宇宙論的MHDシミュレーションで探る宇宙磁場の構造形成への影響

Review paper :

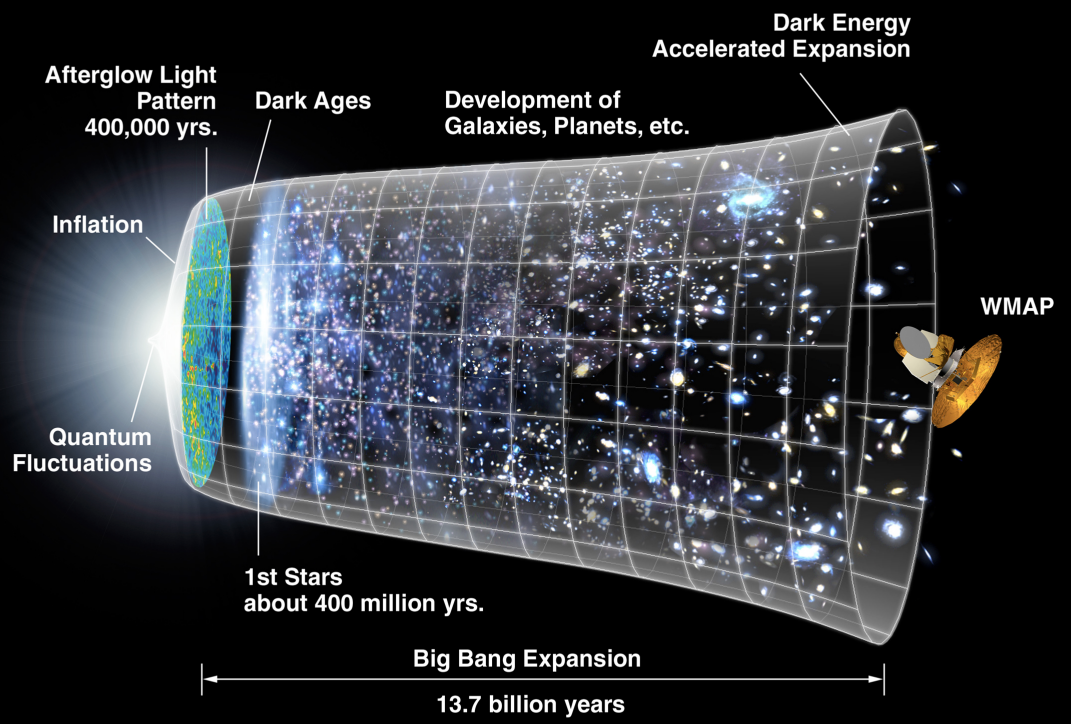
Effects of simulated cosmological magnetic fields on the galaxy population
F. Marinacci and M. Vogelsberger, 2016, MNRAS

名古屋大学大学院理学研究科　宇宙論研究室

M1　箕田鉄兵　2016/07/04

レビュー論文について

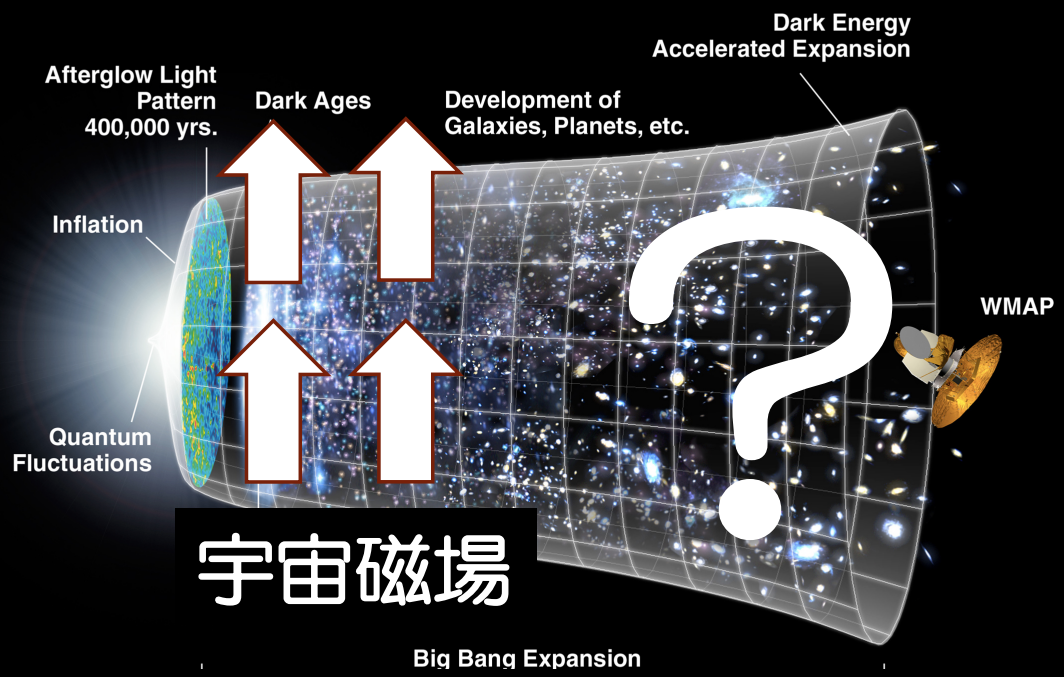
宇宙の進化・構造形成 ← ~~磁場~~



http://science.nasa.gov/missions/wmap/

レビュー論文について

宇宙の進化・構造形成 ← 磁場



手法：宇宙論的MHDシミュレーション

観測量：銀河の数、星質量関数など

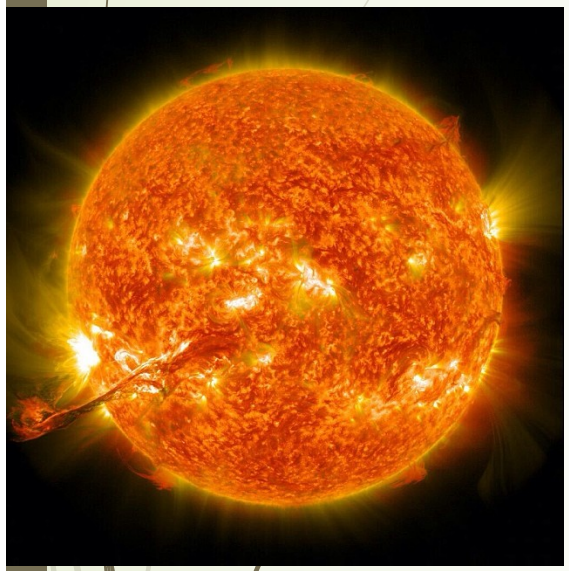
http://science.nasa.gov/missions/wmap/

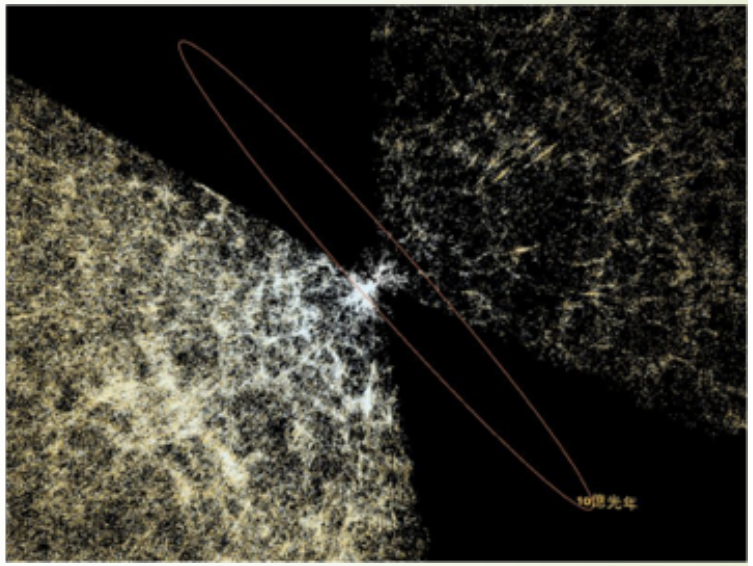
→宇宙磁場が宇宙の構造を変える！？

発表内容

- 研究背景
  - 宇宙磁場について
  - 宇宙磁場の上限値
  - 磁場と構造形成
- シミュレーションセットアップ
- 結果
- まとめ

宇宙の構造と付随する磁場





- 宇宙物理における磁場の役割は重要
- 宇宙論的磁場＝「宇宙磁場」（λ～Mpc）
  →理解が不十分（例：CMBの観測など）

http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html
http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/mtk_tutorial.htm

磁場が構造形成に与える影響

- 磁場が物質の運動に与える影響

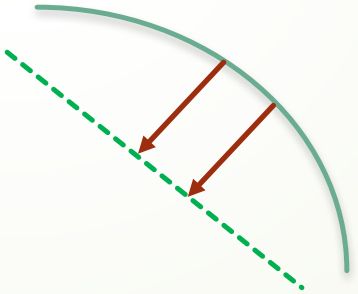
$$\mathbf{F}_{\mathrm{Lorentz}} = \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{\mathrm{c}} = \frac{(\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{B}}{4\pi} - \nabla\left(\frac{\mathrm{B}^2}{8\pi}\right)$$

磁場が構造形成に与える影響

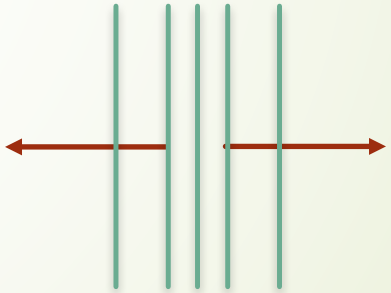
- 磁場が物質の運動に与える影響

$$\mathbf{F}_{\mathrm{Lorentz}} = \frac{\mathbf{J}\times\mathbf{B}}{\mathrm{c}} = \frac{(\mathbf{B}\cdot\nabla)\mathbf{B}}{4\pi} - \nabla\left(\frac{\mathrm{B}^2}{8\pi}\right)$$

磁気張力　　磁気圧



赤：力



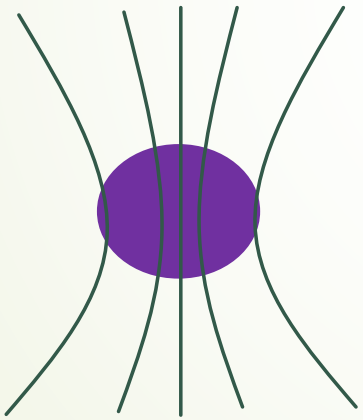
緑：磁場

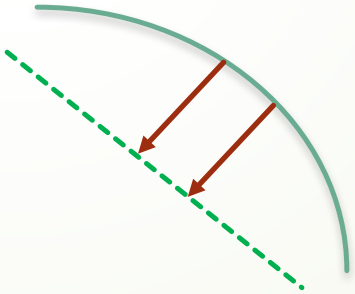
磁場が構造形成に与える影響

- 磁場が物質の運動に与える影響

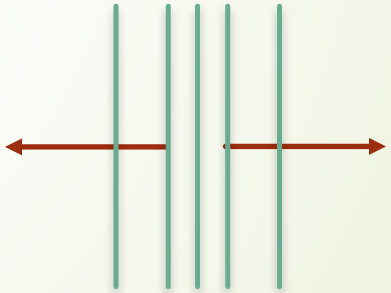
$$\mathbf{F}_{\mathrm{Lorentz}} = \frac{\mathbf{J}\times\mathbf{B}}{\mathrm{c}} = \frac{(\mathbf{B}\cdot\nabla)\mathbf{B}}{4\pi} - \nabla\left(\frac{\mathrm{B}^2}{8\pi}\right)$$

磁気張力　　磁気圧





赤：力



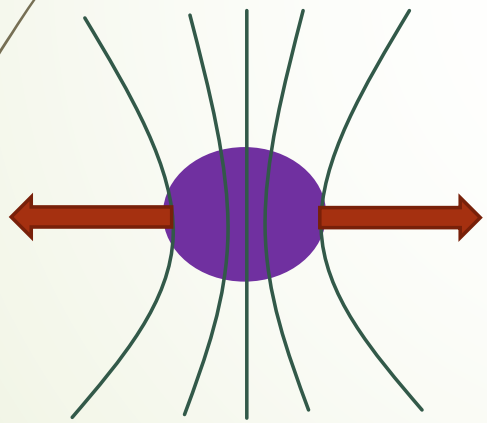
緑：磁場

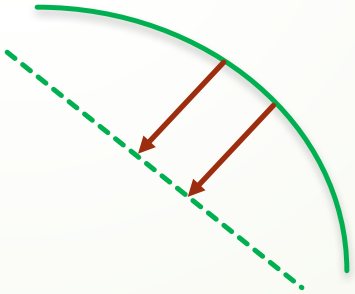
磁場が構造形成に与える影響

- 磁場が物質の運動に与える影響

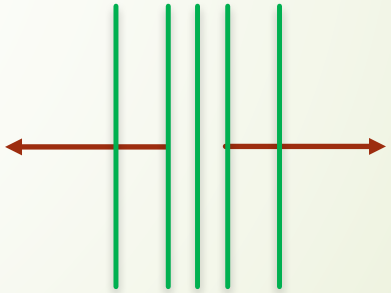
$$\mathbf{F}_{\mathrm{Lorentz}} = \frac{\mathbf{J}\times\mathbf{B}}{\mathrm{c}} = \frac{(\mathbf{B}\cdot\nabla)\mathbf{B}}{4\pi} - \nabla\left(\frac{\mathrm{B}^2}{8\pi}\right)$$

磁気張力　　磁気圧





赤：力



緑：磁場

強い宇宙磁場 → 構造形成の阻害

宇宙磁場の臨界強度

- 構造形成の促進 or 抑制

  →重力による収縮 or 圧力による膨張

熱力学的圧力

宇宙磁場の臨界強度

- 構造形成の促進 or 抑制

  →重力による収縮 or 圧力による膨張

熱力学的圧力 + 磁気圧

宇宙磁場の臨界強度

- 構造形成の促進 or 抑制

  →重力による収縮 or 圧力による膨張

  熱力学的圧力 + 磁気圧

- 構造形成に影響を及ぼす磁場の強度

  → 磁気圧 ～ 熱力学的圧力

  $$\frac{\|\boldsymbol{B}\|^2}{8\pi} \sim n\mathrm{k_B}T$$

宇宙磁場の臨界強度

- 構造形成の促進 or 抑制

  →重力による収縮 or 圧力による膨張

  熱力学的圧力 + 磁気圧

- 構造形成に影響を及ぼす磁場の強度

  → 磁気圧 ～ 熱力学的圧力

$$\frac{\|\boldsymbol{B}\|^2}{8\pi} \sim n\mathrm{k_B}T$$

Faucher-Giguere et al. 2009

- 構造形成が活発 z～6：$\|\boldsymbol{B}\| \sim 10^{-9}\mathrm{G}$

シミュレーションセットアップ

- シミュレーションの大まかな構成

  →流体計算 + 理想MHD + 銀河物理

シミュレーションセットアップ

- シミュレーションの大まかな構成

  →流体計算 + 理想MHD + 銀河物理

- 宇宙磁場の強度：

  $10^{-12}, 10^{-11}, 10^{-10}, 10^{-9}, 5\times10^{-9}, 10^{-8}\,\mathrm{G}$

  上限値

シミュレーションセットアップ

- シミュレーションの大まかな構成

  →流体計算 + 理想MHD + 銀河物理

- 宇宙磁場の強度：

  $10^{-12}, 10^{-11}, 10^{-10}, 10^{-9}, 5\times10^{-9}, 10^{-8}$ G

  上限値

- 宇宙磁場が４つの観測量に影響

  →星形成率密度, 銀河の総数, 星質量関数,

  星ハロー質量関係

シミュレーションセットアップ

Planck 2015

宇宙論パラメータ	数値
Ω_m	0.302
Ω_b	0.04751
Ω_Λ	0.698
σ_8	0.817
n_s	0.9671
h	68

$z_{init} = 127$

磁場は均一に一方向に入れる

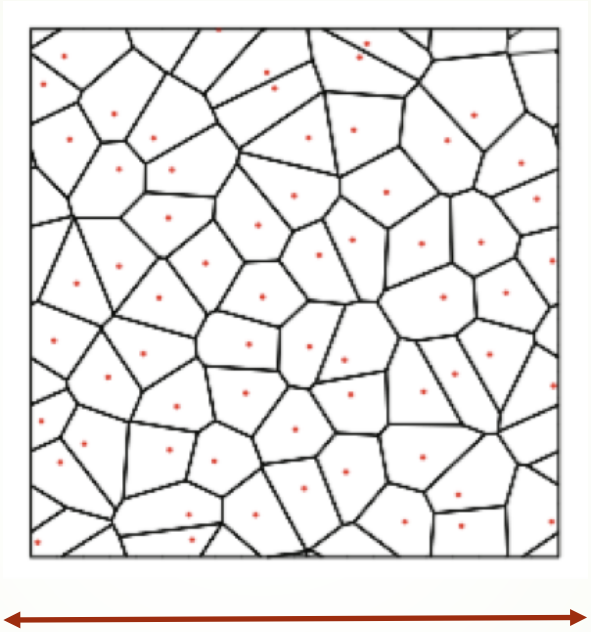
シミュレーションセットアップ

Planck 2015

宇宙論パラメータ	数値
Ω_m	0.302
Ω_b	0.04751
Ω_Λ	0.698
σ_8	0.817
n_s	0.9671
h	68

$z_{\mathrm{init}} = 127$

磁場は均一に一方向に入れる



box size:$(25h^{-1}\mathrm{Mpc})^3$

resolution: 2×256^3

cell mass DM/Baryon:

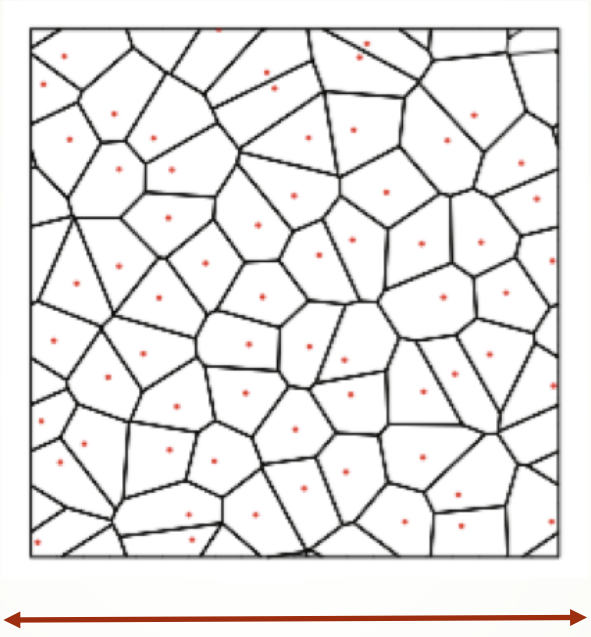
$5.86/1.25[\times10^7 h^{-1}\mathrm{M}_\odot]$

シミュレーションセットアップ

Planck 2015

宇宙論パラメータ	数値
Ω_m	0.302
Ω_b	0.04751
Ω_Λ	0.698
σ_8	0.817
n_s	0.9671
h	68

$z_{init} = 127$
磁場は均一に一方向に入れる

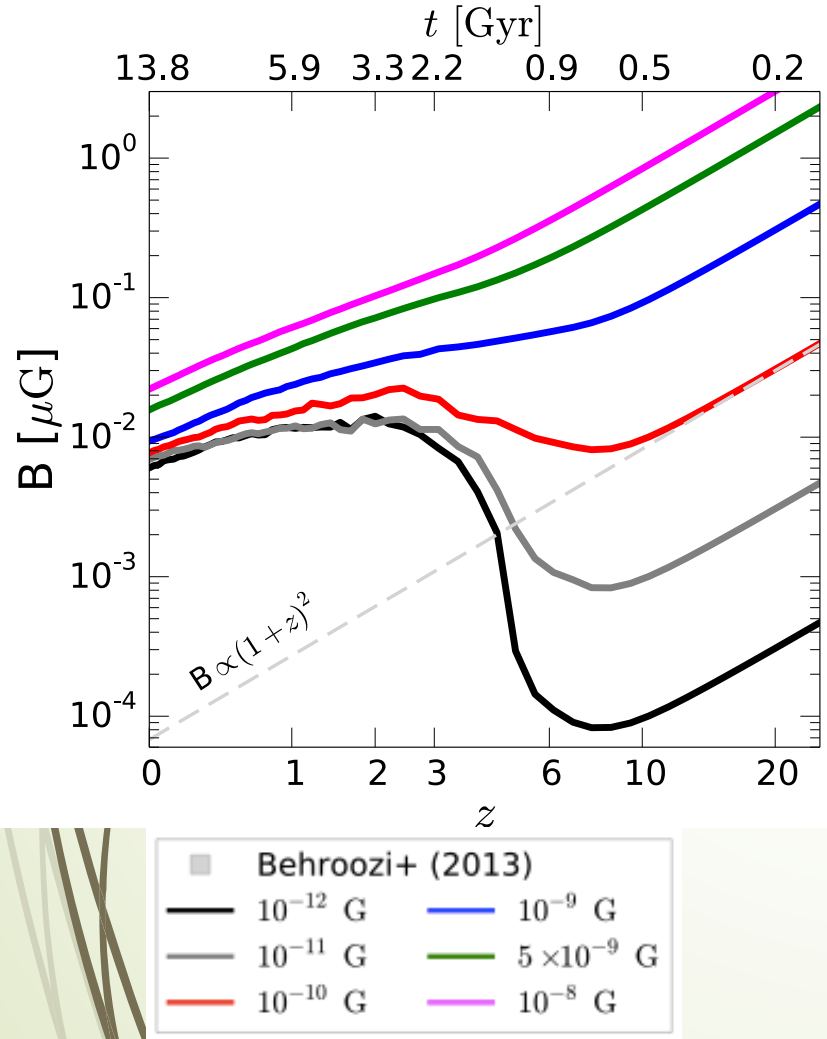


box size:$(25h^{-1}\mathrm{Mpc})^3$
resolution: 2×256^3
cell mass DM/Baryon:
$5.86/1.25[\times10^7 h^{-1}\mathrm{M}_\odot]$

宇宙論的流体計算
AREPO (Springel)
理想MHD
module based on
8-wave Powell et al.
銀河形成・進化
ILLUSTRISの手法

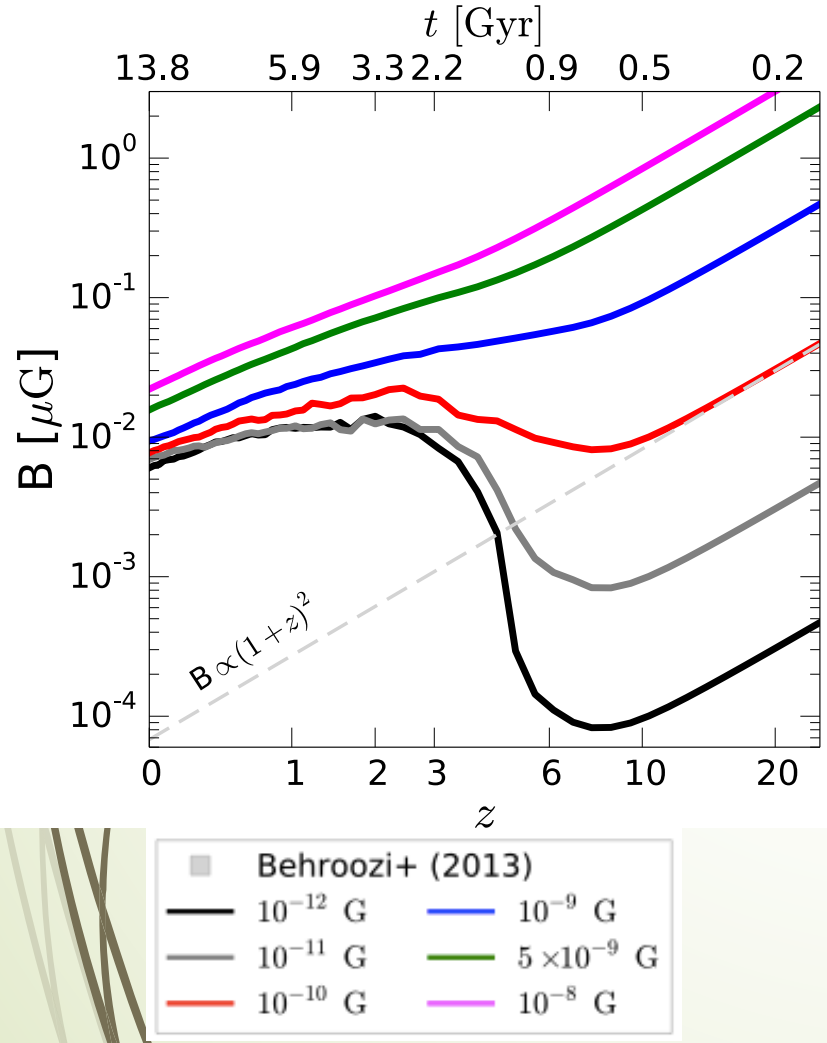
- 重元素汚染
- 恒星進化
- 銀河風スキーム
- ブラックホール
- cooling
- feedbackなど

結果１ 磁場の時間進化



- 横軸：赤方偏移
- 縦軸：磁場強度の二乗平均平方根

結果１ 磁場の時間進化



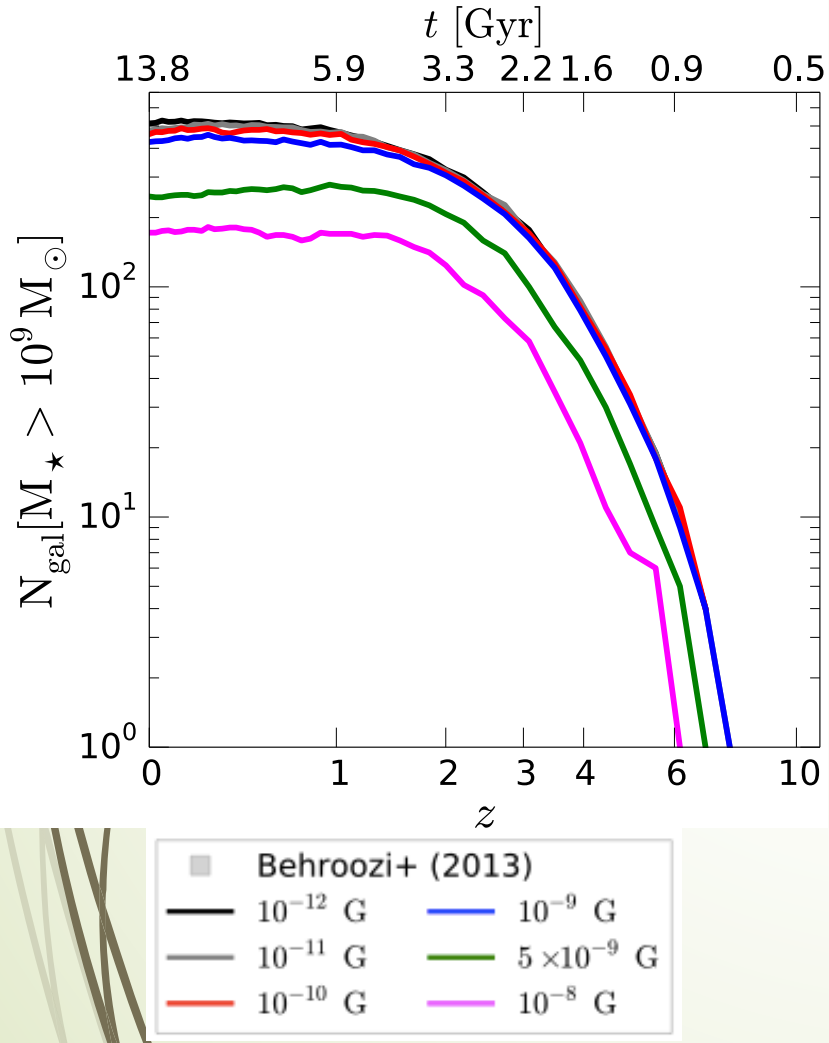
- 横軸：赤方偏移
- 縦軸：磁場強度の二乗平均平方根
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大

  →穏やかに減少
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより小

  →z~6で急激に増幅（構造形成）

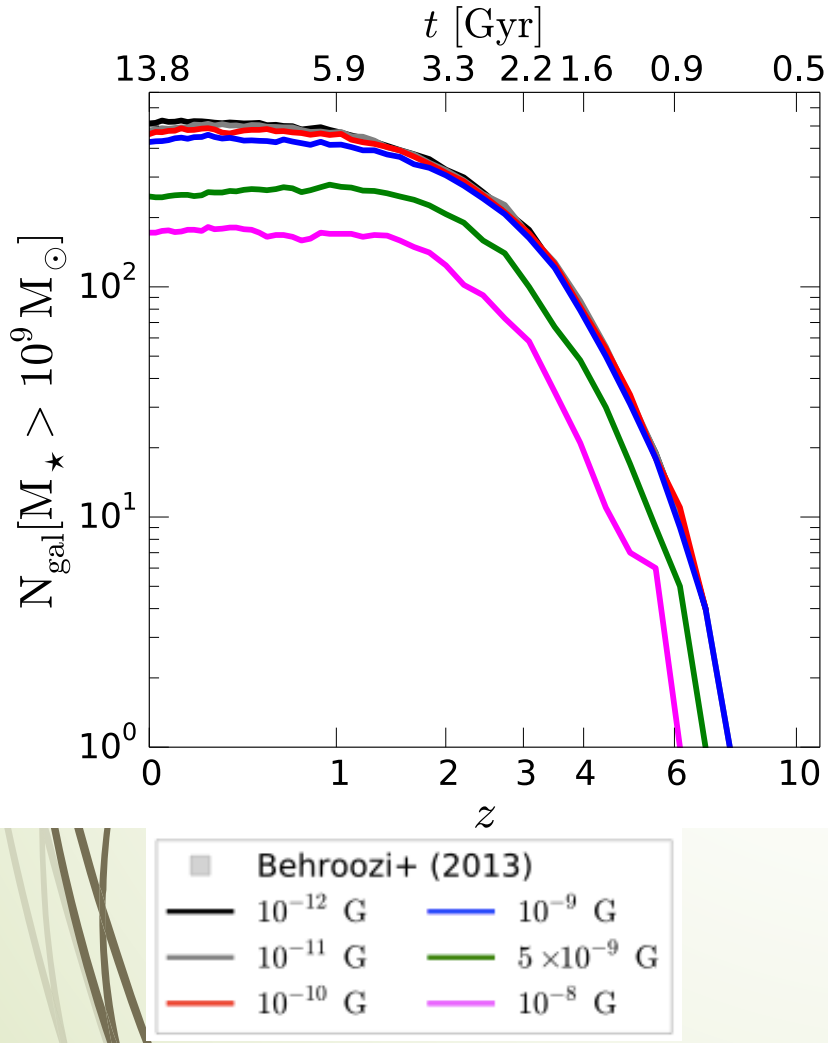
  →10nGほどで増幅がなくなる

結果2 総銀河数



- 横軸：赤方偏移
- 縦軸：星質量が$10^9 M_\odot$より大きい銀河の総数

結果２ 総銀河数



- 横軸：赤方偏移
- 縦軸：星質量が$10^9 M_\odot$より大きい銀河の総数
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大

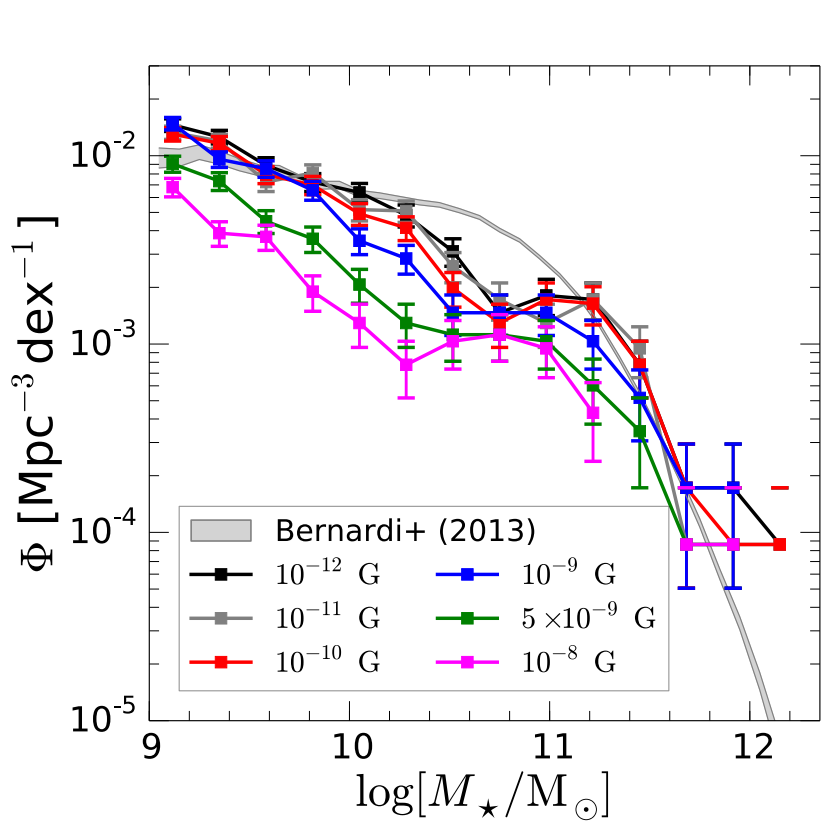
  →全てのzで総銀河数が低下
- 磁場が臨界強度

  → z~2以降で少しだけ低下

  →星質量の下限値によらない

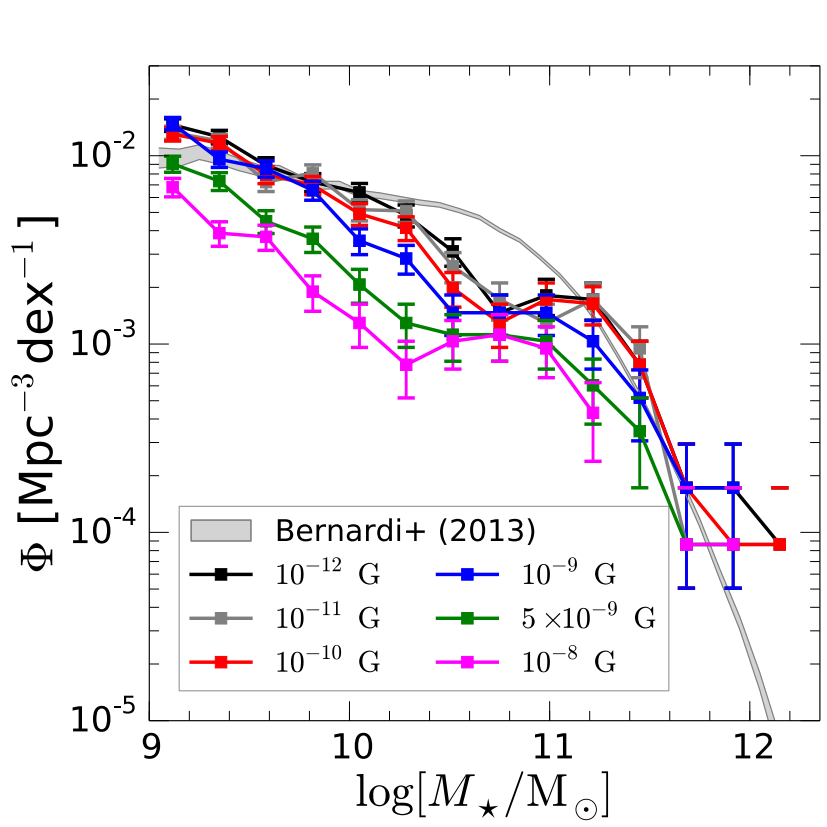
  （$10^9 M_\odot < M_{\star,\min} < 10^{10} M_\odot$）

結果３ 現在の銀河の星質量関数



- 横軸：銀河の星質量
- 縦軸：銀河の数密度

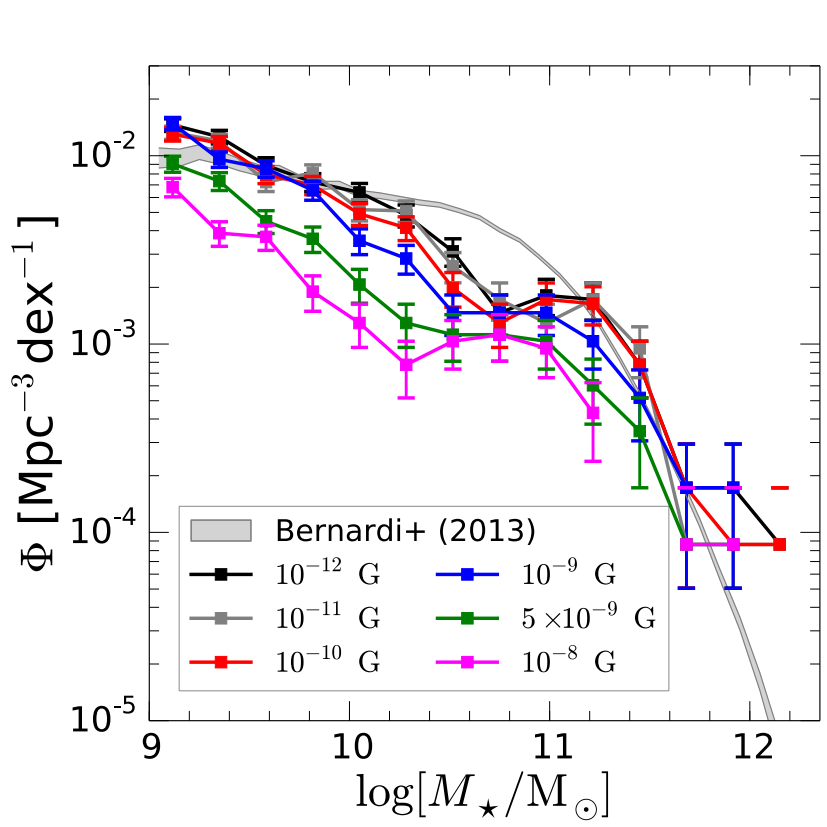
結果３ 現在の銀河の星質量関数



- 横軸：銀河の星質量
- 縦軸：銀河の数密度
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大

  →銀河の星質量関数が低下

結果３ 現在の銀河の星質量関数

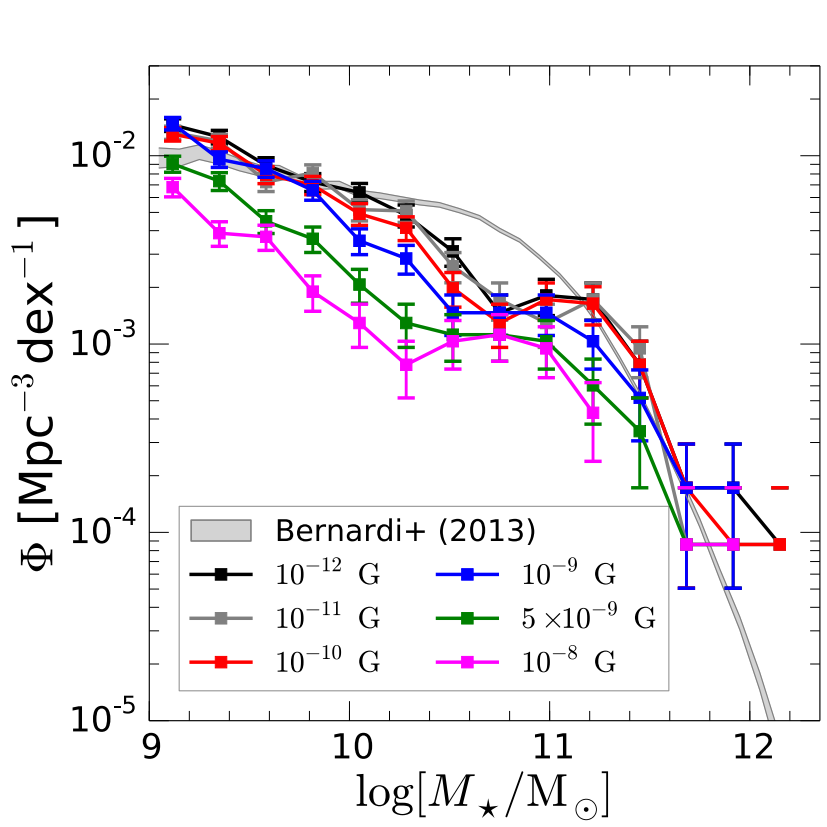


- 横軸：銀河の星質量
- 縦軸：銀河の数密度
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大

  →銀河の星質量関数が低下
- 小質量の銀河（$< 10^{10.5}\mathrm{M}_\odot$）

  →磁場によって形成が阻害

結果３ 現在の銀河の星質量関数



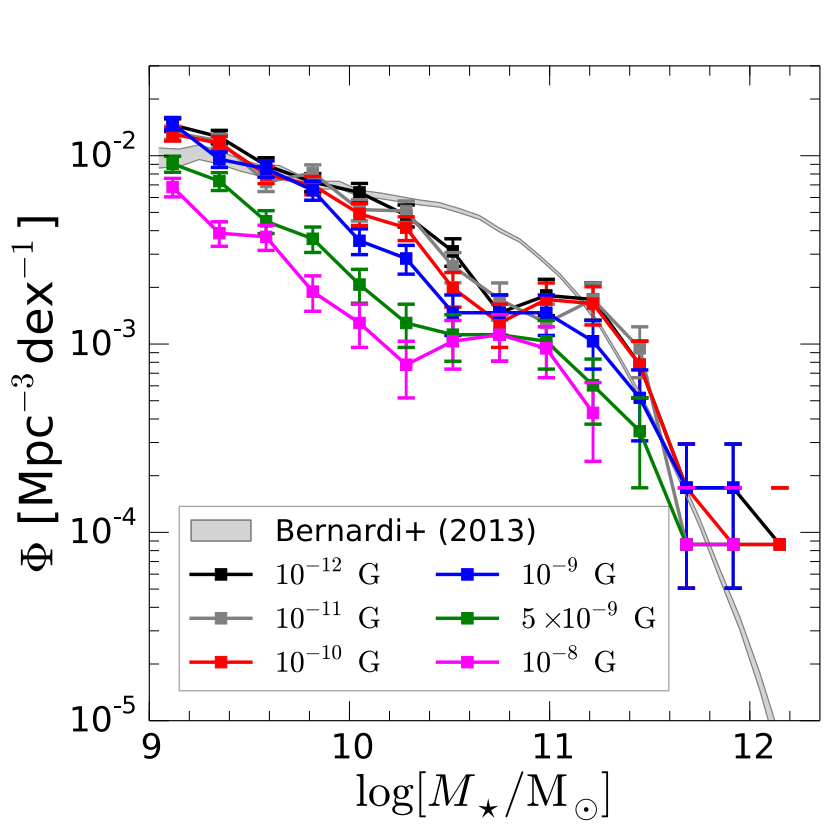
- 横軸：銀河の星質量
- 縦軸：銀河の数密度
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大

  →銀河の星質量関数が低下
- 小質量の銀河（$< 10^{10.5}\mathrm{M}_\odot$）

  →磁場によって形成が阻害
- 中質量の銀河（$\sim 10^{10.5}\mathrm{M}_\odot$）

  →磁場の影響が低下

結果３ 現在の銀河の星質量関数



- 横軸：銀河の星質量
- 縦軸：銀河の数密度
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大

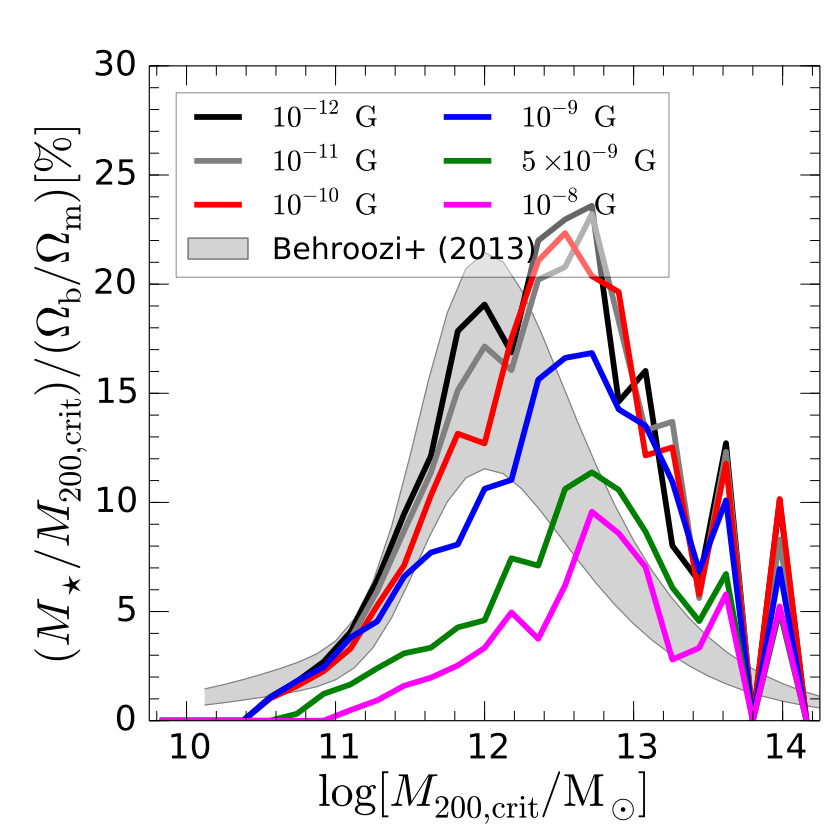
  →銀河の星質量関数が低下
- 小質量の銀河（$< 10^{10.5}\mathrm{M}_\odot$）

  →磁場によって形成が阻害
- 中質量の銀河（$\sim 10^{10.5}\mathrm{M}_\odot$）

  →磁場の影響が低下
- 大質量の銀河（$> 10^{10.5}\mathrm{M}_\odot$）

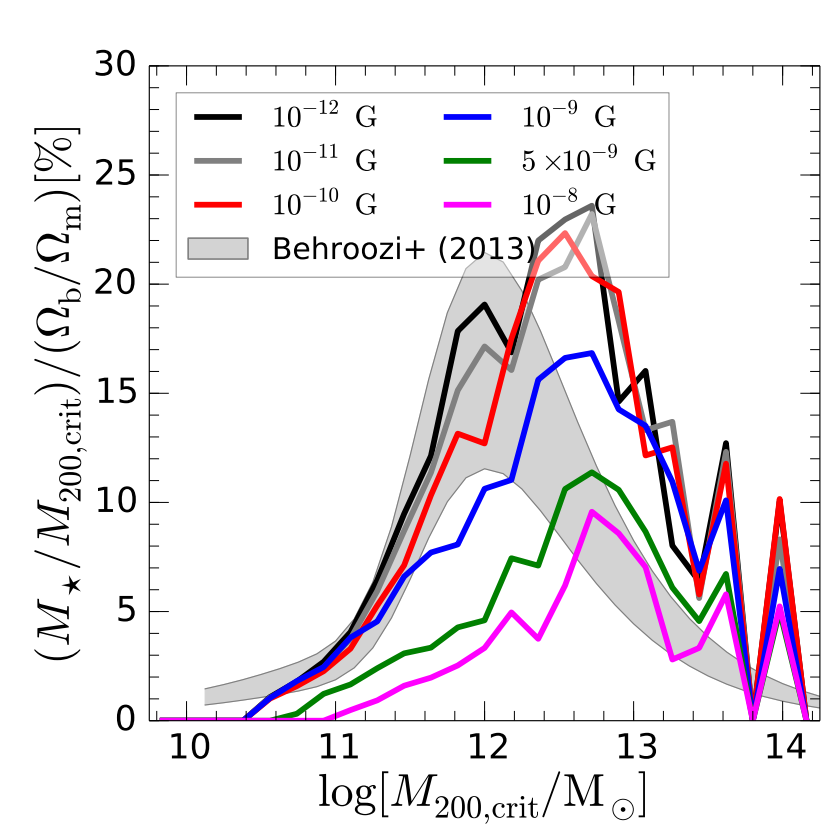
  →合体による生成のため減少

結果４ 銀河の星ハロー質量関係



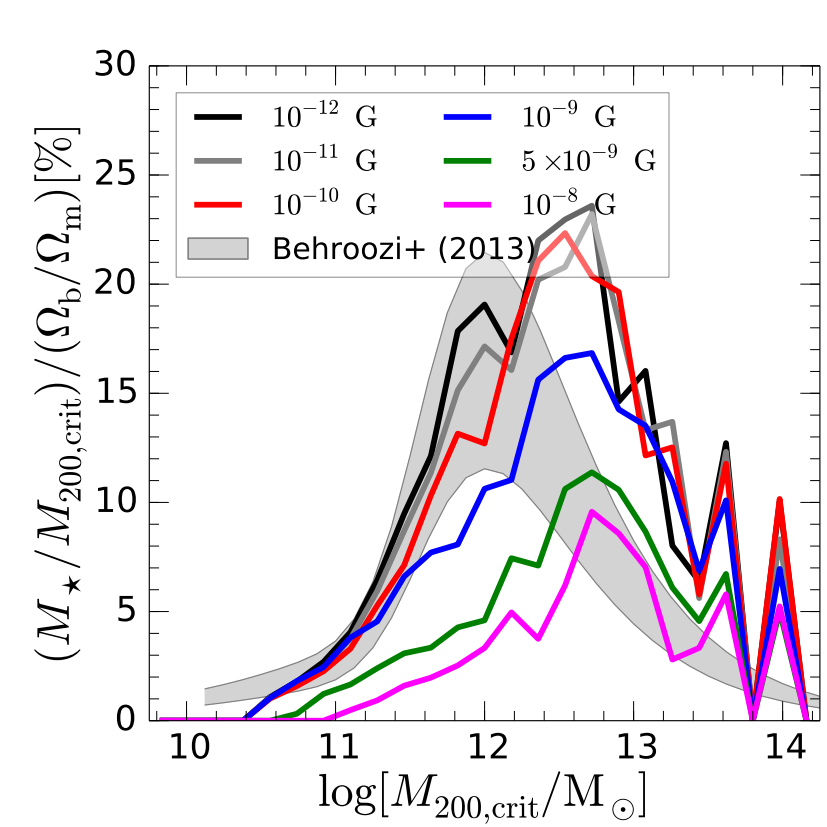
- 横軸：ハローの質量
- 縦軸：ハローに対する星質量比（宇宙全体のバリオン物質比で規格化）

結果４ 銀河の星ハロー質量関係



- 横軸：ハローの質量
- 縦軸：ハローに対する星質量比（宇宙全体のバリオン物質比で規格化）
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}G以上
  →全てのハロー質量で星質量比が減少
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}G未満
  →磁場の影響が低下

結果４ 銀河の星ハロー質量関係



- 横軸：ハローの質量
- 縦軸：ハローに対する星質量比（宇宙全体のバリオン物質比で規格化）
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}G以上
  →全てのハロー質量で星質量比が減少
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}G未満
  →磁場の影響が低下
- 星質量比を最大にするハローの質量が観測と不一致

  →銀河風、フィードバック？

まとめ

- 宇宙論的構造形成シミュレーションを行い、宇宙磁場の強度による構造形成への影響を見積もった
- 宇宙磁場の強度が1nGを超えると、構造形成を大きく妨げ、銀河の総数、星形成率密度、銀河の星質量関数、銀河の星ハロー質量関係を低下させることがわかった
- 観測による宇宙磁場の強度の見積もりや制限となる有用な手法の一つ

END

銀河磁場の観測

- ファラデー回転
- シンクロトロン放射

磁場の散逸のタイムスケール

- オーム散逸
- 両極性散逸

宇宙磁場の上限値

- 宇宙磁場と銀河磁場

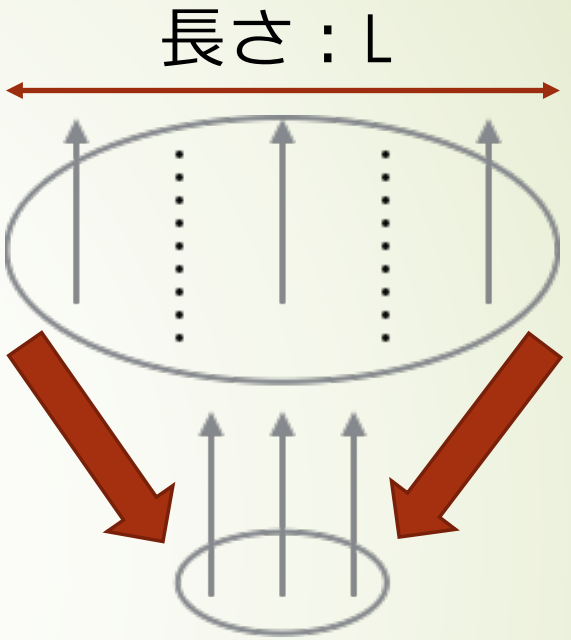
$$|B_{\rm cos}| = |B_{\rm gal}| \left(\frac{\rho_{\rm cos}}{\rho_{\rm gal}} \right)^{2/3}$$

cos：宇宙、gal：銀河

- 銀河磁場の強度 ～ $10\mu G$
- 銀河の平均密度 ～ $10^6 \rho_{\rm crit}$
- 宇宙の平均密度 ～ $\rho_{\rm crit}$

$$\|\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{\cos}}\| \sim \mathbf{1nG}$$

- 銀河による磁場の増幅→この強度は上限値



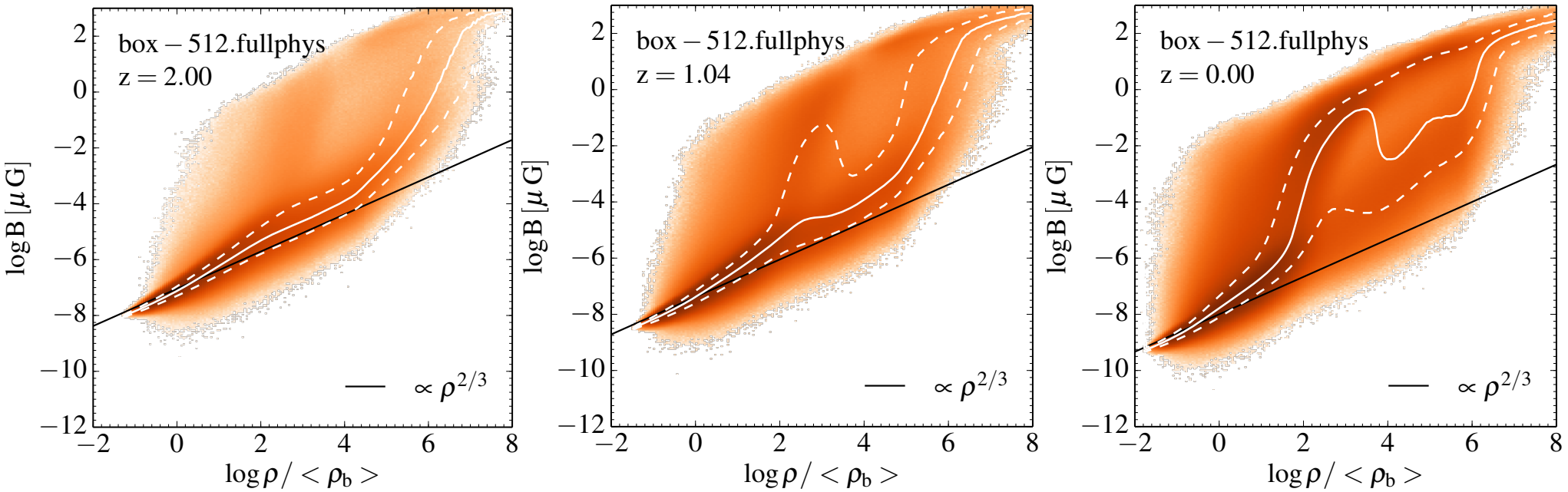
理想MHDを仮定
→ Flux保存
→ $B \propto L^{-2}$
$\rho \propto L^{-3}$
B：磁場の強度
ρ：物質密度

宇宙論パラメータの求め方

- 余裕があれば

磁場の時間進化（先行研究）

Marinacci et al. MNRAS, 453, 3999(2015)



- 初期磁場は10^{-14}G
- 横軸：バリオン密度、縦軸：磁場
- 赤：ガス質量、白：磁場、黒：理想MHD

銀河・星の判定方法

- 銀河の判定条件

  →ハローカタログ*subfind*

  Friend Of Friend

- 星の判定条件

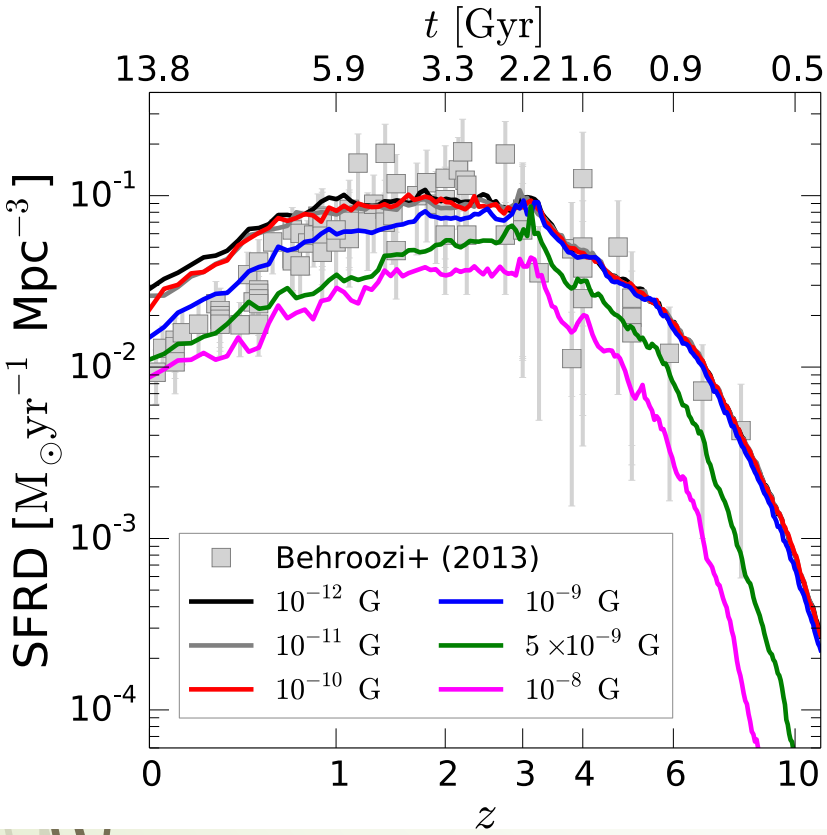
  →密度 $0.13\ \mathrm{cm}^3$ 以上

  形成時間 $2.2\ \mathrm{Gyr}$ 以下

取り入れた銀河物理

- 宇宙論的構造形成シミュレーションを行い、宇宙磁場の強度による構造形成への影響を見積もった
- 宇宙磁場の強度が1nGを超えると、構造形成を大きく妨げ、銀河の総数、星形成率密度、銀河の星質量関数、銀河の星ハロー質量関係を低下させることがわかった
- 観測による宇宙磁場の強度の見積もりや制限となる有用な手法の一つ

結果1.5 宇宙の星形成率密度



- 横軸：赤方偏移
- 縦軸：星形成率密度
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより大
  →全てのzで星形成率密度が低下
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}Gより小
  →星形成率密度がほぼ同じ
- 宇宙磁場の強度が10^{-9}G
  →中間的なふるまい
  （z~3以降低下が始まる）