

## 論文内容の要旨

### 論文題目 Numerical Studies on Galaxy Clustering for Upcoming Wide and Deep Surveys: Baryon Acoustic Oscillations and Primordial Non-Gaussianity

和訳 (将来の広視野深宇宙探査に向けた銀河のクラスタリングの数値的研究: バリオン音響振動及び原始非ガウス性の痕跡)

氏名 西道 啓博

宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎや銀河の空間分布を通して見た大規模構造の精密な観測により、標準的な宇宙モデルが確立されてきた。簡単な仮定、少数のパラメタのみで観測事実をよく説明できるものの、このモデルには宇宙極初期のインフレーションと呼ばれる急激な加速膨脹、及び、近傍宇宙での加速膨脹が含まれ、その物理的機構は分かっていない。前者のインフレーション機構については、現在のところ、ポテンシャルが支配的なスカラー場による単純なモデルで観測事実をよく説明するが、これに変わる様々なモデルが提唱されており、これらを峻別する新しい方法論の開発が重要である。後者については、通常負の圧力を持つ暗黒エネルギーの導入により説明される。暗黒エネルギーは、状態方程式パラメタ  $w=p/\rho$  ( $p$ : 圧力、 $\rho$ : エネルギー密度) により特徴づけられる。最も単純な暗黒エネルギーの候補として、アインシュタイン方程式の宇宙項が挙げられるが、これは  $w=-1$  に対応する。現在までの観測結果は  $w=-1$  と矛盾が無いが、今後の更なる観測により、宇宙項なのかどうか見極めることが当面の目標となる。今後、暗黒エネルギー、インフレーション機構を理解するために、更なる高精度観測が計画されている。

我々は特に銀河の広域深宇宙赤方偏移探査により測定された銀河の三次元分布に統計的に現れる二つの微弱な効果に着目した。初期宇宙では光子とバリオンはトムソン散乱により強く結合しており、一つの流体として振る舞う。この流体は、光子の持つ輻射圧とバリオン

ンが受ける重力により音波振動を起し、これは結合が切れる時期まで継続する。これをバリオン音響振動と呼ぶ。この間の音波の進行距離は宇宙の大規模構造に微弱な痕跡を残す。この距離は宇宙背景輻射の温度揺らぎの観測から分かる暗黒物質、バリオンの総量を用いて物理的に正確に決定できるため、近傍の銀河分布から精密に測定できればこれを標準物差とすることで宇宙膨張の履歴を解明し、暗黒エネルギーの性質を制限できる。

一方、宇宙の原始揺らぎはインフレーション中にできると考えられているため、その統計的性質を調べればインフレーションの機構の解明に繋がる。標準的な宇宙モデルではガウス統計に従う原始揺らぎが仮定されており、この仮定はこれまでの観測と矛盾が無かった。一方で、様々なインフレーションモデルは将来観測により検出可能なレベルの非ガウス性を予言している。これまでの大規模構造の理論には非ガウス性の影響が正しく取り入れられていないため、これを適切に考慮してモデルを再構築する必要がある。

将来の高精度観測から正しく情報を取り出すためには、理論モデルも同様に正確でなくてはならない。暗黒エネルギーの研究に関して言えば、典型的には1%レベルのパワースペクトルの予言が必要となる。近傍の銀河の分布は以下の三つの非線形効果の影響を受けると考えられる。まず、密度揺らぎの非線形成長が挙げられる。近傍宇宙では揺らぎは小さくなく、線形近似は適用できない。次に、銀河の特異速度の影響で、赤方偏移から測った見かけ上の銀河の分布が歪む、赤方偏移歪みがある。これを理解するためには、速度場の進化を明らかにする必要があるが、密度場同様に非線形性の影響は無視できない。最後に、銀河分布と物質分布の違いが挙げられる。これは銀河バイアスと呼ばれる。

バリオン音響振動及び原始揺らぎの非ガウス性の痕跡が現れるスケールは共同距離でそれぞれ100及び1000メガパーセク程度の大スケールであるため、非線形性は比較的弱いと考えられる。このため摂動理論が適用できるものと期待できる。これまで高次の項を取り入れた摂動理論が提案されてきたが、その信頼性は定量的には自明でない。そこで、これらとは独立な方法論による予言を行い、相互に精度評価をする必要がある。

N体シミュレーションは非線形な重力進化を解くツールとして以前から宇宙論的揺らぎの進化に応用されてきた。しかし、こちらも様々な仮定、近似的取り扱いを避けることはできず、将来観測に必要な1パーセントレベルの予言力があるかどうかは自明ではない。そこで、本研究では、シミュレーションを開始する時刻、重力計算の方法、シミュレーション領域の大きさ、質量解像度に対する結果の収束性を徹底的に調べ、系統誤差1%以内の信頼性の高い計算を可能にした。また、系統誤差とは別に、シミュレートする領域の有限性により有限のフーリエモードしか調べることができないため、シミュレーションから測定したパワースペクトルには大きな統計誤差が残るという問題がある。我々はこれを低減する方法論を開発した。この方法は有限体積内での摂動理論に基づくものであり、物質の密

度、速度を摂動として扱い、三次の効果まで取り入れたものである。これにより、赤方偏  
移歪み込みの物質のパワースペクトルを精度よく評価できるようになり、系統誤差・統計  
誤差ともバリオン音響振動の特徴の現れるスケールでは目標の精度をクリアした。

シミュレーションにより信頼性の高い予言ができるようになったので、様々な解析的モデ  
ルとの比較を行い、それぞれの破綻するスケールを明確に決定した（図 1）。その結果、や  
はり線形理論、単純な摂動理論では精度が不十分であること、また、最近提案された改良  
摂動論を用いれば将来の銀河探査のデータを十分に活かせることを明らかにした（図 2）。

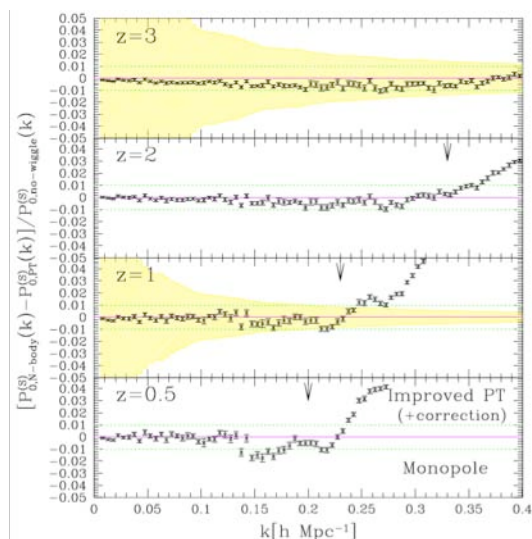


図 1. N 体シミュレーションと理論モデルの比較。縦軸は波数、横軸は赤方偏歪み込みの非線形パワースペクトルの残差を示している。縦向き矢印は理論の信頼区域を表す。上から赤方偏移 3,2,1,0.5。黄色のヒストグラムは典型的な将来観測の測定精度に対応する。

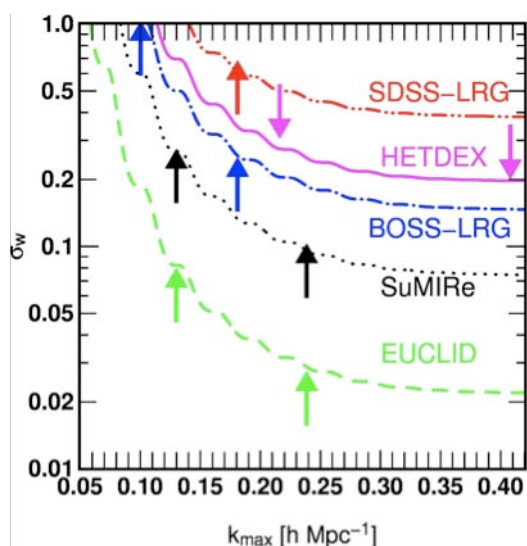


図 2. 将来観測からの暗黒エネルギー状態方程式の決定精度 ( $1\sigma$  レベル)。横軸は解析に取り入れる最大の波数を表す。各曲線は一つの観測計画に対応し、二本の矢印は左から通常の摂動論、改良された摂動論の信頼限界の波数を表す。究極的には 3%程度の制限になると期待される。

次に、我々は N 体シミュレーションを用いて原始非ガウス性が大規模構造に与える影響を調査した。最近の研究では、原始非ガウス性と銀河バイアスの非線形性とのカップリングにより、銀河のパワースペクトルはこれまで考えられていなかった効果を受けることが指摘されていた。本来、非ガウス性の影響は主にバイスペクトルに見られると考えられるが、これもまた同様のカップリングの効果で変更を受ける可能性がある。そこで、我々はシミュレーションから銀河形成の土台となる暗黒物質ハローを同定し、そのバイスペクトルを調べた。特に、局所型と呼ばれる、最も単純な原始揺らぎの非ガウス性のモデルを採用し、摂動理論の予言との整合性を調査した。その結果、バイスペクトルにも原始非ガウス性由来の新しい寄与があることをシミュレーションサイドでは初めて明らかにした（図

3)。この効果は、フーリエ空間の大スケールの閉じた三角形においてより重要であることが分かった (図 3 の左上パネル)。また、この効果は定性的には摂動理論の予言とよく一致していた。最後に、我々の発見した新しい項の影響により、銀河のバイスペクトルがこれまで以上に原始揺らぎの非ガウス性の良い指標になりうることを議論した (図 4)。

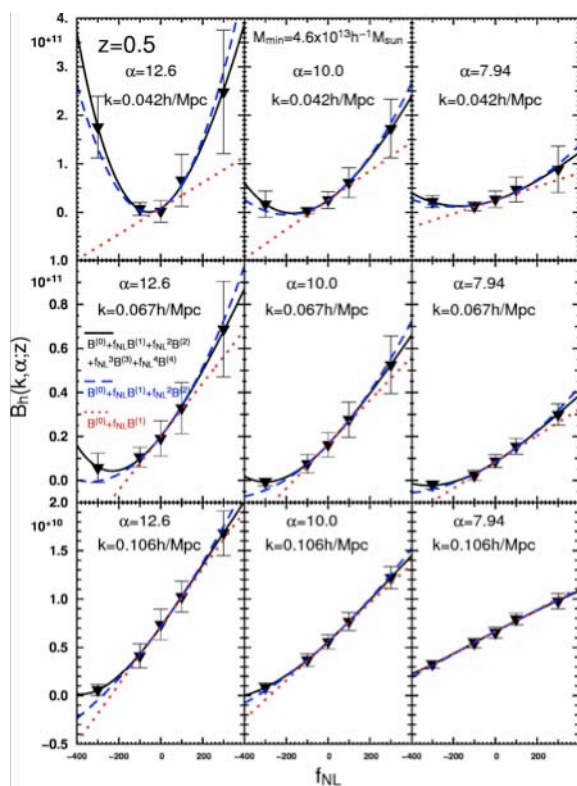


図 3.  $N$  体シミュレーションから測定した暗黒物質ハローのバイスペクトル。各パネルは一つの波数空間の三角形に対応し、横軸は原始揺らぎの非ガウス性を表すパラメータとなっている。従来の理論では点線のように線形に応答するものと考えられていたが、我々のシミュレーションは破線の二次曲線により、よく説明できた。

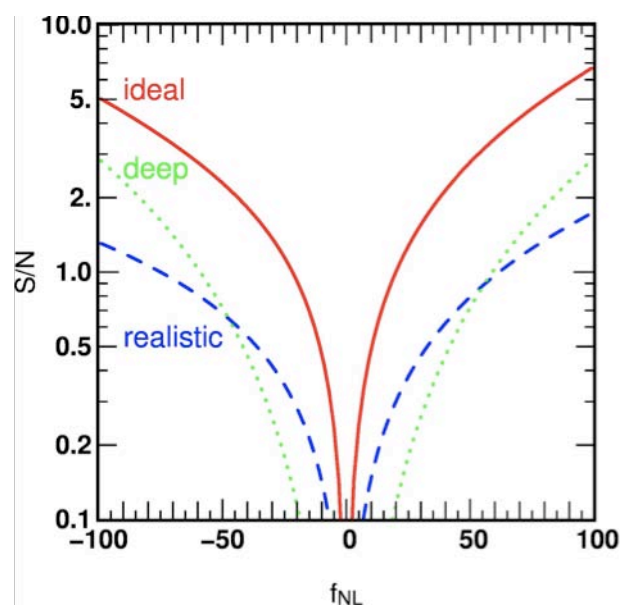


図 4. 将来観測からの原始揺らぎの非ガウス性パラメータのシグナルノイズ比。3つの曲線は3つの銀河探索に対応する。計算には本研究で理論とシミュレーションの一致が良かったフーリエモードのみを使用した。