と呼ばれ、宇宙大構造の成長率の観測指標であり、重力理論の検証をするうえでたいへん重要となる。小スケールほど銀河の運動は複雑になり、銀河分布が視線方向に引き伸ばされる現象は、「神の指 (Fingers-of-God)」効果と呼ばれ、構造成長率を測るうえで大きな系統誤差となる。本稿では、神の指効果を引き起こすサテライト銀河の運動学的情報を引き出し、構造成長率の決定精度を大きく向上させる新たな手法について紹介する。

1. 宇宙の構造形成と重力理論

超新星の観測などで明らかになった宇宙の加速膨張の起源にまつわるダークエネルギー問題は、現代物理学の最も大きな謎の一つである。負の斥力をもつ未知のエネルギー成分の存在、あるいは、一般相対論に基づく重力理論が長距離で破綻している可能性が示唆されている。すばる望遠鏡を用いた銀河撮像・分光サーベイである SuMIRe プロジェクト¹⁾をはじめとして、世界各国で大規模な宇宙観測が進行・計画され、ダークエネルギー問題の解明を目指している。

銀河サーベイなどによって宇宙の膨張および宇宙大構造の成長を精密に調べることは、ダークエネルギーの性質および重力理論の精密検証のうえで最も重要となる。宇宙大構造は、ハーバード・スミソニアン天体物理学センターのマーガレット・ゲラーとジョージ・ハクラらによって1977年から行われた銀河の赤方偏移サーベイによって明らかになった²⁾。100メガパーセク (Mpc) スケー

ルにわたって銀河が連なったグレートウォールや、銀河がほとんどないポイドなどの超巨大な銀河分布構造が発見されたのである。大構造の発見以後、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)³⁾ により、全天の4分の1にわたって銀河100万個を使った3次元銀河地図が作られ、宇宙大構造が遠方まで広がっていることが明らかになった。こうした構造は、宇宙初期にできた小さな揺らぎが重力作用で成長してできたと考えられるが、宇宙大構造の成長の仕方は、重力の性質によって大きく変わる。

例えば、アインシュタイン・ヒルベルト作用のラグランジアンを一般化した $f(R)$ 重力モデル⁴⁾ で、宇宙の膨張率を含む現在の観測結果を説明しようとする、一般相対論の予測に比べて、構造の成長は速くなることが予想されている。一方、重力のみが余剰次元を伝わるモデル⁵⁾ では、重力作用が弱まり、構造の成長は遅くなる。したがって、宇宙大構造が成長する様子を詳しく調べることで、一般相対論を検証できるだけでなく、

さまざまな重力モデルを探ることができる。

2. 銀河の速度場とカイザー効果

宇宙大構造を探るうえで、銀河の赤方偏移サーベイが重要な役割を果たす。遠方銀河の距離は、銀河のスペクトルの放射線や吸収線から赤方偏移の大きさを測ることで推定するのが一般的である。ルメートルやハッブルの法則で知られているように、遠方にある銀河ほど、光の赤方偏移が大きくなる。しかし、赤方偏移は、宇宙膨張の影響だけでなく、各銀河のもつ固有速度情報が加味されるため、赤方偏移から推定した距離は、実際とは異なったものになる。正しい距離がわからないことは、宇宙の構造を精密に調べるうえで一見マイナスのように思える。しかし、赤方偏移に含まれる銀河の速度という新たな情報が、構造の成長率を測る新たな手段を与えてくれるのだ。

個々の銀河のもつ固有速度はどのように決まっているのだろうか？ 銀河が密集している場所には、よりいっそう銀河が集まるように動き、逆に銀河がないところからは遠ざかるように動くことで揺らぎが成長し、銀河分布の構造ができたと考えられる。銀河が集まる（遠ざかる）速度が大きいほど、揺らぎの成長は速く進むので、銀河の速度場と揺らぎの成長の時間変化の関係は表裏一体である。揺らぎの成長に伴う銀河の速度場は、赤方偏移空間での銀河分布にどのような影響を及ぼすだろうか？

図1左上のように、銀河集団の周りに等方に銀河が分布している場合を考えよう。観測者から見て、銀河集団より遠くにある銀河は観測者に近づき、銀河集団より手前にある銀河は観測者から遠ざかるように動く。銀河速度の情報を赤方偏移に加味すると、等方であったはずの銀河分布は、赤方偏移空間では視線方向につぶれて見えるのだ。この現象は、最初に指摘したニック・カイザー（ハワイ大学天文学センター教授）にちなんで、カイザー効果と呼ばれている⁶⁾。カイザー効果に

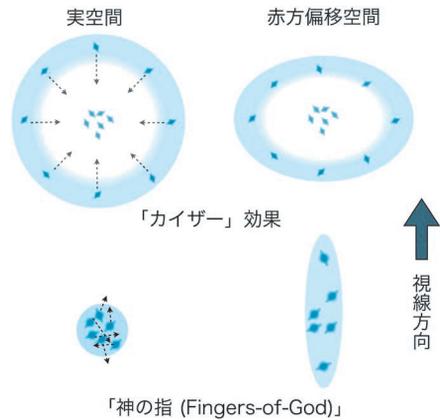


図1 銀河空間分布の赤方偏移変形の様子。大スケールでは、銀河が集まったところの周りでは、よりいっそう、銀河が集まるため、赤方偏移空間で視線方向につぶれて見える「カイザー」効果が生じる。小スケールでは、銀河のランダムな運動の影響が強まり、赤方偏移空間で視線方向に引き延ばされて見える「神の指 (Fingers-of-God)」効果が生じる。

よる銀河分布の赤方偏移変形の大きさは、構造の成長率を測る指標となる。最も、銀河は、質量密度の濃いところに選択的に形成されるため、銀河分布とダークマターを含めた質量分布とは一致しない。これは、銀河バイアスと呼ばれ、単純に赤方偏移変形の大きさから構造成長率を決定することはできない。また、揺らぎの線形近似が成り立つ大スケールのみ、銀河の速度場と構造の成長率が単純な関係になる。実際には、次に述べる非線形な赤方偏移効果で、構造成長率の測定は非常に難しくなる。

3. 神の指

揺らぎの非線形性が無視できない小スケールでは、非線形な重力作用や銀河間の相互作用の効果で、銀河の速度は複雑になる。特に銀河団のように重力的な力学平衡に達した系では、宇宙大構造の成長の仕方とは、ほぼ無関係に銀河団中心の周りを運動するようになる。図1下のように、個々の銀河の速度のばらつきによって、1カ所に集

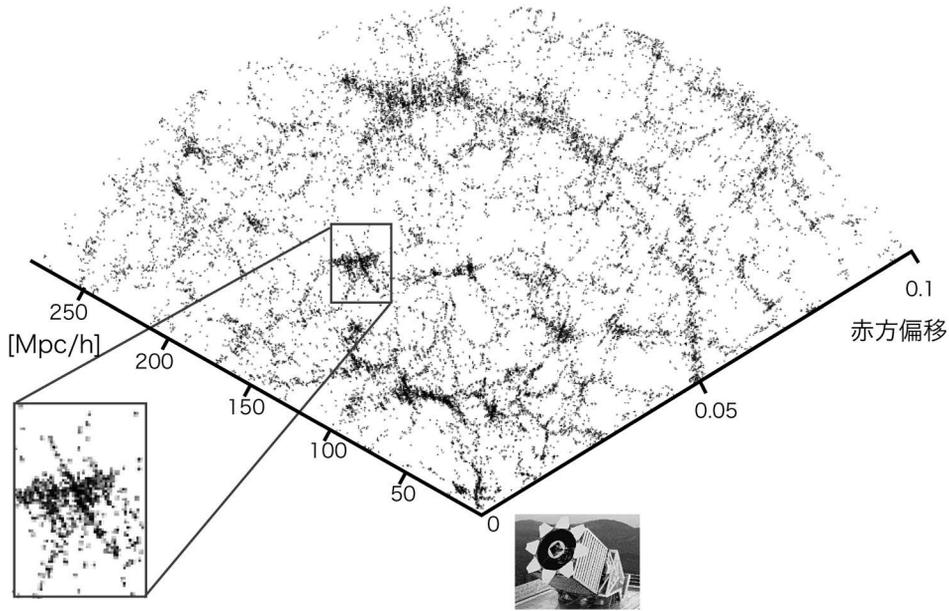


図2 スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) によって観測された北天の銀河のスライスマップ。100メガパーセク (Mpc) にわたる宇宙の大構造の様子が見られる。図枠のように銀河が密集したところでは、視線方向に銀河分布が伸びており、これらは神の指 (Fingers-of-God) と呼ばれている。

まっていた銀河集団は、赤方偏移空間で視線方向に広がってしまう⁷⁾。図2は、SDSS観測で得られた銀河のスライスマップであるが、銀河の密集しているところで、視線方向に伸びた構造が随所に見られる。これは、「神の指 (Fingers-of-God)」と呼ばれており、銀河集団内での銀河がどのような速度分布をもつかで決まる。しかし速度分布は、銀河集団全体の質量や、銀河の合体や摩擦の効果など銀河の進化過程にも依存するため、正確な理論予測は困難である。銀河団内の銀河速度は、1,000 km/s近くに及ぶため、距離に換算すると10 Mpc/h以上になり、大スケールの揺らぎへの影響も無視できない。カイザー効果による赤方偏移変形の大きさから、宇宙大構造の成長率を精密に測定するうえで、神の指効果による赤方偏移変形の影響をどこまできちんと取り除けるかが大きな課題である。

銀河は大きく分けて、銀河集団の質量中心付近にいるセントラル銀河と、その周りを運動するサ

テライト銀河に大別される。神の指を主に引き起こしているのは、速度分散の大きいサテライト銀河である。本稿では、SDSSやBOSS銀河サーベイのターゲット天体になっている、明るく赤い銀河 (Luminous Red Galaxy; 以下LRGと呼ぶ) サンプルに焦点をあてる。LRGは、通常の銀河に比べて質量が大きく、星年齢も高いため、他の銀河より早い時期に生まれたと考えられる。早い時期に生まれた銀河の周りには、物質が多く集まり重力成長が進むので、LRGの多くが銀河群や銀河団中のセントラル銀河になっていると考えられる。しかし、最近になって合体を経験したり、質量の重い銀河団内には、サテライトになっているLRGもあるだろう。大きな銀河集団ほど、サテライト銀河の平均的な速度分散も大きくなる。神の指効果の不定性は、サテライト銀河がどのような質量の銀河集団にどれだけ分布しているかの不定性にある。

4. 銀河パワースペクトルの多重極成分

銀河サンプル中に含まれるサテライト銀河の割合や、その速度分散をどのように調べたらよいであろうか？ 今回、銀河パワースペクトルの多重極成分を用いる方法⁸⁾について紹介する。

銀河パワースペクトルは、銀河数密度の空間的揺らぎのフーリエ振幅の2乗を波数の関数として表したもので、密度揺らぎの統計的性質を調べる基本的な統計量の一つである。赤方偏移変形によって銀河分布が非等方になるため、パワースペクトルに方向依存性をもつ多重極成分が現れる。赤方偏移変形に伴う非等方性は、視線方向の周りで対称であり、また銀河が十分遠方であれば視線方向の前後で対称とみなせるため、4のべき乗の多重極成分が重要となる。カイザー効果に伴う非

等方クラスタリングの効果は、クアドロポール(四極子)成分で強く現れ、さらに多重極の成分は現在の銀河サーベイの観測精度に比べて無視できるほど小さい。図3は、SDSS Data Release 7 (DR7) のLRGカタログで測ったパワースペクトルのクアドロポール(四極子)、ヘキサデカポール成分(十六極子)と、テトラヘキサデカポール成分(六十四極子)成分の大きさを波数 k の関数で表したもので、 k が大きいほど小さい距離スケールを表す。大きな距離スケール(小さい k)では、クアドロポール以外の多重極成分はほとんど0である。しかし、小さい距離スケール(大きい k)ほど、ヘキサデカポール以上の成分が現れる。これが、神の指効果によって生じる非等方成分である。

銀河パワースペクトルの振る舞いを、代表的な構造形成モデルであるハローモデルを使って説明

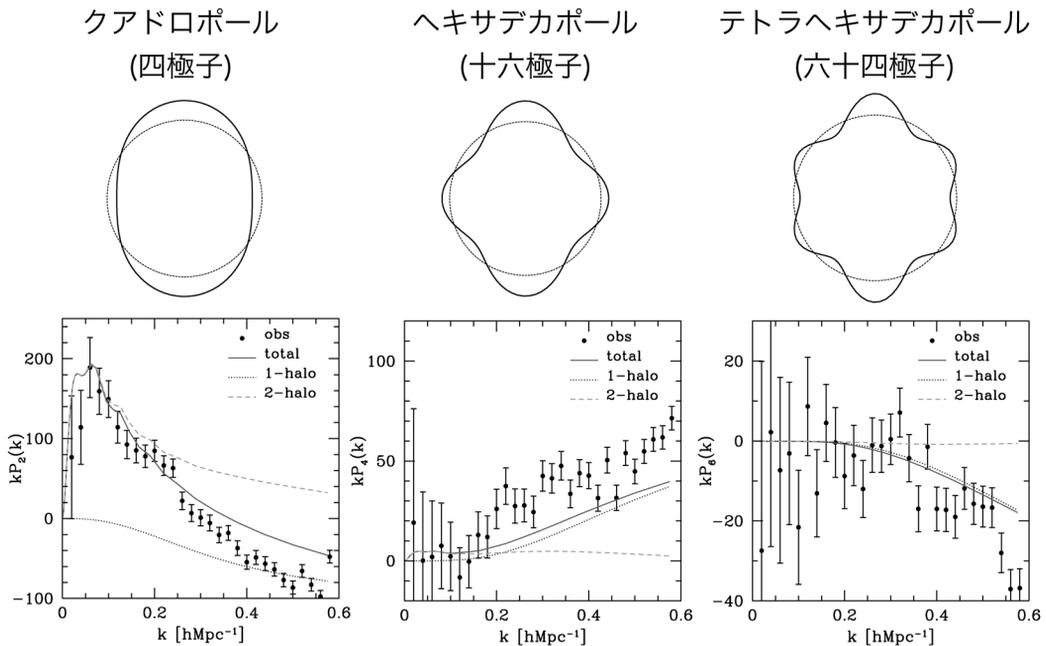


図3 SDSS DR7のLRGサンプルのパワースペクトルの多重極成分: 左図がクアドロポール(四重極), 中央がヘキサデカポール(十六重極), 右図がテトラヘキサデカポール(六十四重極)成分を表す。黒点が観測結果, 実線が, LRGのハロー占有分布(HOD)⁹⁾のもとでのハローモデルによる理論線, 1ハロー項の成分を点線, 2ハロー項の成分を破線で表している。波数 k が大きいほど, 1ハロー項が重要であり, ヘキサデカポール以上の成分では, 1ハロー項が主要な成分となる。

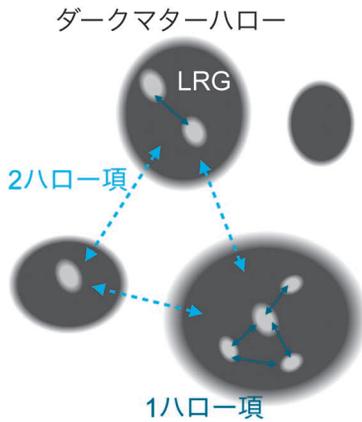


図4 ハローモデルにおける銀河 (LRG) 分布のクラスタリング。ハロー内に、銀河を2個以上含むもの、1個だけのもの、全く含まないものに分かれる。銀河の2点相関関数は、異なるハローに属する銀河ペアと同じハロー内にある銀河ペアの2つに分けられる。

しよう。ハローはダークマターの自己重力系であり、銀河の源となったガスは、ダークマター密度の濃い領域に集まって銀河が形成されたと考えられる。図4のように、ハローモデルのもとでは、銀河間の相関は、二つの異なるハローに属する銀河ペア (2ハロー項) と、同じハローに属する銀河ペア (1ハロー項) の2種類の寄与に分けられる。ハローの空間分布は、物質密度や初期密度揺らぎの振幅の大きさなど宇宙モデルパラメーターに強く依存しているため、2ハロー項が宇宙論的情報の多くを担っている。一方、1ハロー項は、ハロー内の銀河の位置や速度の分布によって決まっており、サテライト銀河を多く保有する大質量ハローで特に重要となる。一般に、ハロー内に銀河がどのように分布しているか、正確に予測することは困難である。ハローに含まれるセントラル銀河とサテライト銀河の数をハロー質量 M の関数として表したハロー占有分布 (Halo Occupation Distribution; 以下HODと呼ぶ) は、LRGの角度相関関数や、近距離にあるLRG同士をグループ化する方法によって調べられている⁹⁾。図3の線は、観測から得られたLRGのHODのもと

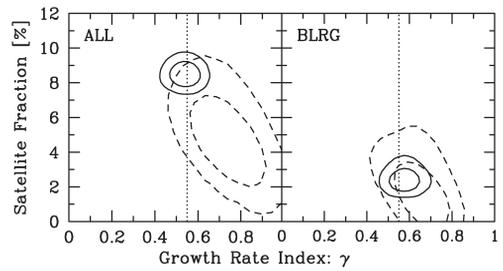


図5 SDSS DR7 LRGサンプルからサテライト銀河の割合と構造成長率指数を制限した結果 (曲線は68%, 95%信頼区間を表す)。実線と破線は、ヘキサデカポール以上の多重極成分を解析に含めた場合と含めない場合の結果であり、多重極成分が成長率を決定するうえで重要な情報であることを示している。

で、サテライトLRGの速度分布がハロー質量から決まるビリアル速度を分散とするガウス分布とした場合のハローモデルの結果である。分光ファイバー衝突によって観測されないLRGの影響についても考慮しており、ハローモデルによって、観測の定性的な振る舞いはよく説明できる。小スケールにいくほど1ハロー項が重要となり、特にヘキサデカポール以上の多重極成分は、1ハロー項に含まれる神の指効果が原因となって現れる。多重極成分の振る舞いが、ハローモデルによって説明できることを示したのは本研究が初めてである。

今回用いたLRGサンプルには、5から10%程度のサテライトしか含まれていないが、多重極パワースペクトルにその影響がはっきりと見てとれる。ヘキサデカポール以上の多重極成分から、サテライト銀河の割合やハロー内の速度分布の情報が得られ、神の指効果の不定性を大きく取り除くことができる。図5は、多重極成分の情報を使わない場合と使った場合とでは、構造の成長率のパラメーターの決定精度がどう変わるかを示したものである。多重極成分の情報がない場合、サテライト銀河の神の指による非等方性とカイザー効果による非等方性を区別することは困難なため、構造の成長率をきちんと評価することは難しい。

しかし、多重極成分の情報を使うことで、サテライト銀河の割合がよく決まるため、成長率の決定精度が3倍近く向上する。これまでほとんど活用されていなかったヘキサデカポール以上の多重極成分は、サテライト銀河の運動学的情報を引き出し、神の指効果の不定性を取り除く有用な情報である。角度相関関数を用いた方法からもサテライト銀河の割合を調べることはできるが、運動学的な情報は赤方偏移情報を通してしか知ることができない。銀河が、ダークマターとは違う速度をもつ（速度バイアス）場合、サテライト銀河の割合は同じでも神の指効果の大きさは違ってくるが、多重極成分の情報を使うことで、速度バイアスについても調べることができる。また、サテライト銀河の速度分布は、重力の性質によって変わるので、重力モデルの検証に使える可能性がある。サテライト銀河の運動学的情報は、宇宙論と銀河進化の両面の研究で非常に重要である。

5. 重力レンズとの相互相関

セントラル銀河とサテライト銀河を区別する別の方法として、重力レンズ現象を用いる方法^{10), 11)}を紹介する。遠方銀河からの光は、宇宙大構造による重力レンズ効果で曲げられ、それに伴い銀河の形状が本来の形から歪められて観測される。レンズとして働く銀河の周囲で、背景銀河像の形状の空間パターンを調べることで、銀河周りの平均的な質量分布の情報を得ることができる。図6は、セントラル銀河とサテライト銀河の周りで予想される重力レンズパターンを表す。セントラル銀河はダークマターハローの質量中心（質量ポテンシャルのピーク）に位置するので、中心に近づくほど質量密度は高くなる。一方、質量中心から離れたサテライト銀河の周りでは、そのずれの大きさ（オフセット）より内側で質量密度プロファイルが減衰する。銀河サンプル中にサテライト銀河の割合が多いほど減衰効果は強くなり、また減衰が始まるスケールから、オフセット

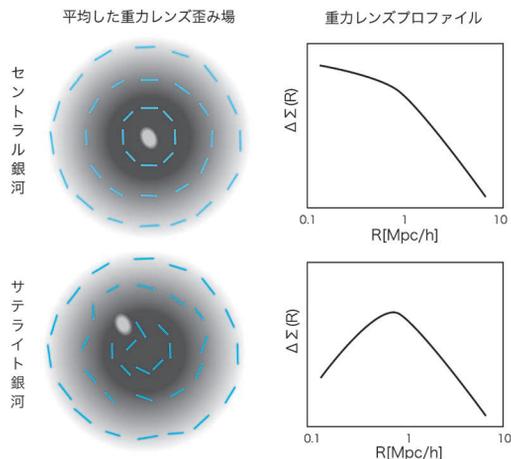


図6 セントラル銀河とサテライト銀河周りの重力レンズ歪みのパターンと重力レンズプロファイル。

の大きさが推定できる。

今回、SDSS DR7のLRG銀河の周りで、背景銀河の重力レンズ効果を調べ、LRGサンプルに含まれるサテライト銀河の割合とオフセットの大きさを測定することに成功した。オフセットの違いを見るため、距離の近いLRGをグループ化したハローカタログの再構築を行い、グループ内での中心の取り方で、重力レンズのシグナルがどう変わるかを調べた。具体的には、1. グループ内で最も明るいBrightest LRG (BLRG), 2. グループで最も暗いFaintest LRG (FLRG), 3. LRGのポジションの算術平均 (Mean) の3点の周りで質量プロファイルを測り、オフセットのない成分（セントラル銀河）とオフセットのある成分（サテライト銀河）の割合を測った。もし、BLRGがすべてセントラル銀河の場合、BLRG, Mean, FLRGの順にオフセット成分の割合が増える。逆にBLRGのサテライトの割合がFLRGと同程度であると、Meanのオフセット成分の割合が最も小さくなる。三つの結果を比較することで、BLRGやFLRGのオフセットの割合を測ることができる。図7の左パネルがBLRG、中央がFLRG、右パネルがMeanの結果である。BLRGとMeanのオフセットの大き

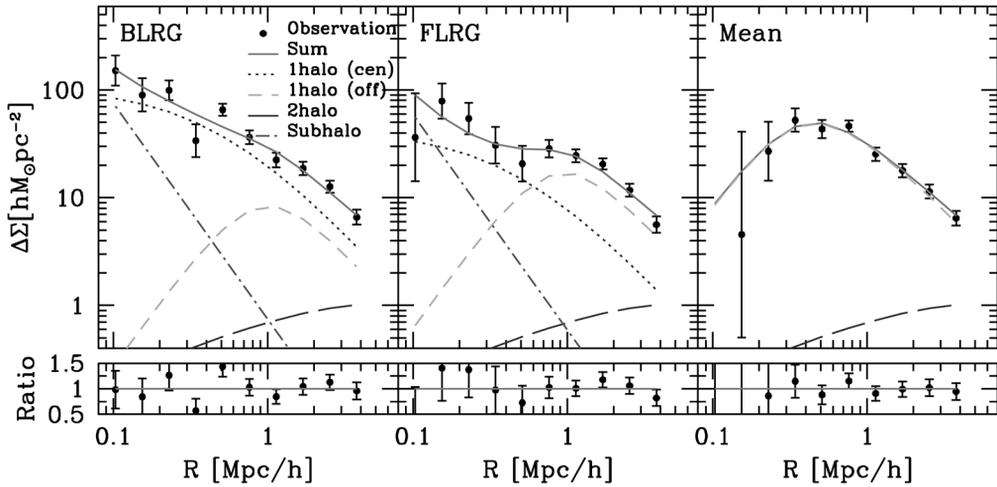


図7 SDSS DR7 LRGサンプルから再構築したハローカタログと、背景銀河の楕円率との相互相関から得られる質量プロファイル。パネルの違いは、ハローの中心の取り方による違いで、左側がグループ内で最も明るい銀河 (Brightest LRG; BLRG)、中央が、グループ内で最も暗い銀河 (Faintest LRG; FLRG)、グループ内のLRGの算術平均ポジションを中心にとった場合を表す。点が観測値を表し、実線がハローモデルに基づいてフィットした結果である。その他の線は、理論モデルの各成分を表しており、点線はオフセットのない成分、短破線はオフセットをもった成分、一点鎖線は、サブハロー項、長破線は2ハロー項を表している。各パネルの下は、観測と理論の比を表しており、理論と観測は誤差の範囲内でよく合っていることがわかる。BLRGに比べて、FLRGでは、オフセット成分が大きいことから、暗い銀河ほどセントラル銀河の割合が少ないことがわかる。オフセット成分の大きさから見積もられるセントラル銀河の割合は、BLRGで $63 \pm 21\%$ 、FLRGで $24 \pm 13\%$ である。BLRGにもオフセット成分があることから、最も明るい銀河が、必ずセントラル銀河となるわけではないことがわかる。

さはほぼ同程度であることがわかり、セントラル銀河の割合は、BLRGで $63 \pm 21\%$ 、FLRGで $24 \pm 13\%$ の結果が得られた。さらに、BLRGのオフセット成分は0ではなく、グループ内で最も明るい銀河が必ずしもセントラル銀河ではないことがわかった。LRGを2個以上保有するハローの典型的質量は $M_{180b} = 1.6 \times 10^{14}$ 太陽質量、オフセットの典型的スケールは400キロパーセク、サテライト銀河の速度分散は660 km/sになることがわかった。

以上から、サテライト銀河による神の指効果の銀河パワースペクトルへの影響を見積もると、 k が $0.2 h/\text{Mpc}$ で銀河のモノポール(単極成分)パワースペクトルは5%近く減衰してしまうことがわかった。これは銀河パワースペクトルを使った宇宙論解析において無視できない影響を及ぼす。

たとえば、質量をもったニュートリノは、無衝突減衰の効果で、小スケールのパワースペクトルが減衰するため、銀河パワースペクトルの精密な測定からニュートリノ質量を決定できる。しかし神の指効果も同様にパワースペクトルを減衰させるため、ニュートリノ質量を精密に評価することが困難になる。重力レンズ現象やパワースペクトルの多重極成分を使った神の指効果の評価は、ニュートリノ質量を決定するうえでも重要となる。

6. まとめと今後の展望

銀河赤方偏移サーベイから得られる銀河の速度場の情報は、宇宙大構造の重力成長の割合を測る重要な観測指標である。今後の大規模観測によって、一般相対論に基づく重力の精密な検証ができ、宇宙の加速膨張の起源解明へとつながる。銀

河サーベイによる宇宙論解析において大きな障害となるのは、銀河とダークマター（あるいはハロー）との間の対応関係の不定性である。特に、神の指で知られる非線形な赤方偏移変形は、サテライト銀河の運動学的性質に起因しており、正確な理論予測は困難である。今回、サテライト銀河の運動学的性質を探る、新たな観測手法を二つ紹介した。

一つは、銀河パワースペクトルに現れるヘキサデカポール以上の多重極成分の情報を使う方法である。これらの多重極成分の振る舞いは、サテライト銀河の運動学的性質でほとんど決まるため、神の指効果を補正するうえでたいへん有用である。多重極成分の情報を含めて解析することで、銀河サンプルに含まれるサテライト銀河の割合や速度分散がよく決まり、成長率の決定精度が大きく向上することがわかった。サテライト銀河の性質を探る別の方法は、重力レンズ現象を用いる方法である。ハロー質量中心からずれたサテライト銀河の周りでは重力レンズ効果が弱まる効果を測ることで、サテライト銀河の割合や、質量中心からのオフセットの大きさを推定することができる。実際に、LRGグループ内で中心の取り方による重力レンズ効果の違いを測定し、グループ内で最も明るい銀河が必ずしもセントラル銀河ではないことがわかった。今後、すばる望遠鏡の超高視野装置を用いたSuMIReや欧州宇宙機関(ESA)が主導する暗黒宇宙探査機Euclid衛星などの銀河撮像・分光サーベイが計画されており、重力レンズ効果と赤方偏移サーベイを組み合わせた新たな宇宙観測が展開される。

今後の銀河サーベイにおいて銀河とダークマターの関係を明らかにすることは、宇宙論だけでなく銀河進化の研究においても非常に重要である。ハロー内でも特に密集している領域(サブハロー)の力学的性質と、色や明るさなど銀河の観測的性質の対応関係を探る研究もなされており¹²⁾、今後の発展に期待がかかる。本稿では、SDSSや

BOSS銀河サーベイのターゲットであるLRGに着目したが、より高赤方偏移($z=1-2$)の銀河サーベイであるSuMIReやEuclidでは、輝線銀河がターゲット天体となる。輝線銀河とハローの対応関係は、LRGに比べて明らかでなく、ハローモデルの枠組みを超えた新たなアプローチが必要になるかもしれない。すばる望遠鏡を用いた遠方宇宙の銀河分光サーベイFastSound計画¹³⁾が進行しており、輝線銀河とハローの関係の詳細が明らかになることが期待される。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、筆者らが発表した投稿論文²⁾⁻⁴⁾に基づいている。共同研究者である高田昌広氏、R. Mandelbaum氏、D. Spergel氏、山本一博氏には、論文執筆のうえで多大な協力をいただきました。名古屋大学では、杉山直氏、松原隆彦氏、市來淨興氏ら、所属機構および宇宙論研究室(C研)のスタッフをはじめとし、多くの教員、研究員、大学院生、学生に、日常的にお世話になっております。この場を借りて感謝の意を述べさせていただきます。大学院の指導教官である須藤靖氏、樽家篤史氏には深く感謝致します。また、執筆を依頼してくださった大栗真宗氏に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) <http://sumire.ipmu.jp>
- 2) de Lapparent V., Geller M. J., Huchra J. P., 1986, ApJ 302, 1
- 3) <http://www.sdss.org>
- 4) Carroll S. M., Duvvuri V., Trodden M., Turner M. S., 2004, Phys. Rev. D 70, 043528
- 5) Dvali G., Gabadadze G., Porrati M., 2000, Phys. Lett. B 485, 208
- 6) Kaiser N., 1987, MNRAS 227, 1
- 7) Jackson J. C., 1972, MNRAS 156, 1
- 8) Hikage C., Yamamoto K., 2013, JCAP 8, 19
- 9) Reid B., Spergel D. N., 2009, ApJ 698, 143
- 10) Hikage C., Takada M., Spergel D. N., 2012, MNRAS 419, 3457
- 11) Hikage C., Mandelbaum R., Takada M., Spergel D. N., 2013, MNRAS 435, 2345
- 12) Masaki S., Hikage C., Takada M., Spergel D. N., Sugiyama N., 2013, MNRAS 433, 3506
- 13) <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/Fastsound/>

Unveiling the Cosmic Structure Formation via the Anisotropy of Galaxy Distribution: Kaiser vs. Fingers-of-God

Chiaki HIKAGE

Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan

Abstract: Unveiling the mystery of cosmic acceleration is a key goal of current and upcoming galaxy surveys including SuMIRe project, the imaging and spectroscopic galaxy surveys using Subaru 8.2 m telescope in Hawaii. Coherent motion of galaxies driven by the gravitational evolution distorts the galaxy distribution in redshift space. Large-scale redshift distortion known as Kaiser effect is a key probe of measuring the cosmic growth rate, providing a robust test of General Relativity and modified gravity models. Complicated motion of galaxies at smaller scales elongate the galaxy distribution along the line-of-sight. This is called Fingers-of-God effect, causing a major uncertainty in the precise measurement of the growth rate. In this article, I introduce two novel methods to extract the dynamical information of satellite galaxies which dominantly sources the Fingers-of-God effect and show how the measurement of the growth rate measurements is improved.