

非線形質量密度揺らぎ確率分布関数の ハローモデルによる物理的理解

加用 一者 (東大宇宙理論研)、樽家 篤史、浜名 崇

A. Taruya, T. Hamana, & I. K. 2003, MNRAS, 339, 495

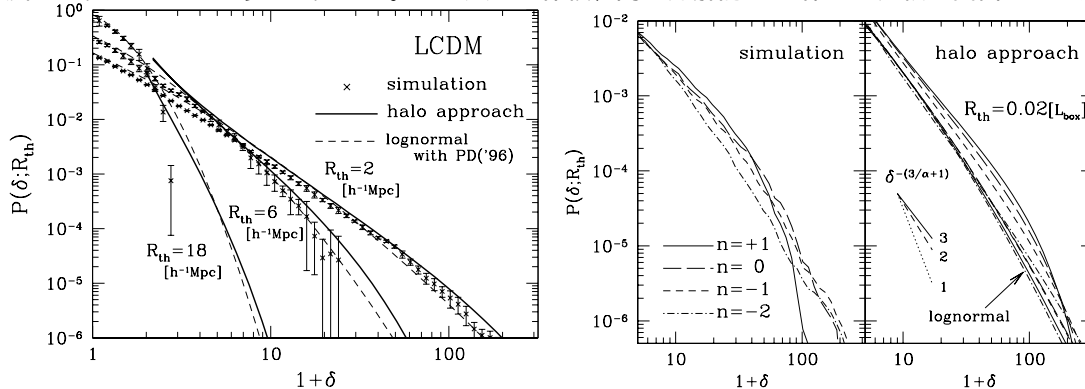
大規模構造進化の最も基本的な要素である質量密度ゆらぎの進化は、問題が単純明快である。それにも関わらず、重力の非線形性および非局所性によりその進化を解析的に理解するのは、最も基本的統計量の一つである確率分布関数においてさえ大きな困難である。一方、質量密度ゆらぎの1点確率分布関数は、N体シミュレーションを通じて、「初期密度ゆらぎのパワースペクトルによらず log-normal 分布で統一적으로よく近似される」ということが知られている (IK, Taruya, & Suto 2001)。しかしなぜこのような著しい特徴を示すのかは謎であった。今回我々は「ハローモデル (図中では 'halo approach')」という近年注目されている現象論的モデルを用いることでこの特徴の由来を理解しようと試みた。

ハローモデルに則り次の三つの簡単な仮定を導入しよう。i) ダークマターは必ずどこかのダークハローに所属する。ii) ダークハローの質量関数 (どのような重さのダークハローがいくつ出来るか) は Press-Schechter 理論 (ここでは Sheth & Tormen の関数形を用いる) で計算できる。これは初期パワースペクトルに依存する。iii) 各ダークハローの密度プロファイルは統一的 (NFW あるいはべき的) プロファイルである。

この仮定の基に、まずある smoothing 半径によりダークハローに smoothing をかける。するとある δ 以上の密度ゆらぎをもつ半径が求まる。これに質量関数の重みをかけて足し合わせることをすれば、全宇宙で、ある δ 以上の密度ゆらぎをもつ部分の体積がわかることになる。そうして求めた確率分布関数が左図である。このシンプルな描像がこれほどまでに N 体とよい一致を見せることは驚きであろう。

しかし N 体と一致するということがこのモデルを採用することの利点ではない。上記のようにこのモデルには、初期パワースペクトル $P(k)$ と密度プロファイル $\rho(r)$ という二つの部品がある。このモデルを採用することで、確率分布関数に対するこれらの影響を解析的に理解できるということこそが重要である。我々はこの二つの関数が各々べき的 ($P(k) \propto k^n, \rho(r) \propto r^{-\alpha}$) であるとして、各べき依存性を詳しく調べた。

その結果、ある δ_* (右図の smoothing 長の場合は $\delta_* \sim 200$) の前後で、 n -依存性、 α -依存性が異なることがわかった。具体的には、 δ_* より小さい δ では、 α -依存性のみが効く。このことは、小さな δ の領域は軽いダークハローが、ダークハローの tail 部分が寄与しているからであると理解できる。確率分布関数が統一的に log-normal で記述されるということは、軽いダークハローの個数があまり初期パワースペクトルによらないこと、およびダークハローの密度プロファイルの tail 部分は -3 乗のべきで統一的に表されること、から来ていると理解できるのである。一方 δ_* より大きい δ では、 n -依存性、 α -依存性、ともに大きくなる。この特徴が N 体に見られるかどうかは、この δ が N 体の分解能の限界に近い領域になるためはっきりしたことは言えない。しかしながら右図を見ると大きな δ においてハローモデルの予言と N 体とが似た振舞いを見せているようにも見える。より大きな体積、高い分解能の N 体との比較も面白いかも知れない。



以上結果をまとめると、ハローモデルにより i) 確率分布関数の log-normal 的性質が再現でき、ii) 初期パワースペクトル依存性の弱さは密度プロファイルの統一性に由来することがわかった。