ボイドの進化と観測的特徴

石原 誠也 (広島大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙にはボイド（超空洞）と呼ばれる低密度の領域が無数に存在している。ボイドは宇宙物理学において興味深い構造をしている。例えば、宇宙マイクロ波背景放射のコールドスポットを巨大なボイドによる積分ザックス・ヴォルフェ効果によって説明できる可能性が示されている。積分ザックス・ヴォルフェ効果とは、宇宙マイクロ波背景放射の特性に影響する宇宙論的な効果であり、CMB 光子が観測者に至るまでの経路で、重力ポテンシャルの時間変化を反映して CMB 光子の温度が変化する効果である。本研究では、ボイドによる積分ザックス・ヴォルフェ効果による温度変化を実際に計算し、それに表れるボイドの特徴を調べる。

1 Introduction

宇宙では、銀河が集まって銀河群、銀河団を形成している。また、この銀河群、銀河団が集まって超銀河団を形成している。宇宙は、このような銀河が密集した分布だけではなく、ボイドと呼ばれる低密度の領域が無数に存在している。これらの銀河の集まりとボイドは宇宙の大規模構造を特徴づける基本的構造である。このボイドは宇宙物理において興味深い効果を引き起こす可能性がある。それは、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎにおいて、CMB の平均温度（約 2.725K）よりも異常に温度の低い（約 $70\mu K$ 低い）領域 (コールドスポット) を、巨大なボイドによる積分ザックスヴォルフェ効果によって説明できる可能性である。実際に、コールドスポットの方向に半径約 200 $[h^{-1}Mpc]$ もの巨大なボイドの存在が報告されている。[1]

本研究では、さまざまな条件のボイドにおける積分ザックスヴォルフェ効果による温度変化を実際に計算し、特徴を調べた。また、観測で見つかった巨大なボイドによる積分ザックスヴォルフェ効果で、コールドスポットを説明できるかを調べた。

2 Methods

この章では、ボイドによる積分ザックスヴォルフェ効果について解説する。

積分ザックスヴォルフェ効果とは、CMB 光子が観測者に至るまでの経路で、重力ポテンシャルの時間変化を反映して CMB 光子の温度が変化する効果である。ここでは、CMB 光子がボイドを通過する場合の積分ザックスヴォルフェ効果を例に考える。CMB 光子がボイドによるポテンシャルの山を通過する際、ポテンシャルの山を登るにつれて、エネルギーを失う。そのとき、重力赤方偏移によって、ポテンシャルの山は引き伸ばされて、低くなるので、CMB 光子がポテンシャルの山を出るときは、失ったエネルギーよりも少ないエネルギーを獲得することになり、合計として、エネルギーを失う。つまり、ボイドを通過する場合の積分ザックスヴォルフェ効果では、CMB 光子はエネルギーを失い、温度が低下する。

積分ザックスヴォルフェ効果は以下のように表される。

$$\frac{\Delta T(r_\perp)}{T} = \int 2\Psi_{,\eta}(x(z))dz \qquad (1)$$

ここで、Ψ は重力ポテンシャル、η は conformal time、z は視線方向を表す。また、線形のときの $\Psi + \Phi = 0$ の関係を用いた。ここでの Φ は曲率ポテンシャルである。
上の式を計算するために、密度分布としては、以下の式で与えられるボイドを考える。[2]

$$\frac{\rho_{\rm v}(r)}{\bar{\rho}} - 1 = \delta_c \frac{1-(\frac{r}{r_s})^\alpha}{1+(\frac{r}{r_{\rm v}})^\beta} \qquad (2)$$

ここで、$\rho_{\rm v}$ はボイドの密度プロファイル、$r_{\rm v}$ はボイドの半径、$\bar{\rho}$ は宇宙全体の平均密度、δ_c は中心の密

度比、r_s は $\rho_{\rm v} = \bar{\rho}$ のときの典型的な半径、α, β はパラメータを表す。
上記の密度分布を用いて、以下を仮定する。

$$\delta = D_1(a)\delta_c \frac{1-(\frac{r}{r_s})^\alpha}{1+(\frac{r}{r_{\rm v}})^\beta} \equiv D_1(a)\tilde{\delta}(r) \quad (3)$$

ここで、a はスケール因子を表し、$D_1(a)$ は growth factor で、以下の式で表される。

$$D_1(a) = a\exp[\int_0^a \frac{da'}{a'}\{\Omega_m(a')^\gamma - 1\}] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Omega_m(a) &= \frac{H_0^2\Omega_m a^{-3}}{H(a)^2} \\ &= \Omega_m a^{-3}(\frac{\Omega_m}{a^3} + 1 - \Omega_m)^{-1} \quad (5) \end{aligned}$$

H_0 はハッブル定数、Ω_m は非相対論的物質の密度パラメータを表す。また、バックグラウンドの方程式として、以下の式を用いた。

$$H^2 = \frac{\dot{a}^2}{a^2} = H_0^2(\frac{\Omega_m}{a^3} + 1 - \Omega_m) \quad (6)$$

$$H_0^2\frac{\Omega_m}{a^3} = \frac{8\pi G}{3}\bar{\rho}_m \quad (7)$$

ここで、$\bar{\rho}_m$ は宇宙全体の非相対論的物質の平均密度を表す。また、ポアソン方程式より

$$\begin{aligned} \Delta\Psi &= 4\pi G a^2 \bar{\rho}_m \delta \quad (8) \\ &= \frac{3}{2}\Omega_m H_0^2 \frac{D_1(a)}{a}\tilde{\delta}(r) \quad (9) \end{aligned}$$

従って、Ψ は以下のように計算できる。

$$\Psi = \frac{3}{2}\Omega_m H_0^2 \frac{D_1(a)}{a}\tilde{\Psi}(r) \quad (10)$$

ここで、

$$\tilde{\Psi}(r) \equiv \int_r^\infty dr' \frac{-1}{r'^2}\int_0^{r'} dr'' \tilde{\delta}(r'') r''^2 \quad (11)$$

上で求めた Ψ を用いると、積分ザックスヴォルフェ効果は以下のように書き直せる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T(r_\perp)}{T} &= -3\Omega_m H_0^2 \frac{\partial}{\partial\eta}(\frac{D_1(a)}{a})\int_{-\infty}^\infty dz\tilde{\Psi}(z) \\ &= 3\Omega_m a H_0^3 \exp[\int_0^a \frac{da'}{a'}\{\Omega_m(a')^\gamma - 1\}] \\ &\quad \times(\frac{\Omega_m}{a^3} + 1 - \Omega_m)^{\frac{1}{2}}(\Omega_m(a')^\gamma - 1) \\ &\quad \times\int_{-\infty}^\infty dz\tilde{\Psi}(z) \quad (12) \end{aligned}$$

ここで、$r_\perp$ は視線方向に垂直な方向を表す。(12) 式からさまざまな条件のボイドによる積分ザックスヴォルフェ効果 $\Delta T(r_\perp)$ を計算し、その特徴について調べた。

3 Results

まず、ボイドの密度分布 [2] について示す。表 1 のパラメータを採用する。ボイドの密度プロファイルは図 1 のようになる。

表 1: パラメータの値

$r_{\rm v}[h^{-1}Mpc]$	δ_c	α	β	$\frac{r_s}{r_{\rm v}}$
10	-0.95	2.4	7	0.75
20	-0.9	2.1	9.5	0.91
40	-0.65	1.7	7.2	1.15
70	-0.5	1	5	1.65

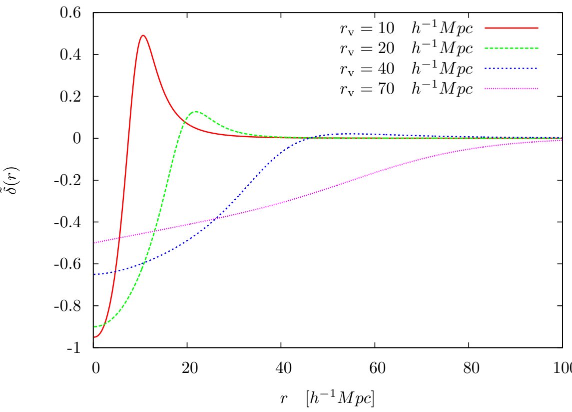

図 1: ボイドの密度分布

上で示した、4 つのボイドを用いて、積分ザックスボルフェ効果を計算する。

最初に、積分ザックスヴォルフェ効果のボイドの大きさの依存性を示す。ここで、赤方偏移は $z = 0.1$、非相対論的物質の密度パラメータは $\Omega_m = 0.3$ とした。

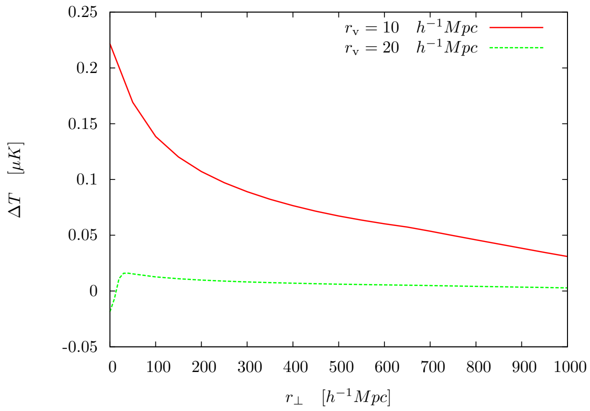

図 2: $r_v = 10, 20$ $[h^{-1}Mpc]$ のボイドの $\Delta T(r_\perp)$

図 2 は、半径の小さいボイドによる $\Delta T(r_\perp)$ を示しており、赤線が半径 $r_v = 10$ $[h^{-1}Mpc]$, 緑線が半径 $r_v = 20$ $[h^{-1}Mpc]$ のボイドによる $\Delta T(r_\perp)$ である。半径 $r_v = 10$ $[h^{-1}Mpc]$ 程度の小さいボイドでは、温度が上昇する効果を示しており、ボイドとしての振る舞いをしていない。そして、半径を少し大きくした $r_v = 20$ $[h^{-1}Mpc]$ のボイドでは、中心付近のみ温度減少の効果を示している。

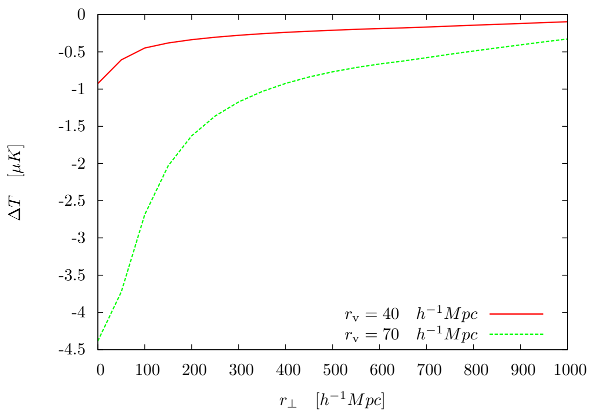

図 3: $r_v = 40, 70$ $[h^{-1}Mpc]$ のボイドの $\Delta T(r_\perp)$

図 3 は、半径の大きいボイドによる $\Delta T(r_\perp)$ を示しており、赤線が半径 $r_v = 30$ $[h^{-1}Mpc]$, 緑線が半径 $r_v = 70$ $[h^{-1}Mpc]$ のボイドによる $\Delta T(r_\perp)$ である。上の 2 つの半径の大きなボイドでは、ともに温度減少の効果を示していて、特に、半径の大きなボイドほどその効果は大きい。

次に、積分ザックスヴォルフェ効果の赤方偏移依存性について考える。(12) 式より、赤方偏移に依存する項のみを計算することで、赤方偏移依存性を知ることができるので、以下の式を計算する。

$$A = a\left(\frac{\Omega_m}{a^3} + 1 - \Omega_m\right)^{\frac{1}{2}}(\Omega_m(a')^\gamma - 1) \times \exp\left[\int_0^a \frac{da'}{a'}\{\Omega_m(a')^\gamma - 1\}\right] \tag{13}$$

計算した結果を次に示す。

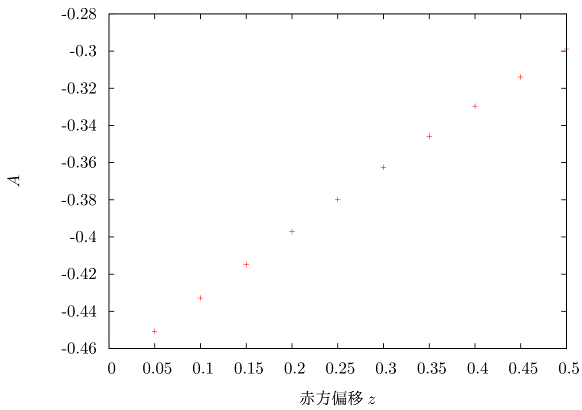

図 4: A の赤方偏移依存性

図 4 は A の赤方偏移依存性を表している。計算結果から、赤方偏移が大きくなるにつれて、A の値は小さくなる。つまり、赤方偏移が大きくなるにつれて、積分ザックスヴォルフェ効果による温度変化は小さくなる。

最後に、コールドスポットの方向で観測されている巨大なボイドで、コールドスポットを説明できるか調べるために、観測で見積もられている半径約 200 $[h^{-1}Mpc]$ で、中心の赤方偏移 $z \sim 0.15$ のボイドに対して、同様に計算した結果を示す。

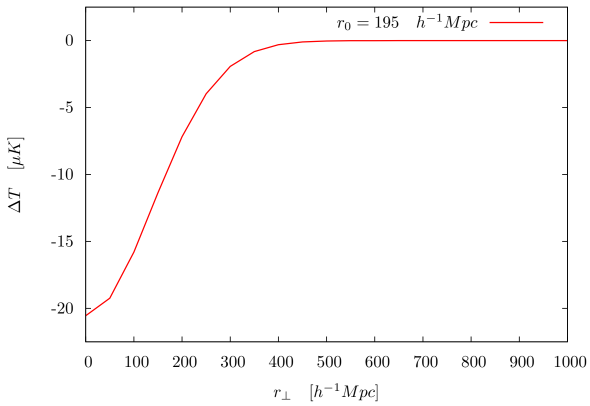

図 5: $r_0 = 195$ $[h^{-1}Mpc]$ のボイドの $\Delta T(r_\perp)$

このボイドの密度プロファイルとしては、以下の式を用いた。[3]

$$\delta(r) = -\delta_0(1 - \frac{2r^2}{3r_0^2})e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} \tag{14}$$

ここで、$\delta_0 = 0.25, \quad r_0 = 195$ $[h^{-1}Mpc]$ とした。ボイドの中心での温度変化は $\Delta T \sim -20$ $[\mu K]$ 程度であり、コールドスポットを説明するには小さすぎる結果となった。従って、線形の仮定のもとで、コールドスポットを巨大なボイドによる積分ザックスヴォルフェ効果で説明することは難しいかもしれない。[3]

4 Summary

ユニバーサルボイド密度プロファイルに基づいた模型では、積分ザックスヴォルフェ効果のボイドの大きさの依存性については、$r_\mathrm{v} = 10$ $[h^{-1}Mpc]$ 程度の小さいボイドでは、ボイドの振る舞いをせず、温度上昇の効果を示す。また、大きいボイドについては、大きくなるにつれて、温度減少の効果は大きくなる。つまり、CMB 光子が通過するボイドが大きいほど、CMB 光子の温度は減少する。赤方偏移依存性については、赤方偏移 z が大きいほど、温度変化は小さくなる。つまり、CMB 光子が通過するボイドが近傍であるほど、CMB 光子の温度は減少する。最後に、観測で見つかった巨大なボイドによる積分ザックスヴォルフェ効果を計算したところ、$\Delta T \sim -20$ $[\mu K]$ となり、コールドスポットを説明することはできない。

Reference

[1] András et al arXiv:1407.1470v1 (2014)

[2] N.Hamaus et al arXiv:1403.5499v2 (2014)

[3] S.Nadathur et al arXiv:1408.4720v2 (2014)