

宇宙背景放射と銀河形成 (J.Silk. 1968ApJ, 151, 459S のレビュー)

篠田 智大 (大阪大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙を支配する非相対論的成分がバリオンであると仮定した場合、ジーンズスケールの見積もりから、放射優勢期では銀河スケールのゆらぎは音響振動をして成長できないが、物質優勢期には銀河の形成が可能となることがわかる。しかし、放射優勢期から物質優勢期へ遷移する際に、光子が脱結合していく過程において、バリオンは光子と相互作用することで、光子の拡散スケール以下ではゆらぎがならされてしまうという現象が起こる。この現象は拡散減衰 (またはシルク減衰) と呼ばれる。この現象によって、銀河スケールのバリオンのゆらぎはほとんど消えてしまう。このように、バリオン宇宙において銀河スケールの構造を形成することが困難になってしまう。このためシルク減衰は、光子と相互作用しないバリオン以外の物質、ダークマターの存在を予言する。

また、最近発表された Planck の CMB 観測結果から、宇宙論パラメータを決めるためには、シルクスケールの見積もりが重要な役割を果たすと考えられる。

1 導入

宇宙はきわめて一様等方であることがわかっているが、完全に一様等方な宇宙にはいかなる構造も形成するはずがない。そのため、宇宙初期においてわずかな密度のゆらぎがあったと考えるのが自然である。このゆらぎはその後の宇宙の進化とともに重力不安定性により成長し、現在の構造に至ったと考えられる。

CMB の観測から、初期の宇宙に微小なゆらぎが確かに存在することが確認されている。宇宙を支配する非相対論的成分がバリオンであると仮定し、宇宙初期におけるジーンズ質量の変化を考えると、放射優勢期ではジーンズ質量が銀河の典型的な質量を上回っており、銀河の形成は物質優勢期に入ってから可能となることがわかる。しかし、放射優勢期から物質優勢期へ遷移する際、光子はバリオンから徐々に脱結合していくが、この間もバリオンは光子と相互作用するため、この相互作用による効果を考慮する必要がある。

2 バリオン宇宙における ジーンズスケール

三次元一様等方宇宙において、重力不安定性によりゆらぎが成長するための条件の目安としてよく知られているジーンズ長 λ_J は、

$$\lambda_J = c_s \sqrt{\frac{\pi}{G\bar{\rho}}} \quad (1)$$

と表される。ただし、 G は万有引力定数、 c_s 、 $\bar{\rho}$ はそれぞれ流体の音速、および質量密度の空間平均を表す。この長さを目安とする長さよりも短いスケールの密度ゆらぎは圧力によって支えられてしまい、成長できず音響振動をし、それより長いスケールのゆらぎのみが重力不安定性により成長できる。また、ジーンズ長を直径とする球に含まれる質量

$$M_J = \frac{4\pi\bar{\rho}}{3} \left(\frac{\lambda_J}{2}\right)^3 = \frac{\pi^{5/2}}{6} \frac{c_s^3}{\sqrt{G^3\bar{\rho}}} \quad (2)$$

は、重力不安定性によるゆらぎの成長によって形成することのできる天体の最小限の質量の目安となる。この量 M_J をジーンズ質量と呼ぶ¹。

¹ジーンズ長やジーンズ質量は重力収縮を起こすスケールの目安を表しており、前につく数値因子にあまり意味はない。

現在の宇宙を支配する非相対論的成分がバリオンであると仮定し、放射成分は光子のみによって担われていると近似的に考えて、ジーンズスケールを見積もる。

光子の脱結合以前はバリオンと光子が強く結合し、1つの流体として振舞うので、全質量密度は $\varrho = \varrho_b + \rho_r/c^2$ 、全圧力は $p = p_r = \rho_r/3$ となる。したがって音速は

$$c_s = \left[\left(\frac{\partial p}{\partial \varrho} \right)_s \right]^{1/2} = \frac{c}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{a}{a_{eq}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

と求まる。ただし a はスケール因子であり、 a_{eq} は物質と放射の等密度時におけるスケール因子 a の値である。

等密度時以前の放射優勢期 $a \ll a_{eq}$ においては、 $c_s \simeq c/\sqrt{3}$ となるので、ジーンズ長がホライズンスケールとなり、ホライズン内でゆらぎは成長できない。これはもちろん、放射優勢期においては放射の圧力が強すぎるためである。

その後等密度時をはさんで光子の脱結合以前の物質優勢期 $a_{eq} \ll a < a_{dec}$ におけるジーンズ質量は

$$M_J \simeq \frac{\pi^{5/2}}{6\sqrt{G^3 \varrho_b}} \left[\frac{c}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{4} \frac{\rho_b}{\rho_r} \right)^{-1/2} \right]^3 \quad (4)$$

となるが、 $\rho_b \propto a^{-3}$ 、 $\rho_r \propto a^{-4}$ によりこれは一定値

$$M_J \simeq 1.9 \times 10^{16} (\Omega_{b0} h^2)^{-2} M_\odot \quad (5)$$

へ近づく。銀河の典型的な質量を $M_{gal} = 10^{11} M_\odot$ とすると、 $M_J \gg M_{gal}$ となり、ジーンズ質量が銀河質量を大きく上回っている。これは光子の脱結合以前に銀河の質量に対応するバリオンのゆらぎは音響振動をして成長できないことを意味している。

光子が脱結合すると、バリオンの音速は非相対論的になり、ジーンズ長は急速に小さくなる。簡単のため、バリオンを水素原子のみからなる単原子理想気体で近似すると、脱結合以後 $a > a_{dec}$ のジーンズ質量は

$$M_J \simeq 3 \times 10^5 (\Omega_{b0} h^2)^{-1/2} M_\odot \left(\frac{a_{dec}}{a} \right)^{3/2} \quad (6)$$

と見積もることができる。この質量はほぼ球状星団程度であり、 $M_J < M_{gal}$ となっている。したがって、銀河の形成は光の脱結合以後に可能となることがわかる。

3 シルク減衰

光子の脱結合において、光子とバリオンの相互作用は一瞬にして切れてしまうわけではなく、徐々に相互作用の回数が減っていき、最後には相互作用をしなくなるという連続的なものになっている。この遷移的な過程において、断熱ゆらぎが一部消えてしまう効果がある。

光子は直接的には自由電子とのトムソン散乱を主としてバリオンと相互作用する。断熱ゆらぎではバリオンと光子のゆらぎははじめ一致しているが、自由電子が再結合して自由電子の数密度が減少すると、光子の平均自由行程が長くなり、光子は拡散する。すると、その拡散スケール以下の光子のゆらぎはならされてしまう。その一方、バリオンはまだ光子と相互作用をするため、拡散した光子との速度差による摩擦力を受ける。上で見たように光子の脱結合以前はジーンズ長がホライズンスケールになっているため、ゆらぎは音響振動をしているが、バリオンの振動はこの摩擦力によって急速に減衰することになる。このように、光子の拡散によってバリオンの密度ゆらぎが光子の拡散スケール以下において減衰してしまう現象を拡散減衰 (diffusion damping) またはシルク減衰 (silk damping) と呼ぶ。

ここで、光子の拡散距離を次のようにして見積もる。電子の数密度を n_e とすると、光子が自由電子と1回衝突するのにかかる時間は $(n_e \sigma_T c)^{-1}$ である。ただし、 σ_T はトムソン散乱断面積である。この時間に光子が進むことのできる平均自由行程 l_f は

$$l_f = \frac{1}{n_e \sigma_T} \quad (7)$$

与えられる。トムソン散乱において光子の振動数は変化しない。そこで、光子が自由電子と衝突するたびに、その進行方向がランダムに変化すると近似的に考えれば、光子の拡散をランダムウォークの過程としてモデル化することができる。

一般に平均自由行程 l_f の粒子が N 回のランダムウォークにより拡散する距離は $l_d = \sqrt{N} l_f$ である。時間 t の間に光子が自由電子と衝突する回数は $N = ct/l_f$ であるから、この間の光子の拡散距離は

$$l_d = \sqrt{\frac{ct}{n_e \sigma_T}} \quad (8)$$

与えられる。ここでおおまかな拡散距離を見積もるため、 t を宇宙年齢スケール $t \sim H^{-1} = (8\pi G\rho_m/3c^2)^{-1/2}$ とし、この時点まですべての原子がイオン化していると近似して $n_e = n_b = \rho_b/m_H$ とする。すると、光子の拡散距離は

$$l_d = \sqrt{\frac{8\pi G m_H c}{3 \sigma_T} \frac{(1+z_{dec})^{-9/4}}{H_0^{3/2} \Omega_{b0}^{1/2} \Omega_{m0}^{1/4}}} \quad (9)$$

となる。

物質成分がバリオンのみからなり $\Omega_{m0} = \Omega_{b0}$ となる場合、この拡散スケールに対応する質量 (シルク質量 (silk mass)) は

$$\begin{aligned} M_d &\equiv \frac{4\pi\bar{\rho}_b}{3} \left(\frac{l_d}{2}\right)^3 \\ &= \frac{\sqrt{2}\pi^{3/2} G^{1/2} m_H^{3/2} c^{3/2} (1+z_{dec})^{-15/4}}{3\sqrt{3} \sigma_T^{3/2} H_0^{5/2} \Omega_{b0}^{5/4}} \\ &= 8.5 \times 10^{11} (\Omega_{b0} h^2)^{-5/4} M_\odot \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ただし、 $z_{dec} = 1100$ とした。これは $M_d > M_{gal}$ と銀河の質量を上回っており、銀河スケールのゆらぎがほとんど消え去ってしまうことになる。

4 まとめ、結論

バリオン宇宙においてジーンズ質量を考えると、光子の脱結合以前はジーンズ質量が銀河質量を上回るため、銀河スケールのゆらぎは成長できないが、光子の脱結合以後はジーンズ質量が十分小さくなり銀河が形成できるように思える。しかし、光子が徐々に脱結合していく過程で、シルク減衰によりゆらぎが一部ならされてしまうことがわかった。このようにシルク減衰は、バリオン宇宙では銀河スケールのゆらぎが脱結合時まで消されてしまうという深刻な問題を提起している。これはバリオンが脱結合時まで光子と相互作用することに起因する。そのためシルク減衰は、重力不安定性により構造が形成されるためには、光子と相互作用しないバリオン以外の物質、ダークマターの存在を予言しているといえる。

5 今後の展望

2013 年 3 月の Planck の CMB 観測結果において、WMAP9 の観測結果と比較して宇宙論パラメータが

$$\Omega_m h^2 = 0.1368 \text{ から } 0.14305 (4.6\% \text{ 増})$$

$$H_0 = 69.7 \text{ から } 67.04 (4.0\% \text{ 減})$$

とわずかに変化している (小松英一郎氏の発表より)。図 1 は、Planck と WMAP9 によって観測された CMB のパワースペクトルを比較したものである。

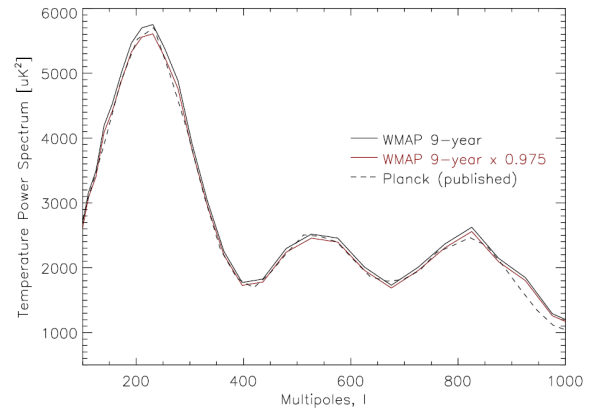


図 1: CMB パワースペクトル

シルク減衰の長さスケールを見込む角度 θ_d は、おおまかに見積もると

$$\begin{aligned} \theta_d &\sim \sqrt{\frac{2\pi G m_H}{3 \sigma_T c} \frac{(1+z_{dec})^{-5/4} \Omega_{m0}^{1/4}}{H_0^{1/2} \Omega_{b0}^{1/2}}} \\ &= 1.203 \times 10^{-3} \left(\frac{1+z_{dec}}{1090}\right)^{-5/4} \\ &\quad \times \left(\frac{\Omega_{b0} h^2}{0.023}\right)^{-1/2} \left(\frac{\Omega_{m0} h^2}{0.13}\right)^{1/4} \text{ rad} \end{aligned} \quad (11)$$

となり、この角度よりも小スケールで拡散減衰が顕著になる。

宇宙論パラメータの値を決定するためには、このシルクスケールの見積もりが重要な役割を果たすと考えられる。

謝辞

今回、この論文のレビューを行うにあたり、ゼミ開いていただきご指導して下さった宇宙進化グルー

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

プの先輩方皆様に感謝いたします。特に D3 の寺木さんには、細かなことまで丁寧に 1 対 1 でご指導していただき、深く感謝いたします。

Reference

J.Silk. 1968ApJ, 151, 459S

C.W.Misner and D.H.Sharp. 1965, Phys. Letters. 15, 279

E.Komatsu's talk at KITP Program: Primordial Cosmology. 2013. (Unpublished)

松原隆彦「現代宇宙論 -時空と物質の共進化」. 2012. 東京大学出版会