宇宙の磁場の起源 密度揺らぎからの磁場生成とその観測的な応用について 市來 淨與 (ICHIKI Kiyotomo)

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, JAPAN

K. Takahashi, K.Ichiki, H. Ohno, H. Hanayama, PRL95, 2005 K. Ichiki, K. Takahashi, H. Ohno, H. Hanayama, N. Sugiyama, Science 311, 2006 D. G. Yamazaki, K. Ichiki, T. Kajino, G.J. Mathews, ApJ646, 2006 K. Ichiki, S. Inoue, K. Takahashi, in preparation

Magnetic Fields in the Universe

磁場は宇宙の様々な場所に存在し、天体現象において重要な役割を果たす





物理学会 – p.2/34



もっと大きなスケール(銀河スケール)でも磁場はある





NGC 6946: optical image ● **電波で** synchrotron を観測 → μG 程度の磁場

Beck and Hoernes, Nature, (1996)

偏光を測って磁場の向き
 1-10kpc 程度の相関長





X 線と電波での Hydra A



Vogt and Ensslin, A&A, (2005) Rotation Measure による観測

物理学会 – p.4/34

銀河団スケールを超えて: \vec{B} in super clusters(?)



物理学会 – p.5/34

ダイナモパラダイム:銀河磁場の種に必要な磁場の強さ

初めは小さかった種磁場が、銀河回転によって現在までに大きく(指数関数的に)成長してきたと考える。



起源はなにか? – 天体物理起源

● 現在までのさまざまな天体活動を通して磁場を生成(+増幅)

- ・ビアマン Battery (Biermann 1950) + ダイナモ増幅
 - 始原超新星: $B \sim 10^{-16}$ G (Hanayama et al, 2005)
 - **多 銀河形成:** $B \sim 10^{-21}$ G (Kulsrud et al., 1997)
 - 再イオン化: $B \sim 10^{-18}$ G (Gnedin et al, 2000)
- **」 ワイベル不安定**: *B* ~ 10⁻⁸G

(Okabe & Hattori (2003), Fujita and Kato (2005))





起源はなにか? – 宇宙論起源

● インフレーション中での磁場生成

電磁場の conformal invariance を破る必要あり。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial\eta^2} - \nabla^2\right) (a^2 \vec{B}) = 0 \to \vec{B} \propto a^{-2}$$

- couplings to gravity: $R_{\mu\nu}A^{\mu}A^{\nu}$, $RF^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ $B \sim 10^{-9}$ G (Turner, 1988)
- coupling to the other fields: $e^{\phi}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ $10^{-65} \leq B \leq 10^{-10}$ G (Ratra (1992), Bamba& Yokoyama (2003))



第3の可能性 — 密度揺らぎ起源

物理学会 – p.9/34

宇宙晴れ上がりまでの磁場生成

- **多
 光子は電子のみを選択的にコンプトン散乱** $(m_e \ll m_p)$
 - ・ 光子流体とバリオン流体に速度差 $(v_{\gamma} v_b)$ があると、陽子と電子に速度差が生まれる。(Harrison (1970), Gopal&Sethi(2004))
 - 光子の非等方圧力 (Π_{γ}) が電子を陽子と違う方向へ散乱 (new!!) → 陽子と電子にずれ → 磁場生成
- ・ $(v_{\gamma} v_b), \Pi_{\gamma}$ は密度揺らざ起源 → 存在は確実
 - 確立した宇宙論的摂動論(と観測)に基づく。
 - さまざまな相関長を持つ磁場が生成される。
 - 磁場の強さは弱い $(10^{-30}$ G $\sim 10^{-20}$ G)





密度揺らぎ:全ての構造の「種」

宇宙はほぼ一様で等方だが、その上にわずかな揺らぎが乗っている。



temperature anisotropy: temperature inhomogeneity at 380,000 yr after the big-bang

- 赤: higher temp (higher density) 青: lower temp (lower density)



present universe

宇宙初期の密度揺らぎによる磁場生成

光の分布に薄い所と濃い所がある = 光子の「風」が吹く



光子の「風」

電流ゼロの陽子と電子のガス



宇宙初期の密度揺らぎによる磁場生成

光の分布に薄い所と濃い所がある = 光子の「風」が吹く



コンプトン散乱で電子だけ押す



宇宙初期の密度揺らぎによる磁場生成

光の分布に薄い所と濃い所がある = 光子の「風」が吹く



磁場生成がこれまで考慮されていなかったわけ

標準的な膨張宇宙の中での密度揺らぎの成長理論の枠組では...



光子の「風」

ー様な物質分布

物理学会 – p.13/34

単純に考えると磁場は生まれない

磁場生成がこれまで考慮されていなかったわけ 今まで考えていなかった小さい効果をちゃんと考慮に入れると...



光子の「風」

「むらむら」した物質分布

キャンセルされずに磁場が生まれる

● 特に光子の非等方圧力が重要

光子の「風」とむらむらした物質分布という小さい効果をふたつ合わせると初めて磁場が生まれる(摂動2次の効果)

Recipe for the magnetic field equation

電子:
$$\frac{d\mathbf{V}_{e}}{dt} = -\frac{\mathbf{\nabla}p_{e}}{\rho_{e}} - \frac{e}{m_{e}}\left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{V}_{e} \times \mathbf{B}}{c}\right) - \mathbf{\nabla}\phi + \frac{\mathbf{C}_{\text{Coulomb}}}{n_{e}m_{e}} + \frac{\mathbf{C}_{\text{Compton}}}{n_{e}m_{e}} \quad (1)$$

陽子:
$$\frac{d\mathbf{V}_{p}}{dt} = -\frac{\mathbf{\nabla}p_{p}}{\rho_{p}} + \frac{e}{m_{p}}\left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{V}_{p} \times \mathbf{B}}{c}\right) - \mathbf{\nabla}\phi - \frac{\mathbf{C}_{\text{Coulomb}}}{n_{p}m_{p}} \quad (2)$$

where, $C_{\text{Coulomb}} = (\mathbf{V}_p - \mathbf{V}_e) n e^2 \eta$, $\eta \approx \frac{\pi e^2 m_e^{1/2}}{(k_B T_e)^{3/2}} \ln \Lambda$, (2)-(1) して $(m_e/m_p \ll 1, p_p \approx p_e)$ 一般化されたオームの法則:

$$\frac{m_e}{e^2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\boldsymbol{J}}{n} \right) = \frac{\nabla p_e}{en_e} + \boldsymbol{E} + \frac{\boldsymbol{v}_e}{c} \times \boldsymbol{B} - \eta \boldsymbol{J} - \frac{\boldsymbol{C}_{\text{Compton}}}{n_e e}$$

rotation をとって、Maxwell eq. ($\nabla \times E = \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$)を使うと

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \nabla \times \left(\frac{\nabla p_e}{en_e}\right) + \nabla \times \left(\frac{\boldsymbol{v}_e}{c} \times \boldsymbol{B}\right) - \eta \nabla \times \boldsymbol{J} - \nabla \times \frac{\boldsymbol{C}_{\text{Compton}}}{n_e e}$$

ビアマン項 ダイナモ項 拡散項

Evolution equation for Magnetic Fields

物理学会 – p.15/34



: 速度差による寄与

: 非等方圧力に寄る寄与

(1st order) × (1st order) の項は、線形摂動で計算した物理量の畳み込みで正確に計算できる!

Evolution equation for Magnetic Fields



確に計算できる!

Let us Calculate B in Λ CDM cosmology



磁場は密度揺らぎから生成される

→ 磁場は CMB 温度揺らぎに付随している











場の源となる揺らぎの発展



揺らぎのスペクトルの時間変化

最初にスモールスケールの磁場が生成され、



揺らぎのスペクトルの時間変化



揺らぎのスペクトルの時間変化



密度揺らぎから生成された宇宙磁場

様々なスケールで磁場が生成: 10^{-30} G $\lesssim B \lesssim 10^{-20}$ G



物理学会 - p.20/34

(初期宇宙を探る道具としての)密度揺らぎ起源の磁場





(初期宇宙を探る道具としての)密度揺らぎ起源の磁場





Magnetic Field from density perturbations + GRB / CMB RM



P(k) を磁場によって測る

1()

物理学会 – p.22/34

(初期宇宙を探る道具としての)密度揺らぎ起源の磁場

hybrid inflation model with running index within 1σ of WMAP 3yr (M. Kawasaki et al., hep-ph/0605271, 本日の高山さん講演)



物理学会 – p.23/34

(初期宇宙を探る道具としての)密度揺らぎ起源の磁場

hybrid inflation model with running index within 1σ of WMAP 3yr (M. Kawasaki et al., hep-ph/0605271, 本日の高山さん講演)



物理学会 – p.23/34

宇宙論的起源の磁場を検証するには?

- 宇宙磁場の起源は「天体起源説」と「宇宙論(密度揺らぎ)起源説」が あるがまだ決定していない。最終的なシナリオを立てるのは難しいが、 宇宙論起源で磁場があるかどうかを検証するのは比較的単純である。な ぜなら、
 - テ体活動が始まっていない初期宇宙に磁場が存在するならば、それは宇宙論的な起源である。(宇宙背景輻射揺らぎ(CMB)にその痕跡を探す。)
 - 宇宙全体のスケールに渡って磁場が存在する、または天体活動が不 活発な場所で磁場が存在することが確認できれば、それは宇宙論的 な起源である可能性が高い。(Void 領域の磁場を探す。)
 - 密度揺らぎ起源の磁場を観測することができれば、密度揺らぎに 関する新しい情報を磁場から得ることができる。

Constraints on Cosmological Magnetic Fields from CMB

ローレンツカ によって、ベクトル型 (回転型)の速度場が、バリオン流体に 誘起される。

→ コンプトン散乱 を通じて揺らぎは光子へ → ドップラー効果で温度揺らぎの非等方性へ

• $\frac{\Delta T}{T}(\eta_0, \vec{k}, \hat{n}) \approx -\vec{v}(\eta_{\text{dec}}) \cdot \hat{n} + \int_{\eta_{\text{dec}}}^{\eta_0} d\eta \vec{V} \cdot \hat{n}$

このようにして生成された温度揺らぎが、小角度スケール (ℓ ≥ 1000) **で観測 される温度揺らぎの起源かもしれない.** (Lewis, PRD 2004, Yamazaki,K.I.,Kajino, ApJL, 2004)

•
$$\Omega_{\rm B} \approx 10^{-5} \Omega_{\gamma} \left(\frac{B}{10^{-8} {\rm G}}\right)^2$$



宇宙磁場による CMB anisotropies (Yamazaki, K.I, Kajino, 2006)



物理学会 – p.26/34

宇宙磁場による CMB anisotropies (Yamazaki, K.I, Kajino, 2006)



物理学会 – p.26/34

CMBによる宇宙磁場への制限 (Yamazaki, K.I, Kajino, 2006)



void 領域に初期磁場は残っているのか? (Bertone, MNRAS 370, 2006)

Magnetic field seeding by galactic winds

Serena Bertone,^{1,2*} Corina Vogt^{2,3*} and Torsten Enßlin^{2*}

¹Astronomy Centre, University of Sussex, Falmer, Brighton BN1 9QH
 ²Max-Planck-Institut f
ür Astrophysik, Karl Schwarzschild Strasse 1, 85741 Garching bei M
ünchen, Germany
 ³Stichting ASTRON, PO Box 2, NL–7990 AA Dwingeloo, the Netherlands

Accepted 2006 April 21. Received 2006 April 21; in original form 2005 February 28

ABSTRACT

The origin of intergalactic magnetic fields is still a mystery and several scenarios have been proposed so far: among them, primordial phase transitions, structure-formation shocks and galactic outflows. In this work, we investigate how efficiently galactic winds can provide an intense and widespread 'seed' magnetization. This may be used to explain the magnetic fields observed today in clusters of galaxies and in the intergalactic medium (IGM). We use semi-analytic simulations of magnetized galactic winds coupled to high-resolution N-body simulations of structure formation to estimate lower and upper limits for the fraction of the IGM which can be magnetized up to a specified level. We find that galactic winds are able to seed a substantial fraction of the cosmic volume with magnetic fields. Most regions affected by winds have magnetic fields in the range $10^{-12} < B < 10^{-8}$ G, while higher seed fields can be obtained only rarely and in close proximity to wind-blowing galaxies. These seed fields are sufficiently intense for a moderately efficient turbulent dynamo to amplify them to the observed values. The volume-filling factor of the magnetized regions strongly depends on the efficiency of winds to load mass from the ambient medium. However, winds never completely fill the whole Universe and pristine gas can be found in cosmic voids and regions unaffected by feedback even at z = 0. This means that, in principle, there might be the possibility to probe the existence of primordial magnetic fields in such regions.

Key words: intergalactic medium – galaxies: magnetic fields – cosmology: theory.

void 領域に初期磁場

Magnetic field seeding by 🛃

Serena Bertone,^{1,2★} Corina Vo_§

¹Astronomy Centre, University of Sussex, Falmer, Brigh
 ²Max-Planck-Institut f
ür Astrophysik, Karl Schwarzschi
 ³Stichting ASTRON, PO Box 2, NL–7990 AA Dwingelou

Accepted 2006 April 21. Received 2006 April 21; in ori



efficiency of winds to load mass from the ambient medium. However, winds never completely fill the whole Universe and pristine gas can be found in cosmic voids and regions unaffected by feedback even at z = 0. This means that, in principle, there might be the possibility to probe the existence of primordial magnetic fields in such regions.

Key words: intergalactic medium - galaxies: magnetic fields - cosmology: theory.

高エネルギー 線を用いて微弱磁場を測る (R. Plaga, Nature 1995)



物理学会 – p.29/34

Our model to predict delayed emission

improved version of Razzaque et al., ApJ (2004)

$$\frac{d^{2}N_{delay}^{IC}}{dtdE_{\gamma}} = \int d\gamma_{e} \frac{dN_{e}}{d\gamma_{e}dt} t_{GRB} \frac{d^{2}N_{\gamma}^{IC}}{dtdE_{\gamma}} \left(\frac{t_{IC}}{\Delta t}\right) e^{-\tau_{\gamma\gamma}(E_{\gamma})}$$

$$\uparrow$$

$$delayed \Delta t + re-emitting \gamma-rays by IC$$

$$\uparrow$$

$$\epsilon_{\gamma} \rightarrow 2m_{e}\gamma_{e} (e^{\pm} \textbf{\pm d}), \ \tau_{\gamma\gamma}: \text{ optical depth of IRB}$$

$$\frac{d^{2}N_{e}}{2m_{e}d\gamma_{e}dt} = \frac{L_{\gamma,\text{iso}}}{4\pi D_{L}^{2}} \frac{\alpha-1}{\epsilon_{\gamma,\text{pk}}^{2}} \left(\frac{2m_{e}\gamma_{e}}{\epsilon_{\gamma,\text{pk}}}\right)^{-\alpha} \left(1 - e^{-\tau_{\gamma\gamma}(2m_{e}\gamma_{e})}\right)$$

$$\uparrow$$

simplest power law (synchrotron) spectrum

$$\frac{d^2 N_{\gamma}}{d\epsilon_{\gamma} dt} = \frac{L_{\gamma, \rm iso}}{4\pi D_{\rm L}^2} \frac{\alpha - 1}{\epsilon_{\gamma, \rm pk}^2} \left(\frac{\epsilon_{\gamma}}{\epsilon_{\gamma, \rm pk}}\right)^{-\alpha} \left(\epsilon_{\gamma} > \epsilon_{\gamma, \rm pk}\right)$$

物理学会 – p.30/34



遅延光子のスペクトル (B=10⁻²⁰G; z=0.1 (left), z=0.5 (right))

K. Ichiki et al., in progress



- IRB absorption will be important $E_{\gamma} > 100$ GeV, but not significant for γ -ray bust at z = 0.1.
- (Time-dependent) spectrum should have a different shape from that by delayed afterglow.

遅延光子のスペクトル (B=10⁻²⁰G; z=1.0 (left), z=3.0 (right))

物理学会 – p.32/34

K. Ichiki et al., in progress



IRB absorption will be important $E_{\gamma} > 100$ GeV.

Sensitivities



物理学会 - p.33/34

Summary

9 銀河以上のスケールで、 μ G 程度の宇宙磁場が観測されている

- 宇宙磁場の起源は今だ未解決
 - 宇宙論起源? (predictable (but model dependent))
 - 天体物理起源? (well known physics, but highly uncertain)
 - **9** 宇宙論的密度揺らぎは自然に磁場を生成する $(B \lesssim 10^{-20} \text{G})$
 - 銀河ダイナモの種としては十分な磁場
 - 宇宙論的摂動論の枠組で精緻に計算可能
 - **初期密度揺らぎの新しい** probe として使える
 ■
- 宇宙論的初期磁場は CMB 揺らぎ and/or void 領域で観測される ● 宇宙論的スケールの磁場は CMB から制限 ($B \leq 5 \times 10^{-9}$ G)
- void 領域の磁場は 線バーストからの GeV-TeV 光子の遅延により観測
 $10^{-20} \leq B \leq 10^{-18}$ G 程度であれば近い将来観測可能