

# Cosmic string による初期磁場生成

堀口 晃一郎 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

本講演では宇宙論的位相欠陥の一種である cosmic string による初期磁場生成について述べる。cosmic string は宇宙初期に起きた場の相転移によって形作られる位相欠陥であり、ひも状の高エネルギー領域として宇宙空間に存在することが期待される。string の運動は密度揺らぎの形成や重力波の生成など様々な物理に影響を与える。本研究では位相欠陥の一種である texture からの磁場生成を見積もった (K.H et al. 2015) に倣い、string が宇宙初期の光子、バリオン流体に与える影響を見積もることで string が宇宙初期に生成しうる磁場を評価する。string による初期磁場生成は以下の過程で行われる。まず、初期宇宙での string の運動により空間の渦度が生成される。次に、空間の渦度に引きずられて光子流体とバリオン流体が運動を始める。この際、光子と電子がトムソン散乱で、電子とバリオンが電磁気力で結びつき、一つの流体として運動している。ここでは光子がバリオンから電子を引き離し、それに追従するようにバリオンが運動するので、光子流体とバリオン流体の間に電場が誘起される。誘起された電場は Maxwell 方程式を通して磁場を生成する。この過程を string の分布や速度の時間進化を考慮して解くことで、string によって生成される初期磁場を求めることができる。本研究により、string が生成しうる初期磁場は  $\sim 1\text{Mpc}$  程度のスケールで  $10^{-20}\text{Gauss}$  程度であることが分かった。本講演では string によって生成される磁場の特徴や進化などについても言及する。

## 1 Introduction

ビッグバン宇宙論は現在の宇宙の発展を記述するモデルとして Cosmic microwave background(CMB) や Ia 型超新星などの観測から強く支持されている。ビッグバン宇宙論では宇宙は極初期に超高温状態にあり、宇宙膨張に従い断熱的に温度が低下する。この際、宇宙は様々な相転移を経験してきたと考えられており、相転移によって破られた対称性によっては宇宙論的位相欠陥と言う特殊な領域ができる場合がある。中でも  $\mathcal{O}(N)$  対称性の破れによって生じた位相欠陥は  $\mathcal{O}(N)$  global defects と呼ばれ、 $\mathcal{O}(1)$  が破れるとき Domain wall、 $\mathcal{O}(2)$  では cosmic string、 $\mathcal{O}(3)$  では monopole、 $\mathcal{O}(N \geq 4)$  では texture が形成される。

本研究では、位相欠陥の中でも cosmic string と呼ばれる一次元のひも状のものに着目する。cosmic string に関わる現象は、cosmic string による背景重力波や CMB への影響、超高エネルギー宇宙線の生成など、現在に至るまで様々な研究がなされている。本研究では cosmic string による初期磁場生成を見ていく。

## 2 Methods

本研究では cosmic string の運動により空間に渦度が発生し、それが Boltzmann 方程式と Einstein 方程式を通して伝搬することで光子流体とバリオン流体の間に相対速度を生み出し、磁場を生成する (K.Takahashi et al. 2005)。まず、cosmic string が生成する渦度  $\sigma$  は、string のエネルギー運動量テンソル  $T_s^{\mu\nu}$  を含む全エネルギー運動量テンソル  $T_{\text{tot}}^{\mu\nu}(\vec{k})$  とベクトルモードへのプロジェクション  $\mathcal{O}_{ij}(\hat{k})$  を用いて以下のように書かれる。

$$\dot{\sigma} + 2\mathcal{H}\sigma = 8Ga^2\Pi/k \quad (1)$$

$$\Pi = T_{\text{tot}}^{ij}\mathcal{O}_{ij}(\hat{k}) \quad (2)$$

ここで  $\dot{\phantom{x}}$  は conformal time での微分、 $\mathcal{H} = \dot{a}/a$  は conformal Hubble である。この渦度が以下のバリオン流体の運動方程式とボルツマン方程式を通して他の揺らぎに伝搬する。

$$\dot{v}_b - \dot{\sigma} + \mathcal{H}(v_b - \sigma) = R\dot{\tau}(v_\gamma - v_b). \quad (3)$$

$$\dot{v}_\gamma - \dot{\sigma} + \frac{k}{8}\Pi_\gamma = -\dot{\tau}(v_\gamma - v_b), \quad (4)$$

$$\dot{\Pi}_\gamma + \frac{8}{5}kI_3 - \frac{8}{5}kv_\gamma = -\dot{\tau}\left(\frac{9}{10}\Pi_\gamma - \frac{9}{5}E_2\right), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_l + k\frac{l}{2l+1}\left(\frac{l+2}{l+1}I_{l+1} - I_{l-1}\right) \\ = -\dot{\tau}I_l \quad (l \geq 3), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_l + \frac{(l+3)(l+2)l(l-1)}{(l+1)^3(2l+1)}kE_{l+1} - \frac{l}{2l+1}kE_{l-1} \\ = -\dot{\tau}\left(E_l - \frac{2}{15}\zeta\delta_{l2}\right) + \frac{2}{l(l+1)}kB_l, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_l + \frac{(l+3)(l+2)l(l-1)}{(l+1)^3(2l+1)}kB_{l+1} - \frac{l}{2l+1}kB_{l-1} \\ = -\frac{2}{l(l+1)}kE_l, \end{aligned} \quad (8)$$

ここで  $\Pi_\gamma = 3I_2$  であり  $\zeta = 3I_2/4 + 9E_2/2$  となっており、 $v_b$  はバリオン流体の速度、 $v_\gamma$  は光子流体の速度、 $\Pi_\gamma$  は光子流体の非等方圧力、 $I_l$  は放射強度の  $l$  次のモーメント、 $E_l, B_l$  はそれぞれ偏光の  $l$  次のモーメント、 $n_e$  は電子数密度、 $\sigma_T$  はトムソン散乱断面積、 $\dot{\tau} = an_e\sigma_T$  は opacity、 $\rho_\gamma, \rho_b$  はそれぞれ光子とバリオンのエネルギー密度で  $R = 4\rho_\gamma/3\rho_b$  である。これらを解いて  $\delta v = v_\gamma - v_b$  を得ることでオイラー方程式とマクスウェル方程式から得た以下の磁場の発展 (K.Takahashi et al. 2005) を得る。

$$\frac{1}{a} \frac{d}{d\eta} (a^2 B^i) = \frac{4\sigma_T \rho_\gamma a}{3e} \epsilon^{ijk} \partial_k (v_{\gamma j} - v_{b j}) \quad (9)$$

ここで、 $e$  は素電荷、 $\epsilon^{ijk}$  は Levi-Civita テンソルである。これを積分することで以下の形を得る。

$$\langle B^i(\vec{k}, \eta) B_i(\vec{k}', \eta) \rangle = (2\pi)^3 S_B(k, \eta) \delta^{(3)}(\vec{k} - \vec{k}'), \quad (10)$$

ここで磁場のパワースペクトル  $S_B(k)$  は以下のよう書かれる。

$$\begin{aligned} a^4(\eta) \frac{k^3}{2\pi^2} S_B(k, \eta) &= 2 \frac{k^3}{2\pi^2} \left(\frac{4\sigma_T}{3e}\right)^2 k^2 \\ &\times \left[ \int_0^\eta d\eta' a^2(\eta') \rho_\gamma(\eta') \delta v(k, \eta') \right]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

### 3 Results

この方法のもとに実際に cosmic string から CMB を計算する公開コード CMBACT (CMBACT4 2014) に基づき cosmic string によって生成される磁場を計算した。string tension  $G\mu = 1.1 \times 10^{-7}$  の場合の結果を図 1 に示す。ここで  $G$  は重量定数である。尚、現在この内容については論文執筆中であるため、近似式や詳しい結果は割愛するが、これを発展させていくと現在では 1Mpc 程度のスケールで  $10^{-21} \sim 10^{-23}$  Gauss 程度の磁場を生成しうる。

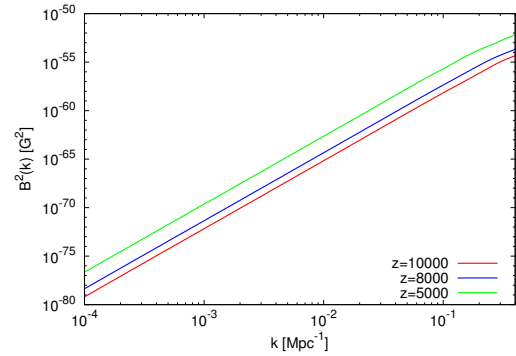


図 1: cosmic string による磁場のスペクトル。横軸は波数、縦軸は磁場の強度。赤線が  $z = 10000$ 、青線が  $z = 8000$ 、緑線が  $z = 5000$  の場合の磁場のスペクトル。

### 4 Discussion

Decoupling 以前の時期では、輻射流体とバリオン流体の間での強結合近似が重要な役割を果たし、これを用いることで磁場の生成を解釈することができる。基本的には (K.H et al. 2015) と同様の方法で解釈を進めることができるが、cosmic string を計算する場合いくつか注意する点が現れる。これについても現在執筆中の論文の内容であるため割愛させていただく。

## 5 Conclusion

本発表では宇宙論的位相欠陥の一種である cosmic string による磁場生成を見た。decoupling 以前の宇宙では強結合近似が磁場生成について重要な役割を果たし、decoupling 以後の成長も含めると磁場は  $10^{-21} \sim 10^{-23}$  Gauss 程度になることが分かった。これらの磁場はダイナモ機構による増幅を得ることで銀河や銀河団の種磁場となりうる。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

K.H., K.Ichiki, T.Sekiguchi,& N.Sugiyama, 2015, JCAP,4 (Apr., 2015) 7

K. Takahashi, K. Ichiki, H. Ohno, and H. Hanayama, 2005, Phys.Rev.Lett.95 (Sept., 2005) 121301

CMBACT4 : <http://www.sfu.ca/levon/cmbact.html>