

宇宙密度揺らぎの振幅問題—標準宇宙論への警告!?



高橋 龍一

弘前大学大学院理工学研究科
takahasi@hirosaki-u.ac.jp

宇宙には星や惑星、銀河や銀河団といった多種多様な構造が存在している。これらの構造はいつどのように形成されたのだろうか？宇宙では遠くを見ることにより、過去を知ることができる。そのため、望遠鏡を使い宇宙の構造がどのように進化してきたか、時代をさかのぼって調べることができる。近年の観測技術の向上により、宇宙の太古の時代（ビッグバンから約40万年後）から現在（ビッグバンから約138億年後）まで、進化の歴史を詳細に知ることができるようになってきた。それに伴い構造形成にひとつの問題が浮かび上がってきた。太古から現在まで、構造形成が（理論的に予想されるより）あまり進んでいないように見えるのである。

宇宙は138億年前のビッグバンにより始まり、現在も膨張を続けていることが観測から確認されている。現代宇宙論は一般相対性理論を用いて、宇宙の膨張史や構造形成史を調べる。一般相対論が宇宙のサイズ（ $\approx 10^{27}$ cm）でも成り立っていると仮定するため、宇宙論は大スケールでの物理法則をチェックする舞台にもなっている。様々な観測から宇宙の成分の約7割が暗黒エネルギー、約3割が物質（暗黒物質と元素）から成ることが示唆されている。暗黒エネルギーにより現在の宇宙膨張が促進されていると考えられている。暗黒物質は光と相互作用しない未知の物質で、構造形成は暗黒物質の重力が主に働いて進むと考えられている。このように一般相対論に基づいて、暗黒エネルギーと暗黒物質を主成分とする宇宙モデルは、現代宇宙論の“標準モデル”と呼ばれている。

初期宇宙の物質分布は完全に一様ではな

く、非常に小さな密度揺らぎがあったことが宇宙背景放射の観測から示唆されている。そのため周囲に比べ密度の高い領域は、重力も強いので物質が集まりやすく、その場所で構造が形成されたと考えられている。暗黒物質が重力で集まって暗黒ハローと呼ばれる自己重力構造物を作り、その重力場内で元素（水素、ヘリウムなど）が収縮して、星や銀河を形成したと考えられている。宇宙の密度揺らぎは、太古の時代は宇宙背景放射の観測から、また現在付近は大規模銀河サーベイから非常に詳細に測られている。近年の観測技術の向上や理論模型の高精度化により、密度揺らぎの振幅は数パーセント以下の精度で決定されている。観測誤差が小さくなってきたことにより、太古と現在の揺らぎの振幅に系統的なずれがあることが知られるようになってきた。理論的な“標準モデル”の予言に比べ、太古から現在まで密度揺らぎがあまり成長していないように見える。宇宙背景放射により測られた太古の密度揺らぎの振幅が相対的に高く、銀河サーベイ等で観測された現在の振幅が相対的に低い値を示している。また現在の揺らぎの振幅が低いために、銀河団もあまりできていない。この問題は、観測的な系統誤差の可能性も残っているが、“標準モデル”の枠組みで多少モデルを変更しただけでは解決できそうに見えない。本記事ではこの問題の現状を紹介し、解決するために提案されているいくつかのアイデアを紹介する。この密度揺らぎの振幅の不一致問題は、暗黒物質による構造形成モデルの修正や、新しい物理法則の発見に繋がるテーマかも知れない。

—Keywords—

密度揺らぎ：

ある位置での物質密度が宇宙全体の平均値からどの程度ずれているかを表す。時刻 t 位置 r での密度を $\rho(r, t)$ 、その時期の平均密度を $\bar{\rho}(t)$ とすると、密度揺らぎは $\delta(r, t) = \rho(r, t)/\bar{\rho}(t) - 1$ で定義される。揺らぎが1より十分小さい場合を線形領域、1より大きくなると非線形領域と呼ばれる。大まかには1より大きくなると自分自身の重力で潰れて構造を作る。

宇宙背景放射：

ビッグバン直後の宇宙は非常に高温のプラズマで満たされていた。その後宇宙膨張に伴い温度が下がってきて、ビッグバンから約40万年後、電離していた陽子と電子が結合し宇宙が中性化した。この時期の光子が宇宙背景放射として全天で観測されている。スペクトルは温度2.7 Kの黒体放射に従っているが、温度は全天で一定ではなく微小な揺らぎがある。この温度揺らぎからこの時代の密度揺らぎを詳細に知ることができる。

大規模銀河サーベイ：

今日の標準的な構造形成のシナリオでは、密度揺らぎのピークに銀河が形成されたと考えられている。そのため近傍の銀河分布を調べることに、現在の密度揺らぎを推定することができる。また遠方からやってくる光は、手前の構造の重力場により光が曲げられる（重力レンズ効果と呼ばれる）。そのため遠方銀河の形状の歪みを測れば、視線方向の物質分布を推定することができる。