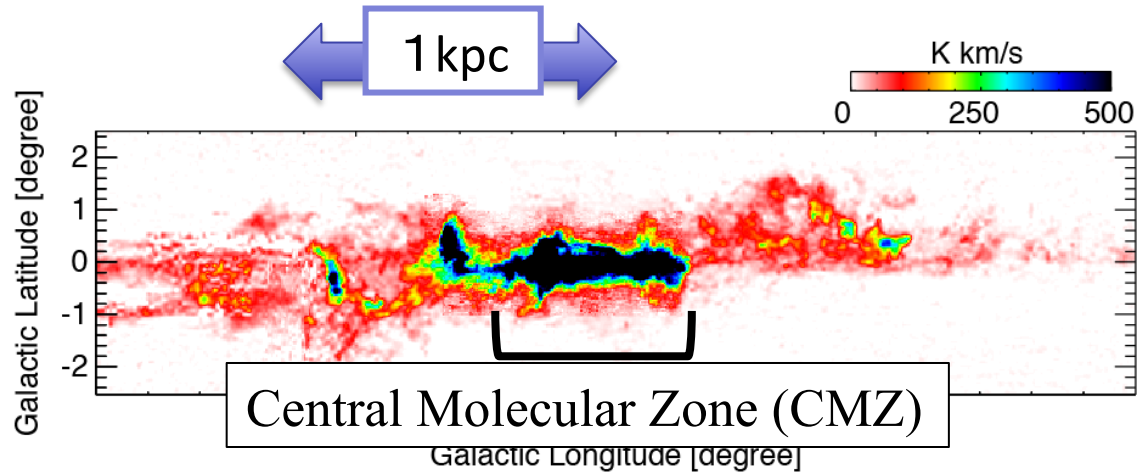
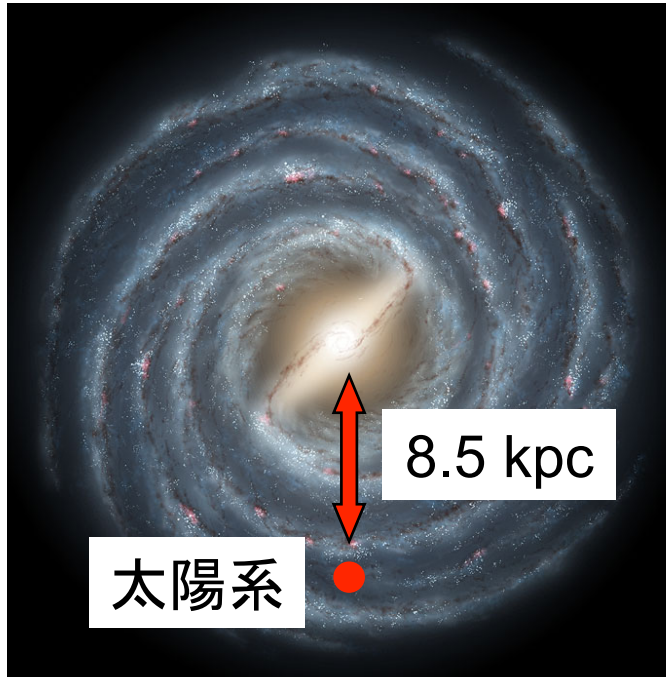
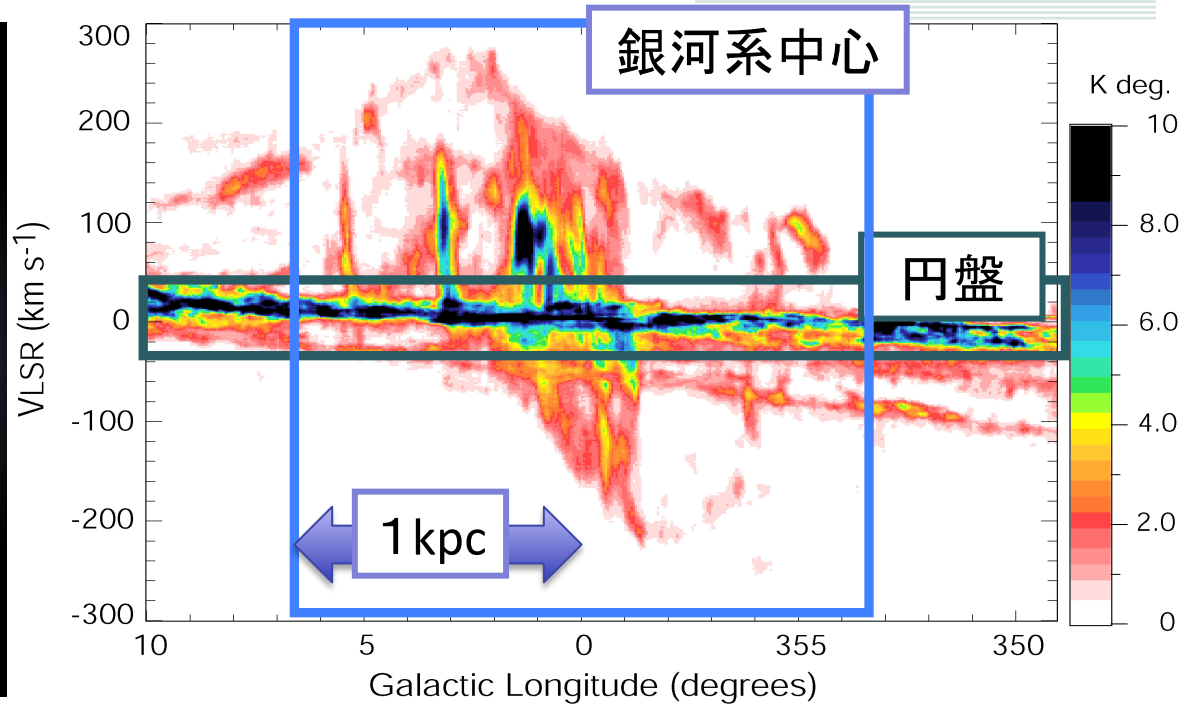
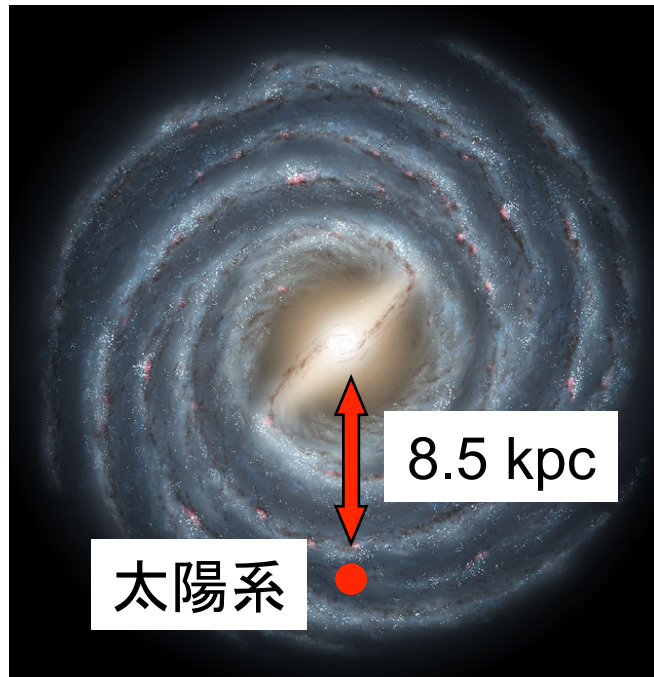


# 銀河系中心部



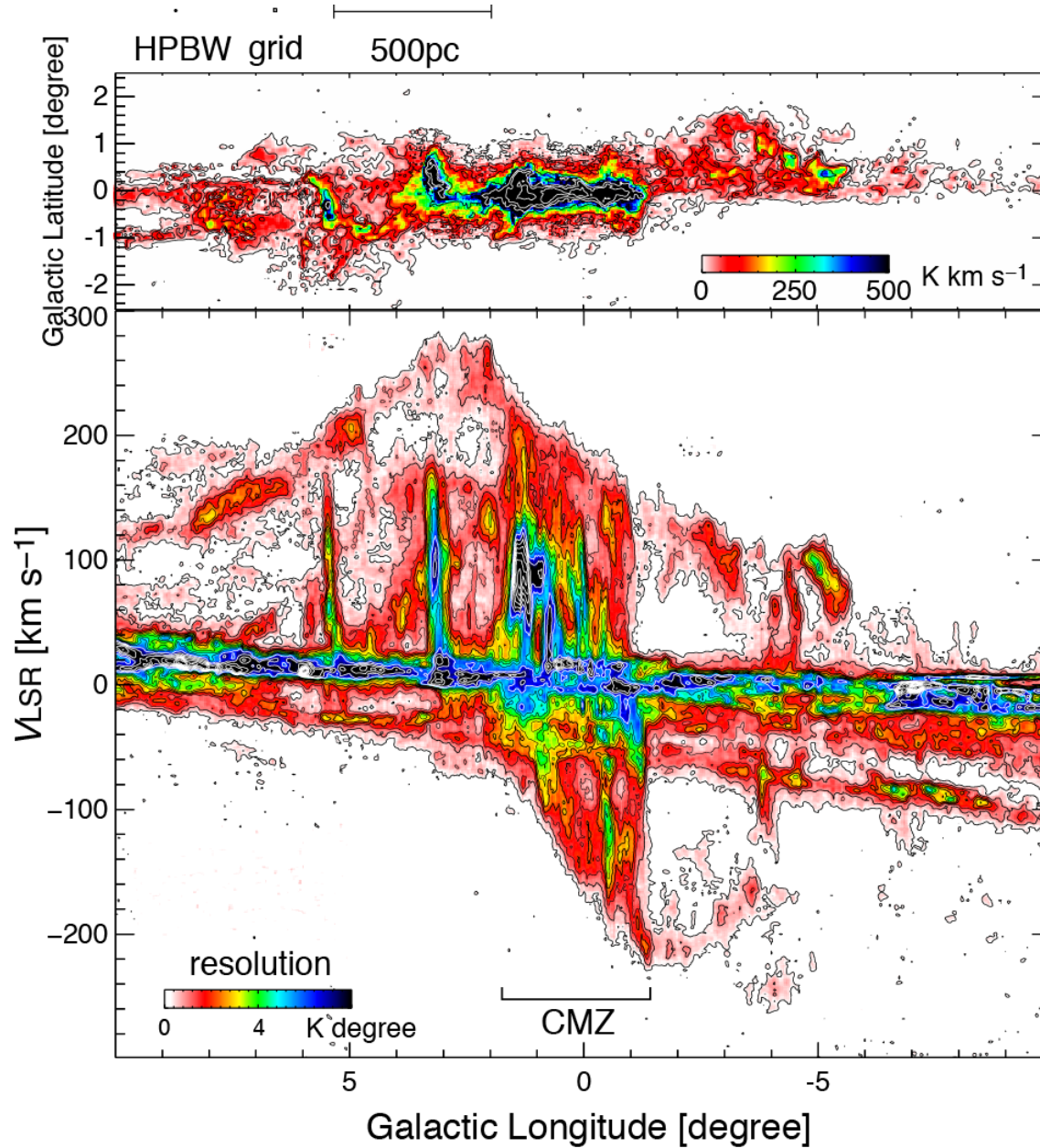
- 巨大ブラックホールSgr A\*を中心とする銀河系の特異領域
- 分子ガスの大速度分散(15~50km/s)と高温(30~300K).
- 強い磁場と特異な磁場構造 (※円盤部の典型的な分子雲で $1\mu\text{G}$ )
  - ✓ 大局的に $> 50\mu\text{G}$  (Crocker + 2010)
  - ✓ 局所的に $\sim 1\text{ mG}$  (Yuzef-Zadeh+1984; Morris 1990)

# 銀河系中心部



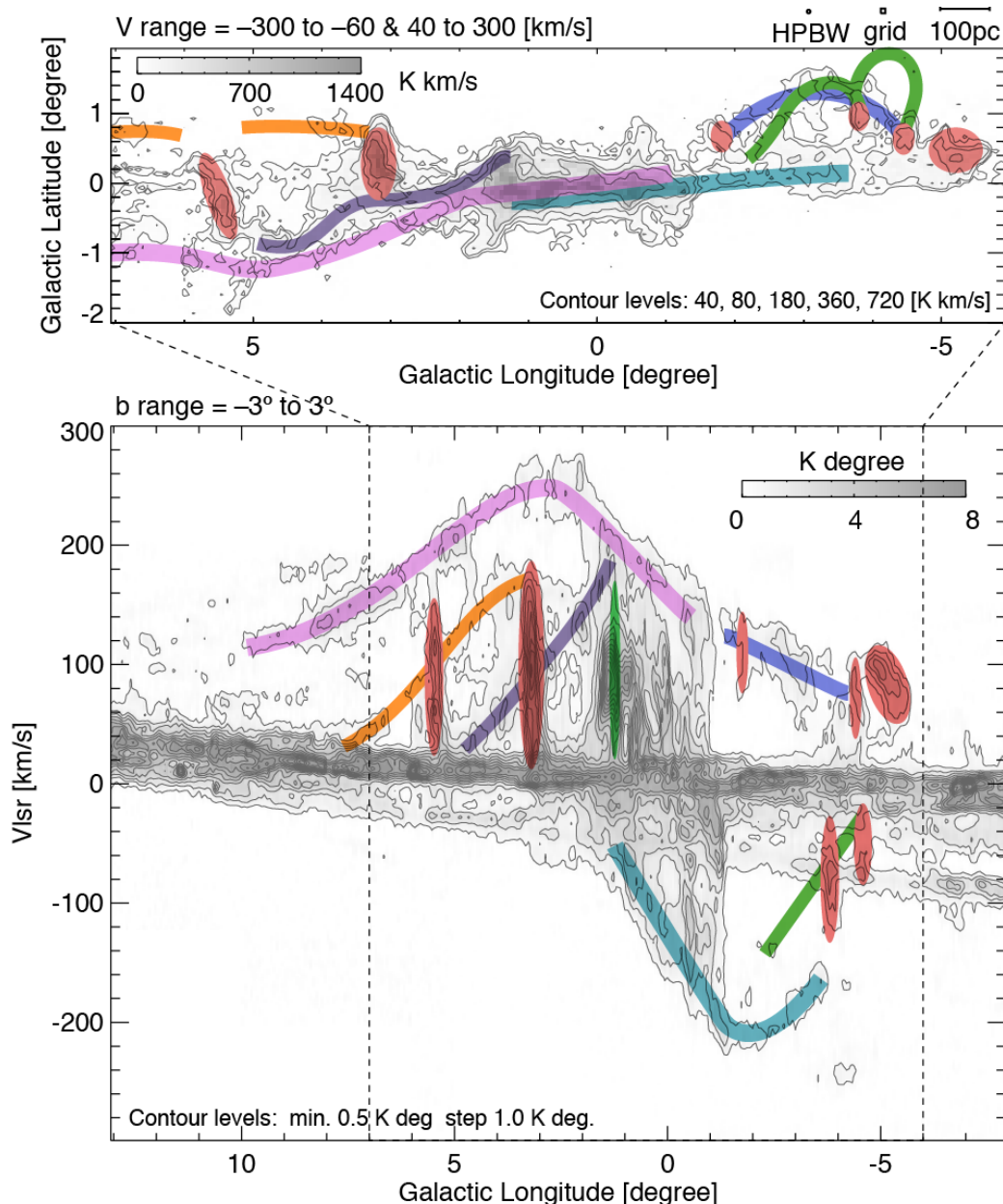
- 巨大ブラックホールSgr A\*を中心とする銀河系の特異領域
- 分子ガスの大速度分散(15~50km/s)と高温(30~300K).
- 強い磁場と特異な磁場構造 (※円盤部の典型的な分子雲で1 $\mu$ G)
  - ✓ 大局的に > 50 $\mu$ G (Crocker + 2010)
  - ✓ 局所的に ~ 1 mG (Yuzef-Zadeh+1984; Morris 1990)

# 銀河系中心部の分子雲 ( $R < 1 \text{ kpc}$ の大局的構造)



1. ガスの銀経正方向への偏り
2. CMZの平行四辺形の速度構造
3. CMZ外に点在するコンパクト( $< 50 \text{ pc}$ )な高速度( $> 100 \text{ km/s}$ )構造
4. 高速度構造を結ぶように分布する定速度勾配の構造(銀画面に対して浮上している)

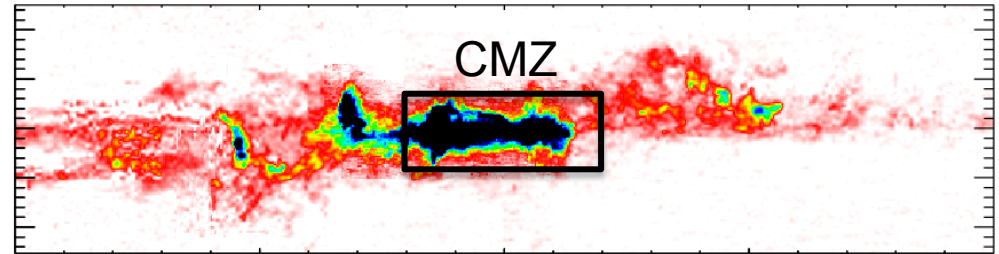
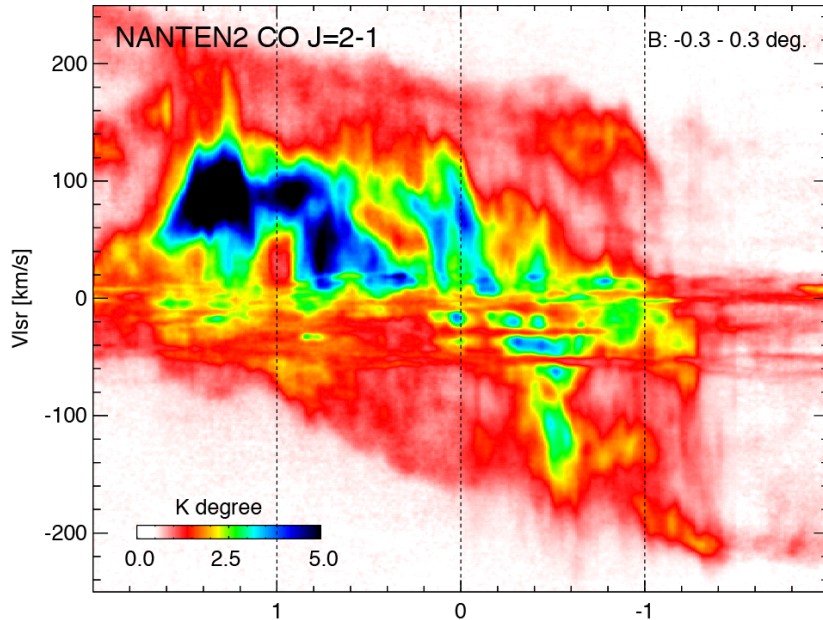
# 銀河系中心部の分子雲 ( $R < 1 \text{ kpc}$ の大局的構造)



1. ガスの銀経正方向への偏り
2. CMZの平行四辺形の速度構造
3. CMZ外に点在するコンパクト( $< 50 \text{ pc}$ )な高速度( $> 100 \text{ km/s}$ )構造
4. 高速度構造を結ぶように分布する定速度勾配の構造 (銀画面に対して浮上している)

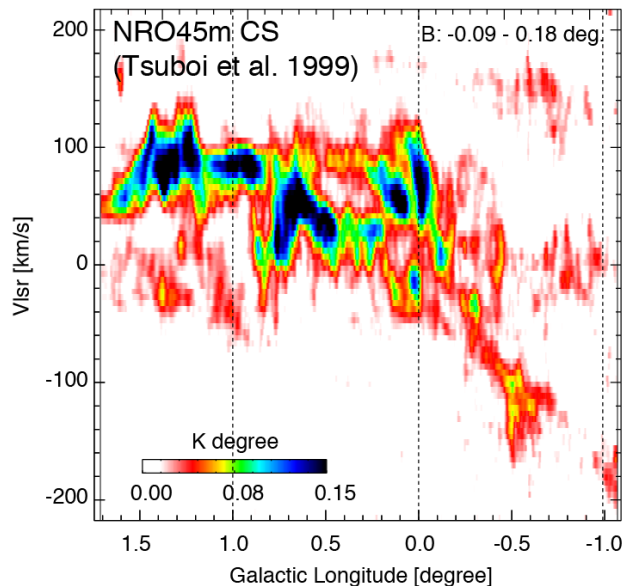


# CMZの分子ガス (平行四辺形構造)

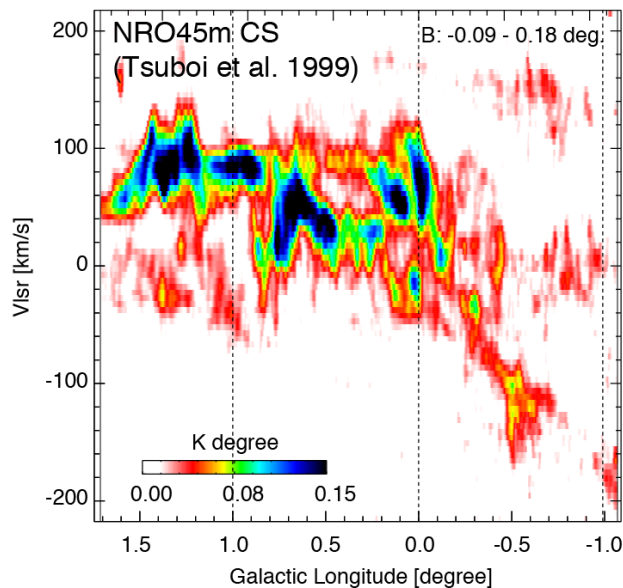
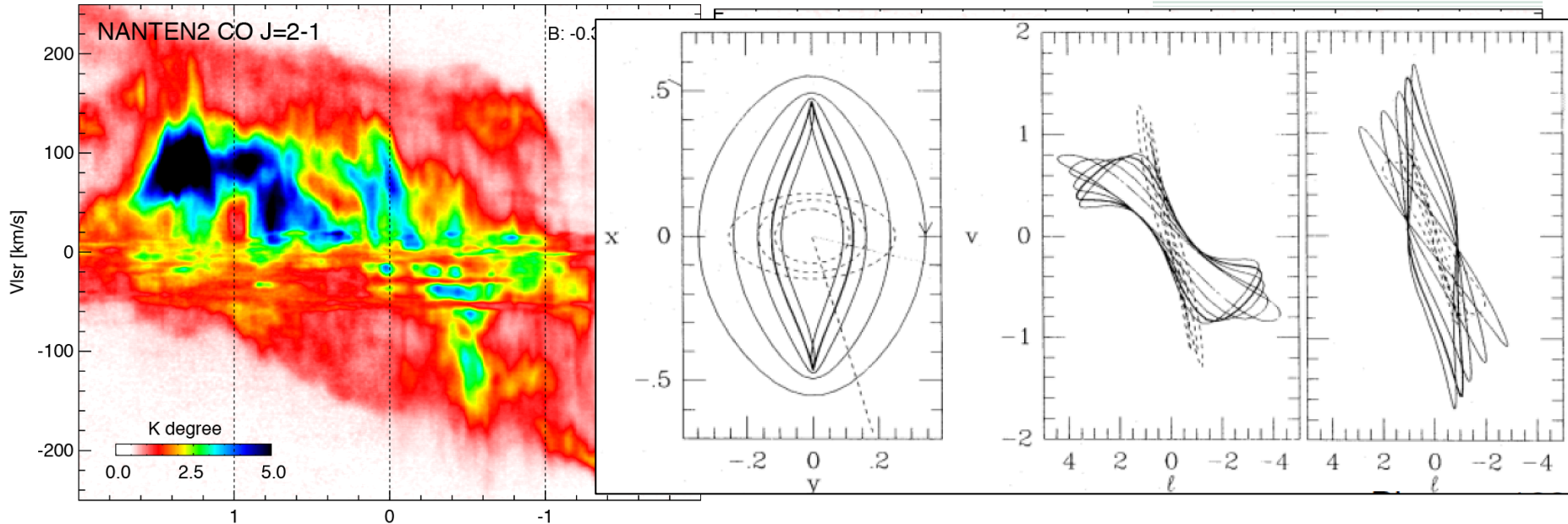


## CMZの構成

1. Sgr A, Sgr B cloudsを含む主要部  
(e.g., Sofue's Arms 1 & 2; Herschel ring)
2. p-v図で平行四辺形を取る成分  
so-called “Expanding Molecular Ring”



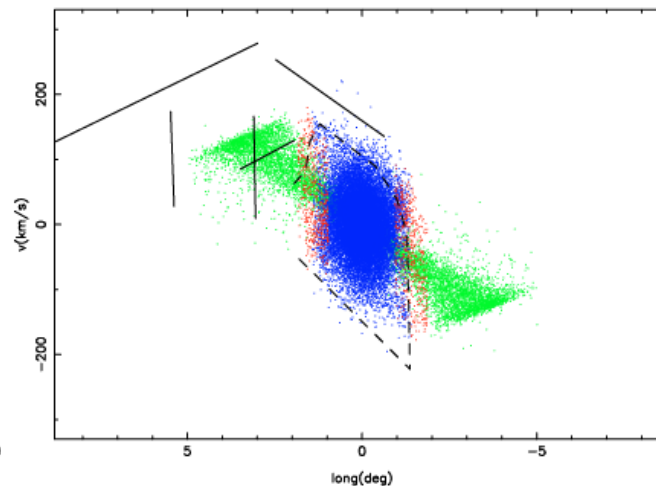
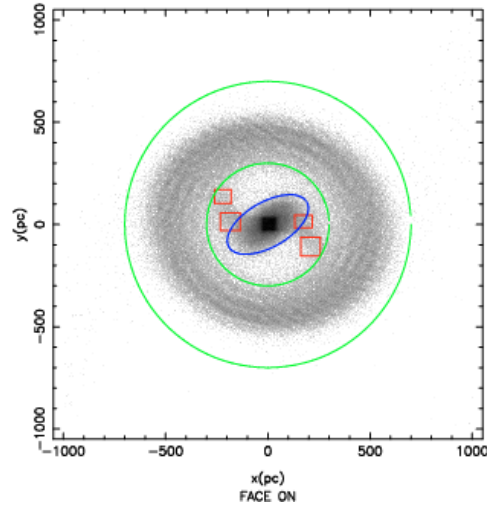
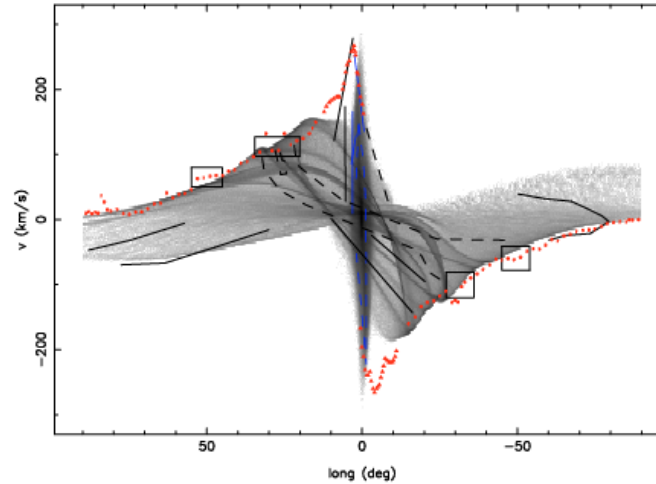
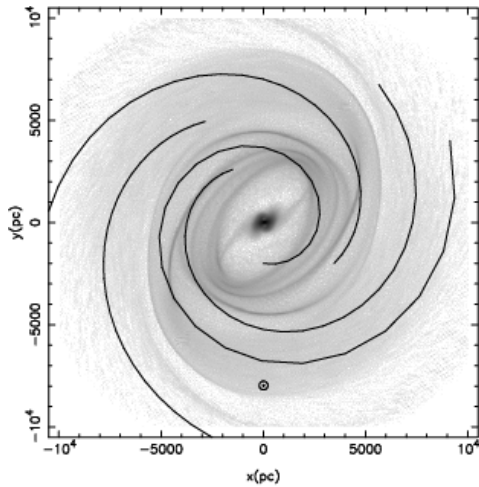
# CMZの分子ガス (平行四辺形構造)



## Galactic Bar起源説

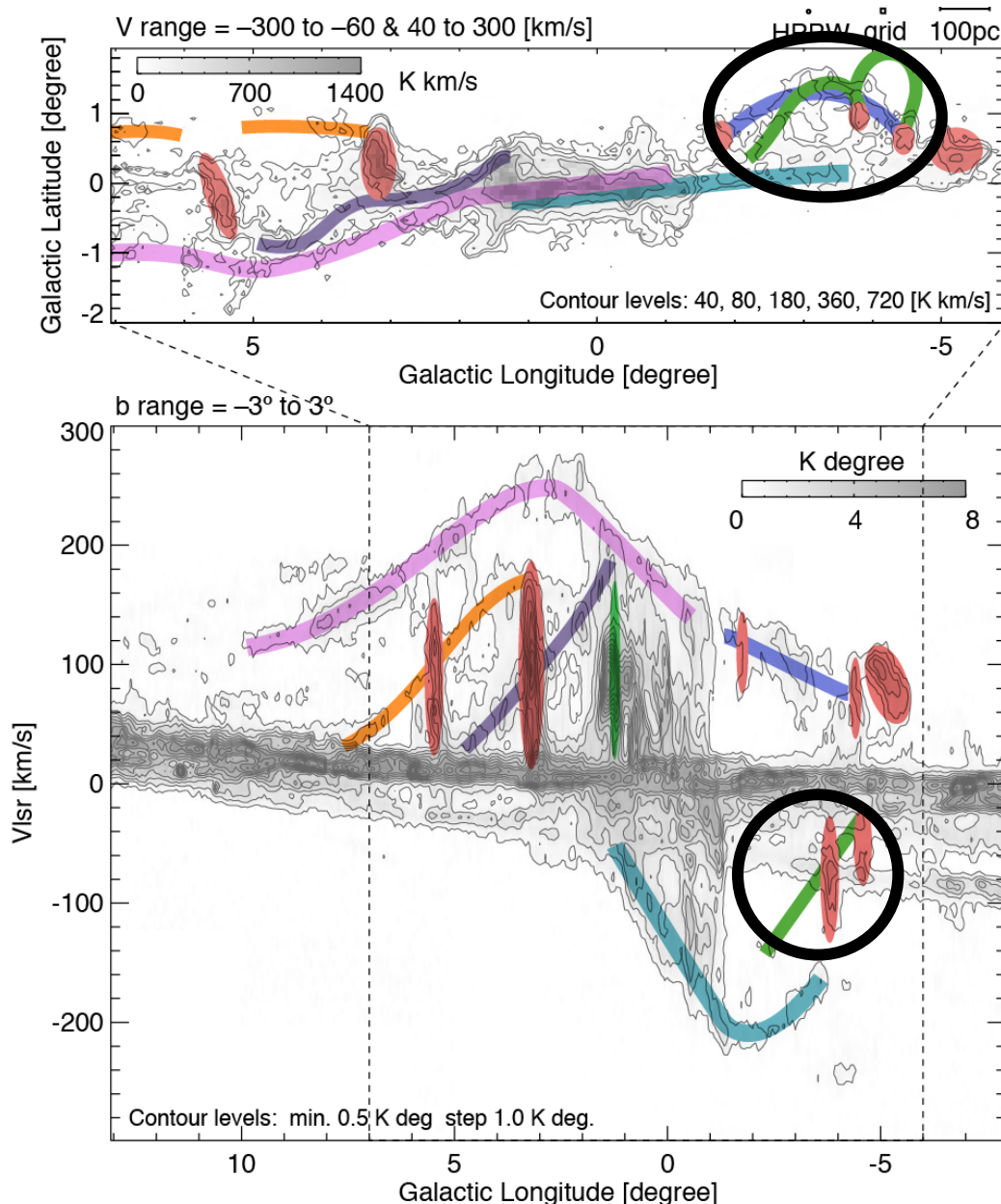
- Binney et al. (1991)
- 楕円軌道のガス運動により非一様回転成分=平行四辺形を説明

# 数値計算例(Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



- 2MASSデータを元にポテンシャルを構築しアーム構造、CMZ平行四辺形の再現を試みる
- 大局的分布(アーム構造)は観測とよく一致
- CMZは非一様回転成分は見えるものの不明瞭
- ガスの銀経正方向への偏りは解釈できない
- 高速度成分は再現できない
- 鉛直方向構造は取り扱っていない

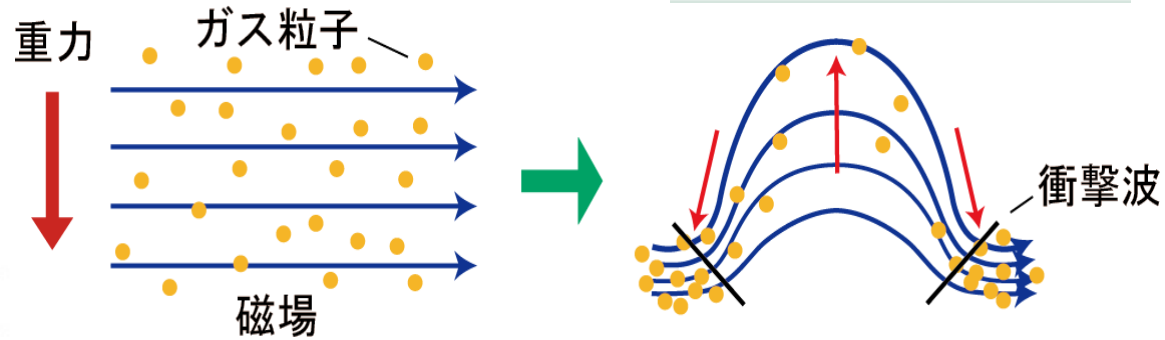
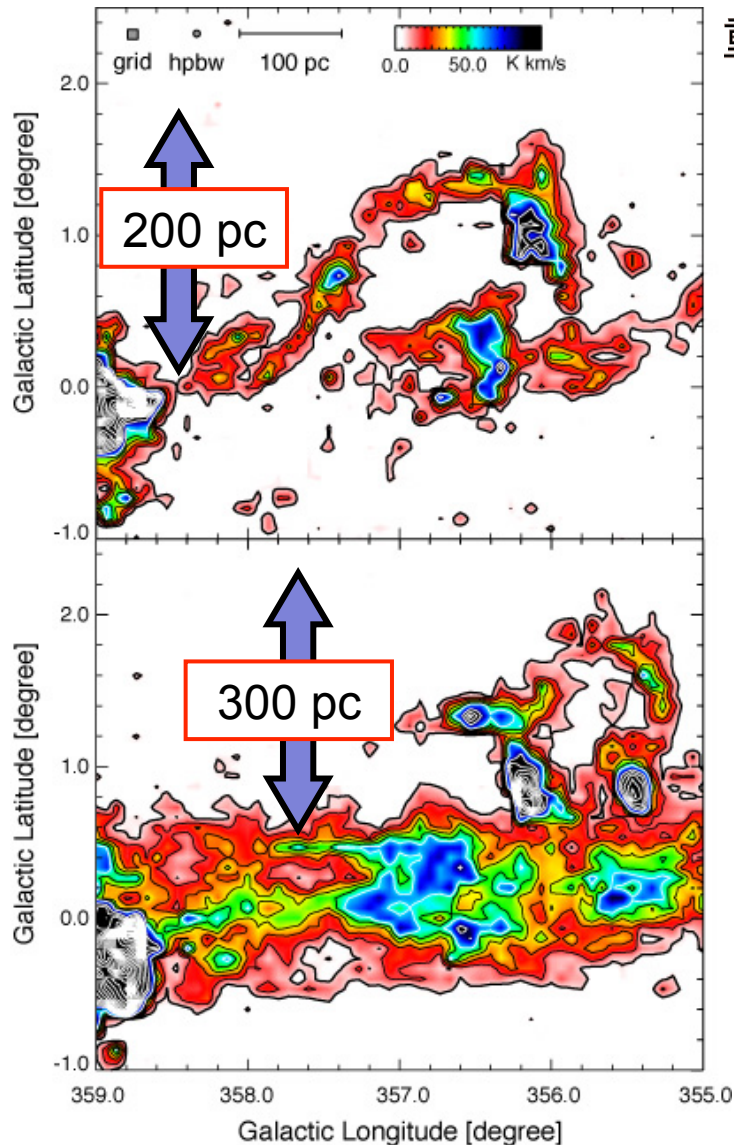
# 銀河系中心部の分子雲 (R<1kpcの大局的構造)



1. ガスの銀経正方向への偏り
2. CMZの平行四辺形の速度構造
3. CMZ外に点在するコンパクト(<50pc)な高速度(>100km/s)構造
4. 高速度構造を結ぶように分布する定速度勾配の構造(銀画面に対して浮上している)

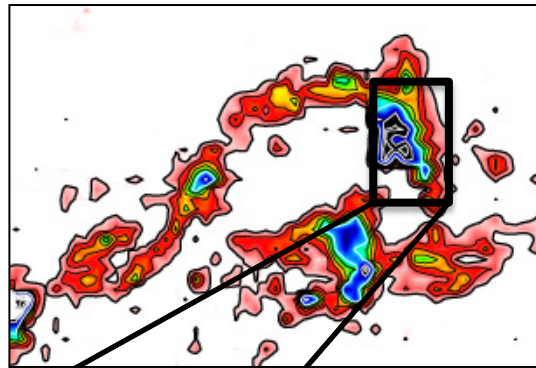


# パーカー不安定性による磁気浮上ループ



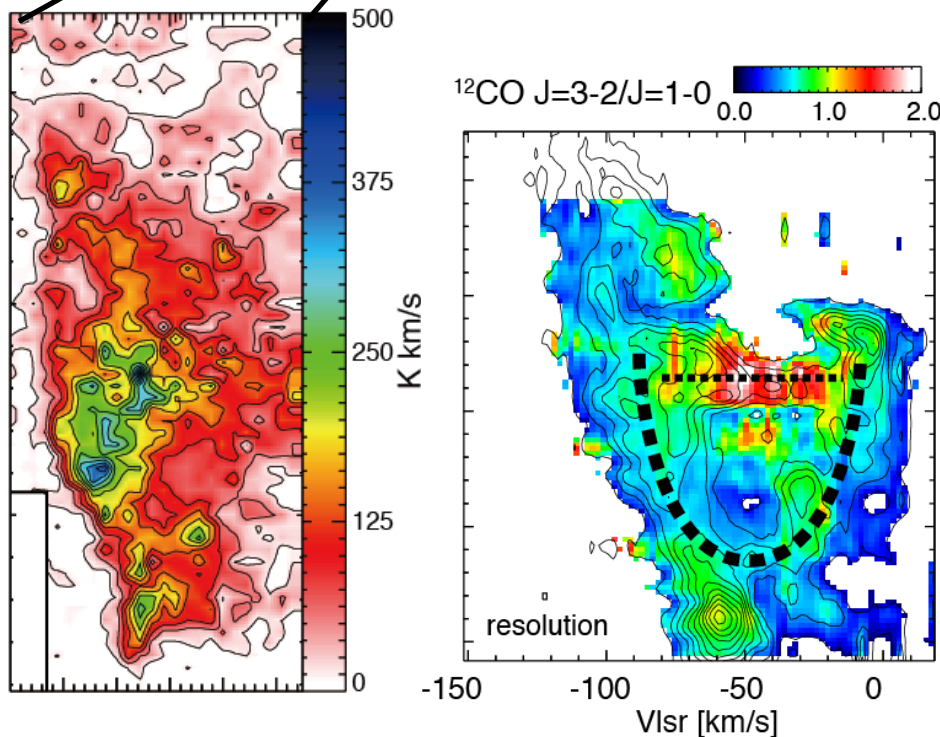
- 中心から700pcに、2本のループ状分子雲(ループ1, 2)を発見(Fukui+2006)
- 根元(フットポイント)でガスの集中と、大きな速度分散( $\sim 50$  km/s)
- Parker不安定性による形成
  - フットポイントで衝撃波+ガスの集中
- 合計の運動エネルギー  $\sim 10^{52}$  erg (Torii+2010b)
  - 超新星爆発100–1000個相当

# ループ1、2フットポイントの高分解能観測



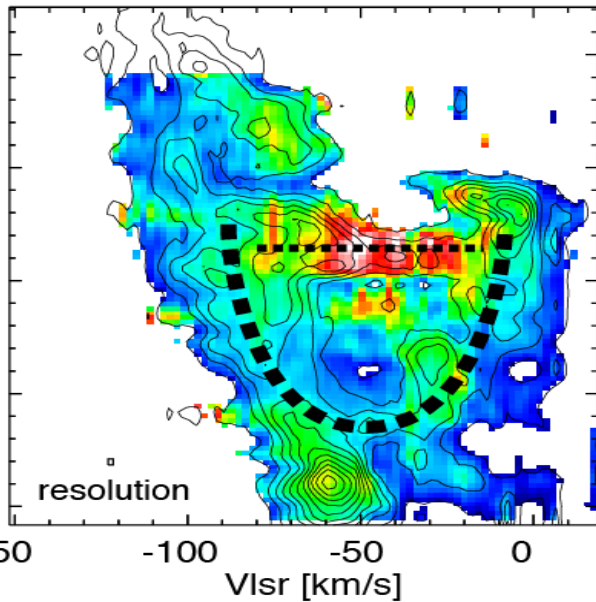
NANTEN2, Mopra, ASTEによるCO J=1-0, 3-2, 4-3, 7-6輝線の高分解能(~数pc)観測 (Torii et al. 2010a)

#複数のJ遷移を比較することで、分子雲の温度、密度を推定できる



- U字型の速度構造を発見
- CO3-2/1-0比が高く、全体で温度50K, 中央で>100K
- ガスの落下による加熱と、磁気リコネクションによる局所的な加速・加熱を提案
- U字型構造は分子雲ループで一般的(Kudo+2011)

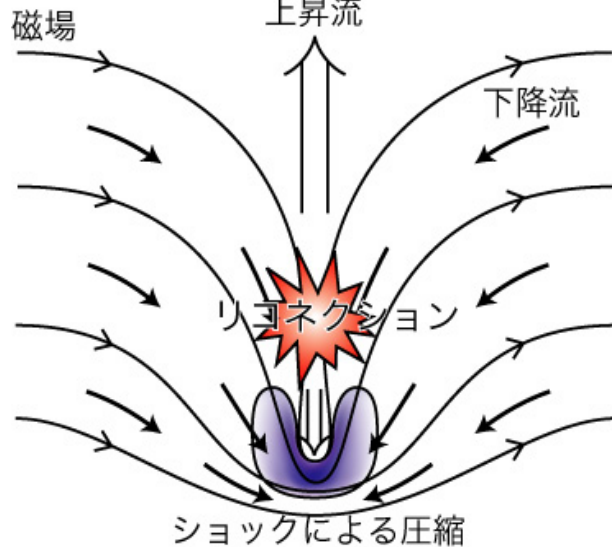
# ループ1、2フットポイントの高分解能観測



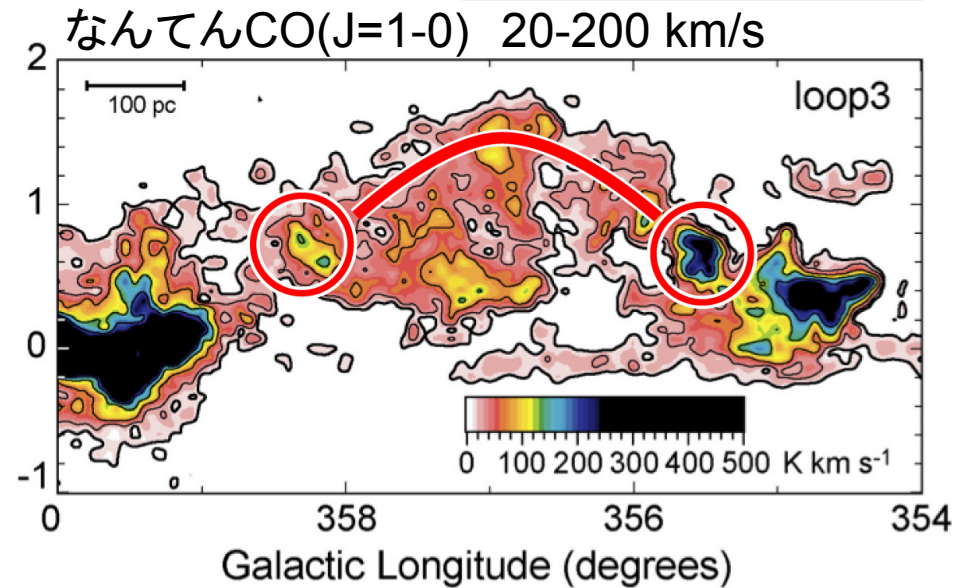
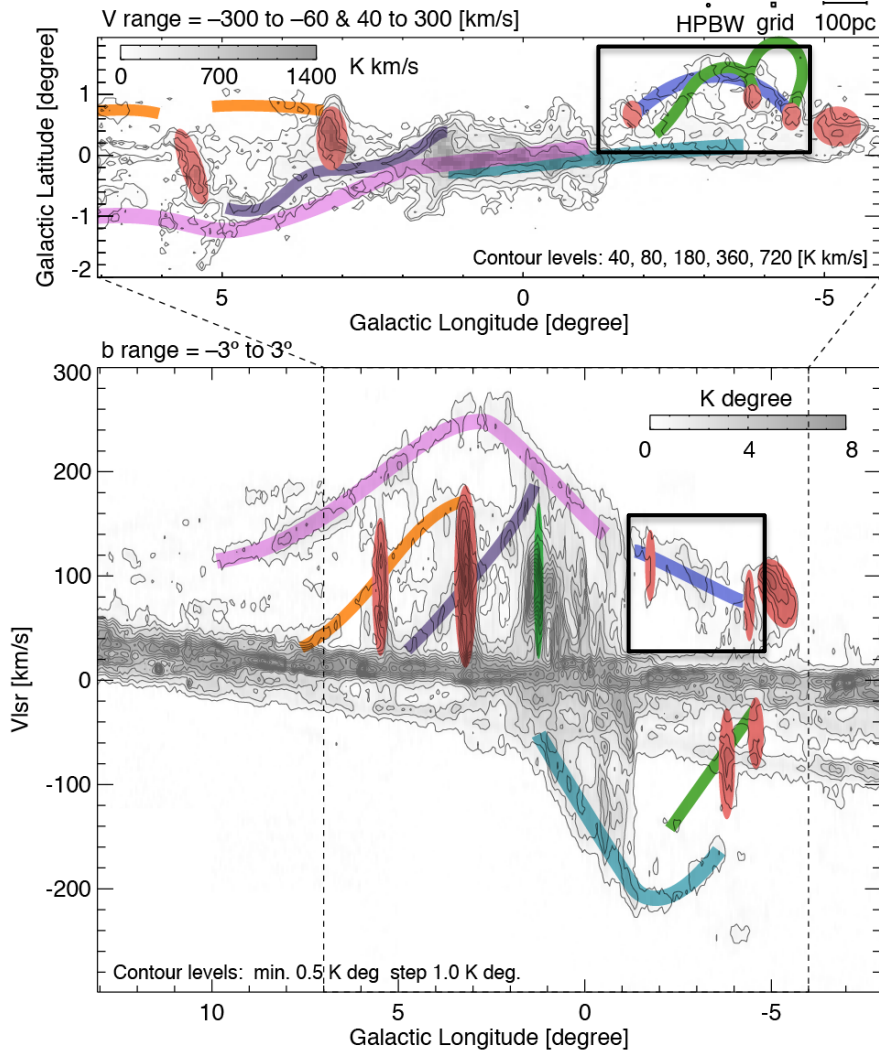
NANTEN2, Mopra, ASTEによるCO J=1-0, 3-2, 4-3, 7-6輝線の高分解能(~数pc)観測 (Torii et al. 2010a)

#複数のJ遷移を比較することで、分子雲の温度、密度を推定できる

- U字型の速度構造を発見
- CO3-2/1-0比が高く、全体で温度50K, 中央で>100K
- ガスの落下による加熱と、磁気リコネクションによる局所的な加速・加熱を提案
- U字型構造は分子雲ループで一般的(Kudo+2011)



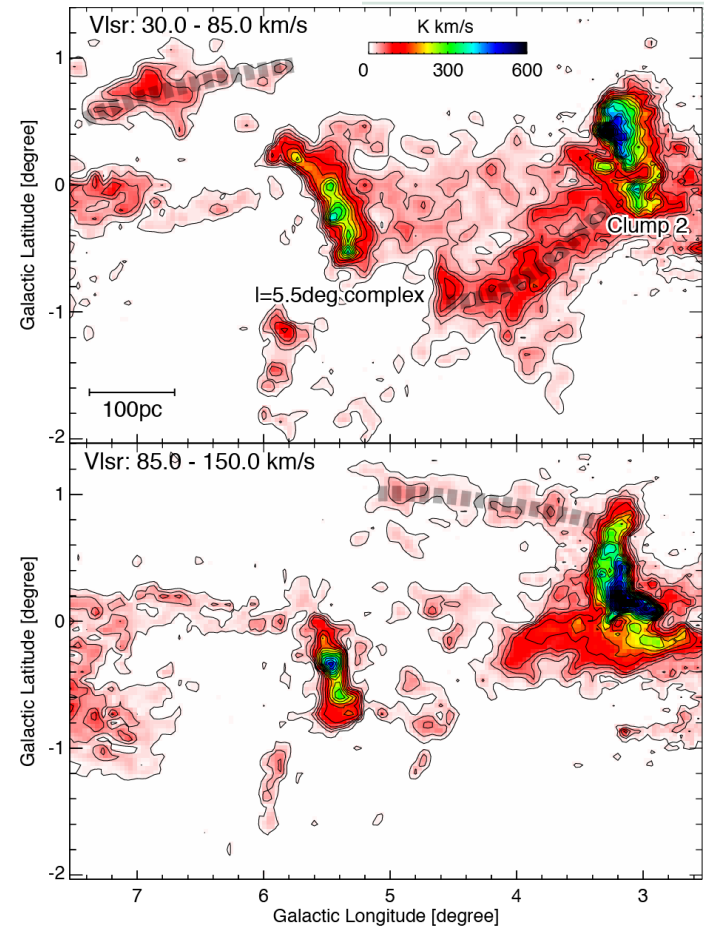
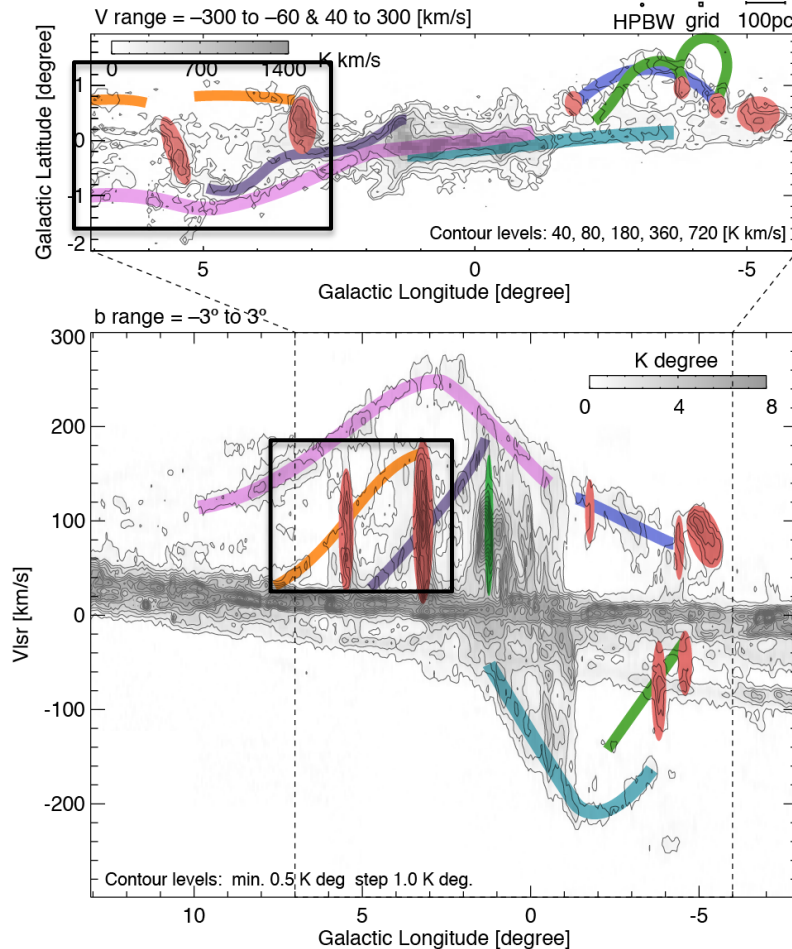
# 銀河系中心部での磁気浮上ループ形成



- パーカー不安定性は普遍的現象
- Fujishita et al. (2009)により、銀経負方向に、第3のループの存在が報告

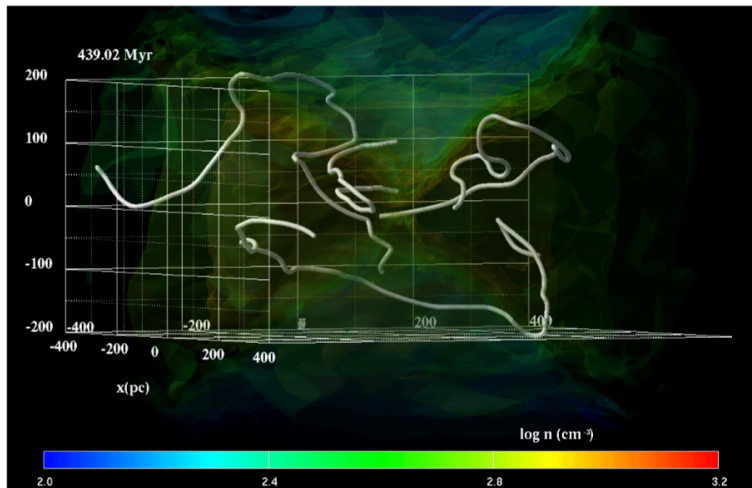
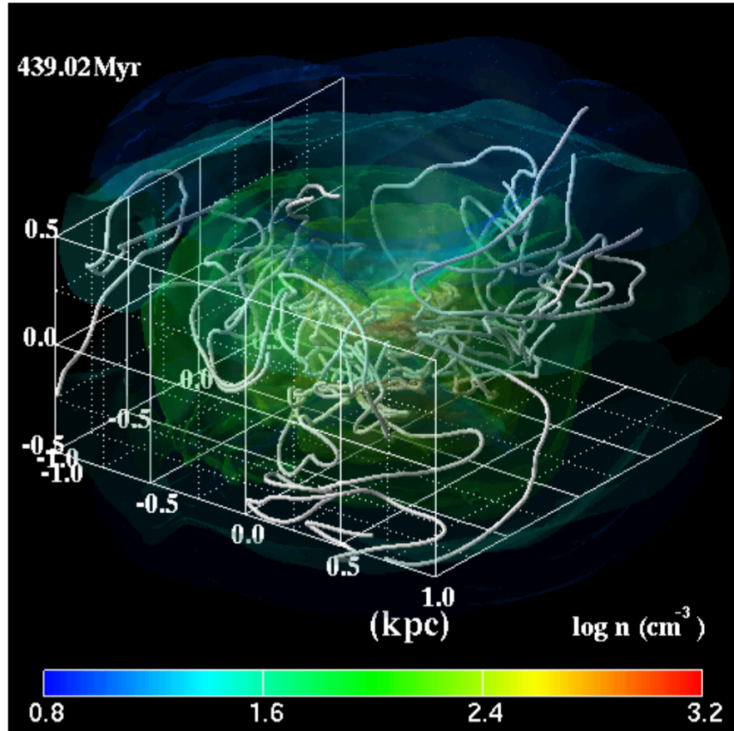


# 銀河系中心部での磁気浮上ループ形成(銀経正方向)

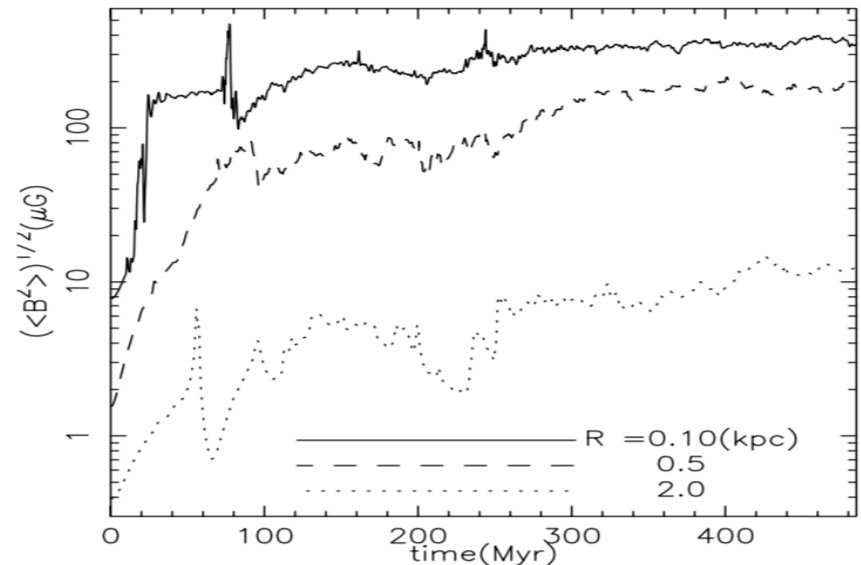


- 鉛直方向に伸びた大速度成分(Bania's Clump 2,  $l=5.5^\circ$  complex)
- 一定の速度勾配を持つ浮上成分
- 磁気浮上ループで解釈できる可能性

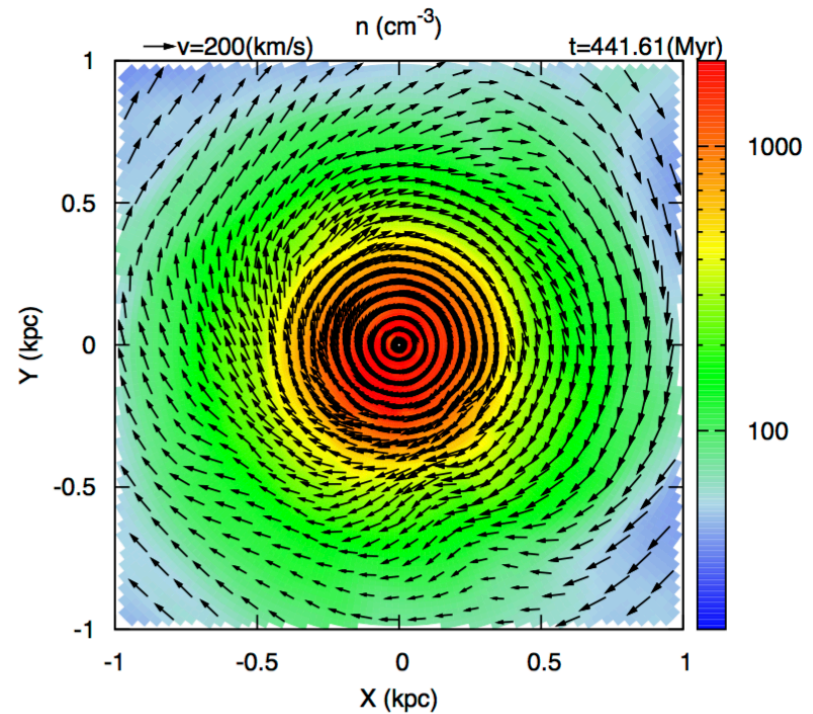
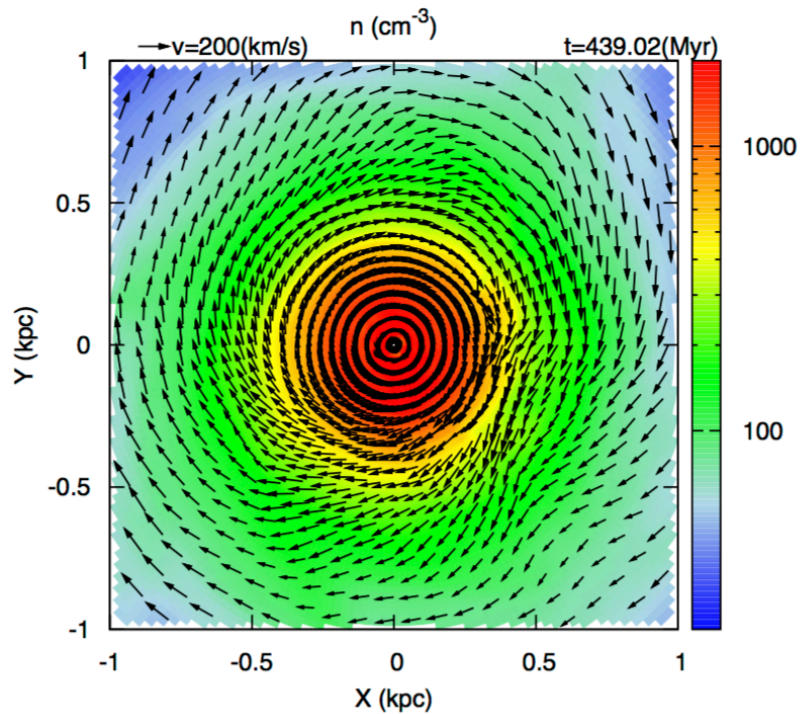
# MHD数値計算 (Suzuku et al. 2015)



- 銀河系中心広域MHD数値計算
- バー構造を含まない軸対象ポテンシャル (Miyamoto & Nagai 1975)
- 回転に伴った磁場の増幅, 乱流の励起 (差動回転, 磁気回転不安定性MRI, Parker不安定性)



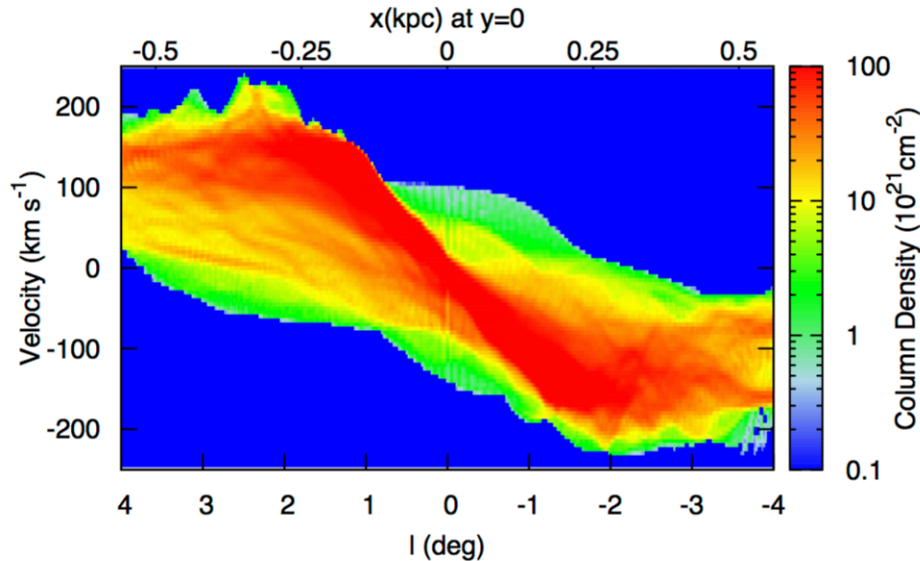
# MHD数値計算 (Suzuku et al. 2015)



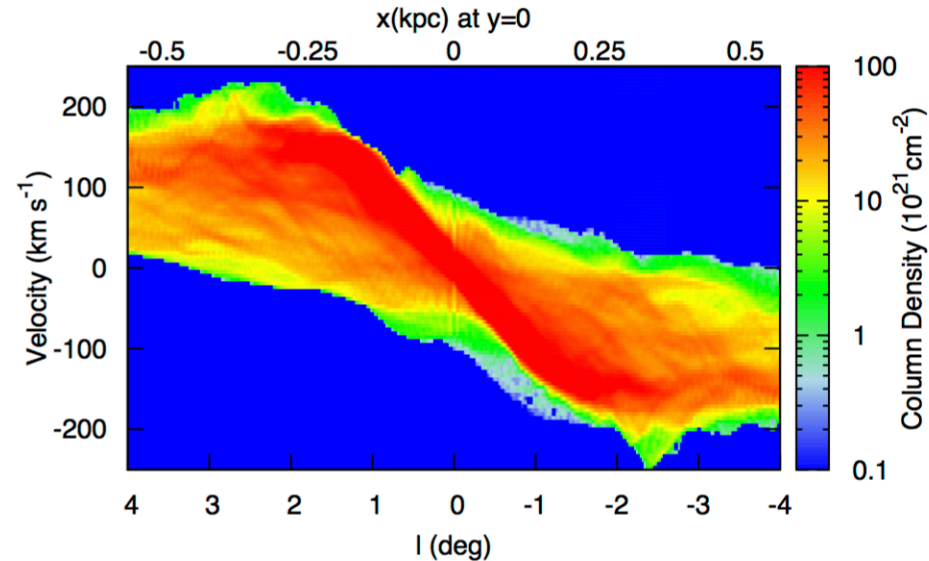
- 時間依存性のある動径方向外向きの速度成分が励起
  - MRIに伴う角運動量輸送(遠心力の増加)と磁気圧の上昇
- 位置-速度図で平行四辺形構造
- 非対象構造

# MHD数值計算 (Suzuku et al. 2015)

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



Column Density ( $|z| < 0.2 \text{ kpc}$ ,  $n > 100 \text{ cm}^{-3}$ ) at  $t=441.61 \text{ (Myr)}$

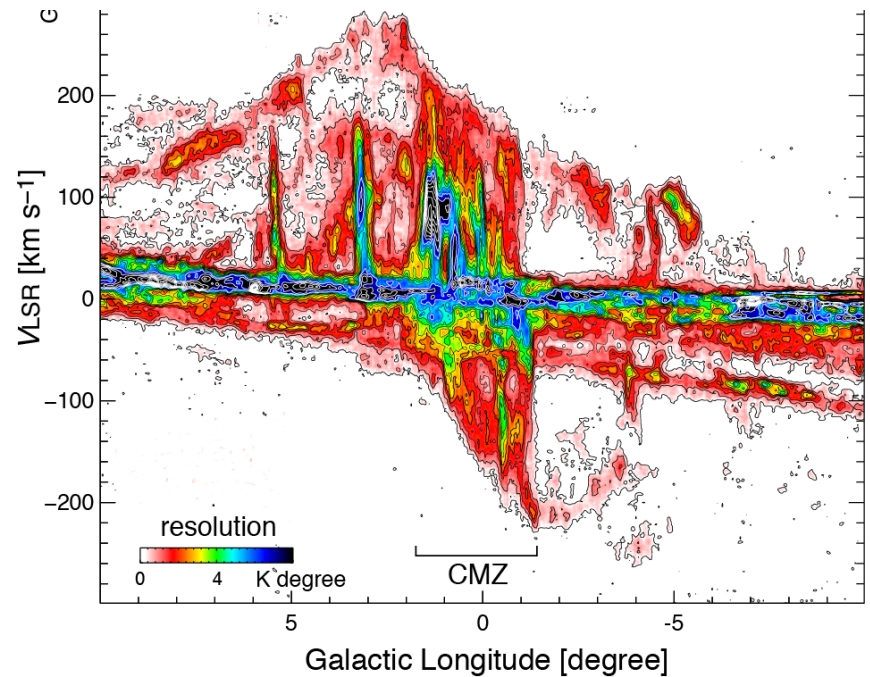
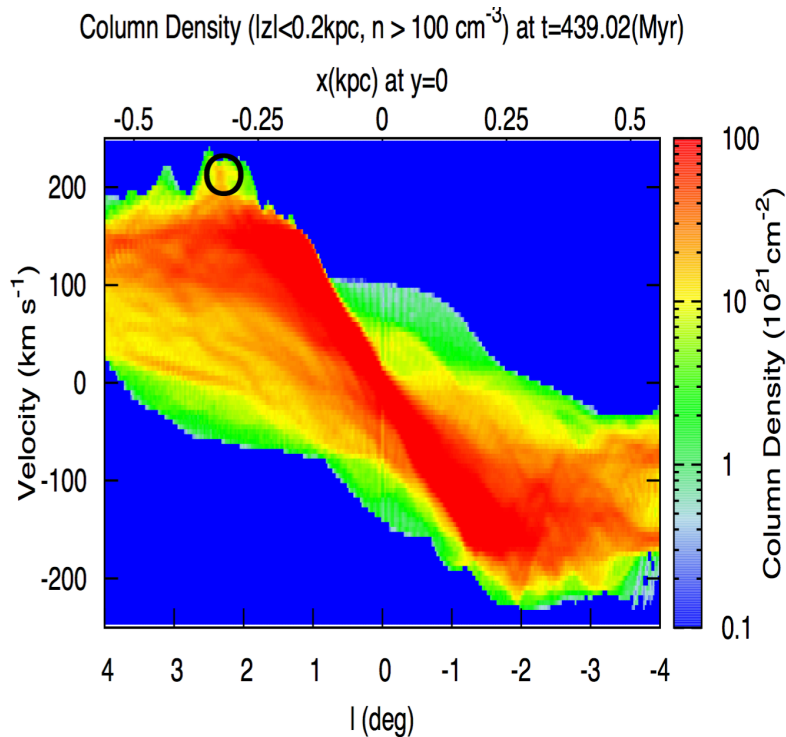


- 時間依存性のある動径方向外向きの速度成分が励起
  - MRIに伴う角運動量輸送 (遠心力の増加) と磁気圧の上昇
- 位置-速度図で平行四辺形構造
- 非対象構造

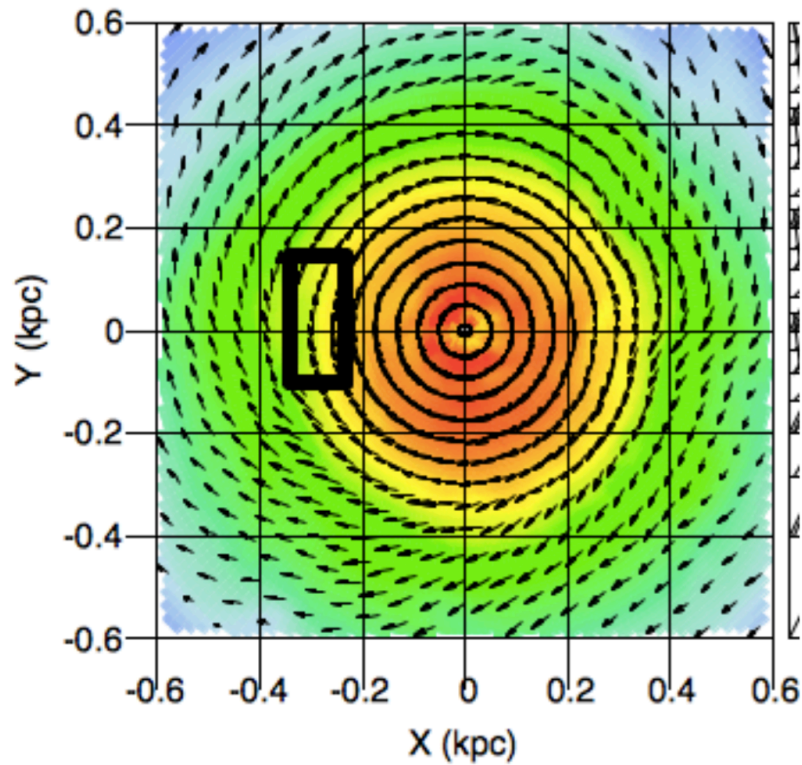


# MHD数值計算結果の解析(Kakiuchi et al. in prep.)

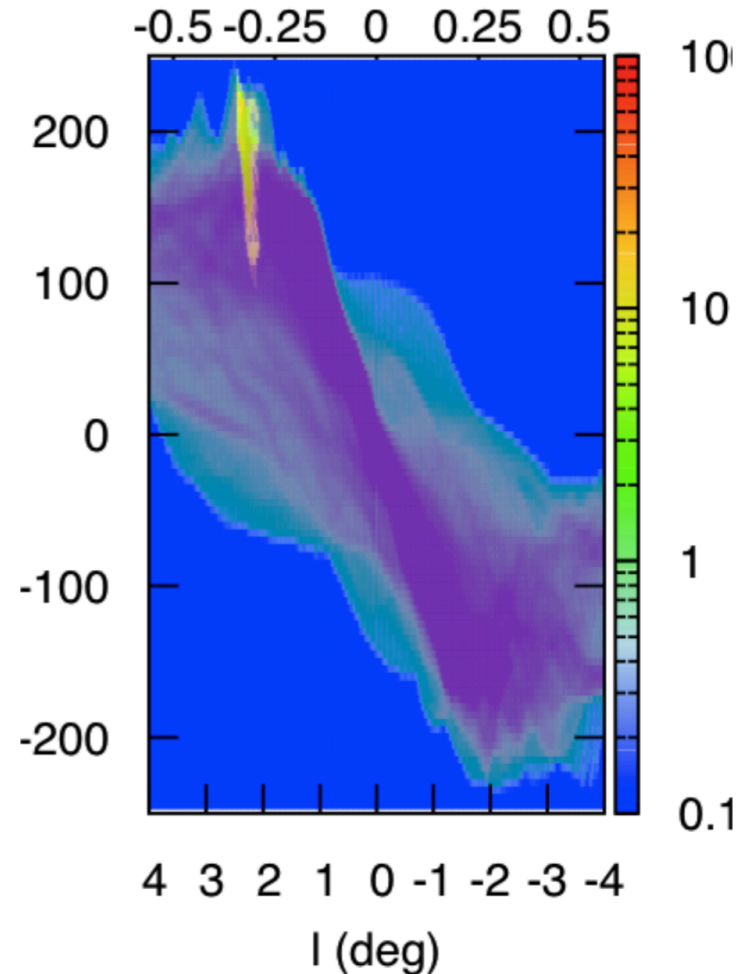
- Suzuki et al. (2015)で水平方向運動の解析
- 課題：
  - 鉛直方向の構造は？(磁気浮上ループ)
  - コンパクトな大速度分散構造は？



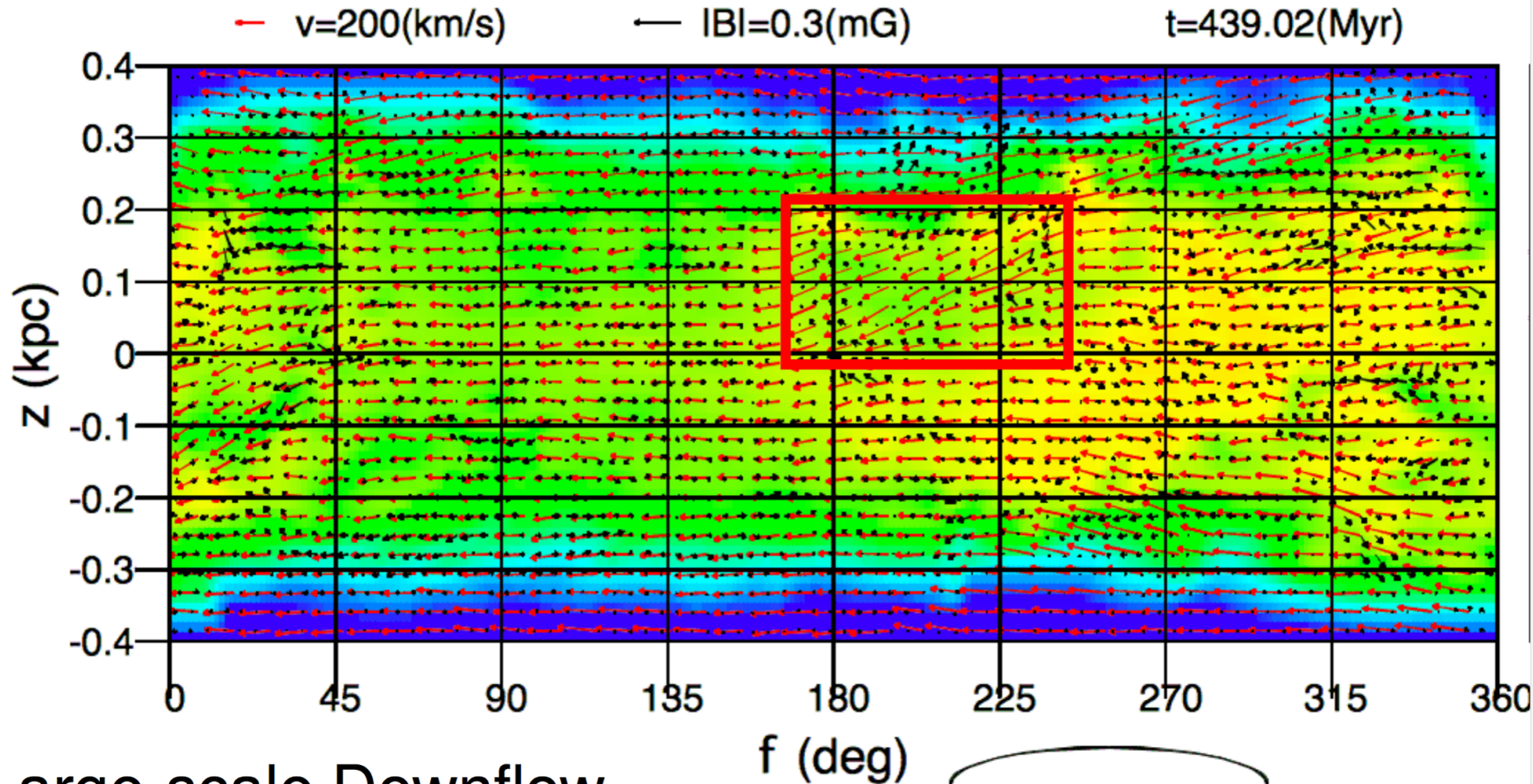
# MHD数值計算結果の解析(Kakiuchi et al. in prep.)



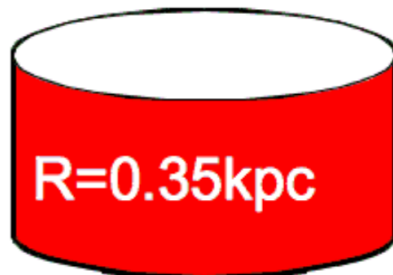
$\mu\text{m}$  Density ( $|z| < 0.2 \text{ kpc}$ ,  $n > 100 \text{ cr}$ )  
at  $t = 439.02 \text{ (Myr)}$



# MHD数值計算結果の解析(Kakiuchi et al. in prep.)

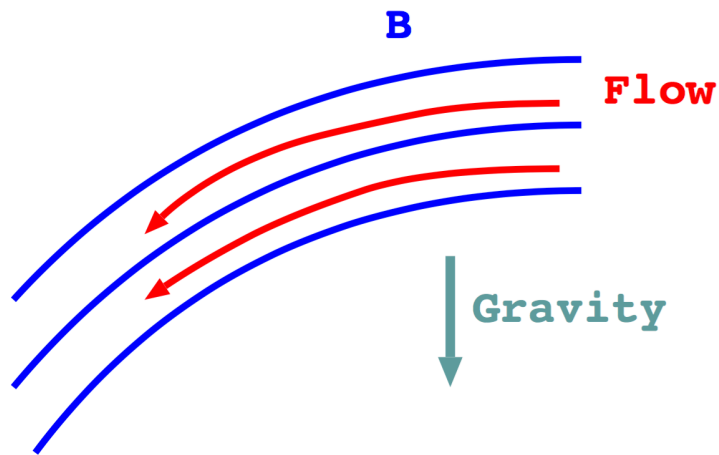


Large-scale Downflow.



# 下降流の正体(鉛直磁場成分)

If taking a look at the magnetic configuration...



- 磁力線に沿って重力により加速落下するガス
- 時間依存でstochasticに形成
- 鉛直方向に伸びた構造

## Parker Instability (Mag. Buoyancy) Parker 1966

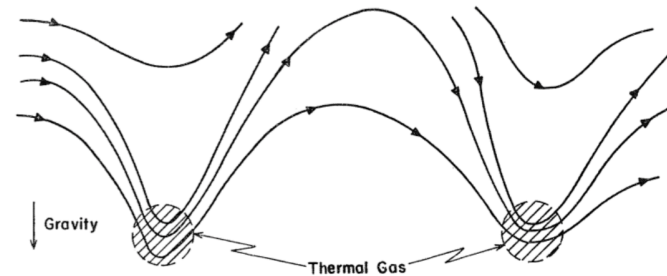
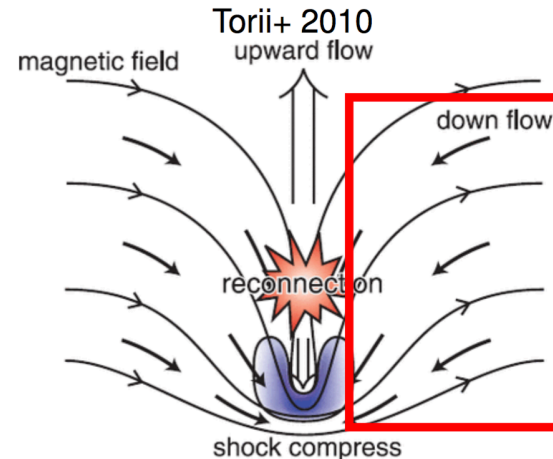


FIG. 2.—Sketch of the local state of the lines of force of the interstellar magnetic field and interstellar gas-cloud configuration resulting from the intrinsic instability of a large-scale field along the galactic disk or arm when confined by the weight of the gas.





# まとめ

- 中心部のガス運動の理解には、磁場が重要
- 分子雲観測：
  - 銀河系中心 $R < 1\text{kpc}$ において、から様々な速度構造、鉛直方向構造を持つ成分が多数検出
  - パーカー不安定性による磁気浮上ループが有力候補
- MHD数値計算：
  - バー構造を含めない計算から、位置-速度図でのCMZの平行四辺形の形成に成功
  - 時間依存するstochasticな構造
  - 鉛直方向磁場に沿ったガスの重力落下により、観測で見られるような大速度分散構造を形成