

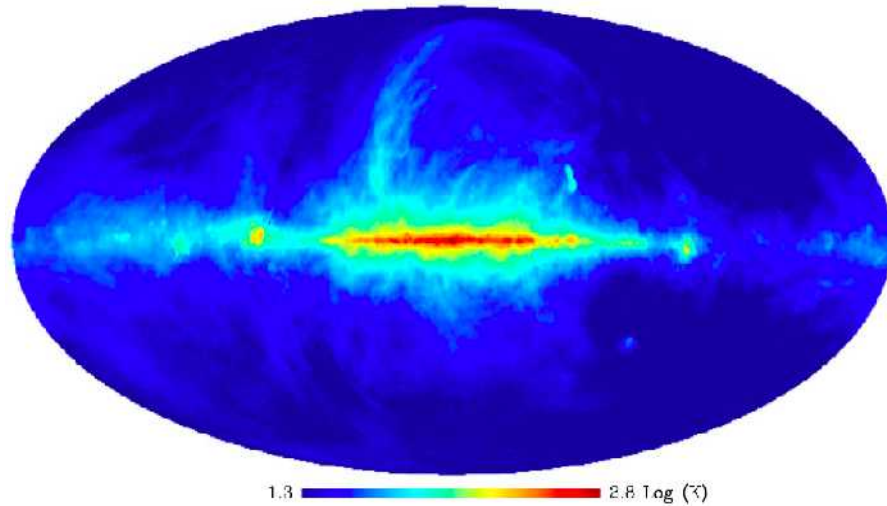
銀河ダイナモの大局的3次元数値実験

工藤 祐己(千葉大学)
町田 真美(九州大学), 服部 誠(東北大学)
松元 亮治(千葉大学)

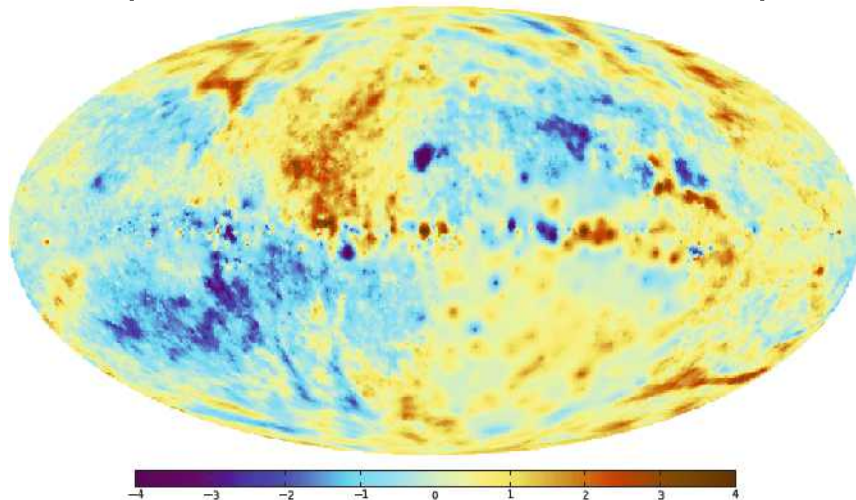
渦巻(円盤)銀河の磁場構造

天の川銀河

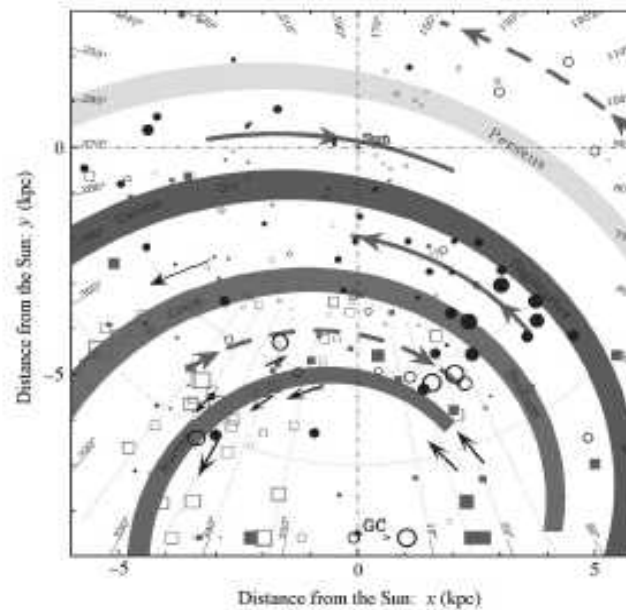
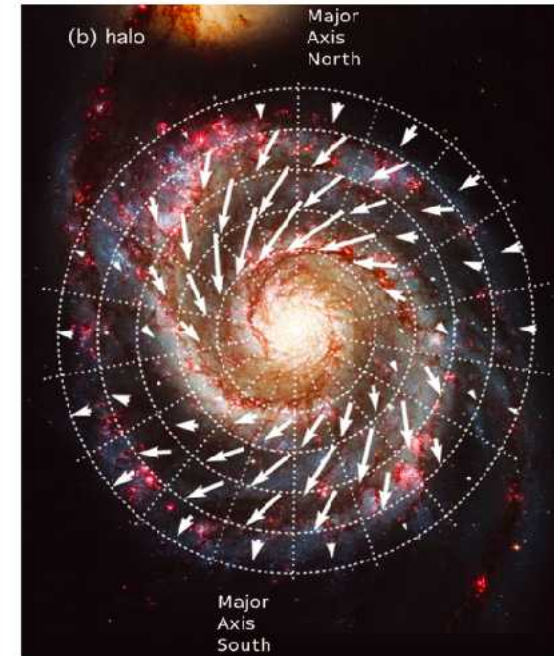
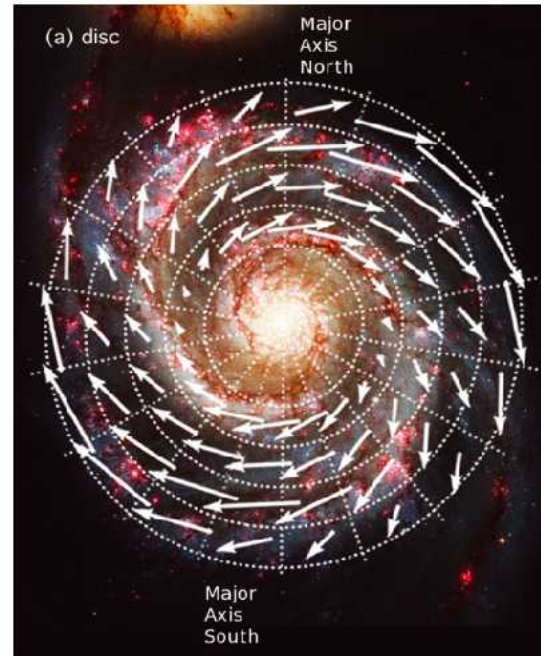
シンクロトロン放射 405[MHz]
(Waelkens et al. 2009)



ローテーションメジャー
(Opparman et al. 2012)



子持ち銀河(M51) (Fletcher et al.2011)
円盤とハローで磁場の向きが異なる



天の川銀河
(Han et al. 2007)

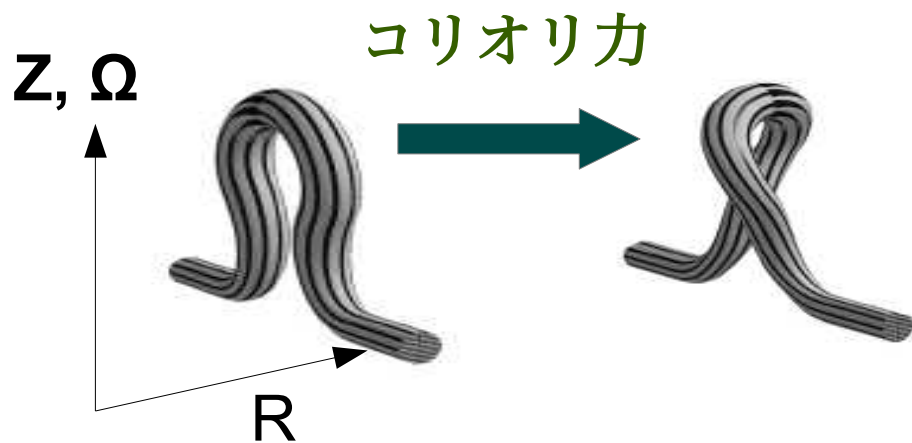
腕毎に磁場の
向きが異なる

銀河ダイナモ (磁場の増幅・維持機構)

$\alpha\Omega$ ダイナモ

α 効果

- ・ 磁気乱流
- ・ Parker (1955, 1971)



$$\left(B_z \right) B_r$$

α 効果



Ω 効果
差動回転

$$B_\varphi$$

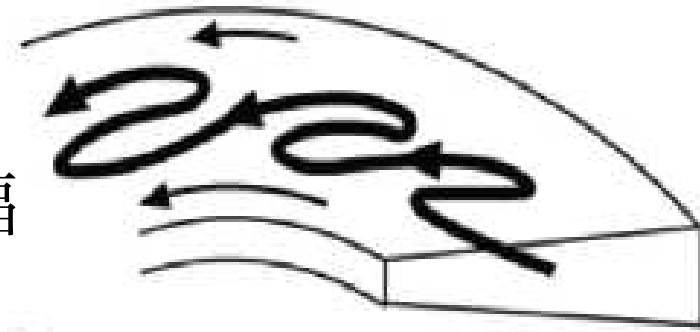
MRI-Parker dynamo

Nishikori et al. 2006, Machida et al. 2013

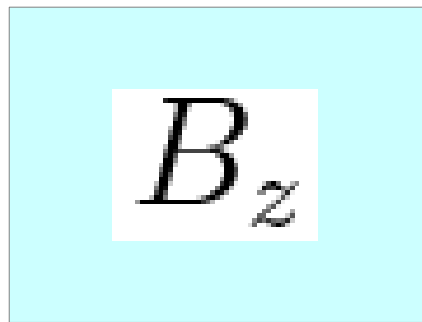
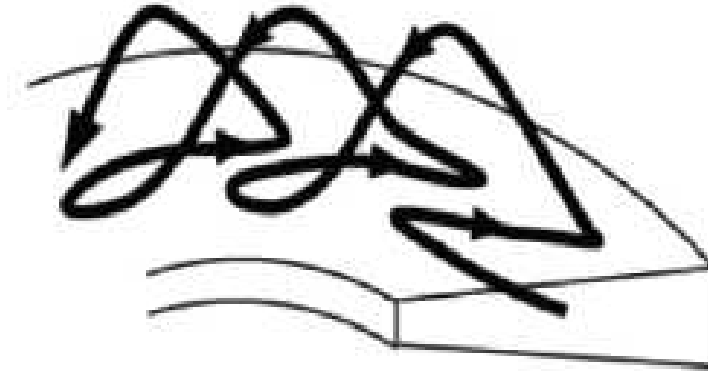
(1) 磁気回転不安定性(MRI)による磁場の増幅

(2) パーカー不安定性による磁束の流出

(1) MRI



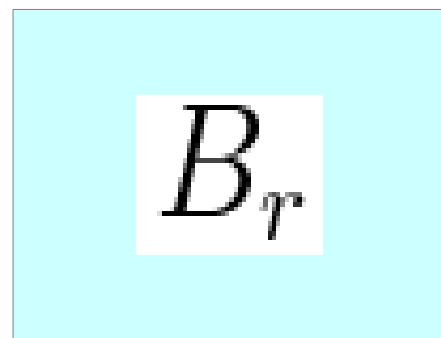
(2) Parker instability



パーカー不安定性



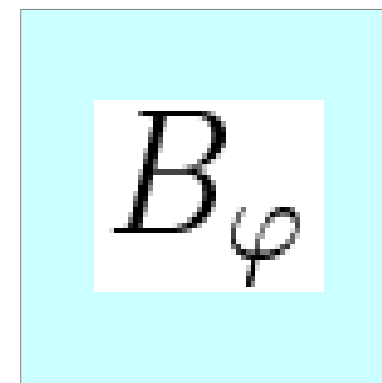
MRI



MRI



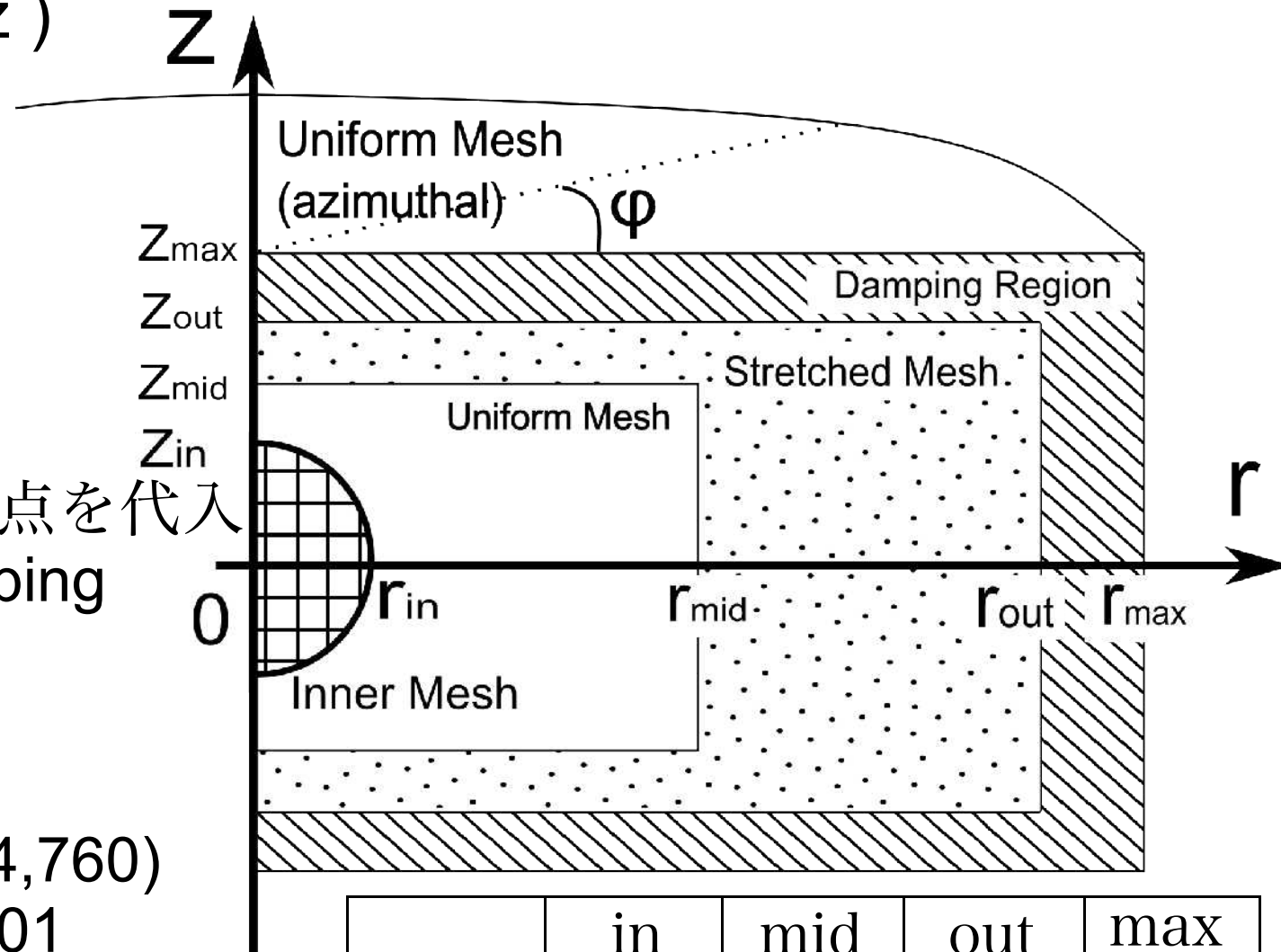
Ω 効果(差動回転)



B_φ

Simulation Set-Up

- 円筒座標系(r, φ, z)
- 計算領域
 - $0 < r < 30$ [kpc]
 - $0 < \varphi < 2\pi$
 - $-11 < z < 11$ [kpc]
- 境界条件
 - r- 内側 : 吸収境界
 - r- 軸 : 180度離れた点を代入
 - r- 外側 : wave damping
 - z : wave damping
 - φ : 周期境界
- グリッド数
 - $(N_r, N_\varphi, N_z) = (384, 64, 760)$
 - $\Delta r = 0.04$ 、 $\Delta z = 0.01$
- $r > 8$ [kpc], $|z| > 2.5$ [kpc]
で非一様メッシュ
- 磁気流体スキーム
CANS+ (HLLD法 + MP5法)



	in	mid	out	max
r [kpc]	0.8	8.28	27.28	29.38
z [kpc]	1.28	2.43	10.13	10.45

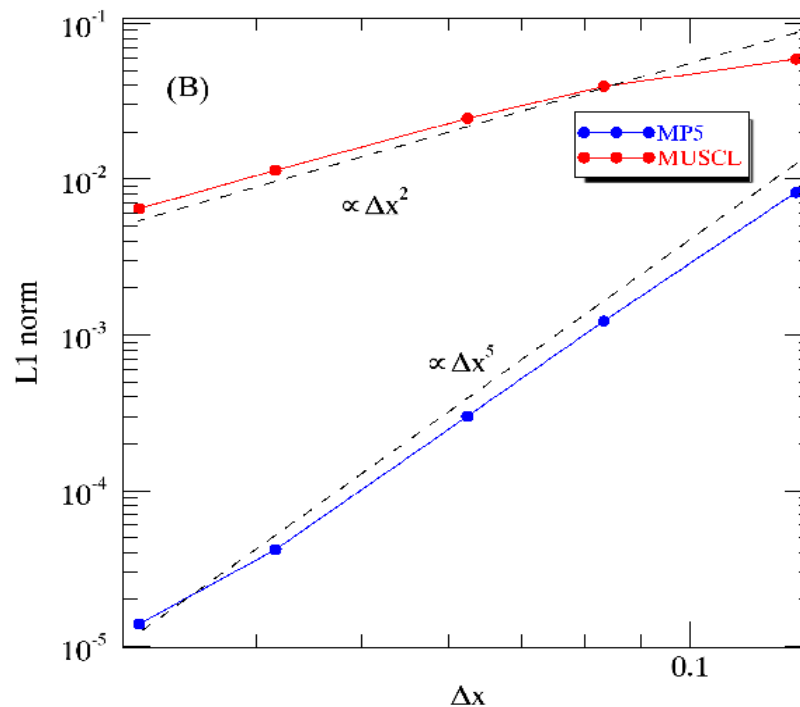
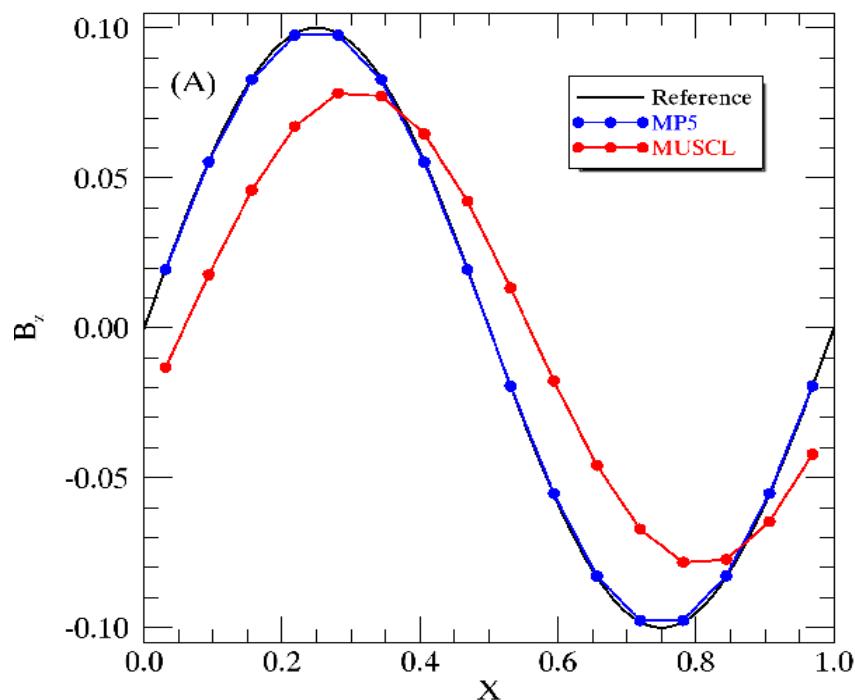
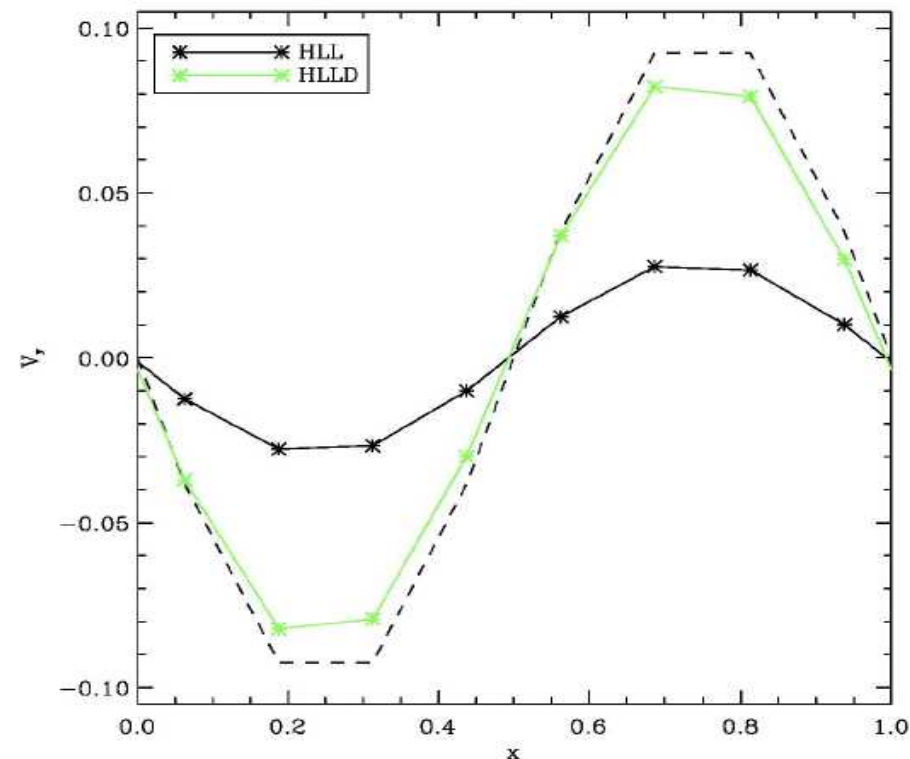
CANS+

アルフベン波伝播テスト

松本洋介先生のスライドより

右：数値解法(HLL V.S. **HLLD**)

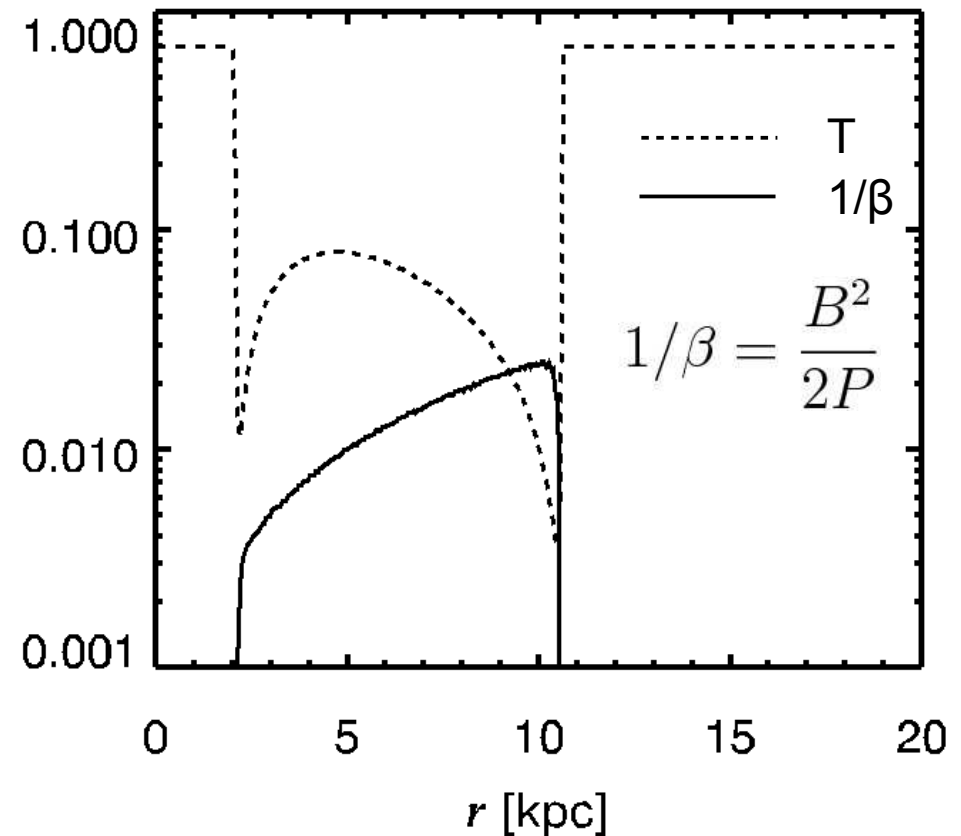
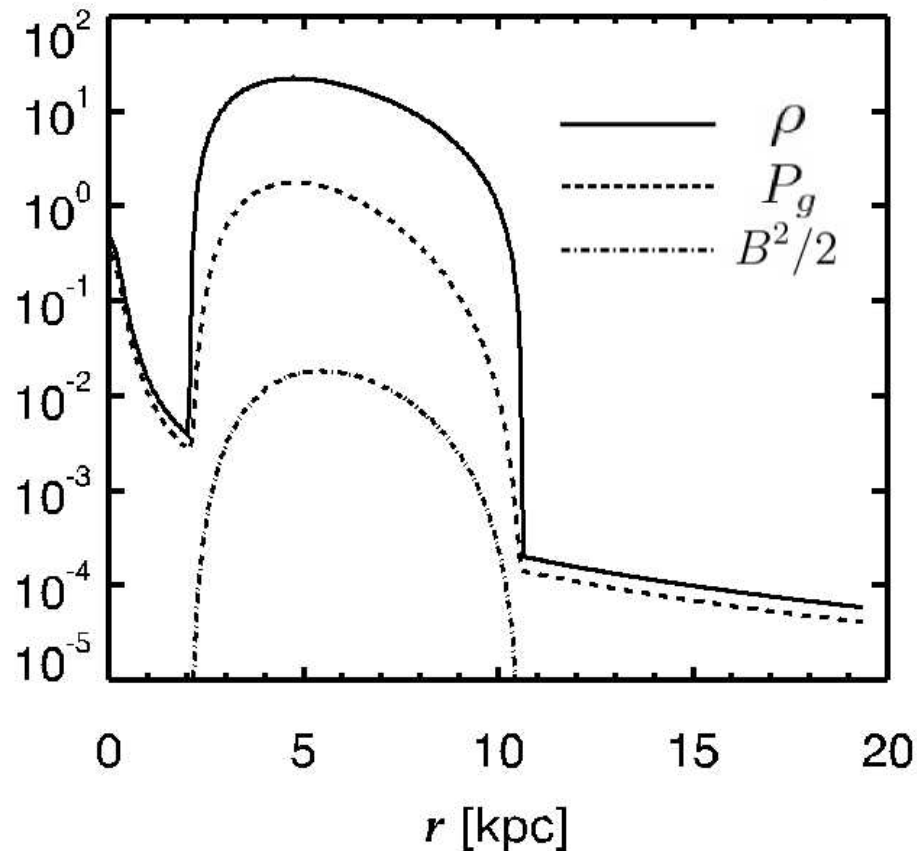
下：精度(**2次** V.S. **5次**)



モデルと初期条件

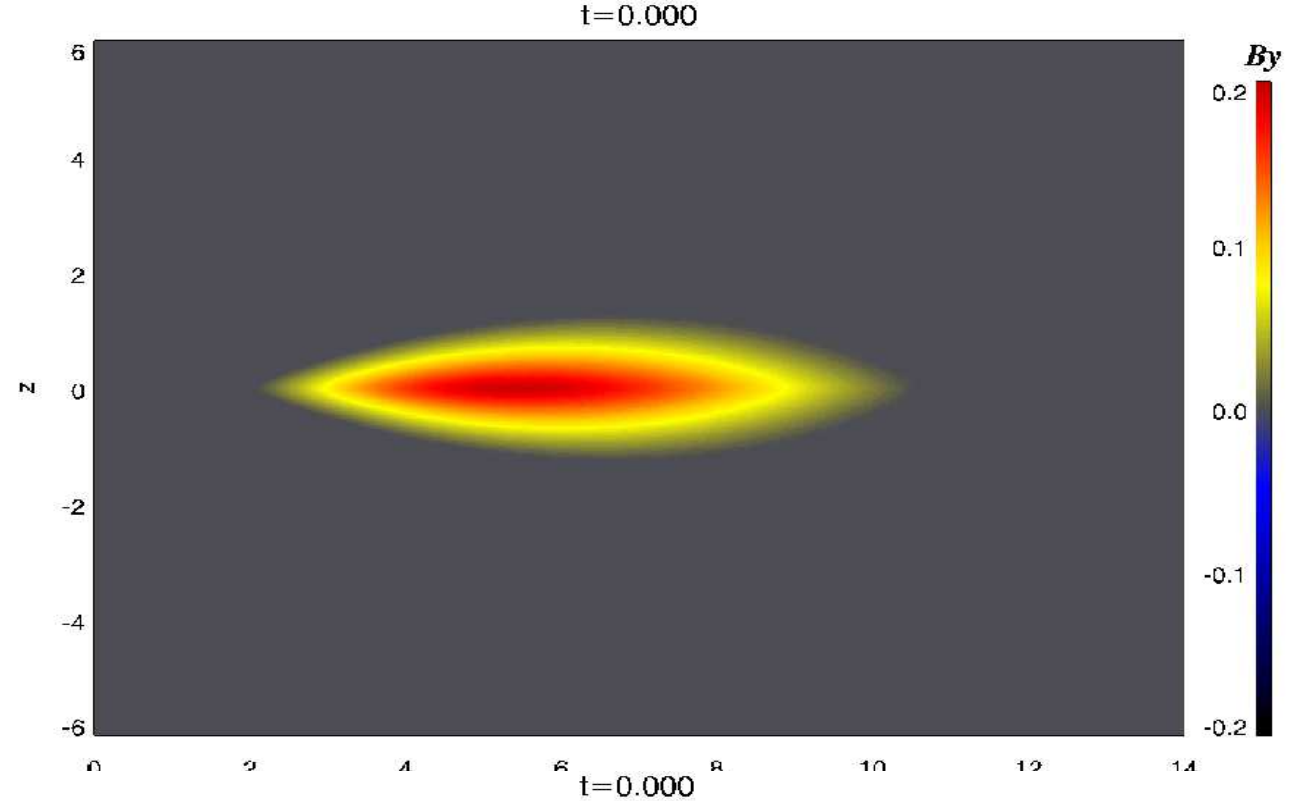
- 初期磁場は方位角成分のみ
- 軸対称重力ポテンシャル(宮本-永井)
- 磁場に対してランダム摂動
- 初期の角速度分布を与える $v = r^{-0.12}$
- 初期分布は軸対称な平衡解

赤道面 ($z=0$)における初期物理量分布

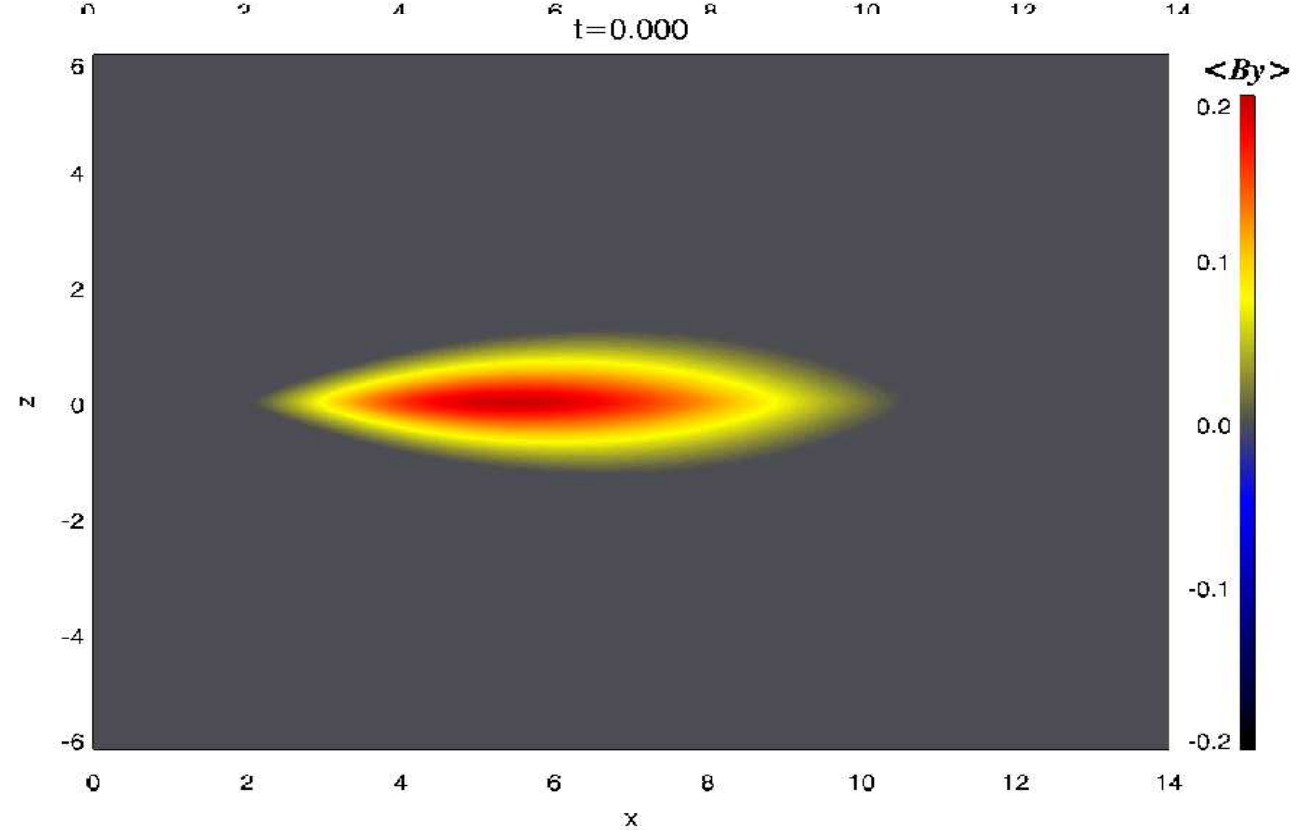


方位角磁場(1)

方位角磁場 B_ϕ

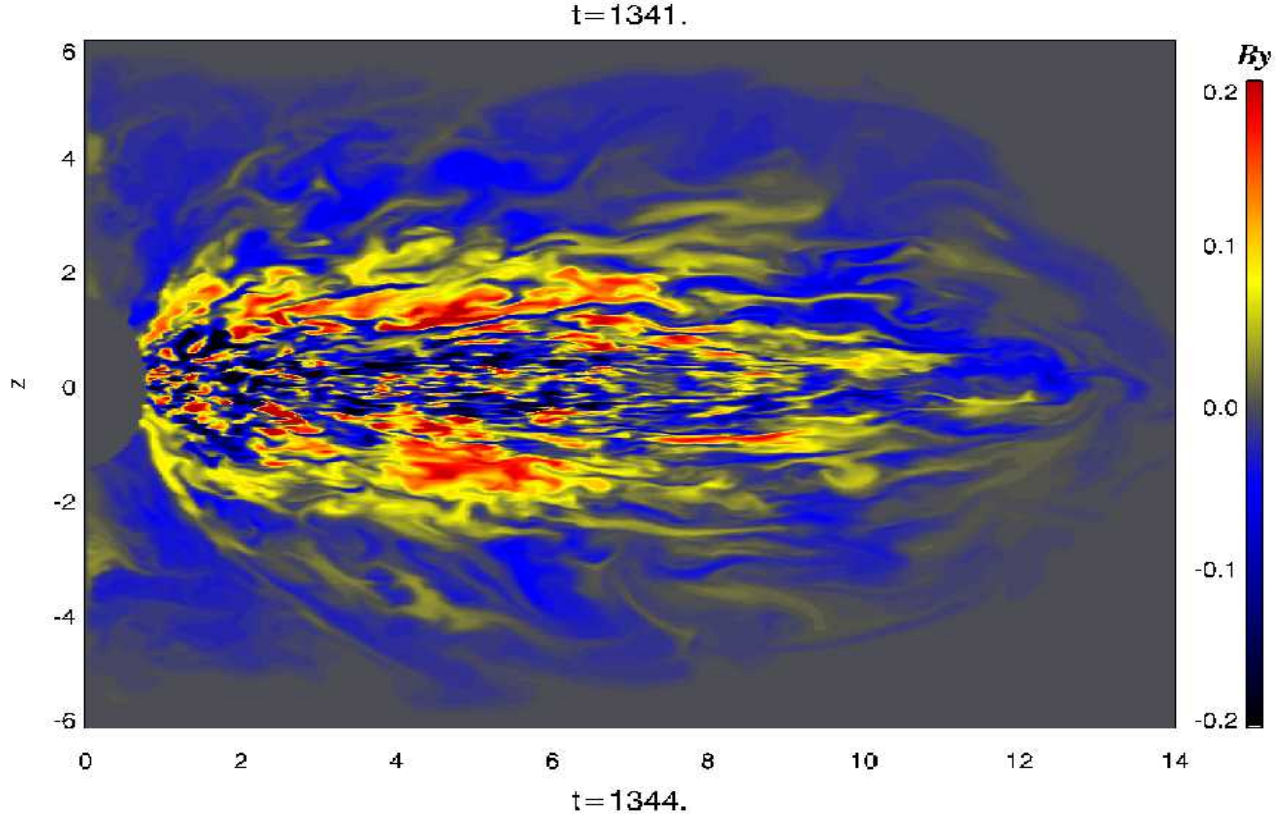


方位角磁場 B_ϕ
の方位角平均

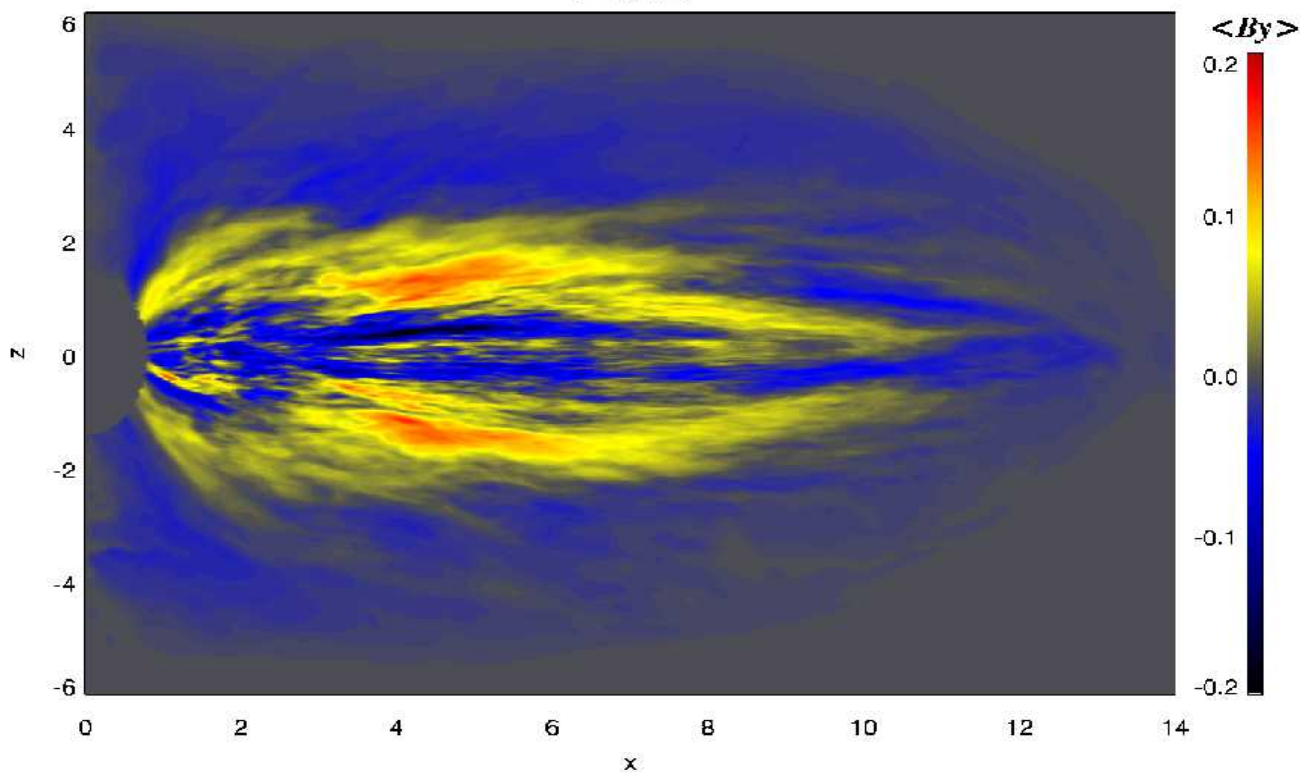


方位角磁場(1)

方位角磁場 B_ϕ

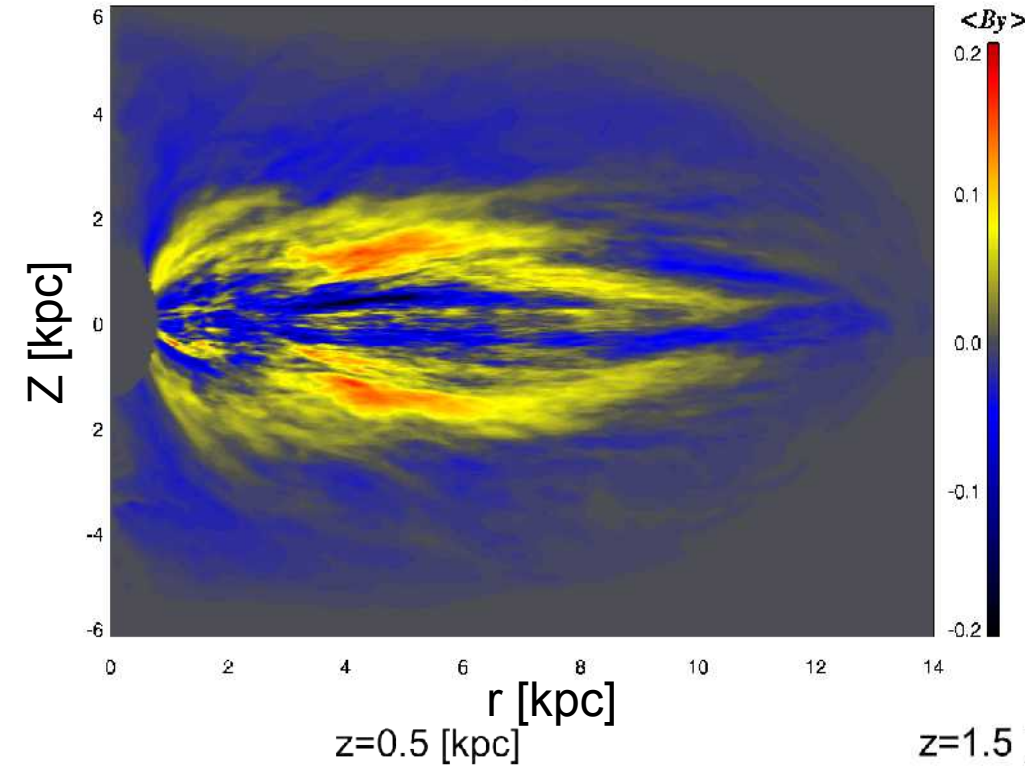


方位角磁場 B_ϕ
の方位角平均

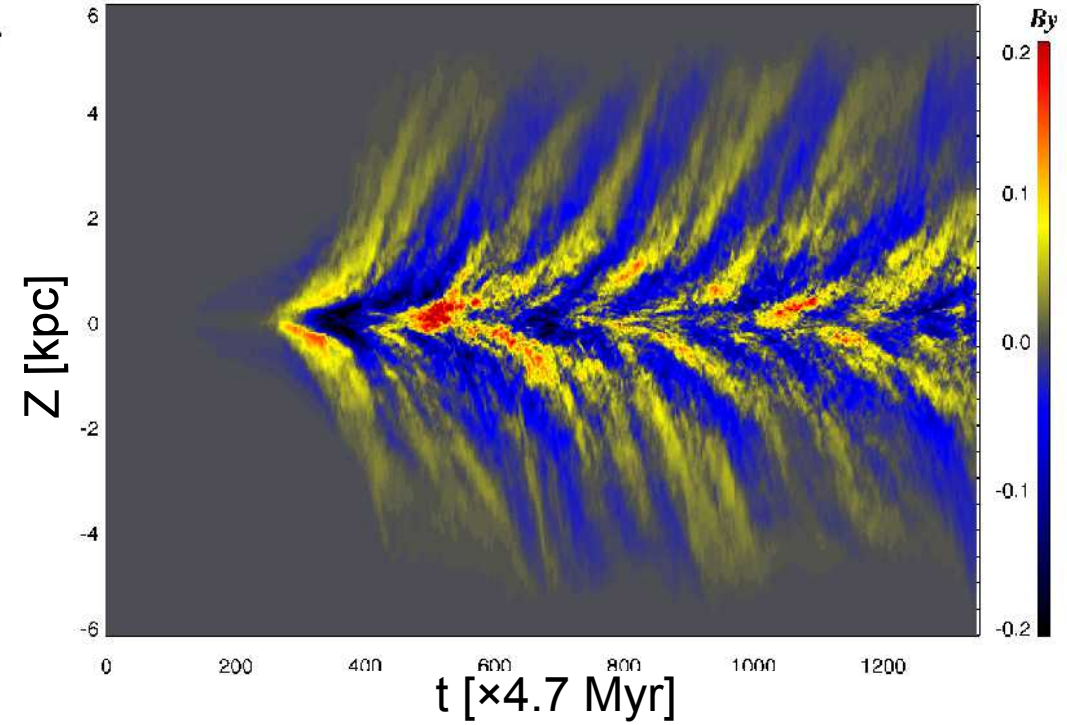


方位角磁場(2)

$t = 1344 [\times 4.7 \text{ Myr}]$



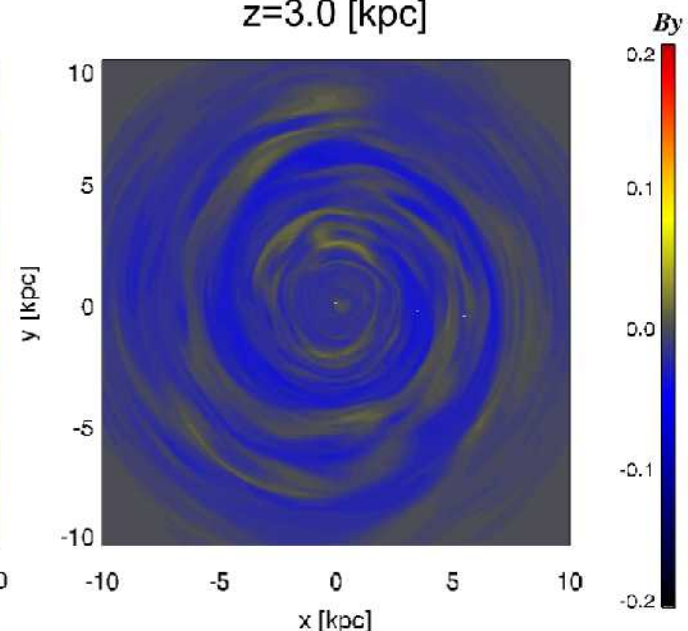
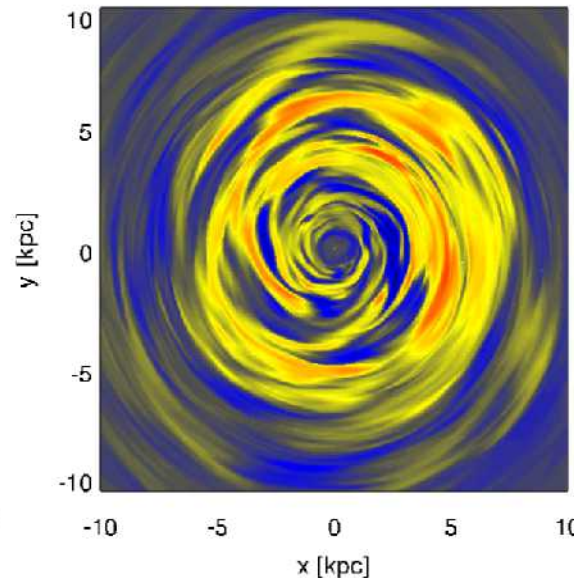
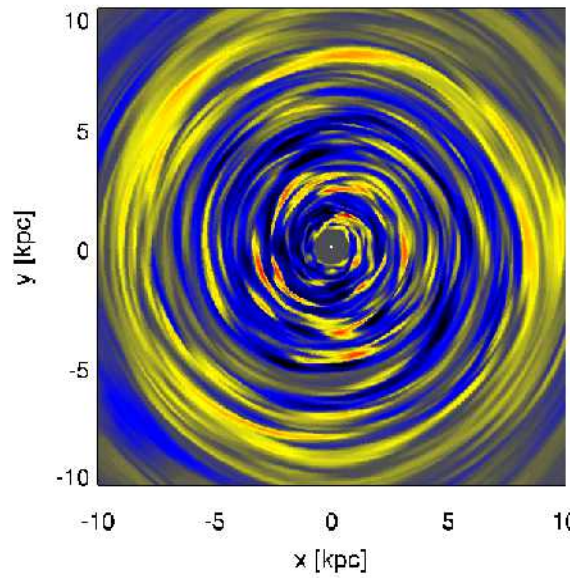
$r = 2.025 [\text{kpc}]$



$z = 0.5 [\text{kpc}]$

$z = 1.5 [\text{kpc}]$

$z = 3.0 [\text{kpc}]$



観測との比較

- 銀河ダイナモの数値計算結果に基づいてシンクロトロン放射強度分布とファラデー回転度分布を計算

数値シミュレーション

磁場分布 熱的ガス分布

+

HEALPix

銀河宇宙線の電子成分
(仮定)
数密度の空間分布

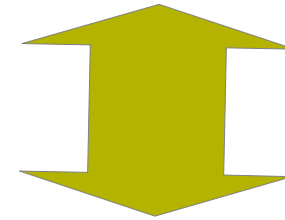
$$n_e = n_0 \exp(-R/h_R) \operatorname{sech}^2(z/h_d)$$

$$h_R = 5 \text{ kpc and } h_d = 1 \text{ kpc}$$

銀河磁場に関する観測量

シンクロトロン放射強度分布

ローテーションメジャー(RM)



シンクロトロン放射
(磁場+宇宙線電子)

$$\int n_{cr} B_{\perp} dl$$

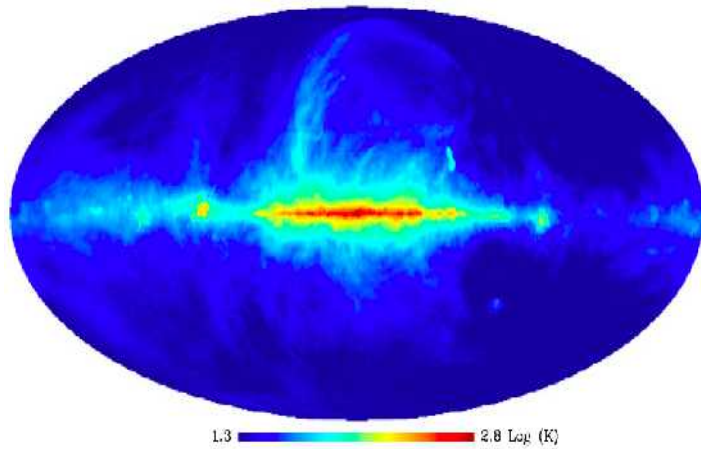
ローテーションメジャー
(磁場+熱的ガス)

$$\int n_e B_{\parallel} dl$$

全天マップと角度相関

観測

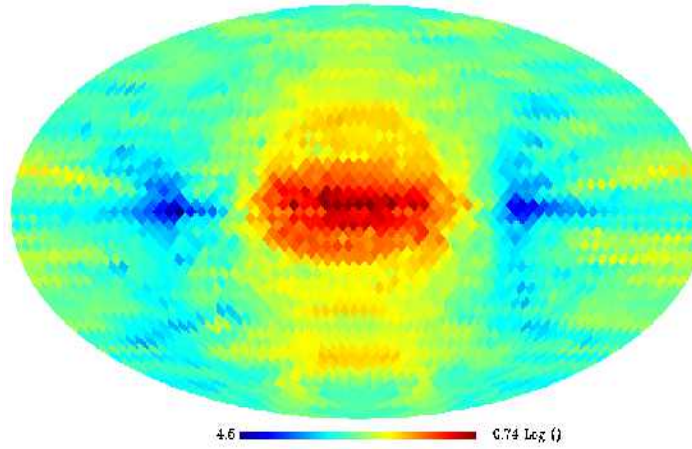
シンクロトロン放射
405[MHz]



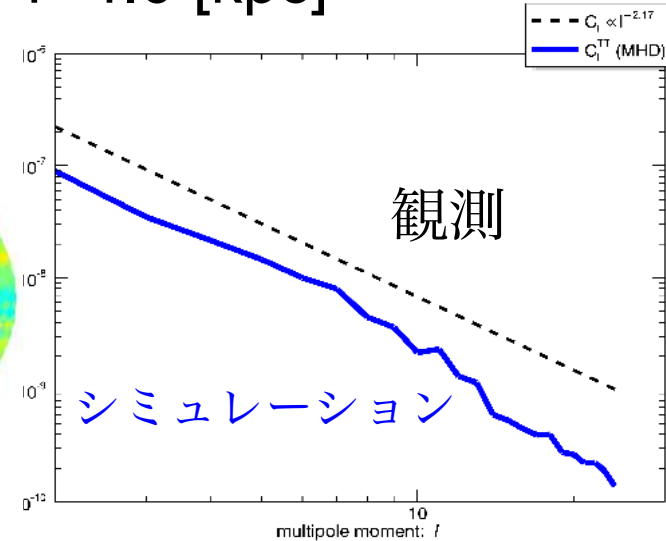
シミュレーション

$t \sim 1096 [\times 4.7 \text{ Myr}]$ $r = 4.0 [\text{kpc}]$

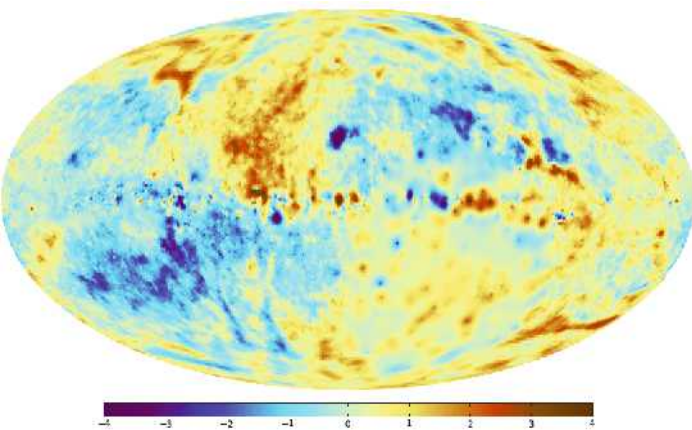
Synchrotron intensity by Num.MHD model



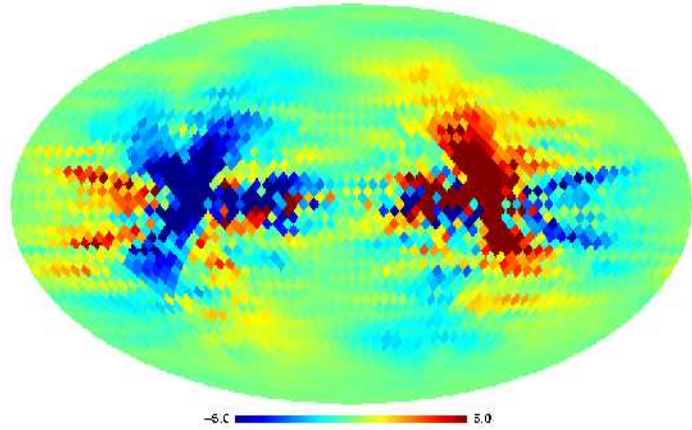
角度パワースペクトル



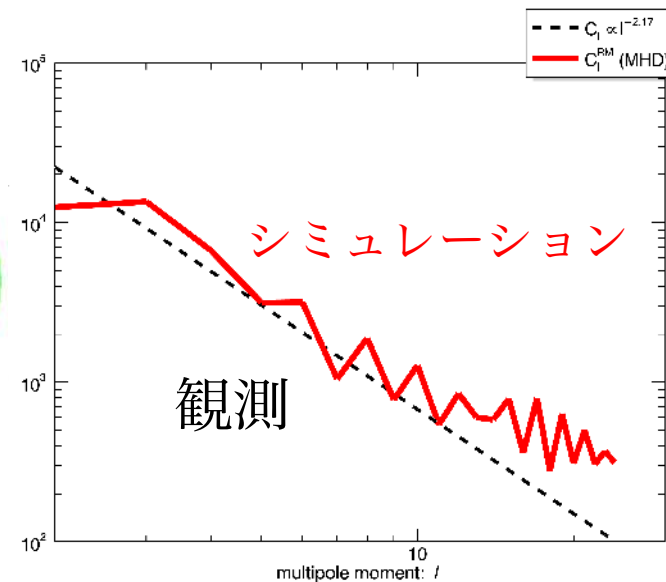
ローテーションメジャー



RM by Num.MHD model



$N_{\text{side}} = 16$



まとめ

- MRI-Parker の銀河ダイナモ
 - 動径方向に方位角磁場の反転がみられる。
 - 鉛直方向については z と共にストライプ状に磁場の向きが反転している。
 - 時間と共に円盤からハローへ高く浮上した磁場は過去の円盤磁場の情報を含む。
- 全天マップと角度パワースペクトル
 - シンクロトロン放射では軸対称な構造が見られた。
 - RMでは赤道面对称性が存在する。
 - 角度パワースペクトルの傾きはおおよそ一致