

磁気乱流による銀河系中心近傍ガスの 非円軌道運動の励起

鈴木 建 , 福井 康雄, 鳥居 和史 (名大理),
町田 真美 (九大理) & 松元 亮治 (千葉大理)

2015 年 6 月 3 日

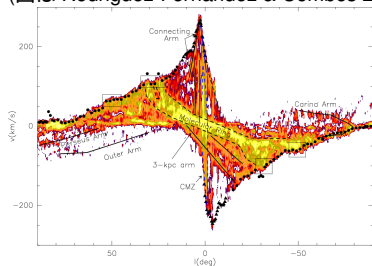
Thanks to PC clusters(Ta lab.), Cray XC30 (NAOJ), HITACHI SR16000(Yukawa inst.)

はじめに：銀河系の銀経-速度図

はじめに: 銀河系の銀経-速度図

CO(J=1-0) Dame+ 2001

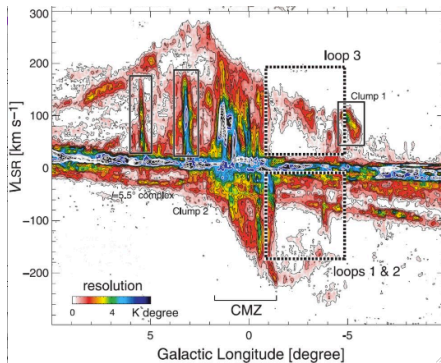
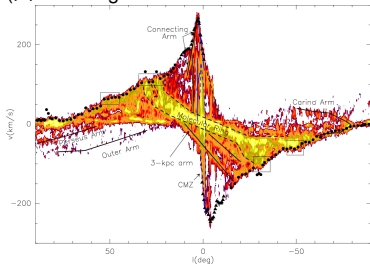
(図は Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



はじめに: 銀河系の銀経-速度図

CO(J=1-0) Dame+ 2001

(図は Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



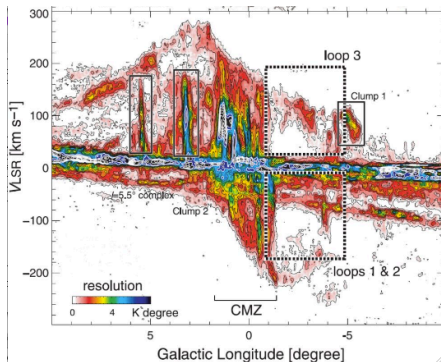
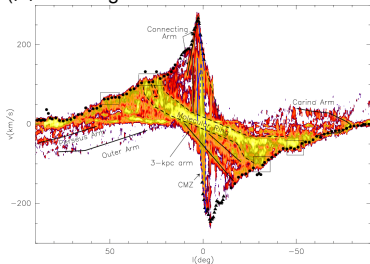
$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ NANTEN 観測

Torii+ 2010

はじめに: 銀河系の銀経-速度図

CO(J=1-0) Dame+ 2001

(図は Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ NANTEN 観測

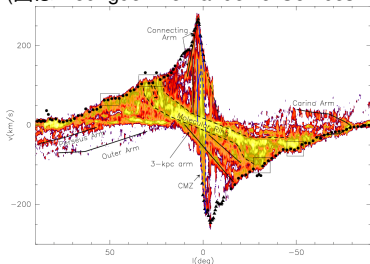
Torii+ 2010

観測: $l-v$ 図の平行四辺形

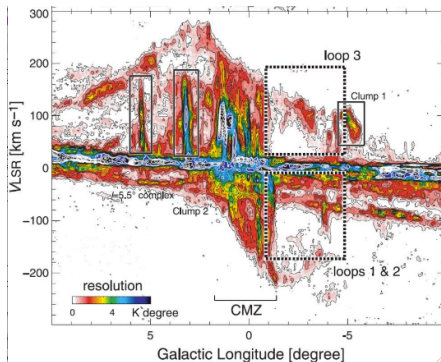
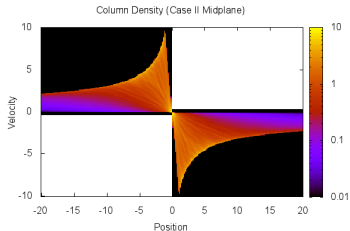
はじめに: 銀河系の銀経-速度図

CO(J=1-0) Dame+ 2001

(図は Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



円運動のみ (以下: Kepler 回転) の場合



$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ NANTEN 観測

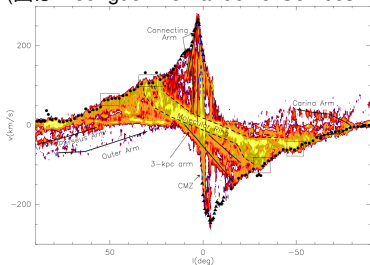
Torii+ 2010

観測: $l-v$ 図の平行四辺形

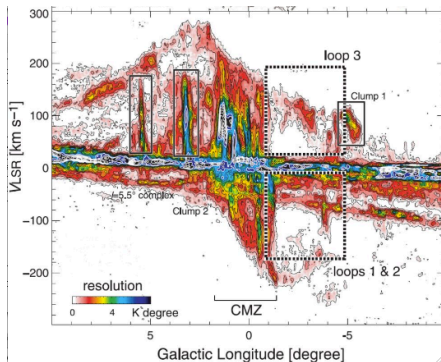
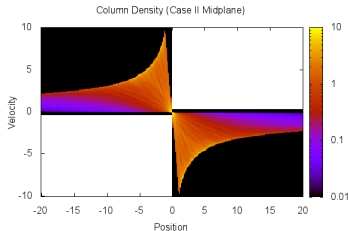
はじめに: 銀河系の銀経-速度図

CO(J=1-0) Dame+ 2001

(図は Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



円運動のみ (以下: Kepler 回転) の場合



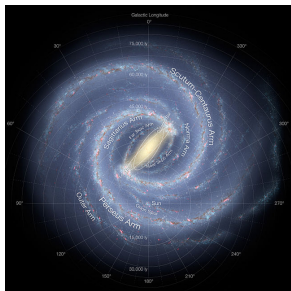
$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ NANTEN 観測

Torii+ 2010

観測: $l-v$ 図の平行四辺形
⇒ 非円運動の存在

従来: **Bar** \Leftrightarrow 非円運動？

従来: Bar \leftrightarrow 非円運動？

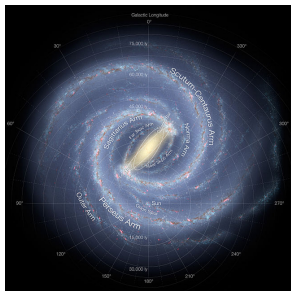


Artistic view (NASA JPL)

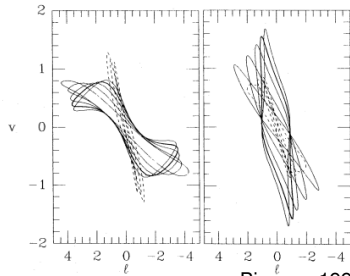
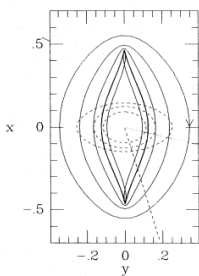
Bar の存在 \Leftarrow 赤外観測

Matsumoto+ 1982;
Blitz & Spergel 1991;
Churchwell+ 2009

従来: Bar \leftrightarrow 非円運動 ?



Artistic view (NASA JPL)

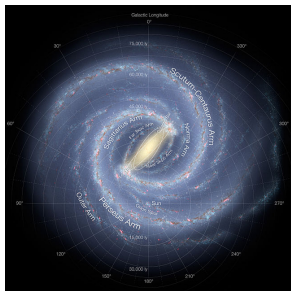


Binney+ 1991

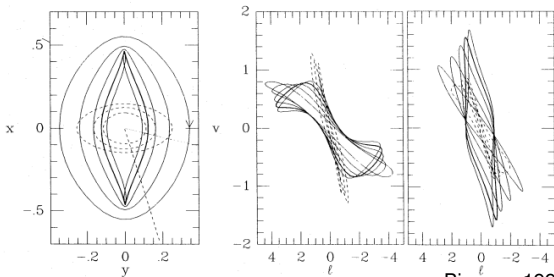
Bar の存在 \Leftarrow 赤外觀測

Matsumoto+ 1982;
Blitz & Spergel 1991;
Churchwell+ 2009

従来: Bar \leftrightarrow 非円運動？



Artistic view (NASA JPL)



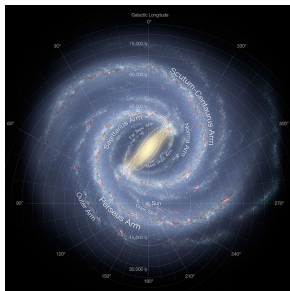
Binney+ 1991

棒形状ガスを違う角度から見る

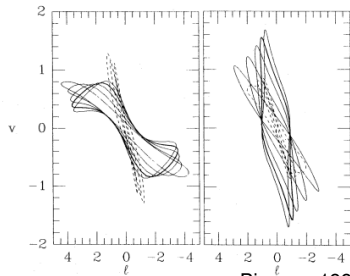
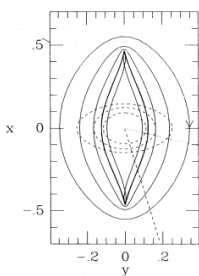
Bar の存在 \Leftarrow 赤外観測

Matsumoto+ 1982;
Blitz & Spergel 1991;
Churchwell+ 2009

従来: Bar \leftrightarrow 非円運動？



Artistic view (NASA JPL)



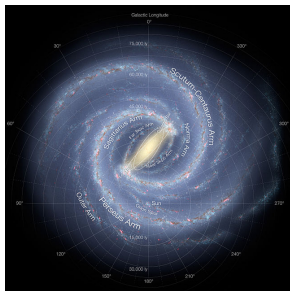
Binney+ 1991

棒形状ガスを違う角度から見る
 \Rightarrow 様々な形の平行四辺形

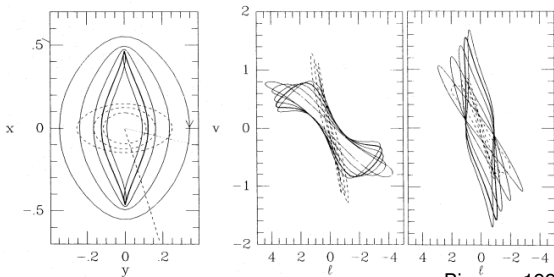
Bar の存在 \Leftarrow 赤外観測

Matsumoto+ 1982;
Blitz & Spergel 1991;
Churchwell+ 2009

従来: Bar \leftrightarrow 非円運動 ?



Artistic view (NASA JPL)



Binney+ 1991

棒形状ガスを違う角度から見る
 \Rightarrow 様々な形の平行四辺形

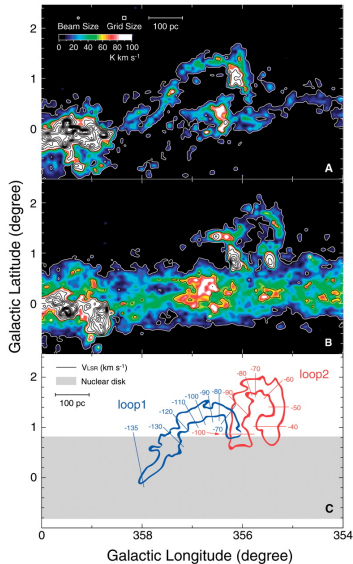
Bar の存在 \Leftarrow 赤外観測

Matsumoto+ 1982;
Blitz & Spergel 1991;
Churchwell+ 2009

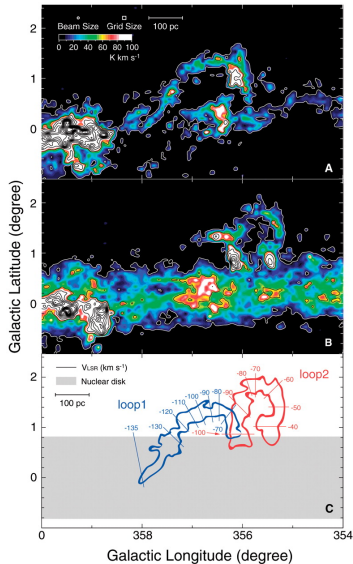
棒ポテンシャルを考慮した仕事は沢山
Koda & Wada 2002; Baba+ 2010; Molinari+ 2011

銀河中心の分子雲磁気ループ-磁場の重要性-

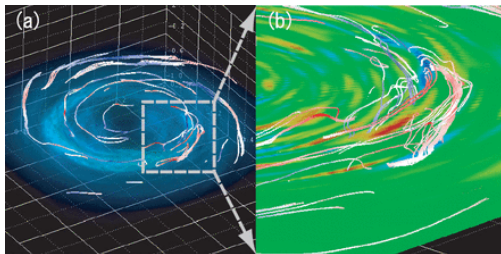
銀河中心の分子雲磁気ループ-磁場の重要性-



銀河中心の分子雲磁気ループ-磁場の重要性-

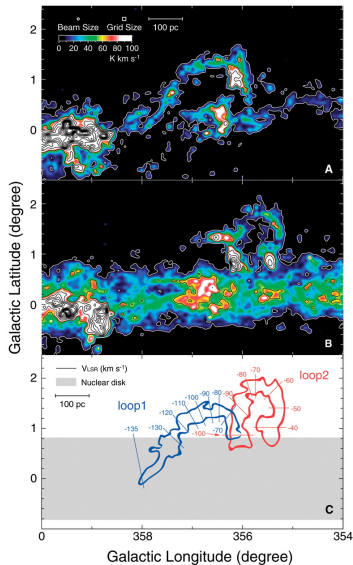


Fukui+ 2006

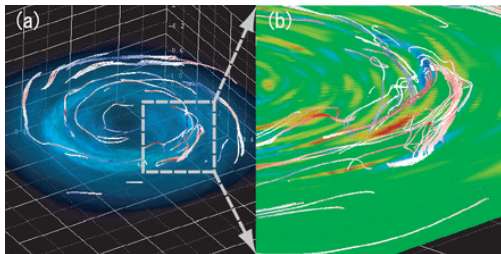


Machida+ 2009

銀河中心の分子雲磁気ループ-磁場の重要性-

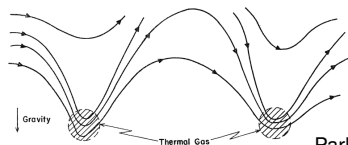


Fukui+ 2006



Machida+ 2009

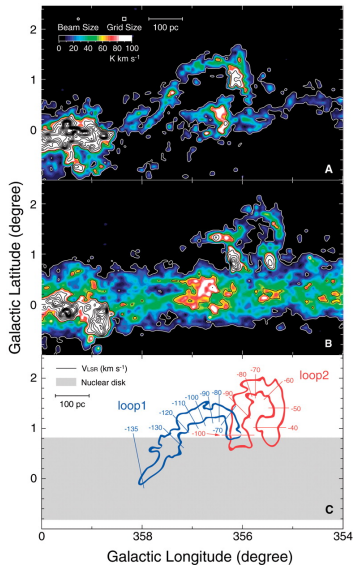
パーカー不安定性 (磁気浮力)



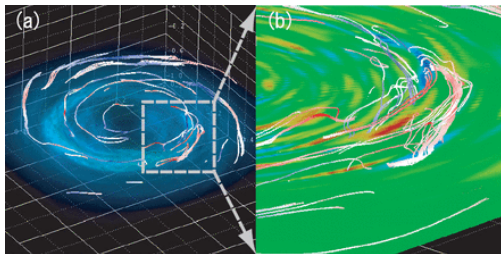
Parker 1966

FIG. 2.—Sketch of the local state of the lines of force of the interstellar magnetic field and interstellar gas-cloud configuration resulting from the intrinsic instability of a large-scale field along the galactic disk or arm when confined by the weight of the gas.

銀河中心の分子雲磁気ループ-磁場の重要性-

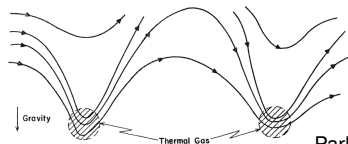


Fukui+ 2006



Machida+ 2009

パーカー不安定性 (磁気浮力)



Parker 1966

FIG. 2.—Sketch of the local state of the lines of force of the interstellar magnetic field and interstellar gas-cloud configuration, resulting from the intrinsic instability of a large-scale field along the galactic disk or arm when confined by the weight of the gas.

磁場が動力学に影響

銀河中心の磁場

- **> 50 μG** Crocker+ 2010
磁場がこれ以上弱いと電子のシンクロトロン損失が抑制
 \Rightarrow 逆コンプトン散乱により γ 線を作り過ぎ > EGRET(300MeV)
- フィラメントなどの複雑な形状
+ 動力学の議論 $\Rightarrow \sim \text{mG}$

Yusef-Zadeh+ 1984; Tsuboi+ 1986; Chuss+ 2003; Nishiyama+ 2010

圧力の概算値

- 分子雲 ガス圧:
$$P \sim 10^{-10} \text{erg/cm}^3 \left(\frac{n}{10^4 \text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{T}{100\text{K}} \right)$$
- 乱流 実効圧:
$$P \sim 10^{-8} \text{erg/cm}^3 \left(\frac{n}{10^3 \text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{\delta v}{30 \text{km/s}} \right)^2$$
- 磁気圧: $P \sim 4 \times 10^{-10} \text{erg/cm}^3 \left(\frac{B}{100 \mu\text{G}} \right)^2$

本研究

本研究

磁場 \Rightarrow 非円運動の励起？

を磁気流体数値実験により調べる．

本研究

磁場 \Rightarrow 非円運動の励起？

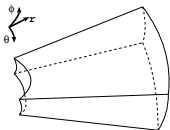
を磁気流体数値実験により調べる．

- 軸対称ポテンシャル (Miyamoto & Nagai 1975)

$$\Phi(R, z) = \sum_{i=1}^3 \frac{-GM_i}{\sqrt{R^2 + (a_i + \sqrt{b_i^2 + z^2})^2}}$$

	$M_i(10^{10} M_{\odot})$	$a_i(\text{kpc})$	$b_i(\text{kpc})$
SMBH 1	4.4×10^{-4}	0	0
Bulge 2	2.05	0	0.495
Disk 3	25.47	7.258	0.52

MHD シミュレーション



- 計算領域 (3D 球座標):
 $(r, \theta, \phi) = (0.01 - 60 \text{ kpc}, \pm\pi/3, 2\pi)$ (全周) を
(384, 128, 256) メッシュで解像

- 理想磁気流体力学方程式を解く

$$\text{Mass consv.: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

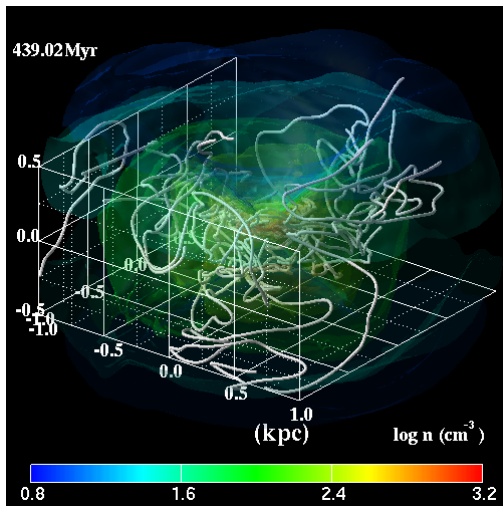
$$\text{Mom. consv.: } \frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla (p + \frac{B^2}{8\pi}) - \frac{(B \cdot \nabla) B}{4\pi\rho} + \nabla \Phi = 0$$

$$\text{Eng. consv.: } \rho \frac{de}{dt} = -p \nabla \cdot v$$

$$B \text{ evol.: } \frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) \text{ with } \nabla \cdot B = 0$$

- 局所等温近似; 音速で 50-100 km/s
(分子雲の速度分散に対応)
- 初期磁場: $B_z = 0.71 \mu\text{G} \left(\frac{R}{1 \text{ kpc}} \right)^{-1}$ in $R > 35 \text{ pc}$

概観



▶ 2kpc-long

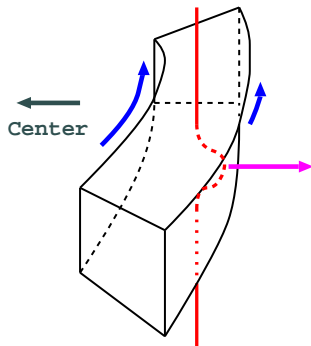
▶ 2kpc-short

▶ 1kpc-long

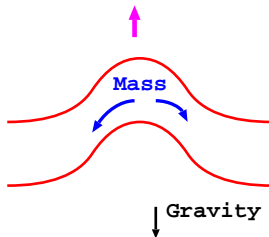
▶ 1kpc-short

▶ 0.6kpc-short

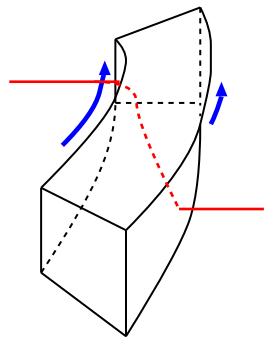
磁場の増幅



MagnetoRotational
Instability



Parker Instability
(Magnetic Boyancy)



B_ϕ Generation
by Differential
Rotation

▶ Stratified MRI

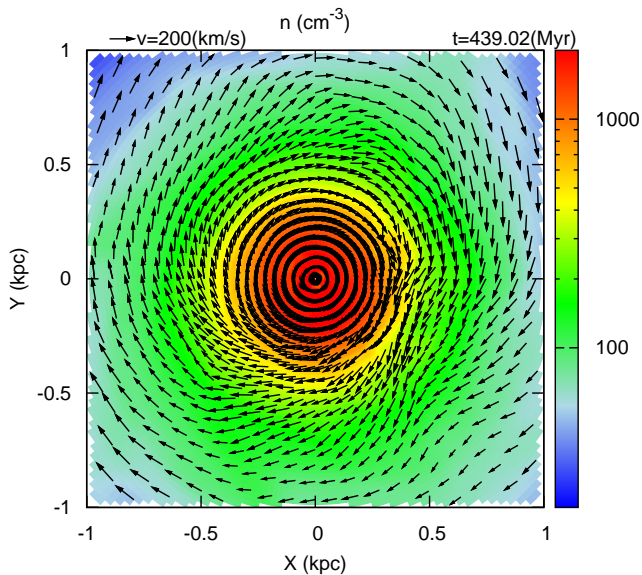
▶ Local MRI

磁気回転不安定性

パーカー不安定性
(磁気浮力)

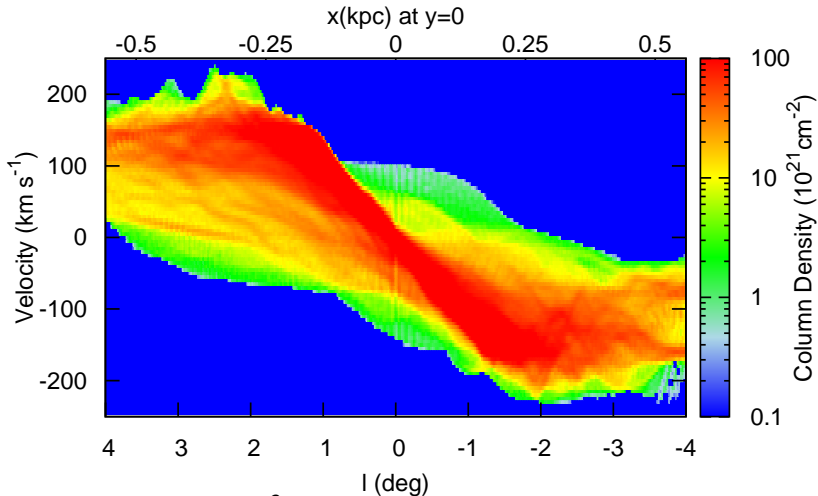
巻き込み

上から眺める (@赤道面)



銀経-速度図 -銀河中心付近-

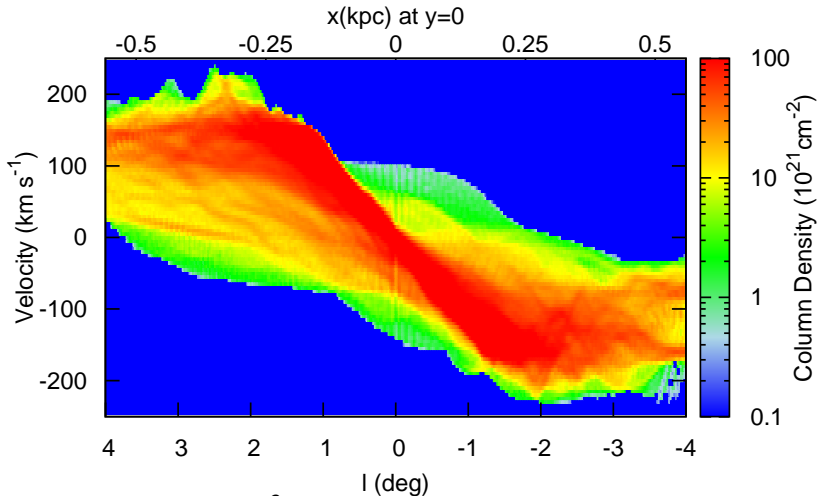
Column Density ($|z| < 0.2 \text{ kpc}$, $n > 100 \text{ cm}^{-3}$) at $t = 439.02 \text{ (Myr)}$



高密度 ($N_{\text{H}} > 100 \text{ cm}^{-3}$) 領域のみ積分 \Rightarrow 柱密度

銀経-速度図 -銀河中心付近-

Column Density ($|z| < 0.2 \text{ kpc}$, $n > 100 \text{ cm}^{-3}$) at $t = 439.02 \text{ (Myr)}$



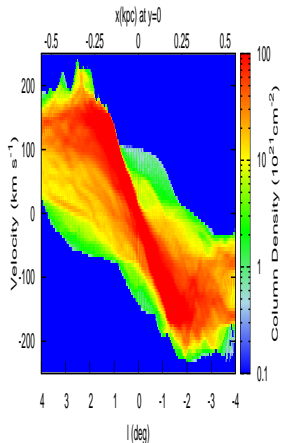
高密度 ($N_{\text{H}} > 100 \text{ cm}^{-3}$) 領域のみ積分 \Rightarrow 柱密度

形状は時間依存

銀経-速度図 -観測との比較-

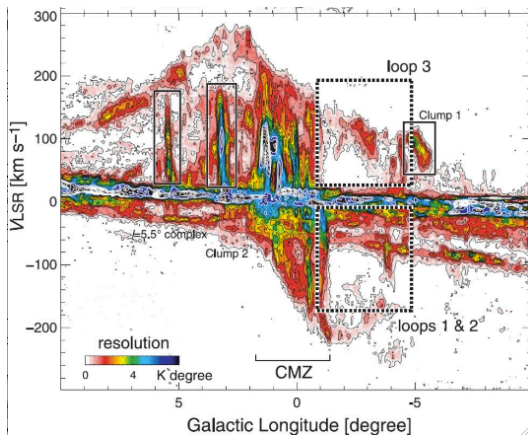
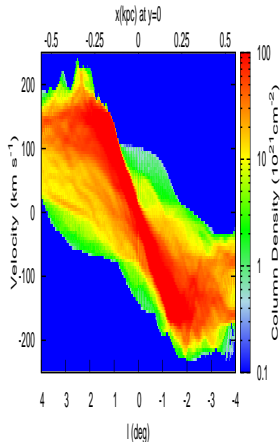
銀経-速度図 -観測との比較-

Column Density ($|z| < 0.2 \text{ kpc}$, $n > 100 \text{ cm}^{-3}$) at $t = 439.02 \text{ (Myr)}$



銀経-速度図 -観測との比較-

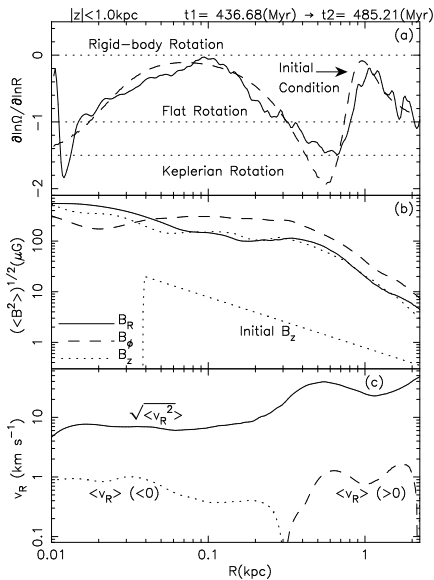
Column Density ($|z| < 0.2 \text{ kpc}$, $n > 100 \text{ cm}^{-3}$) at $t = 439.02 \text{ (Myr)}$



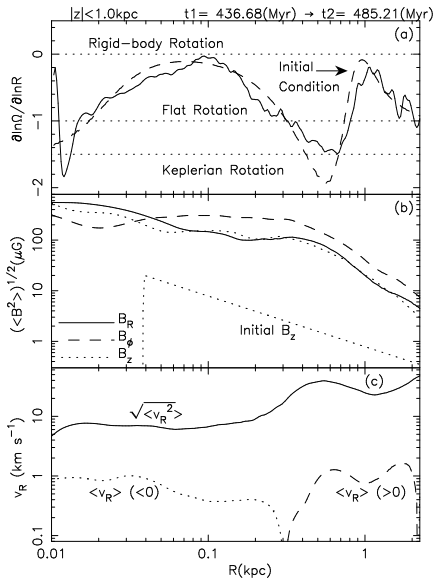
NANTEN 観測 Torii+ 2010

直接比較には $N(\text{H}_2)/I(\text{CO}) (\approx 2.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1})$ 必要 .
(Strong+ 1988)

非回転運動の励起

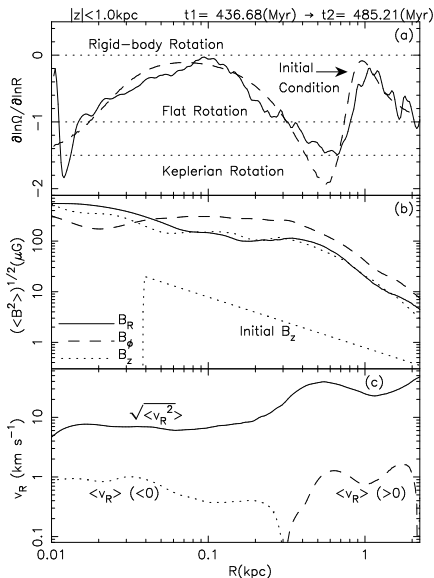


非回転運動の励起



銀河中心付近の平均磁場
 $\approx 0.5 \text{ mG}$

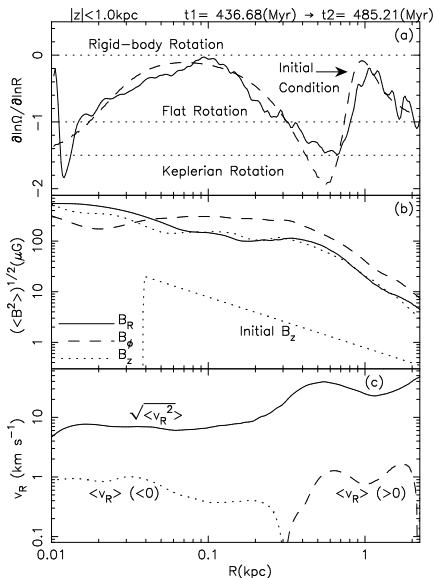
非回転運動の励起



銀河中心付近の平均磁場
 $\approx 0.5 \text{ mG}$

差動回転度合
 $(\partial \ln \Omega / \partial \ln R)$ の
 単純でない構造
 \Rightarrow 角運動量輸送のムラ
 & 磁場 (磁気圧) のムラ
 \Rightarrow 動径方向の運動

非回転運動の励起

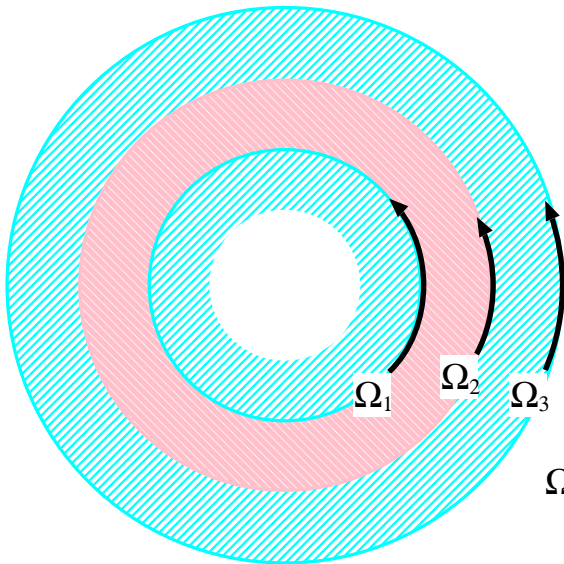


銀河中心付近の平均磁場
 $\approx 0.5 \text{ mG}$

差動回転度合
($\partial \ln \Omega / \partial \ln R$) の
単純でない構造
 \Rightarrow 角運動量輸送のムラ
& 磁場 (磁気圧) のムラ
 \Rightarrow 動径方向の運動

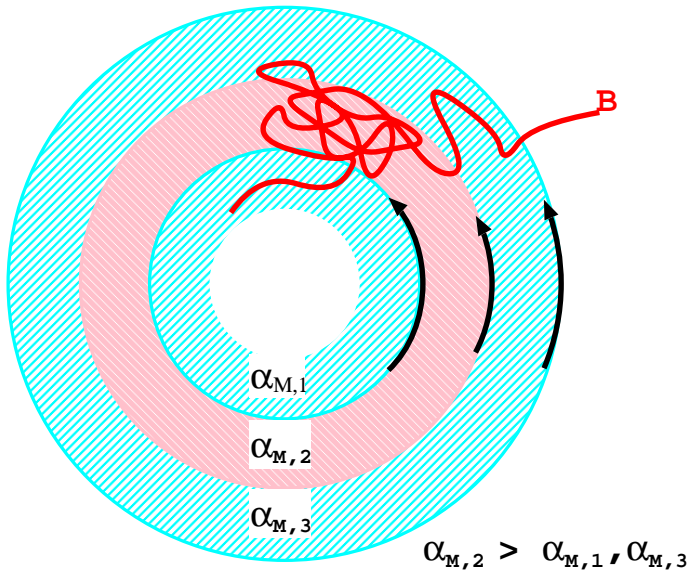
左図は複雑なので, 次ページ \Rightarrow

非回転運動の励起 - その 1 -

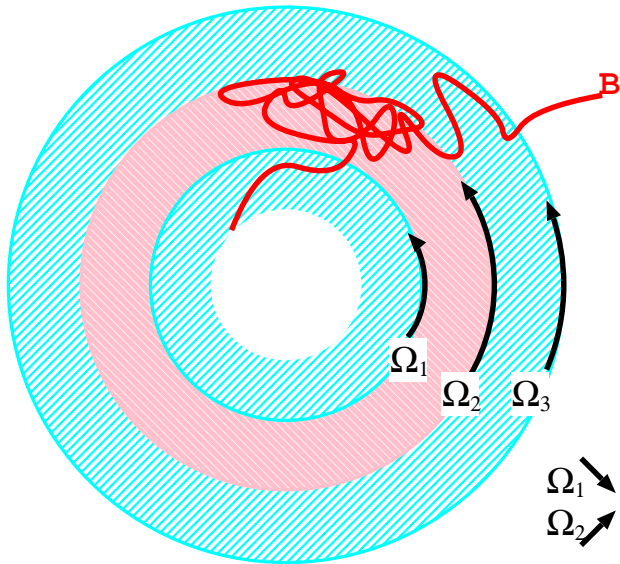


$$\Omega_1 > \Omega_2 = \Omega_3$$

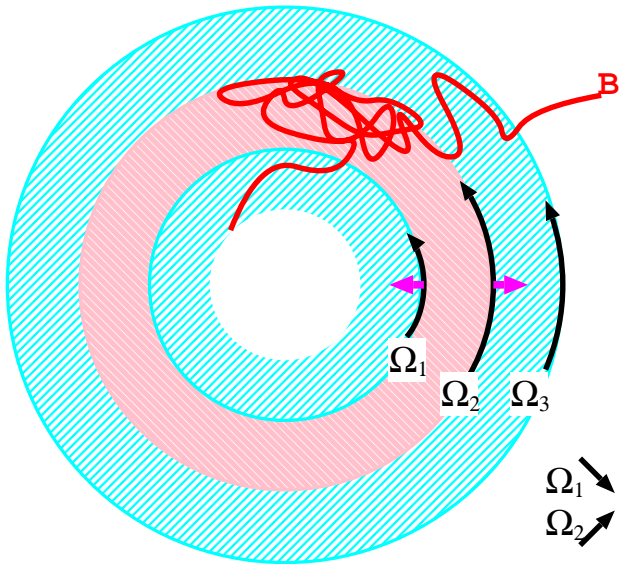
非回転運動の励起 - その1 -



非回転運動の励起 -その1-



非回転運動の励起 - その1 -



乱流による実効的粘性 ($\Rightarrow \alpha$ 値)

角運動量の式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho r v_\phi) + \nabla \cdot \mathbf{r} \left[\rho v_\phi \mathbf{v} - \frac{B_\phi}{4\pi} \mathbf{B} + \left(p + \frac{B_r^2 + B_z^2}{8\pi} \right) \mathbf{e}_\phi \right] = 0$$

定常, 軸対称近似かつ z 方向積分 $\partial_t = \nabla_\phi = 0$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho r^3 \Omega v_r + r^2 \rho \left(\delta v_\phi v_r - \frac{B_\phi B_r}{4\pi \rho} \right) \right] \\ \equiv \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho r^3 \Omega v_r + r^2 \rho w_{r\phi} \right] = 0, \end{aligned}$$

但し $v_\phi = r\Omega + \delta v_\phi$ (ケプラー回転 + 擾乱成分)

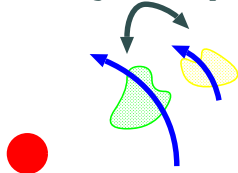
$w_{r\phi} = \text{Reynolds 応力 } (\delta v_\phi v_r) + \text{Maxwell 応力 } \left(-\frac{B_\phi B_r}{4\pi \rho} \right)$

$w_{r\phi} \equiv \alpha c_s^2$; α : the Shakura & Sunyaev parameter.

降着率は以下のように見積もられる:

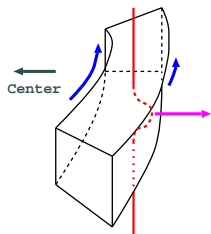
$$\dot{M} = -2\pi r v_r \int \rho dz \approx -2\pi w_{r\phi} / \Omega \int \rho dz$$

Exchange fluid elements by
"stirring with a spoon"



磁場の増幅

磁場の増幅



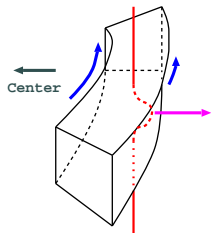
MagnetoRotational
Instability

- 磁気回転不安定性の成長率

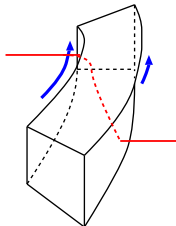
$$\frac{\omega_{\text{MRI,max}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R} \right|$$

$\omega_{\text{MRI,max}}$: MRI の最大成長率

磁場の増幅



MagnetoRotational
Instability



B_θ Generation
by Differential
Rotation

- 磁気回転不安定性の成長率

$$\frac{\omega_{\text{MRI,max}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R} \right|$$

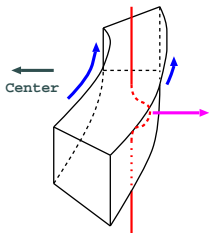
$\omega_{\text{MRI,max}}$: MRI の最大成長率

- 差動回転による巻き込み

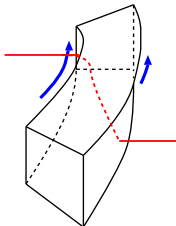
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \text{ より}$$

$$\frac{1}{\Omega} \frac{\partial B_\phi}{\partial t} = B_R \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R}$$

磁場の増幅



MagnetoRotational
Instability



B_ϕ Generation
by Differential
Rotation

- 磁気回転不安定性の成長率

$$\frac{\omega_{\text{MRI,max}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R} \right|$$

$\omega_{\text{MRI,max}}$: MRI の最大成長率

- 差動回転による巻き込み

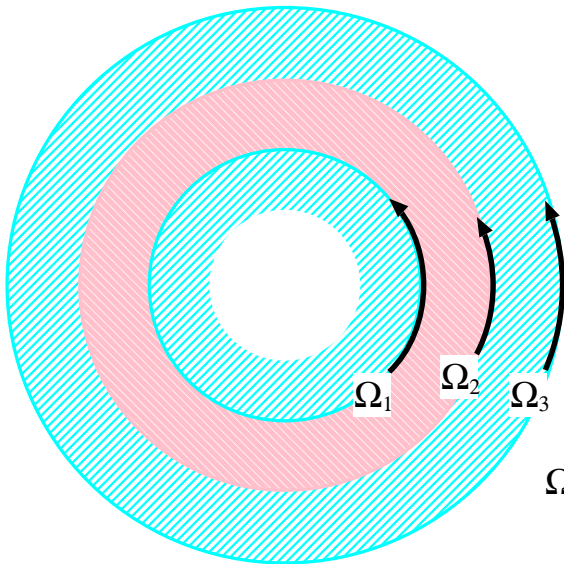
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \text{ より}$$

$$\frac{1}{\Omega} \frac{\partial B_\phi}{\partial t} = B_R \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R}$$

強い差動回転 ($\left| \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R} \right|$ 大)

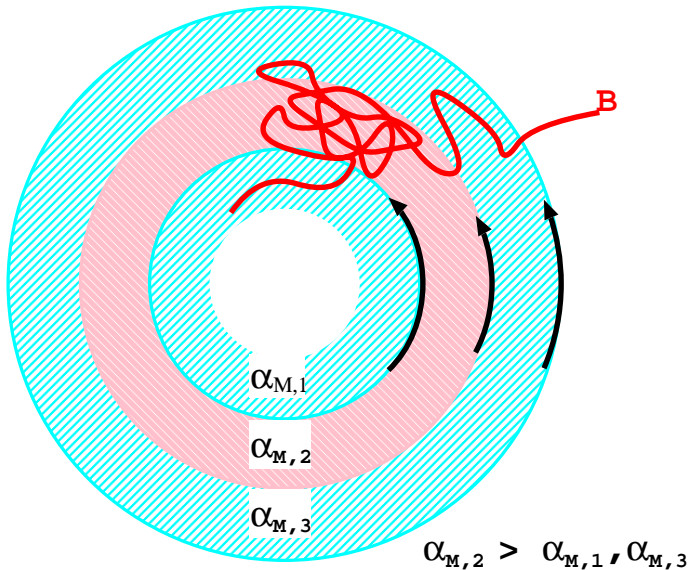
⇒ 磁場増幅也大

非回転運動の励起 - その 1 -

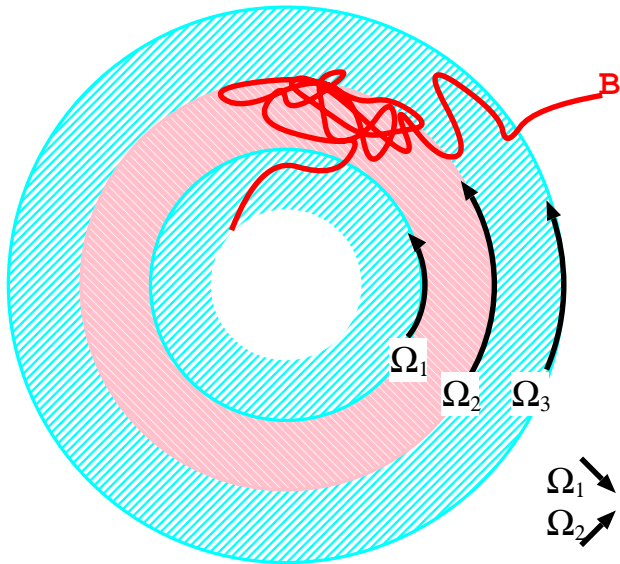


$$\Omega_1 > \Omega_2 = \Omega_3$$

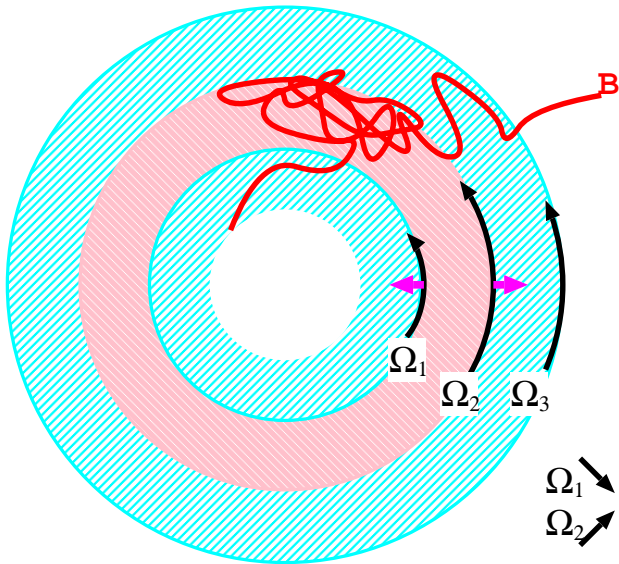
非回転運動の励起 - その1 -



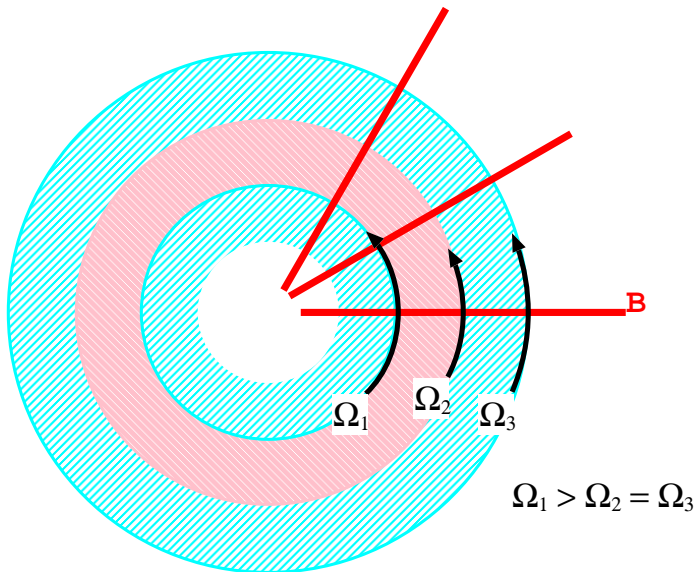
非回転運動の励起 -その1-



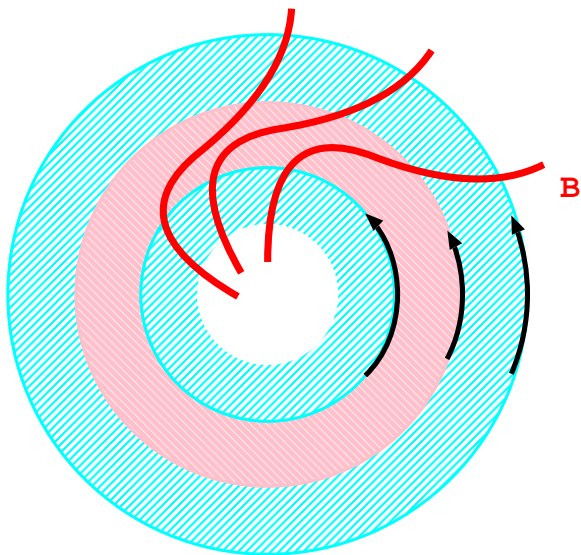
非回転運動の励起 - その1 -



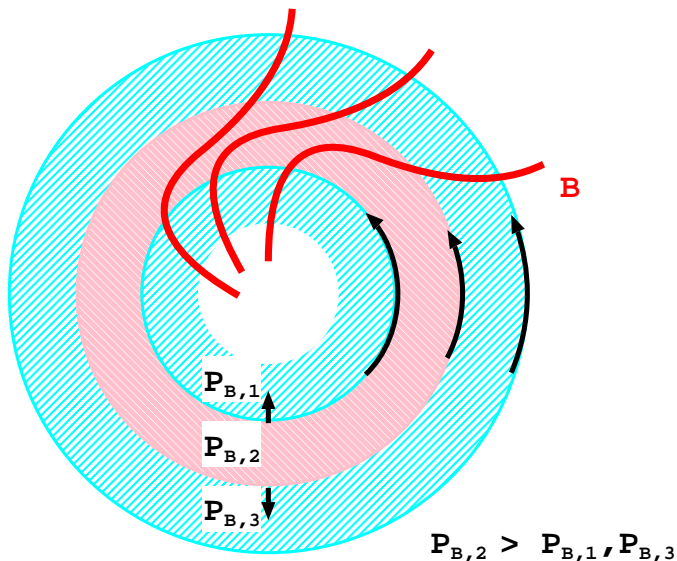
非回転運動の励起 - その2 -



非回転運動の励起 - その2 -



非回転運動の励起 - その2 -



まとめ

軸対称ポテンシャルのもと，銀河バルジ+円盤の
磁気流体数値実験を行い

- 増幅磁場 \Rightarrow ガスの非円運動
- 位置-速度 ($l-v$) 図: 時間依存する“平行四辺形”
を見い出した．

非円運動励起のメカニズム

- 差動回転がきつい場所: 角運動輸送大 & 磁場増幅大
- 差動回転がゆるい場所: 角運動輸送小 & 磁場増幅小

動径方向に回転周波数と磁気圧のムラを生じる．
 \Rightarrow ガスの動径方向 (つまり非円) 運動