

銀河形状の大規模整列： 銀河の形は初期宇宙を覚えているか？



栗田 智 貴

〈Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching, Germany〉
e-mail: ktosh@mpa-garching.mpg.de

銀河の形状が、宇宙論界隈で注目を集めている。これまで、宇宙論研究者は「銀河を点として扱う」とよく言われてきた。しかし最近の研究により、銀河の形状は従来捉えられなかった物理現象に敏感であることがわかってきた。本稿では、Intrinsic Alignment (IA) と呼ばれる、銀河の固有形状が宇宙論的スケールで「そろそろ」現象に注目し、銀河形状という向きをもつ観測量が、クラスターリングだけでは捉えにくい初期宇宙の非等方性やパリティ破れの痕跡に感度を持ち得ることを紹介する。IA を用いた新しい初期宇宙探査の可能性と今後の展望を概観する。

1. はじめに

銀河は、渦巻銀河や楕円銀河に代表されるように、多彩な形状を示す。ところが宇宙論では、銀河を「青い銀河」「赤い銀河」といった大まかな集団として扱うことはあっても、その形状そのものに着目した研究は長らく限られていた。そのため、宇宙論と銀河形成の研究者が集まる場では、「宇宙論研究者は銀河を点として扱う」という鉄板ジョークがよく聞かれる。

しかし、重力レンズ効果による銀河の形状のゆがみが宇宙論研究に用いられるようになってからは、すばらの主焦点撮像カメラ「Suprime-Cam」や「Hyper Suprime-Cam」のような高性能カメラによって銀河の撮像データの質が大幅に向上し、銀河形状が持つ豊富な情報が注目を集めるようになった。宇宙論研究者が扱う空間分解能が向上し、銀河を「点」ではなく、空間的な広がりとうきを持つ天体として本格的に扱える段階に到達したのである [1-6]。

銀河形状は、弱重力レンズ効果の主要な観測量

として重要であるだけではない。近年では、レンズ効果とは独立に、銀河が形成・進化する過程や、大規模構造中の潮汐場の影響を通じて決まる固有形状そのものが、宇宙論的な情報を担う可能性が注目されている。もしこの固有形状を新たな宇宙論的シグナルとして適切に活用できれば、宇宙論パラメータ推定の精度向上につながるだけでなく、初期宇宙の物理を探る新しい探針にもなり得る [7]。

では、銀河の形状は、どのようにして初期宇宙の情報を今に伝えるのだろうか？この問いを考えると鍵となるのが、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) や宇宙の大規模構造 (Large-Scale Structure; LSS) の起源と考えられている、初期宇宙で生成された微小な確率的ゆらぎ場、すなわち原始曲率ゆらぎ (以下、原始ゆらぎ) である。

これまでのCMBおよびLSSの観測から、原始ゆらぎの統計分布は、観測誤差の範囲でガウス分布と整合的であることが示されている [8-10]。しかし、ガウス性だけからは、たとえばインフ

レーションを担った自由度や相互作用の詳細といった、ゆらぎの生成機構を一意に決定することはできない。そこで重要になるのが、ガウス性からのわずかなずれである原始非ガウス性 (Primordial Non-Gaussianity; PNG) である [11].

ガウス場であれば、その統計情報は2点相関、すなわちフーリエ空間でのパワースペクトルによって尽くされる。一方、原始非ガウス性が存在すれば、3点相関 (バイスペクトル) や4点相関 (トリスペクトル) といった高次相関に、初期宇宙の力学や相互作用の痕跡が刻まれる。パワースペクトルが主に「ゆらぎの大きさの分布」を記述するのに対し、原始非ガウス性は「異なるゆらぎ同士がどのように結びついているか」を捉えるため、類似した予言を与える多くの初期宇宙モデルを識別する強力な手段となる。実際、原始非ガウス性はこれまで主にCMBの高次スペクトル解析によって検証され、波数依存性や形状依存性に対して強い制限が得られてきた。

さらに近年では、銀河の3次元分布を用いた銀河クラスター解析においても、バイスペクトルの測定や、超大スケールに現れる特徴的なシグナルであるスケール依存バイアスを用いて、原始非ガウス性を制限する研究が進展している (詳細は第3章)。Sloan Digital Sky Survey III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) や Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) などの大規模分光サーベイの進展により、その精度は着実に向上している [12].

銀河クラスターが本質的に銀河を「点」とみなし、その空間分布の統計性に着目する観測量であるのに対し、撮像サーベイでは位置情報に加えて、個々の銀河が持つ形状や向きという、局所的により豊かな情報を利用できる。ここに、銀河形状を用いる意義がある。銀河形状は、銀河クラスターリングだけでは捉えにくい初期宇宙の情報に感度を持つ可能性があり、原始非ガウス性の新しい検証手段として期待されている。

本稿では、銀河形状を積極的に宇宙論的シグナルとして捉える筆者らの研究を紹介する。特に、以下の二つの問い

- なぜ、第一原理から予言しにくい複雑な物理過程の産物である銀河が、初期宇宙の原始ゆらぎへの探針となり得るのか?
- なぜ銀河の「形状」に着目するのか? 銀河クラスターリングだけでは捉えにくいどの情報を、形状は新たに与えるのか?

を軸に、銀河形状が初期宇宙物理の検証に果たし得る役割と、筆者らの最近の成果を概観する。

2. 宇宙の大規模構造と銀河形状

2.1 Intrinsic Alignment (IA)

標準的な宇宙論モデル (Λ CDM モデル) において、構造形成の種となる初期の物質密度ゆらぎはインフレーションによって生成された原始ゆらぎを起源とする。これらのゆらぎは重力不安定性を通じて成長し、小さな構造が合体を繰り返してより大きな構造へと発達するボトムアップ型の階層成長を示す。こうした過程によって形成された高密度領域 (ダークマターハロー、以下ハロー) の中で、星や銀河、銀河団などが形成され、それらが連なることで宇宙の大規模構造が構築される。

個々のハローや銀河は、周囲の重力場 (すなわち周囲の構造、物質分布) の影響を受けながら形成される。例として、大きなフィラメント構造の中で形成されるハローや銀河を考えよう。形成過程における物質の降着は、フィラメントが伸びている方向から起こりやすいため、ハローや銀河形状の主軸の向きは統計的にフィラメントの方向と相関することが期待される。このように、ハローや銀河の形状が、周囲の大規模構造と相関して統計的に「そろろう」現象は、Intrinsic Alignment (以下IA) と呼ばれる [13]. とくに楕円銀河では、銀河本体の形状が周囲の潮汐場を比較的直接反映するため、IAの主要な研究対象となってい

る*1. 次節では、IAによる相関シグナルを定量的に記述するための理論モデルを紹介する。

2.2 IAの物理的描像と線形理論

天体（ハローや銀河）の形状は、適当なスカラー関数（例えば質量や光度分布） ρ の二次モーメントテンソル

$$I_{ij} = \frac{1}{N} \int d^3r \rho(\mathbf{r}) w(r) r_i r_j, \quad (1)$$

を用いてしばしば定義される。ここで \mathbf{r} は天体の中心からの距離、 w は任意の重み関数、 N は適当な規格化定数である。これは、対象天体の形状を三軸不等楕円体として近似することに対応する。シミュレーションや観測から得られた多数の天体に対して I_{ij} を測定し、それらを各天体の位置 \mathbf{x} に対応づけて配置することで、形状の空間分布（以下、形状場） $I_{ij}(\mathbf{x})$ を構築できる。これは、空間の各点に対して 3×3 の対称行列が対応する場合、すなわち2階の対称テンソル場である。その6つ自由度は、天体のサイズを表すトレース成分1つと、形状を特徴づけるトレースレス成分5つ（歪みの大きさ2つと主軸の向き3つ）に対応する。

統計的一様等方性の仮定より、形状の統計平均（背景量）は球、すなわち $\langle I_{ij} \rangle = \langle \text{Tr}I \rangle \delta_{ij}/3$ であるから、形状場のゆらぎ S_{ij} を

$$\delta_{ij} + S_{ij}(\mathbf{x}) \equiv \frac{I_{ij}(\mathbf{x})}{\langle \text{Tr}I \rangle / 3}, \quad (2)$$

のように定義すれば、 $\langle S_{ij} \rangle = 0$ を満たし、左辺の形から、 S_{ij} は天体形状の単位球からの歪みを表すテンソル型のゆらぎ場となる。

S_{ij} に対する物理モデルを考えよう。場 $S_{ij}(\mathbf{x})$ は多数のフーリエモード $S_{ij}(\mathbf{k})$ の重ね合わせとして表されるが、ここでは波長 $\lambda \gtrsim 100 h^{-1} \text{Mpc}$

（空間周波数 $k = 2\pi/\lambda \lesssim 0.1 h \text{Mpc}^{-1}$ ）の宇宙論的スケールからの寄与に注目する。言い換えると、以後はローパスフィルタを施して粗視化された形状場を仮定する。

このような、銀河やハロー形成のスケールよりはるかに長波長のモードを天体物理過程で生成することは難しいため、その起源はインフレーションで生成された原始ゆらぎであると考えられる。さらにガウス性初期条件の下では、例えば原始重力ポテンシャル Φ のような単一のスカラー場に比例する。また、天体形成の領域はこのモードに対して十分局所的とみなせるため、等価原理の下では、最低次の重力効果は天体の時空上の軌道に沿ったポテンシャルの二階微分（潮汐力場）である。以上より、宇宙論的スケールのモードからの天体形状への寄与は

$$S_{ij}(\mathbf{x}) \propto \nabla_i \nabla_j \Phi(\mathbf{x}) \propto \nabla^{-2} \nabla_i \nabla_j \delta_m(\mathbf{x}), \quad (3)$$

の形で与えられる。ここで δ_m は物質密度場であり、最後の関係式にはポアソン方程式を用いた。これはIAの線形理論モデル（Linear Alignment Model）と呼ばれ、宇宙論的スケールにおける天体の形状場と背後のポテンシャル場や物質密度場をつなぐ最も基本的なモデルである [15]。図1に、この線形理論モデルの物理的描像を示す。天体は複雑な天体物理過程を経て形成されるため、個々の形状を見るとバラついているが、多数の天体の形状を平均化してみると背後の潮汐力場（物質分布）と相関する。比例係数は相関の強さを表し、天体サンプルの性質（質量、光度、色など）や形状の測定方法及び精度などに依存する。

ここで、後期宇宙の代表的な観測量である銀河クラスタリングの線形理論を思い出そう。観測された銀河の数密度のゆらぎ場 δ_g はスカラー型のト

*1 本稿で扱う銀河は、特に断りのない限り楕円銀河（星形成がほぼ停止した赤い銀河集団）とする。楕円銀河では銀河本体の形状がIAの主な指標となる一方で、渦巻銀河では形状よりもスピン（角運動量）方向との相関が議論されることが多い [14]。



図1 IAの線形理論によって予言される、銀河やハローの形状の空間分布パターン。黒の実線は、宇宙論的スケールの物質密度ゆらぎ(図では水平方向のモード)の振幅を示す。灰色の矢印は、このモードが作る潮汐力場の伸縮方向に対応する。個々の形状(青色の楕円体)が周囲の潮汐力場と相関することで、それらの空間的なパターンが背後の宇宙論的スケールの物質密度分布をトレースする。

レーザーであり、宇宙論的線形スケールにおいて

$$\delta_g(\mathbf{x}) \propto \nabla^2 \Phi(\mathbf{x}) \propto \delta_m(\mathbf{x}), \quad (4)$$

と関係づく^{*2}。したがって、式(3)は式(4)のテンソル版への自然な拡張であり、銀河の形状場は後期宇宙のテンソル型のトレーサーであると理解できる。このようなIAの宇宙論的シグナルとしての有用性は近年注目され始め、理論及び観測の両面で研究が進められている。

2.3 IAの統計量と実データからの測定

では、実際の観測データからIAのモデルをどのように検証し、そこから宇宙論的情報を引き出せるのだろうか? ここまでは天体を3次元的な形状(楕円体)として扱ってきたが、実際に観測できる量は、天球面に射影された2次元的な形状(楕円)のみである。射影とは、もともとの3次元的な形状から視線方向に垂直な面の成分を取り出す操作であり、形状の自由度は5自由度から2自由度へと減少する。これらは実空間では2つの楕円率に対応し、一方フーリエ空間ではEモード場とBモード場に対応する。このような形状場から、例えば2点相関関数や、そのフーリエ変換であるパワースペクトルなどの統計量を定義できる。筆者は形状場のパワースペクトルに着目し、

その測定および解析を進めてきた。以下では、その研究の一部を紹介する。

図2は、BOSSで取得された銀河の位置および形状データ(左図)と、それらから構築した密度場と形状場の相互パワースペクトル(右図)を示す[16]。相互パワースペクトルの振幅は、銀河数密度の空間変動と銀河形状(歪みと向き)の空間パターンの整列の度合いに対応する(図1参照)。

前節で述べた標準宇宙論モデル(Λ CDM+ガウス性初期条件)におけるIAの線形理論では、式(3)のように形状場は単一のスカラー場由来し、このとき生成されるのは厳密にEモードのみである。したがって、密度場とEモードの相関(濃青の丸点)は非ゼロである一方、Bモードとの相関(淡青の×印)は誤差内でゼロが期待される。Bモード相関は観測、測定や解析の不完全さによる見かけの相関の指標でもあり、これが期待通りゼロと整合していることは、Eモードの測定点が宇宙論由来のシグナルであることを裏づけている。また、黒実線はIAの線形理論の最良フィットモデルであり、スケール依存性はデータとよく一致している。

パワースペクトルの形状は、標準宇宙論モデルにおいて、バリオン音響振動や構造形成の成長率など、豊富な宇宙論的情報を含む。このため、銀河クラスタリングの統計量(銀河密度パワースペクトルなど)と組み合わせ、宇宙論パラメータの制限の改善を目指す研究も行われている[17]。次章では、一方で、ガウス性初期条件の仮定を緩め、形状場のパワースペクトルに刻まれる原始ゆらぎの非ガウス性の寄与を議論し、IAが初期宇宙の物理への探針となる具体例を紹介する。

3. 初期宇宙の探針としての銀河形状

3.1 原始非ガウス性

標準的な宇宙論モデルでは、宇宙の大規模構造形成の種となった原始ゆらぎはガウス確率場であ

^{*2} 式(3)と(4)の表式では、小スケールからくる確率的な寄与(Stochasticity)は無視している。

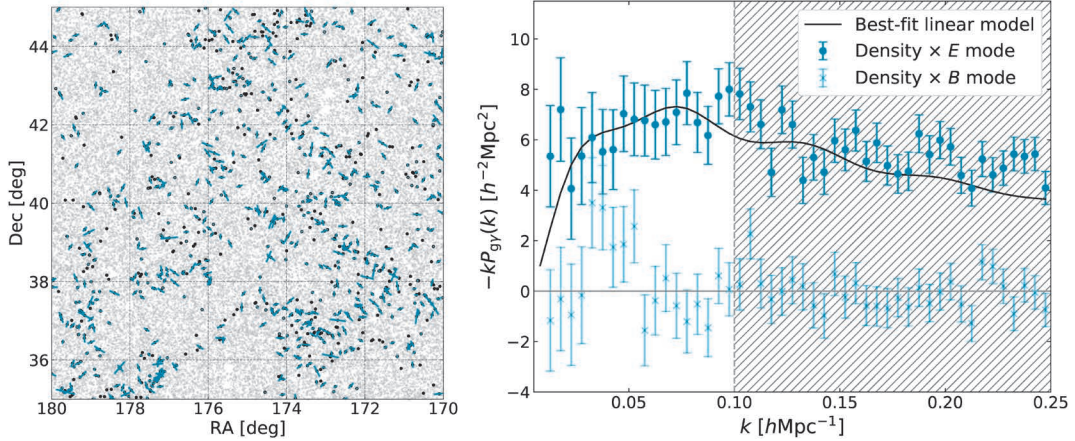


図2 【左図】 BOSSの銀河位置と形状データの一部。黒点は、分光観測によりスペクトルが取得された銀河の天球面上の位置（赤方偏移は $0.47 < z < 0.5$ の薄いスライス）を示す。これらのうち、画像データから楕円率が高精度に測定された銀河については、青色の棒の向きと長さでその形状を表す。背景の灰色点は、サーベイ由来の非物理的なゆらぎを補正するためのランダム粒子である。この領域は、銀河サンプル全体の有効体積のおよそ1/14600に相当する。【右図】 BOSSのNorth Galactic Cap (NGC) 領域における、赤方偏移 $0.2 < z < 0.5$ の銀河サンプルから測定した、銀河数密度場と銀河形状場の相互パワースペクトル。濃青の丸点（淡青の×印）は、それぞれEモード（Bモード）形状場との相互相関を示す。横軸は、空間周波数（ $k \approx 2\pi \times$ 空間スケールの逆数）を表し、表示範囲は宇宙論的スケール（物質密度ゆらぎの線形～準非線形スケール）に対応する。黒実線は標準宇宙論モデル（ Λ CDM+ガウス性初期条件）の線形理論による最良フィットモデルを示す。灰色斜線部は線形理論の適用外として、フィットには含めていない。

ると仮定される。ガウス性が成り立つ場合、ゆらぎの統計的性質は2点相関関数（パワースペクトル）で尽き、線形領域では異なるフーリエモード同士は独立である。原始非ガウス性（Primordial Non-Gaussianity; PNG）はこの完全なガウス性からのずれとして定義される。ガウス場では高次の連結相関関数が消えるのに対し、原始非ガウス性があれば最低次から3点相関（バイスペクトル）や4点相関（トリススペクトル）が非ゼロとなる。これは複数モードの結びつき（モードカップリング）の存在を意味する（図3）。

最も標準的な単一場・スローロールインフレーションでは、このずれは一般に非常に小さいと期待され、これまでのCMBや銀河クラスターリングの観測制限とも整合的である。しかし原始非ガウス性は、パワースペクトルだけでは区別しにくい初期宇宙モデルの差異を反映し得るため、その探索は初期宇宙物理の検証において重要である。実

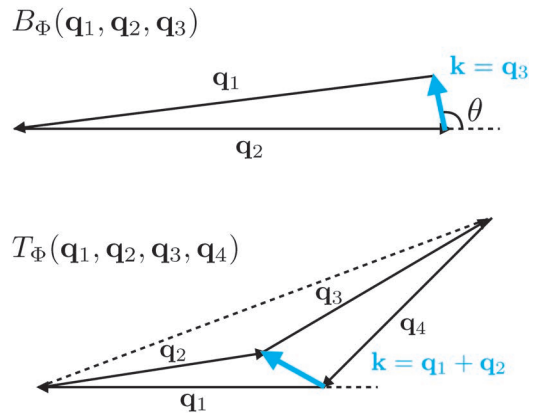


図3 フーリエ空間における原始3点相関（バイスペクトル, B_Φ ）と原始4点相関（トリススペクトル, T_Φ ）を特徴づける波数ベクトル配置の模式図。 B_Φ (T_Φ) はそれぞれ、3つ（4つ）の波数ベクトルの成す三角形（四面体）の大きさや形状の関数となる。実際に測定する銀河密度や銀河形状のパワースペクトルへの影響は、一辺（青色）がその他の辺（黒色）に比べて非常に小さく潰れた図形からの寄与が特に支配的となる（詳細は本文）。

際、原始非ガウス性の大きさや形状依存性は、単一場 (single field) か複数場 (multi field) か、あるいは相互作用の形 (音速の小ささ等) を区別する手がかりとなり得る [18]. 特定の形状・極限で現れる非ガウス性の特徴は、インフレーション期に存在した追加粒子の寄与を反映するため、その質量やスピンに関する手がかりを与える [19]. このように原始非ガウス性は、初期宇宙モデルに強い制約を与える有力な観測的指標である.

3.2 原始3点相関：非等方局所型

観測と理論の両面で最も標準的に扱われる原始非ガウス性として、局所型 (local type) と呼ばれるものがある [20]. 局所型では、原始重力ポテンシャル Φ はガウス場 ϕ の実空間での局所的な非線形変換として

$$\Phi(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x}) + f_{\text{NL}}(\phi^2(\mathbf{x}) - \langle \phi^2 \rangle), \quad (5)$$

と表される. このときパイスペクトル B_ϕ は図3で示すような一辺が潰れた三角形 (squeezed configuration) で増幅され、その極限 ($k = q_3 \ll q \simeq q_1 \simeq q_2$) では

$$B_\phi(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \rightarrow 4f_{\text{NL}}P_\phi(k)P_\phi(q), \quad (6)$$

となる. ここで P_ϕ は原始パワースペクトル、 f_{NL} は局所型非ガウス性の大きさを特徴づけるパラメータである. 標準的な単一場・スローロールインフレーションでは局所型 f_{NL} は一般に非常に小さいと期待されるため、もし有意に大きな局所型 f_{NL} が検出されれば、標準単一場モデルを超える物理 (複数場の影響など) を示唆する.

局所型非ガウス性は大規模構造にも特徴的な影響を与えることが知られている [21]. 上述したように、一辺が潰れた三角形のモードカップリングは、長波長モード (\mathbf{k}) が短波長モード (\mathbf{q}) の局所的な「ゆらぎの強さ」を空間的に変調する. ハロー形成は小スケールゆらぎの強さに敏感であるため、この変調はハロー及び銀河の数密度ゆらぎ δ_g に長波長ポテンシャル Φ に比例する寄与を加える. その結果、式 (4) で示した、ガウス初期条件で成り立つ銀河密度 δ_g と物質密度 δ_m の単純な比例関係 (線形バイアス) は破れ、 k^{-2} で増大するスケール依存性を持つ追加項が生じる (図4の左

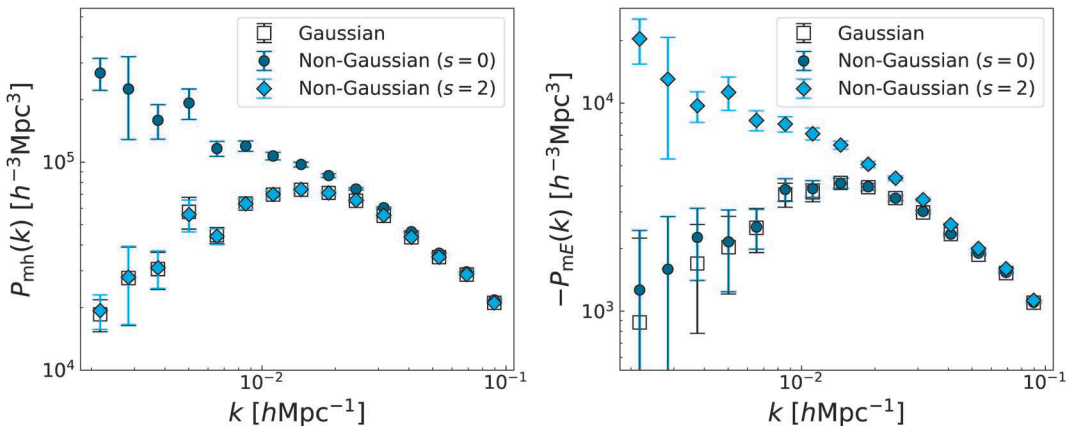


図4 宇宙論的 N 体シミュレーションから測定した、物質密度場とハロー数密度場の相互パワースペクトル (左図) および、物質密度場とハロー形状の E モード場の相互パワースペクトル (右図). 色と記号の種類は、シミュレーションの初期条件の違いを示し、それぞれガウス性初期条件 (Gaussian, 白抜き四角), 局所型原始非ガウス性初期条件 (Non-Gaussian ($s=0$), 暗青の丸), 「非等方的な」局所型原始非ガウス性初期条件 (Non-Gaussian ($s=2$), 明青の菱形) に対応する. ハロー数密度とハロー形状場は、それぞれ異なる原始非ガウス性に応答して、大スケールで増幅することがわかる.

図参照). このことを用いて, 測定された銀河 (ハロー) 密度パワースペクトルの宇宙論的大スケールでの振る舞いから, 局所型 f_{NL} に強い制限をつけることができる [10].

式 (6) で与えた局所型バイスペクトルは角度依存性を持たず, 等方的な非ガウス性に対応する. 一方で, 局所型の一般化として角度依存性を持つ「非等方的な」局所型非ガウス性も考えられる. 例えば, 2次のルジャンドル多項式 L_2 を用いると

$$B_\phi(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \rightarrow 4f_{NL}^2 L_2(\mu) P_\phi(k) P_\phi(q), \quad (7)$$

と表され, これは四重極依存性を持つ. ここで $\mu = \cos \theta = \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{q}}$ は長波長モードと短波長モードのなす角の余弦 (図3の上図参照) であり, f_{NL}^2 は非等方的な局所型非ガウス性を特徴づけるパラメータである. この種の角度依存バイスペクトルは, 例えばベクトル場の寄与 [22, 23] や高次スピン場の寄与 [19] を含むいくつかのインフレーションシナリオで予言される.

この場合, 長波長モードは短波長ゆらぎの等方的な振幅ではなく, その「四重極的な異方性」の強さを空間的に変調する. その結果, 局所的な天体の形状が長波長モードに応答し, 前述と同様の議論により, 式 (3) で示したガウス初期条件における銀河形状と物質密度の比例関係に対しても, 大スケールで k^{-2} で増大する効果が追加される [24]. 図4の右図は, 初期条件に非等方的局所型非ガウス性を導入した場合に, 実際にシミュレーションで測定したハロー形状場のパワースペクトルが増幅されることを示す [25].

以上より, 密度場は主として等方的な局所型非ガウス性に, 形状場は非等方的成分に感度を持つため, それぞれ異なる成分に独立に制限を与えられる. 実際に筆者らは, BOSSの銀河サンプルから測定した密度場と形状場の相互パワースペクトル (図2右) を用いて非等方的局所型非ガウス性を後期宇宙の観測量から初めて制限し, $f_{NL}^2 = -71^{+272}$ を得た [16]. この制限は, 現在の Planck による制限 $\sigma(f_{NL}^2) \simeq$

20 [8] より約一桁弱い, 将来の大規模銀河サーベイで得られるより大きなサンプルにより, 同程度, あるいはそれ以上の制限が期待されている [25].

3.3 原始4点相関: パリティ非保存崩壊型

原始ゆらぎの4点相関 (トライスペクトル) は, 3点相関だけでは見えにくい相互作用や, 追加の場が媒介する効果を抽出できる. 特に近年は, 初期宇宙におけるパリティ対称性の破れを検証する統計量として注目されている [26]. スカラー場のゆらぎ (原始ゆらぎや銀河密度ゆらぎ) について, 2点を作る直線や3点を作る三角形は, 鏡に映した配置も回転によって元の配置と重ね合わせられる. 統計的一様等方性を仮定するとそれらは同一視されるため, 2点・3点統計量だけではパリティ奇成分をパリティ偶成分から区別できない. 一方, 4点を作る四面体は一般に鏡像が回転では一致しないため, 4点相関ではパリティ奇成分を分離して解析できる (図5上段参照).

実際, BOSSやDESIの銀河クラスタリングの4点相関関数のパリティ奇成分の解析から, パリティ対称性の破れを示唆する兆候が報告されている [27-29]. しかし, これらの結果は解析の際にどのように銀河を選択するかに敏感であり, 系統誤差や共分散推定の不確かさによる見かけのシグナルである可能性も残る [30] ため, 現時点では結論は定まっておらず, 本テーマは今なお重要な検証課題として位置づけられている.

一方で, 銀河の位置 (スカラー量) だけに限らず形状 (テンソル量, スピン2量) を観測量として組み込むと, より低次の統計でもパリティの破れの検証が可能になる (図5下段参照). 筆者らはこの動機のもと, 銀河形状の2点統計であるパワースペクトルのうち, パリティ奇成分である EB パワースペクトル着目して, パリティ奇の原始トライスペクトルを探索できる可能性を調べた [31].

この研究では大規模構造の有効場の理論 (Effective Field Theory; EFT) の枠組みを用いて, IAの EB パワースペクトルが, パリティ奇の原始

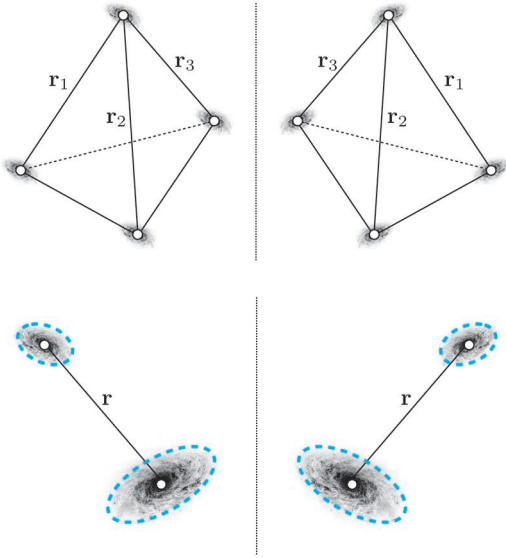


図5 銀河の3次元配置とその鏡像（パリティ変換）の模式図。中央の点線は鏡面を表す。【上段】銀河を点（位置情報のみ）として扱う場合、鏡像と区別するには少なくとも4点からなる同一平面上にない配置（四面体）が必要となる。【下段】各銀河に形状（楕円率，すなわちテンソル情報）を付与すると，2点の位置と形状の情報で鏡像との区別が可能になる。

トリスpekトルの崩壊極限（collapsed limit）と呼ばれる，四面体の対角線の一つが潰れた図形（図3下段参照），に鋭い感度を持つことを示した。とくに $U(1)$ ゲージ場を含むインフレーションモデル [26] を例に，大スケールで $P_\phi(k) \sim k^{-3}$ の増幅が現れることを示し，実際に宇宙論的 N 体シミュレーションを用いてこの予言を検証した（図6参照）。さらに，DESIおよびVera C. Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time（以下LSST）で得られる将来データを想定した予測から，IAのEBパワースpekトルが，銀河の4点相関やCMBトリスpekトル解析から得られているパリティ対称性を破る原始非ガウス性に関するいくつかの既存制限を改善し得ることを示した。

4. まとめと展望

本稿では，銀河の固有形状が示す宇宙論的ス

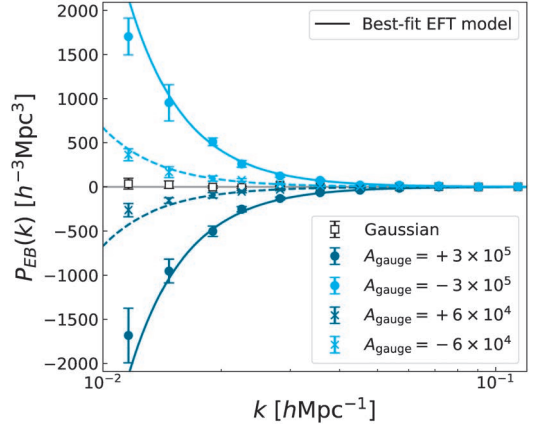


図6 宇宙論的 N 体シミュレーションから測定した，ハロー形状場のEBパワースpekトル（パリティ奇パワースpekトル）と，対応するEFT最良フィットモデル（実線）との比較。色と記号の種類は，シミュレーションの初期条件の違いとパリティ奇の原始非ガウス性の振幅（ A_{gauge} ）の大きさの違いに対応する。ガウス性初期条件は白抜き四角，パリティ奇初期条件については，正（負）の符号が暗青（明青）に対応し，丸点（×印）が振幅の大きさに対応する。

ケールの相関である Intrinsic Alignment (IA) を概観し，IAを初期宇宙物理の探針として用いる可能性に関する筆者らの研究を紹介した。銀河形状は，局所的な歪みの大きさと向きを含む量であり，後期宇宙の観測から構成できるテンソル場として捉えられる。このため，初期宇宙の非等方性に関わる痕跡，例えば非等方非ガウス性やパリティ非保存非ガウス性に対して高い感度を持ち，銀河クラスタリングだけでは調べにくい初期宇宙モデルを検証する有力な手段となり得る。

また，本稿では触れなかったIAの宇宙論的な応用例として，原始重力波（Primordial Gravitational Waves）の痕跡を銀河形状から探索する研究も進められている [32–35]。さらにIAは，初期宇宙物理への探針としてだけでなく，銀河クラスタリングと組み合わせることで，標準宇宙論の宇宙論パラメータ（物質密度 Ω_m や密度ゆらぎの振幅 σ_8 など）に対する制限を改善することも示されている [17]。

このようにIAは、後期宇宙における新しい観測量として、今後いっそう重要性を増していく分野である。実際、DESI, Euclid, Subaru HSC/PFS, LSST, 4MOST survey, およびRoman Space Telescopeといった現在進行中・将来の銀河サーベイは、IAの測定を大きく改善し得る高品質なデータを提供する見込みである。これらは利用可能な銀河サンプルの幅を広げ、銀河形状を用いた宇宙論モデルのより高精度な検証を可能にすると期待する。

謝辞

本稿の内容は、筆者の博士論文 [36]、マックス・プランク宇宙物理学研究所における筆者の集中講義資料 [37]、ならびに高田昌広氏との共同研究 [16] と Drew Jamieson 氏、小松英一郎氏、Fabian Schmidt 氏との共同研究 [31] に基づいたものです。特に、指導教員である高田昌広氏には修士課程から博士課程修了に至るまで長期にわたりご指導いただき深く感謝いたします。また、本稿の草稿に対して有益なコメントをくださった小松英一郎氏に感謝申し上げます。最後に、本稿の執筆を助めてくださった奥村哲平氏に感謝するとともに、原稿提出が大幅に遅れたにもかかわらず辛抱強くご対応いただいた西澤淳前編集委員、宮武広直編集委員に深く御礼申し上げます。

参考文献

[1] Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S1
 [2] 宮崎聡, 2019, 天文月報, 112, 80
 [3] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
 [4] Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
 [5] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
 [6] 杉山素直他, 2024, 天文月報, 117, 304
 [7] Chisari, N. E., 2025, A&A Rev., 33, 5
 [8] Planck Collaboration, 2020, A&A, 641, A9
 [9] Cabass, G., et al., 2022a, Phys. Rev. Lett., 129, 021301
 [10] Cabass, G., et al., 2022b, Phys. Rev. D, 106, 043506
 [11] Bartolo, N., et al., 2004, Phys. Rep., 402, 103
 [12] Chaussidon, E., et al., 2025, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2025, 029
 [13] Catelan, P., et al., 2001, MNRAS, 320, L7
 [14] Iye, M., et al., 2021, ApJ, 907, 123

[15] Hirata, C. M., & Seljak, U., 2004, Phys. Rev. D, 70, 063526
 [16] Kurita, T., & Takada, M., 2023, Phys. Rev. D, 108, 083533
 [17] Taruya, A., & Okumura, T., 2020, APJ, 891, L42
 [18] Chen, X., 2010, Adv. Astron., 2010, 638979
 [19] Arkani-Hamed, N., & Maldacena, J., 2015, arXiv e-prints, arXiv:1503.08043
 [20] Komatsu, E., & Spergel, D. N., 2001, Phys. Rev. D, 63, 063002
 [21] Dalal, N., et al., 2008, Phys. Rev. D, 77, 123514
 [22] Bartolo, N., et al., 2013, Phys. Rev. D, 87, 023504
 [23] Shiraishi, M., et al., 2013, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2013, 002
 [24] Schmidt, F., et al., 2015, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2015, 032
 [25] Akitsu, K., et al., 2021, Phys. Rev. D, 103, 083508
 [26] Shiraishi, M., 2016, Phys. Rev. D, 94, 083503
 [27] Philcox, O. H. E., 2022, Phys. Rev. D, 106, 063501
 [28] Hou, J., et al., 2023, MNRAS, 522, 5701
 [29] Slepian, Z., et al., 2025, arXiv e-prints, arXiv:2508.09133
 [30] Krolewski, A., et al., 2024, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2024, 044
 [31] Kurita, T., et al., 2026, Phys. Rev. D, 113, 063557
 [32] Schmidt, F., & Jeong, D., 2012, Phys. Rev. D, 86, 083513
 [33] Schmidt, F., et al., 2014, Phys. Rev. D, 89, 083507
 [34] Akitsu, K., et al., 2023, Phys. Rev. D, 107, 063531
 [35] Okumura, T., & Sasaki, M., 2024, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2024, 060
 [36] 栗田智貴, 2023, 東京大学, 博士論文
 [37] Kurita, T., 2025, MPA Lecture Series

Probing Early Universe Physics with Galaxy Intrinsic Alignment

Toshiki KURITA

Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching, Germany

Abstract: Primordial non-Gaussianity (PNG) of the curvature perturbation encodes key information about the underlying physics of the early Universe and has therefore been studied extensively using precision measurements of the cosmic microwave background and galaxy clustering. In this article, we focus on intrinsic alignment (IA), the phenomenon in which intrinsic galaxy shapes become coherently aligned on cosmological scales, and explain how IA statistics can be sensitive to signatures of anisotropic PNG and parity-violating PNG that are difficult to access with galaxy clustering alone. We conclude by outlining the prospects and outlook for probing early-Universe physics with IA.