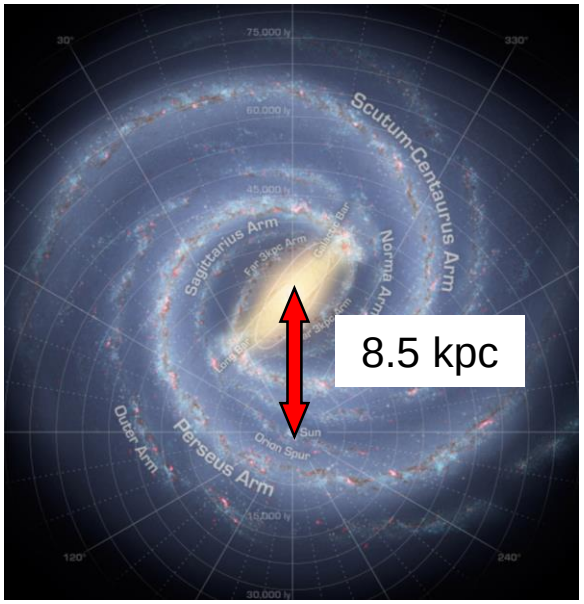
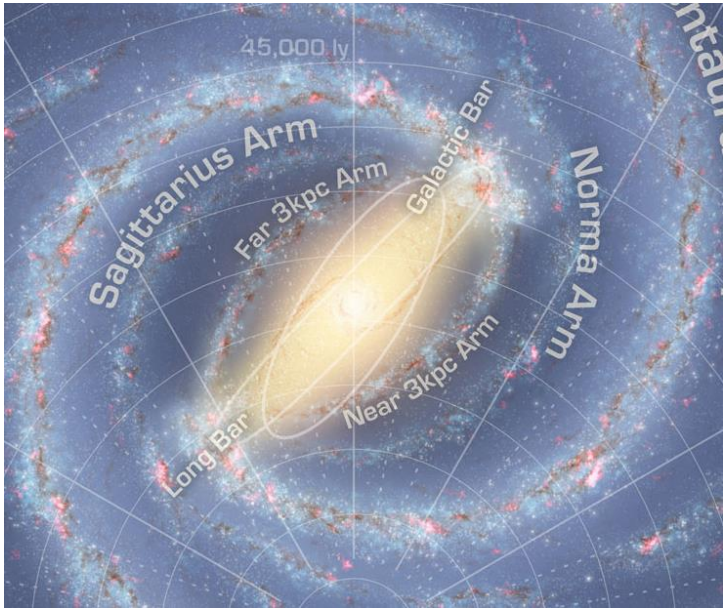
銀河中心領域の分子雲観測とMHD

鳥居 和史(野辺山宇宙電波観測所)

福井康雄, 榎谷玲依(名大)
町田真美(九大), 松元亮治(千葉大),
鈴木健(東大), 柿内健佑(名大/東大)

銀河系中心部

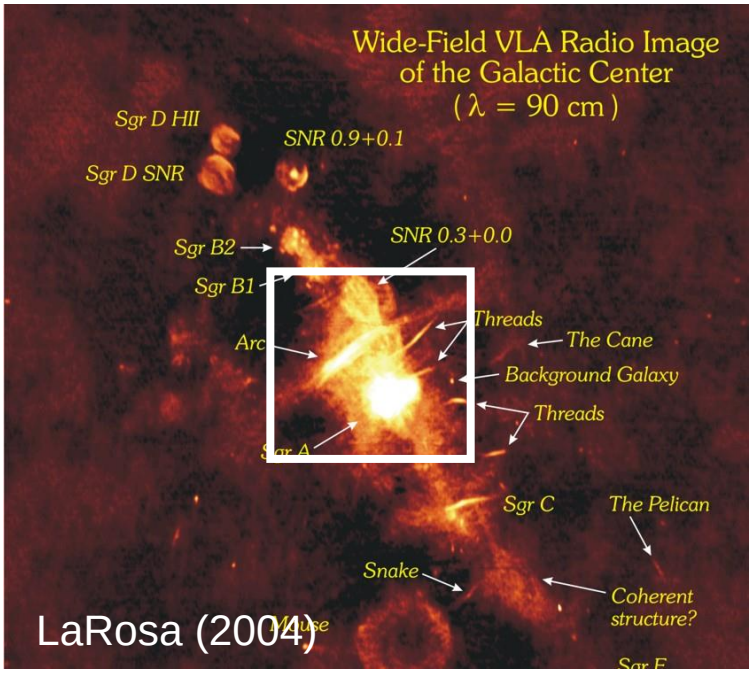


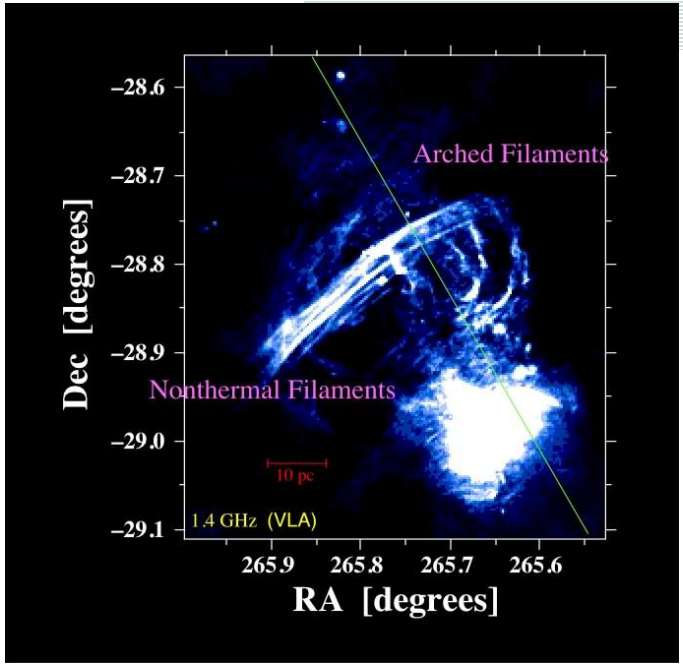


銀河系中心？

- Rg ~ 0.001pc – 1kpc
- Central Molecular Zone (CMZ)
  (Morris & Serabyn 1996)
  - 中心部300pcに(2–6)×10^7 Mo
  - 銀河系の全分子ガスの10%
  - Dense gasの80% (Longmore+13)
  - 大速度分散（15–50km/s）
- しかし、星形成は不活発
  - 星形成率：~0.1Mo/yr
    (e.g., Barnes+17)
  - 一方で、活発な星形成領域(Sgr B2)や2つの巨大星団(Arches, Quintuplet)も

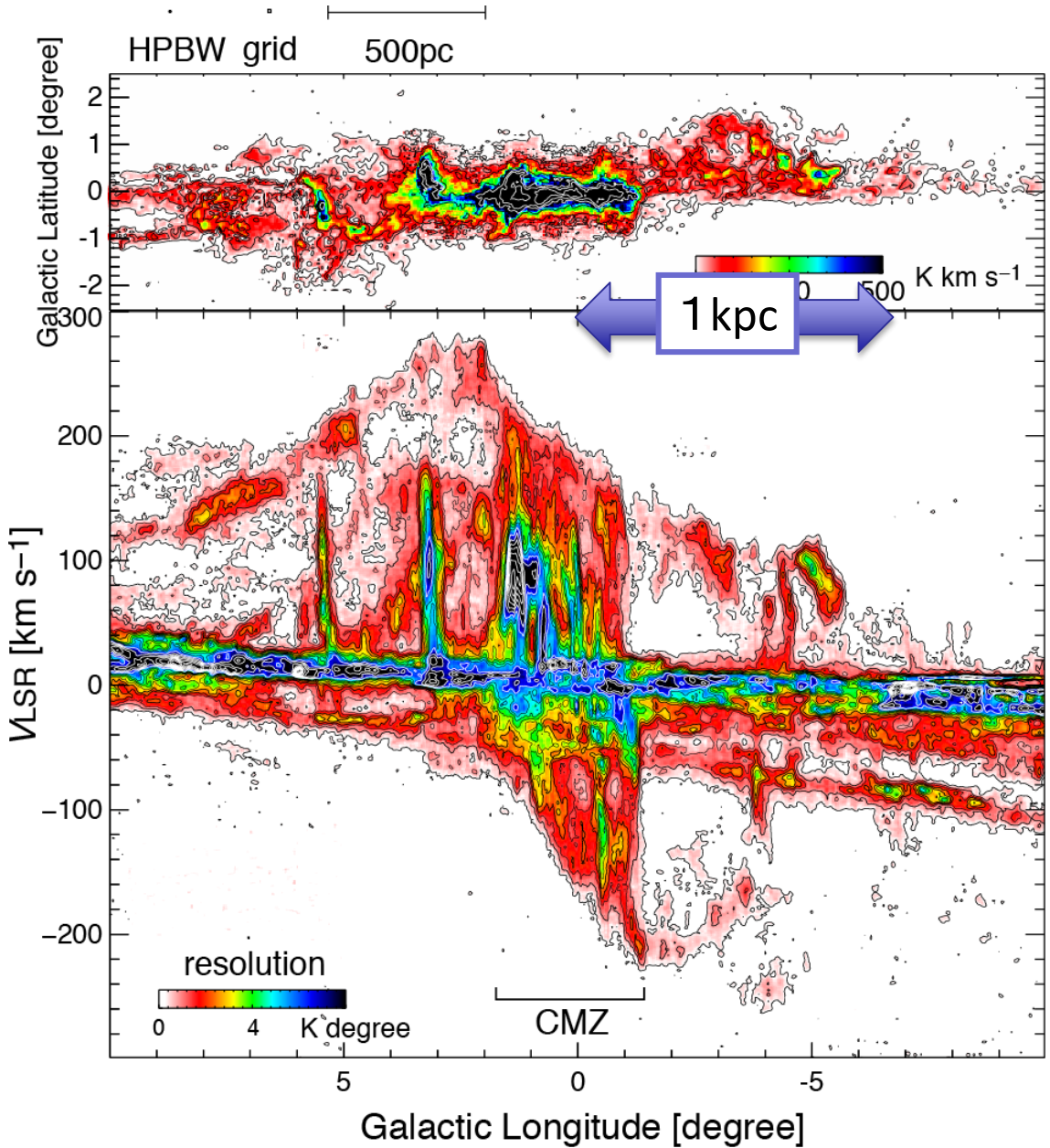
CMZの磁場構造





- 強い磁場 (※円盤部の典型的な分子雲で1μG)
  - 大局的に> 50μG (Crocker + 10)
  - 局所的に ~ 1 mG (Yuzef-Zadeh+84; Morris 90; Ferriere 09)
- 磁場構造
  - 垂直磁場 (Yuzef-Zadeh+84; Morris 90; LaRosa+00)
  - 水平磁場 (Novak+00,03; Nishiyama+09,10)

銀河系中心部の分子雲

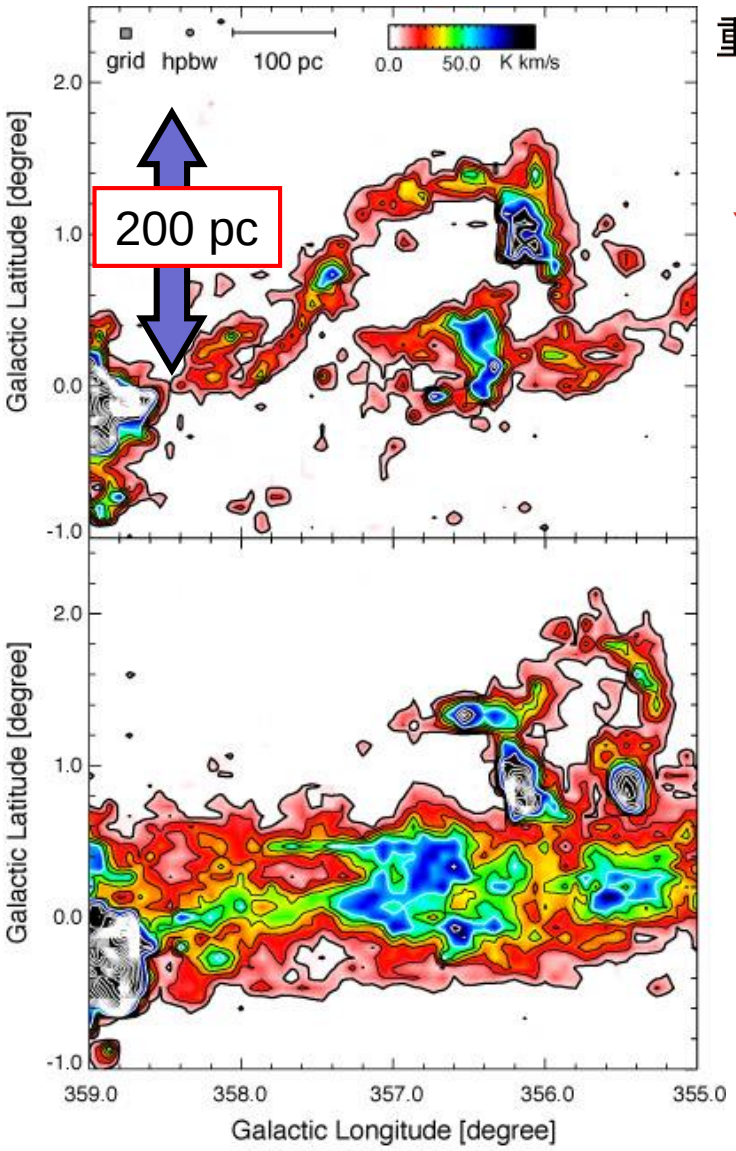


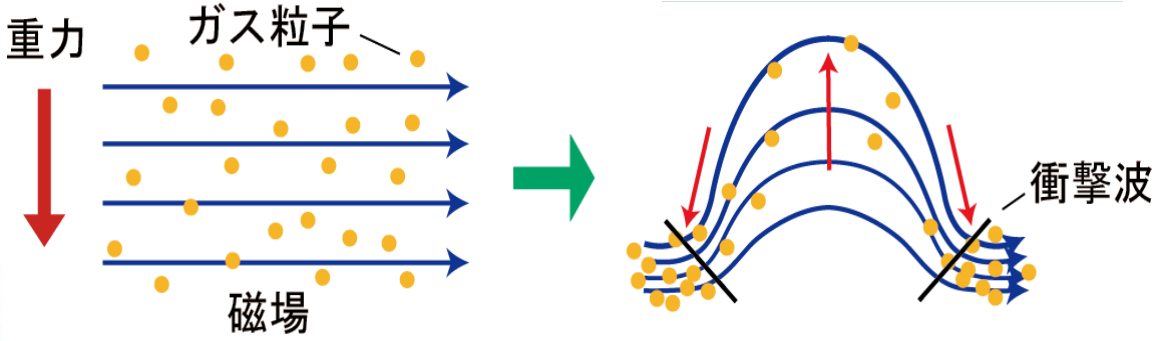
NANTEN 4m鏡CO(J=1-0)
(Torii et al. 2010b)

- 500km/sにおよぶ分子ガスの速度構造
- CMZの平行四辺形の速度構造
- CMZ外に点在するコンパクト(<50pc)な高速度(>100km/s)構造
- 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）

1. 銀河系中心部の磁気浮上ループとパーカー不安定性

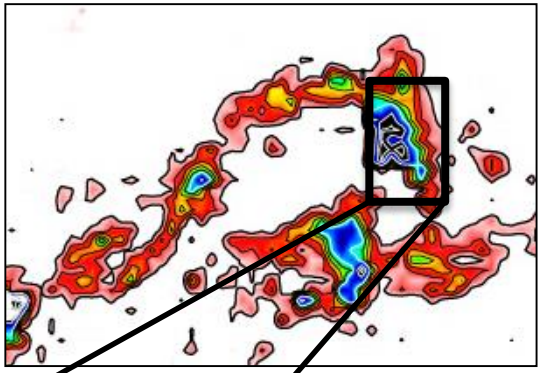
パーカー不安定性による磁気浮上ループ





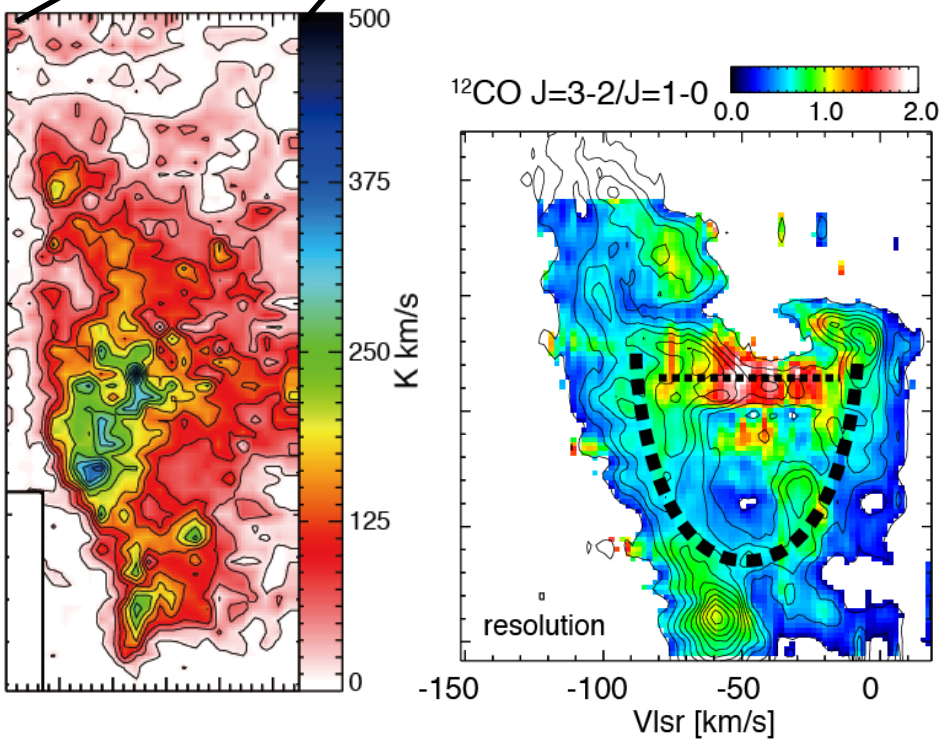
- 中心から700pcに、2本のループ状分子雲（ループ1, 2）を発見(Fukui+2006)
- 根元（フットポイント）でガスの集中と、大きな速度分散(~50 km/s)
- Parker不安定性による形成
  - フットポイントで衝撃波＋ガスの集中
- 合計の運動エネルギー ~ 10^{52} erg (Torii+2010b)
  - 超新星爆発100–1000個相当

ループ1、2フットポイントの高分解能観測



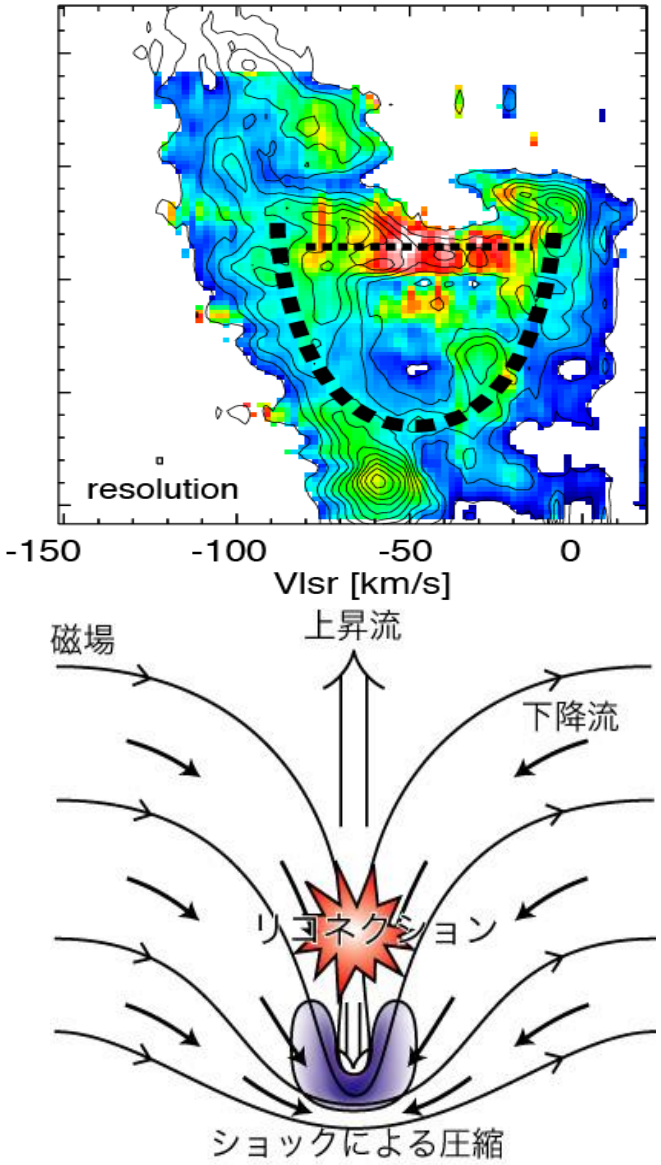
NANTEN2, Mopra, ASTEによるCO J=1-0, 3-2,4-3,7-6輝線の高分解能(~数pc)観測
(Torii et al. 2010a)

#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

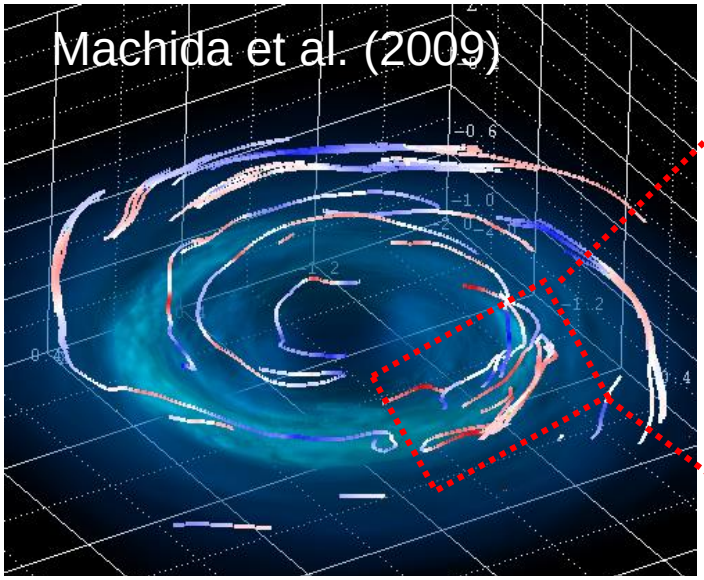


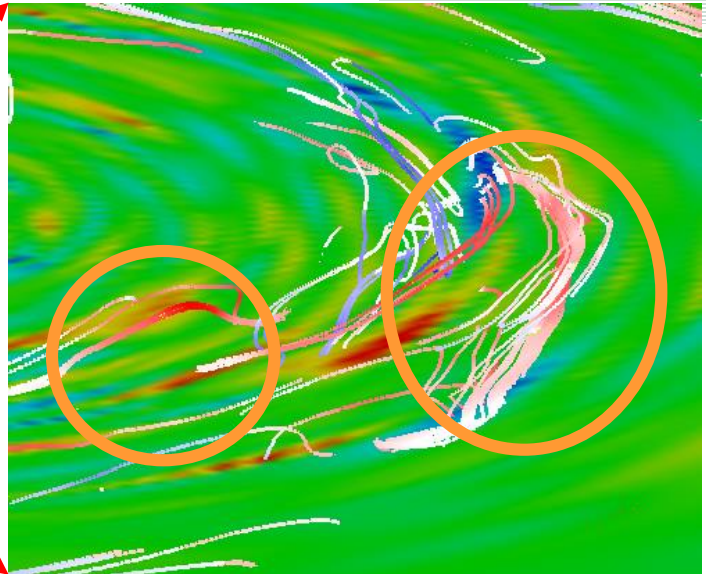
NANTEN2, Mopra, ASTEによるCO J=1-0, 3-2,4-3,7-6輝線の高分解能(~数pc)観測
(Torii et al. 2010a)

#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

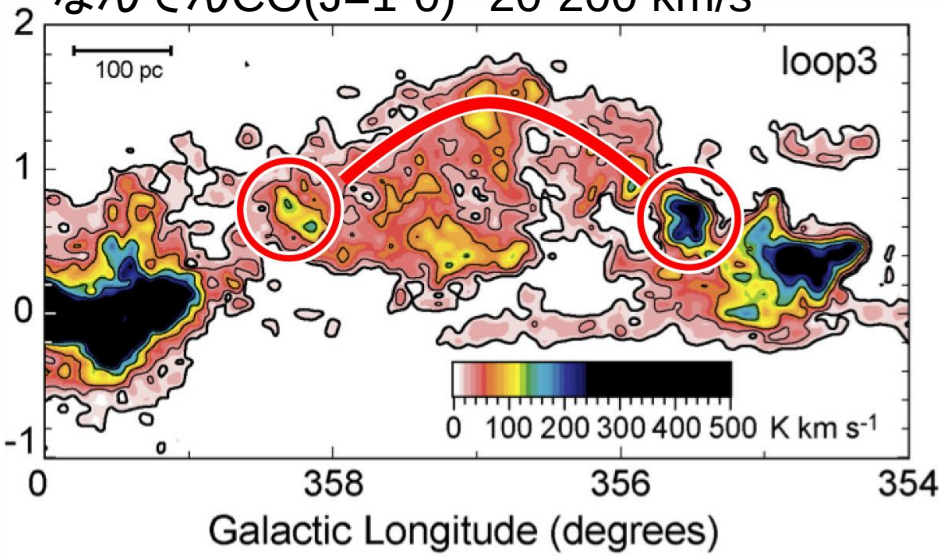
- U字型の速度構造を発見
- CO3-2/1-0比が高く、全体で温度50K, 中央で>100K
- ガスの落下による加熱と、磁気リコネクションによる局所的な加速・加熱を提案
- U字型構造は分子雲ループで一般的(Kudo+2011)

銀河系中心部でのループ形成



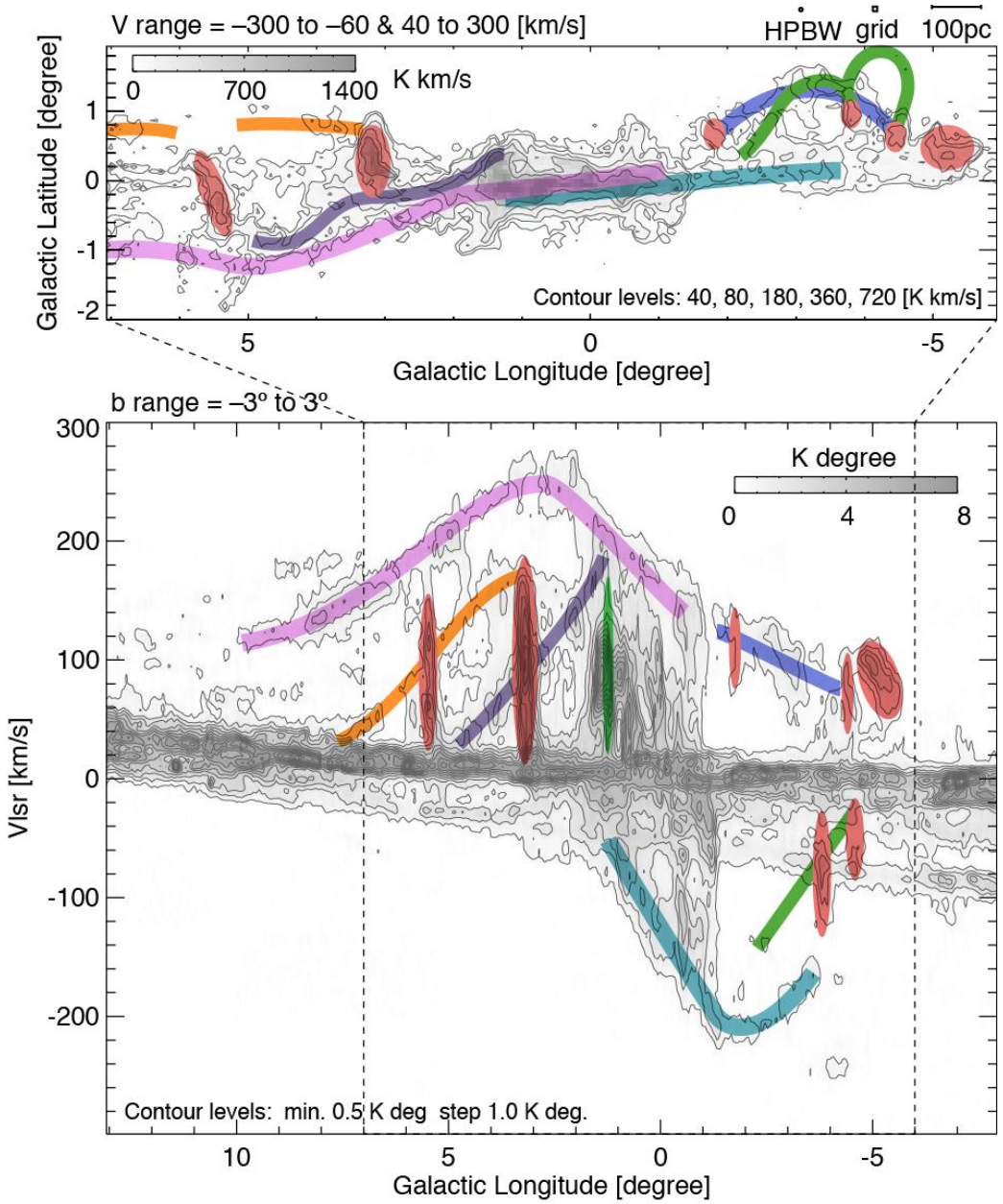


なんてんCO(J=1-0)　20-200 km/s



- MHD数値計算の結果、銀河系中心で多数のループを検出
- Fujishita et al. (2009)により、ループ3の存在が報告

銀河系中心部でのループ形成



CMZの外側の分子雲

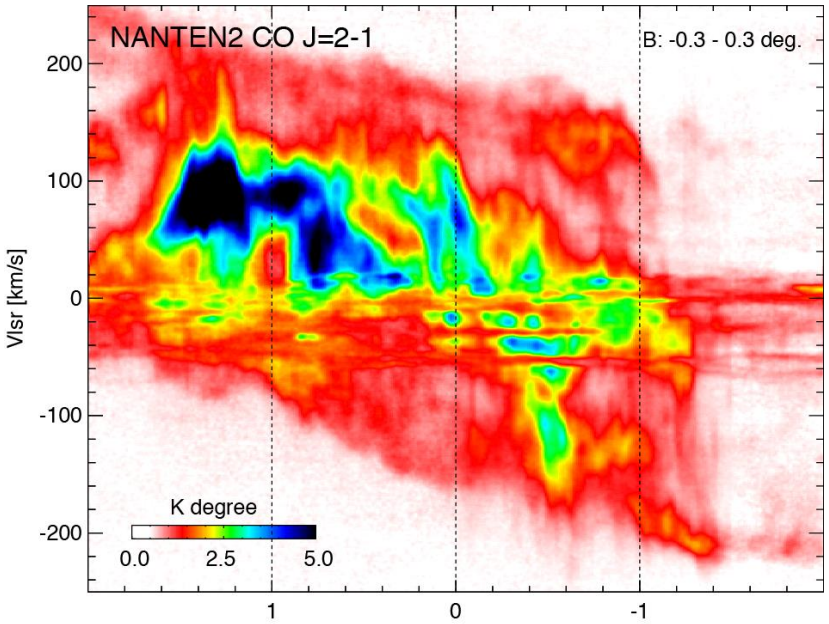
- コンパクト(<50pc)かつ大速度分散(>50km/s)の成分
- それらを結ぶ(またぐ)速度勾配を持った浮上成分

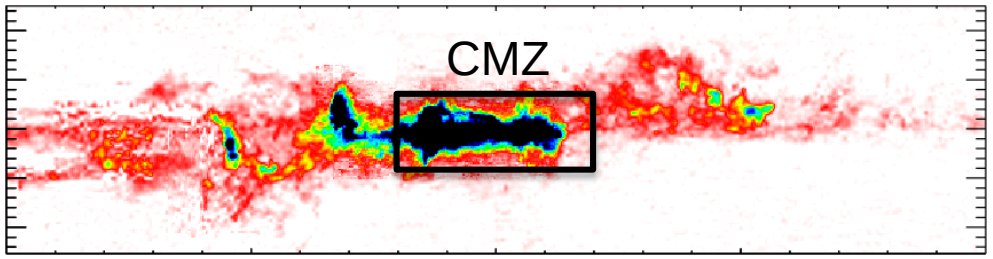
課題・疑問:

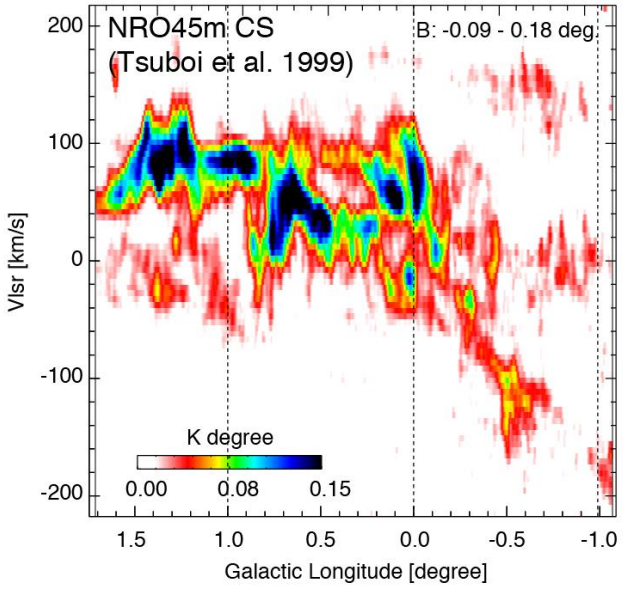
- 分子雲構造の理論的再現
- CMZへの適用

2. MHD円盤としてのCMZ

CMZの分子ガス (平行四辺形構造)





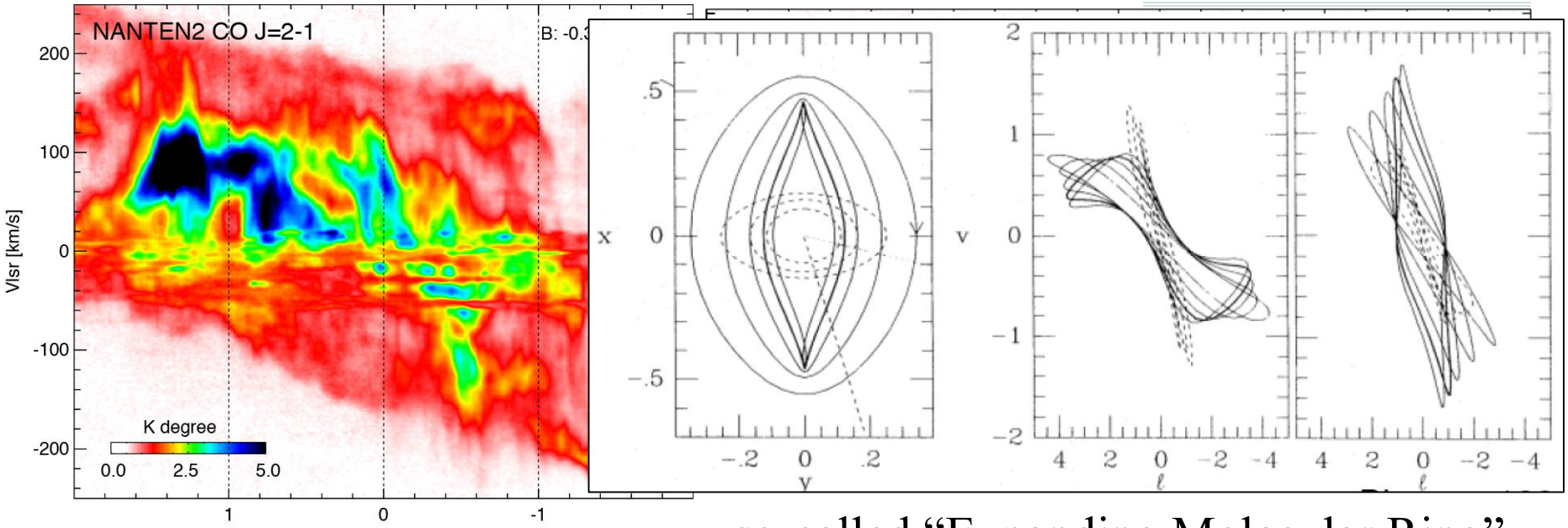


CMZの構成

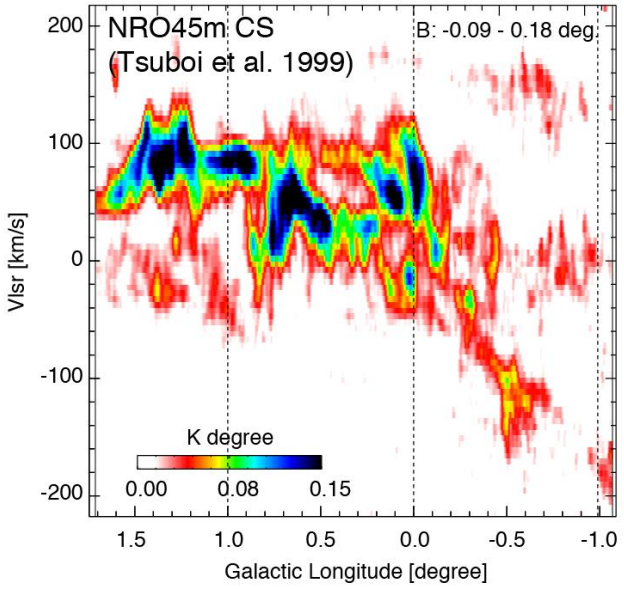
1. Sgr A, Sgr B cloudsを含む主要部 (e.g., Sofue's Arms 1 & 2; Herschel ring)
2. p-v図で平行四辺形を取る成分

so-called "Expanding Molecular Ring"

CMZの分子ガス (平行四辺形構造)



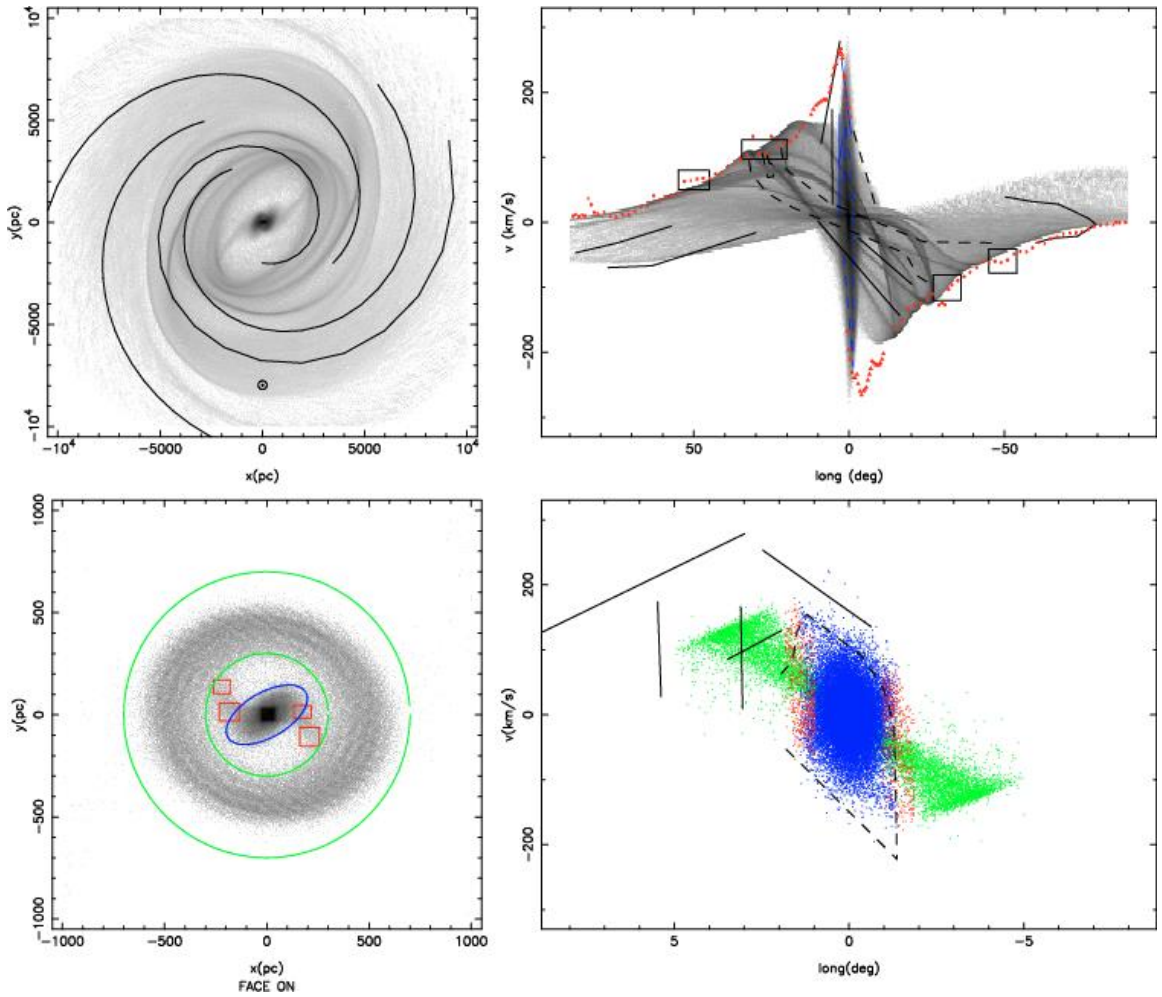
so-called “Expanding Molecular Ring”



Galactic Bar起源説

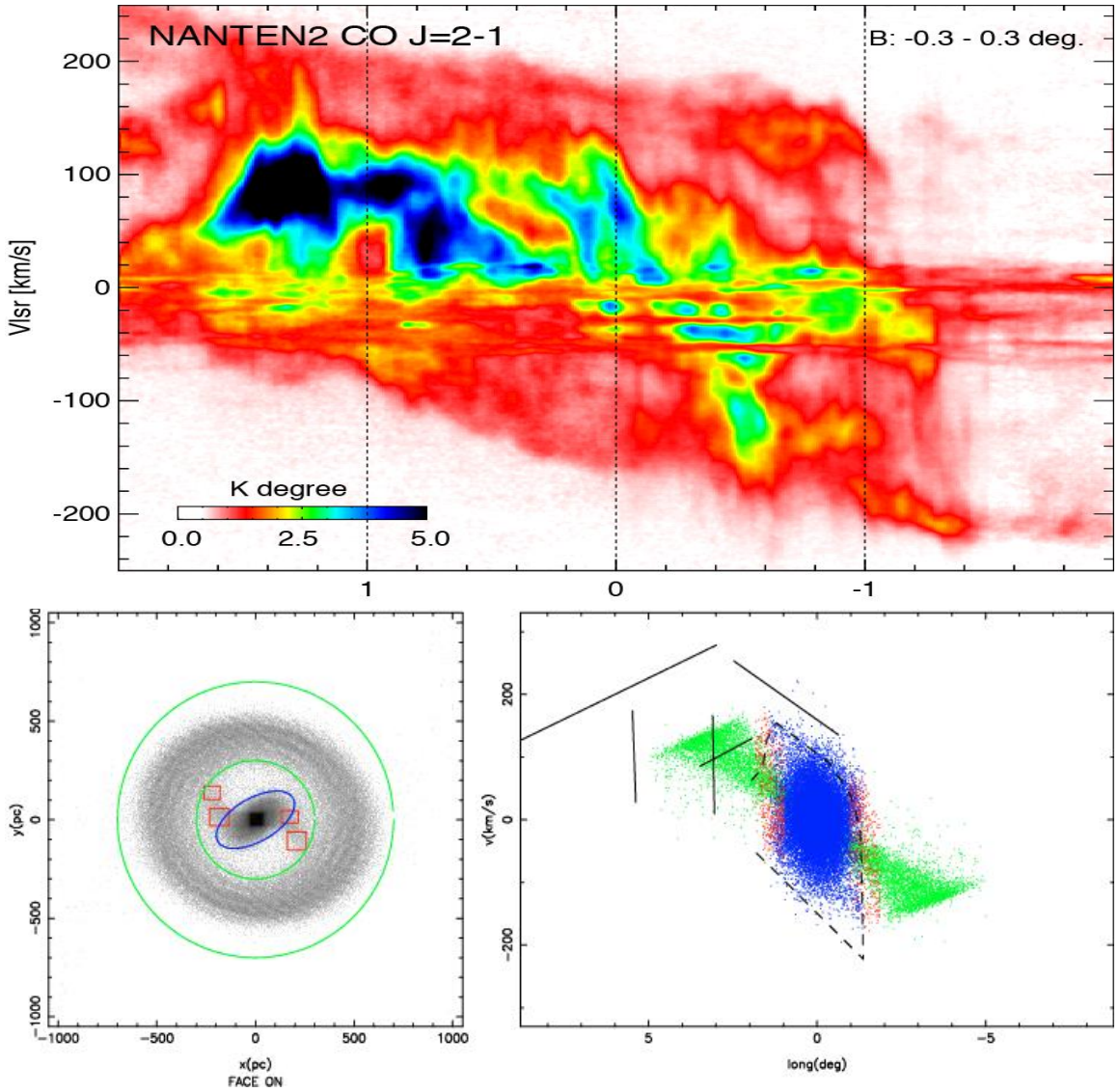
- Binney et al. (1991)が提唱
- 楕円軌道のガス運動により非一様回転成分=平行四辺形を説明
- 銀河系中心業界の主流

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



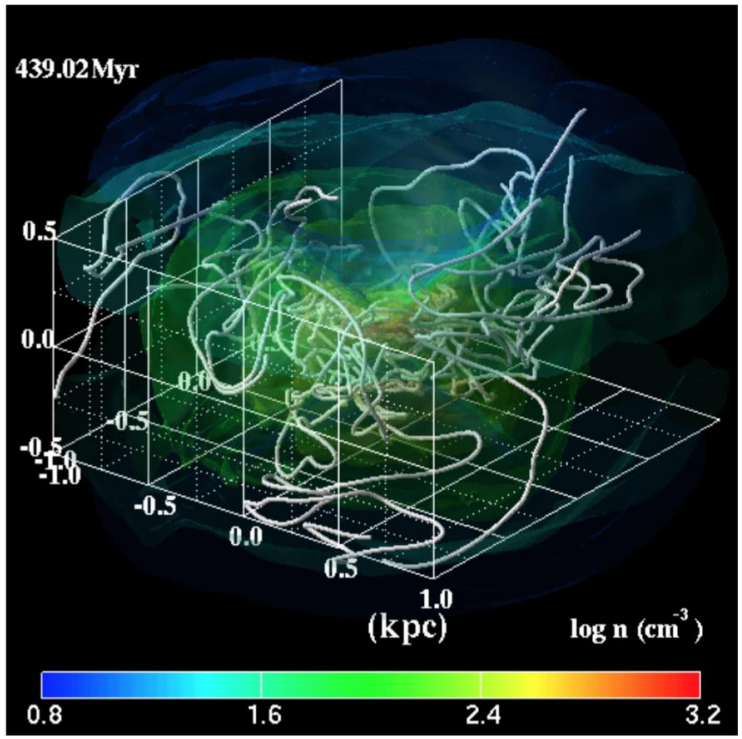
- 2MASSデータを元にポテンシャルを構築
- 数値計算により銀河系のアーム構造、CMZの平行四辺形の再現を試みる
- 大局的分布(アーム構造)は観測とよく一致
- CMZは…？
- 鉛直方向構造は取り扱っていない

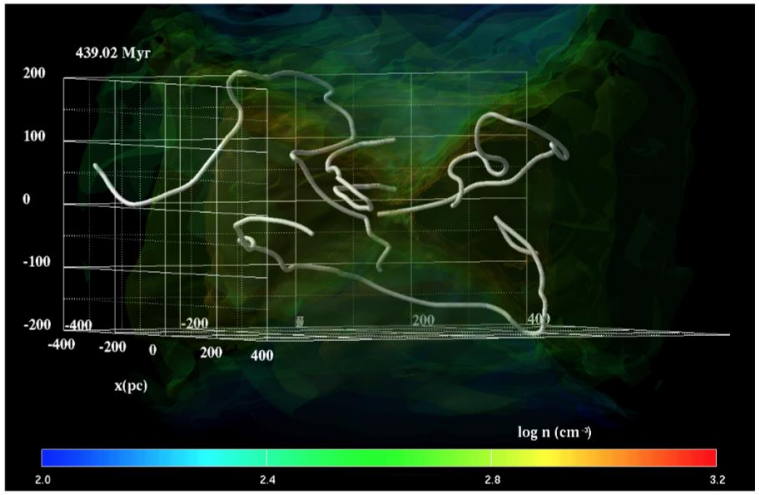
数値計算例(Rodriguez-Fernandez & Combes 2008)



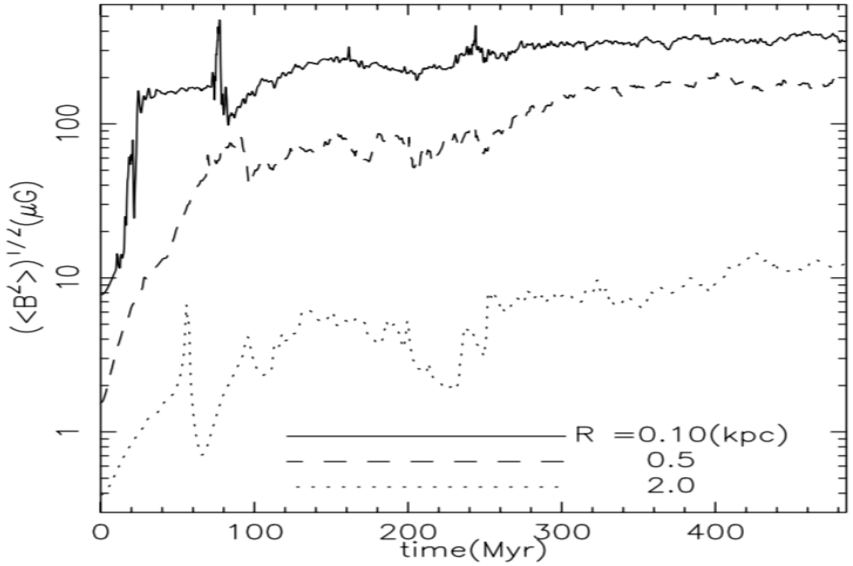
- 2MASSデータを元にポテンシャルを構築
- 数値計算により銀河系のアーム構造、CMZの平行四辺形の再現を試みる
- 大局的分布(アーム構造)は観測とよく一致
- CMZは…？
- 鉛直方向構造は取り扱っていない

MHD数値計算 (Suzuku et al. 2015)

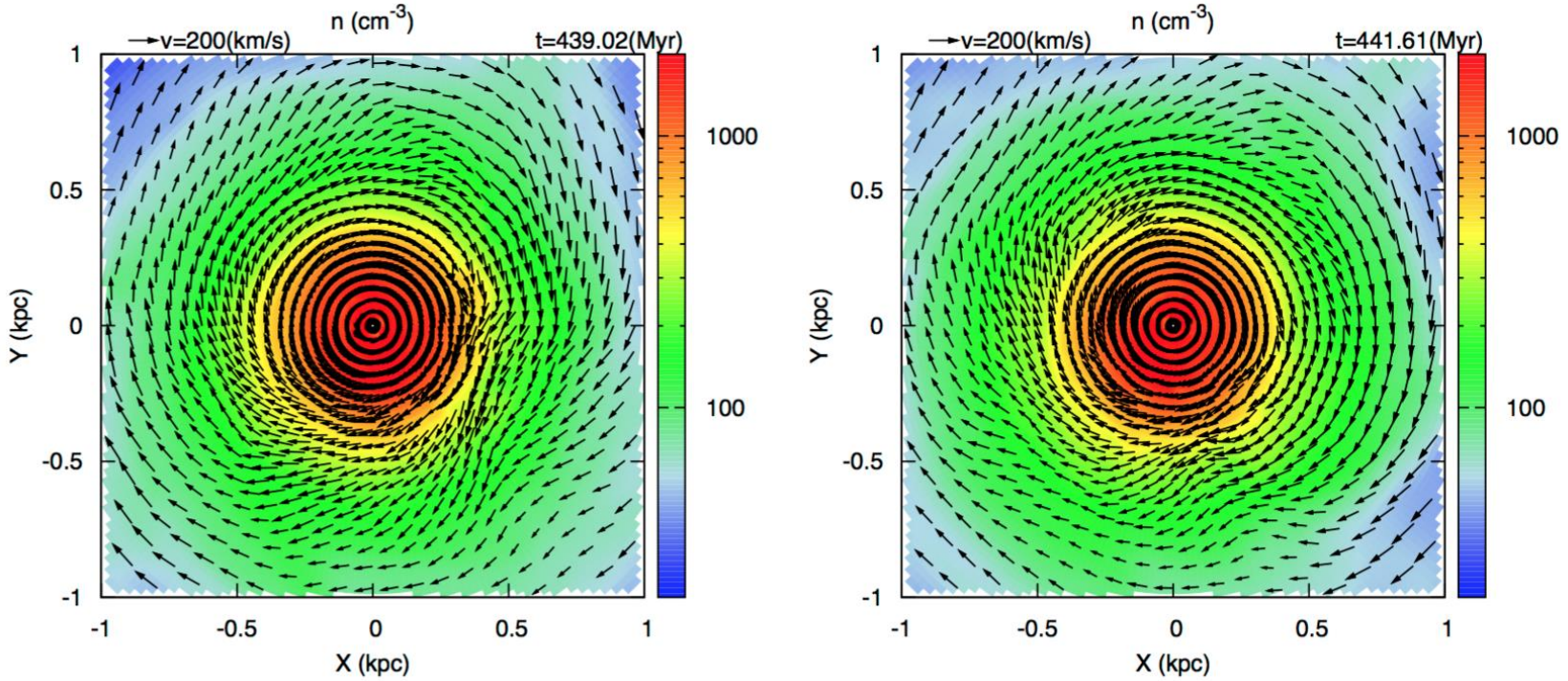




- 銀河系中心広域MHD数値計算
- バー構造を含まない軸対象ポテンシャル (Miyamoto & Nagai 1975)
- 回転に伴った磁場の増幅, 乱流の励起（差動回転, 磁気回転不安定性MRI, Parker不安定性）

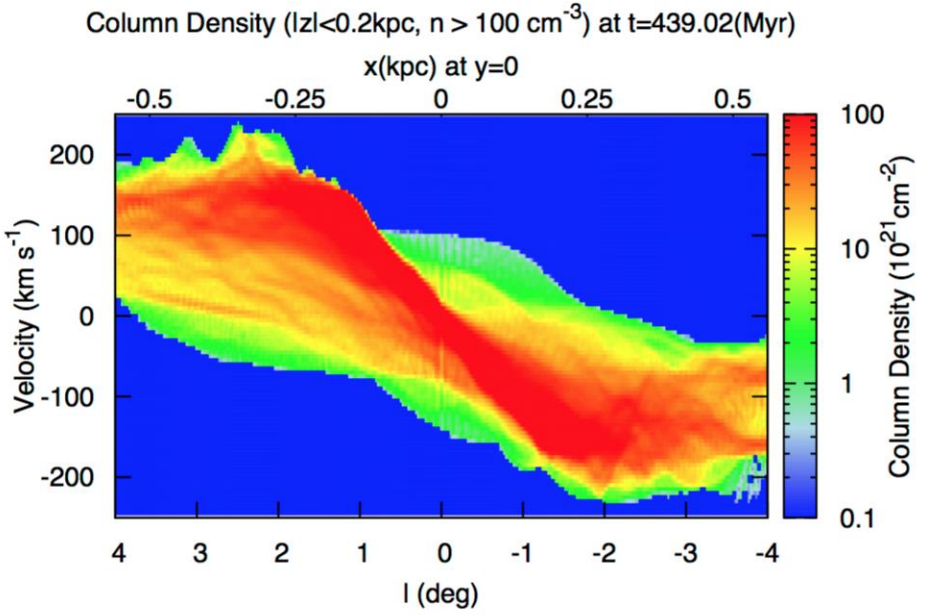


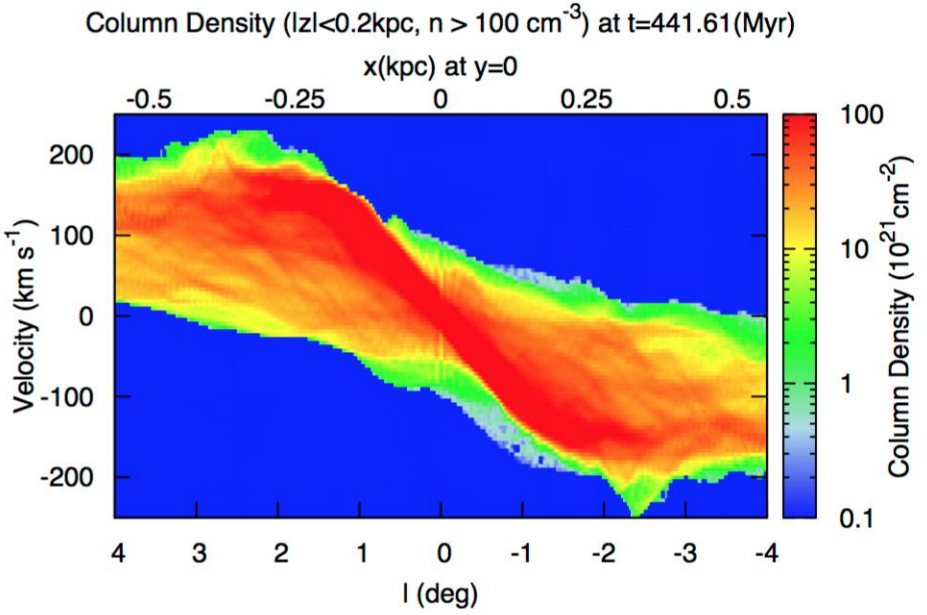
MHD数値計算 (Suzuku et al. 2015)



- 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（遠心力の増減）と磁気圧勾配
- 位置-速度図で平行四辺形構造
- 非対象構造

MHD数値計算 (Suzuku et al. 2015)

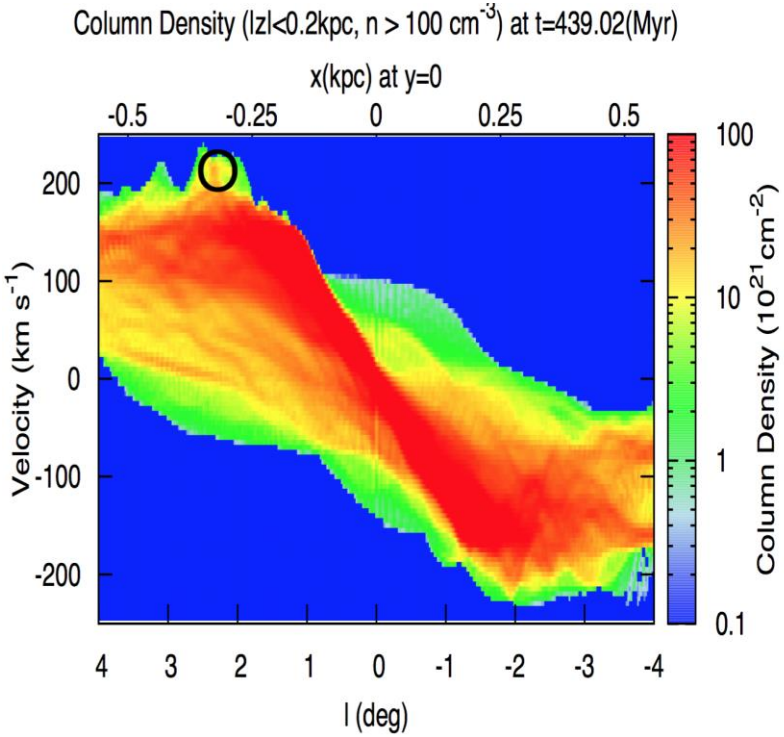


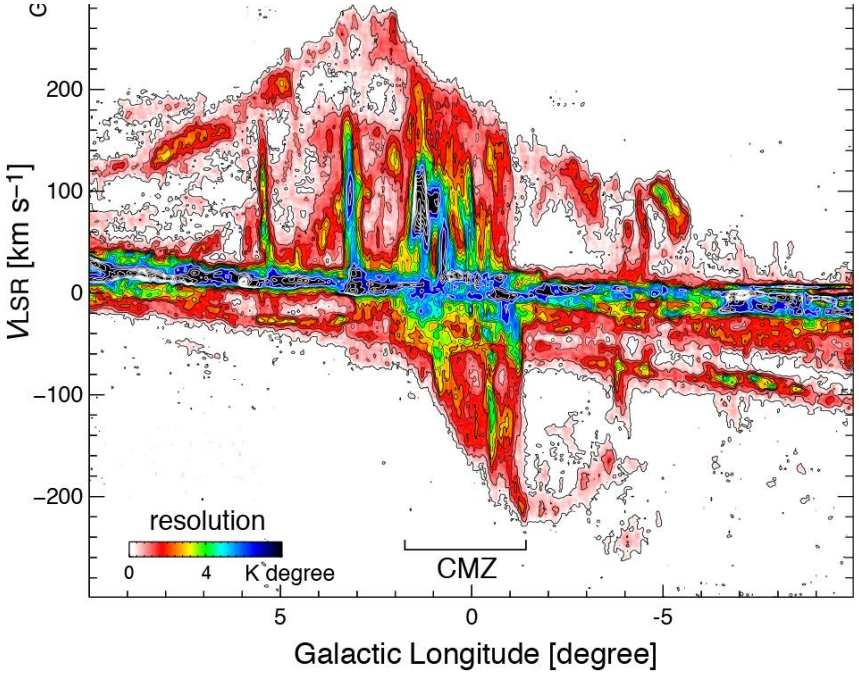


- 時間依存性のある動径方向外向きの速度成分が励起
  - MRIに伴う角運動量輸送（遠心力の増加）と磁気圧の上昇
- 位置-速度図で平行四辺形構造
- 非対象構造

MHD数値計算結果の解析

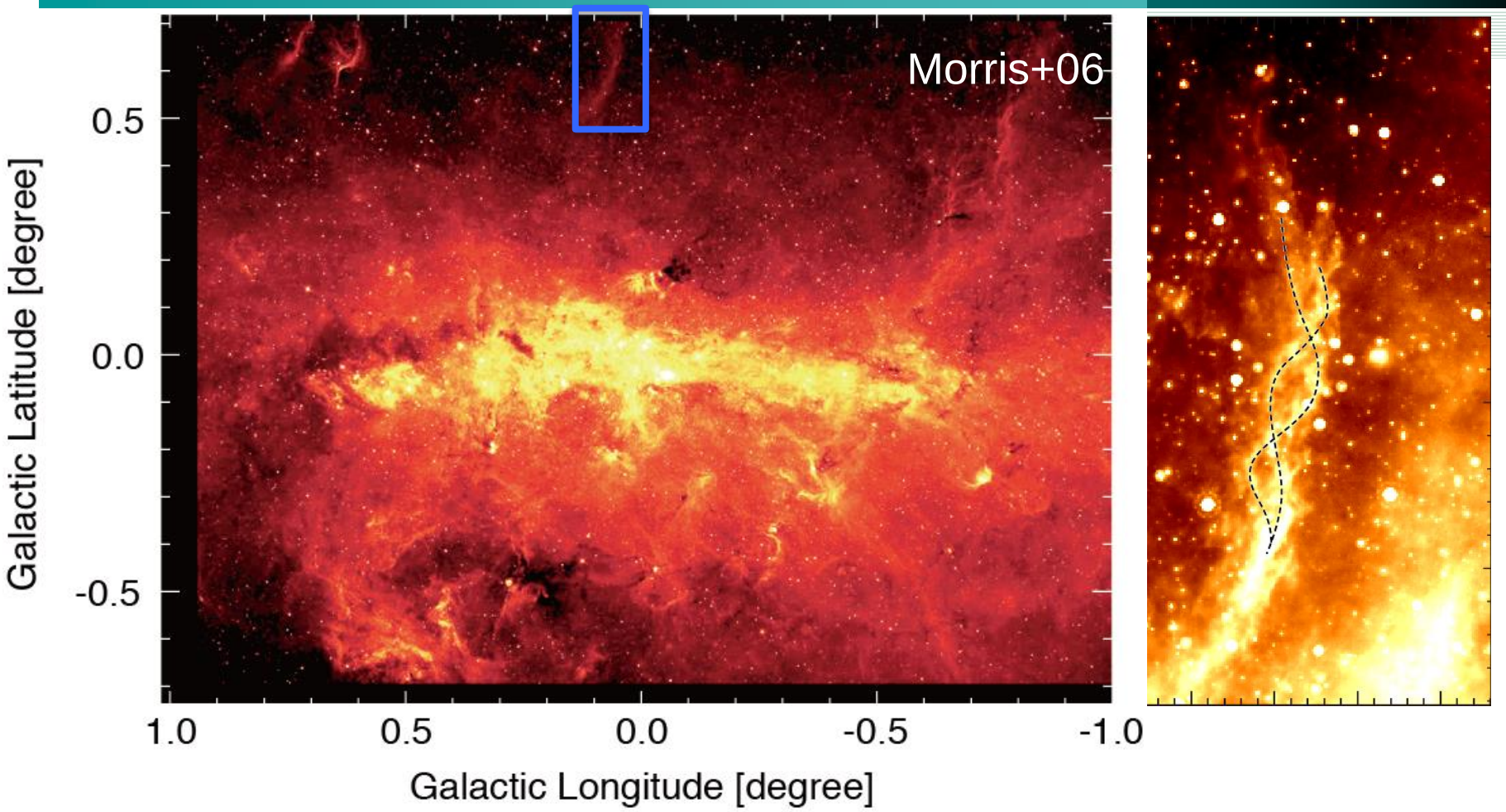
- Suzuki et al. (2015)で水平方向運動の解析
- 課題・疑問：・ 鉛直方向の構造・運動の解析(Kakiuchi+ in prep.)
  ・コンパクトな大速度分散構造は？





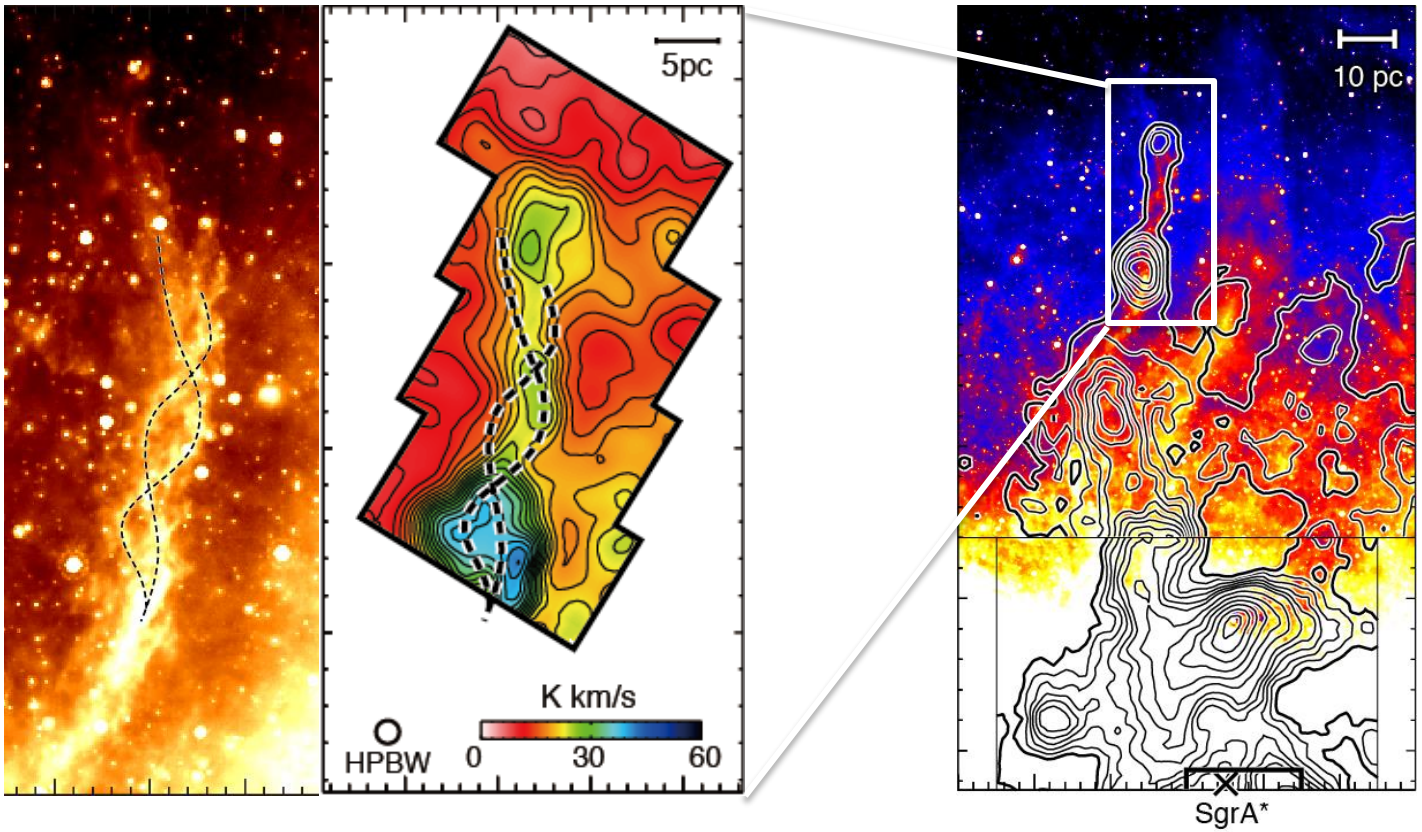
3. 赤外線二重らせん星雲(DHN)と磁気タワー

Double Helix Nebula in the CMZ



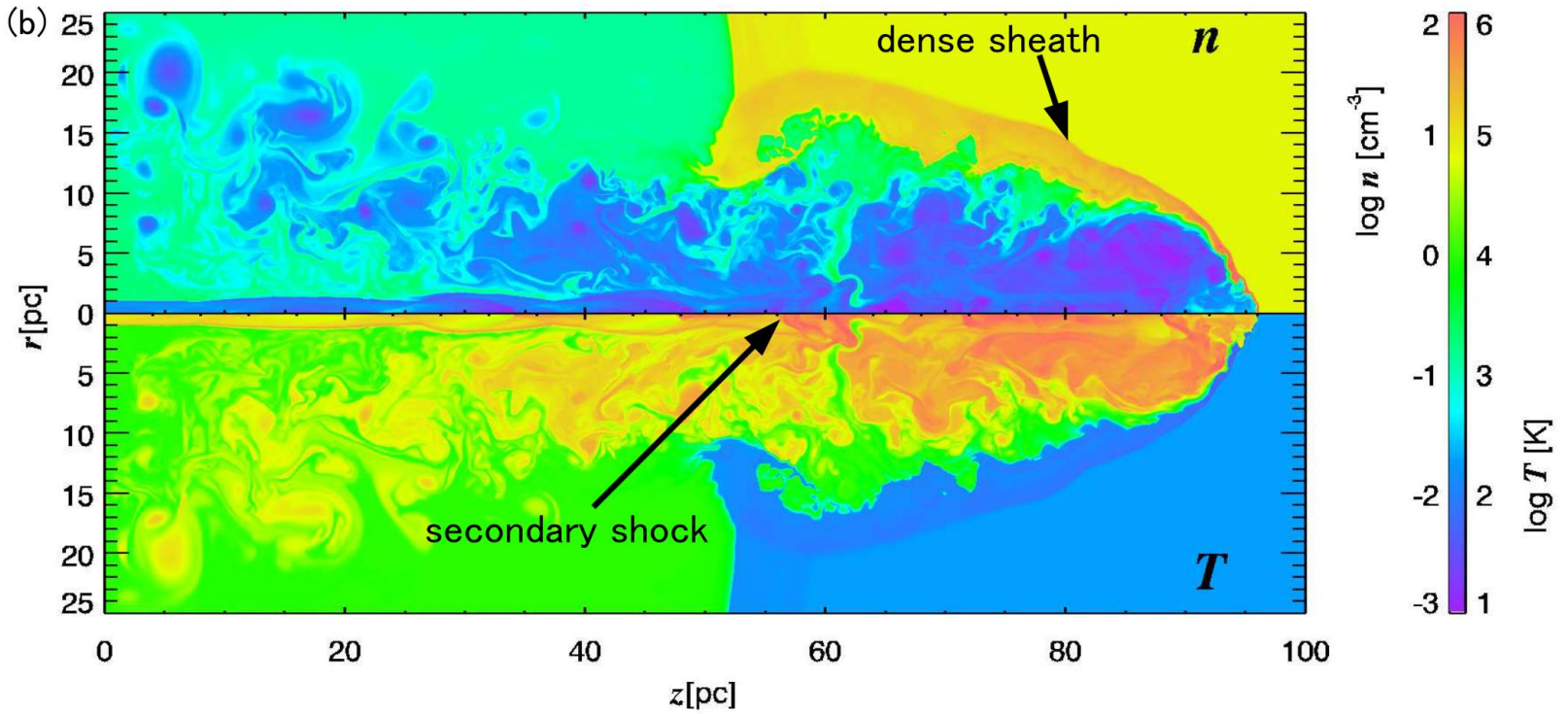
- Sgr A*の上方100pcに二重らせんの構造
- 距離：8kpc (±2kpc) (Enokiya+14)

Double Helix Nebula (DHN)



- DHNに付随する分子雲を検出(Enokiya+14; Torii +14)
- 高さ100pcの分子雲の”柱”の先端にDHN
- 柱の根元はCircumnuclear disk方向に

磁気タワーモデル (Asahina+14)



- 超音速ジェット（図はv_jet = 220km/s）がHI gas layerに突入、熱的不安定性により低温・高密度ガスが形成 (Asahina+14).

課題・疑問:

- 分子雲柱の折れ曲がった構造
- DHNの二重らせん構造の作り方

4. まとめと展望

銀河系中心部とMHD

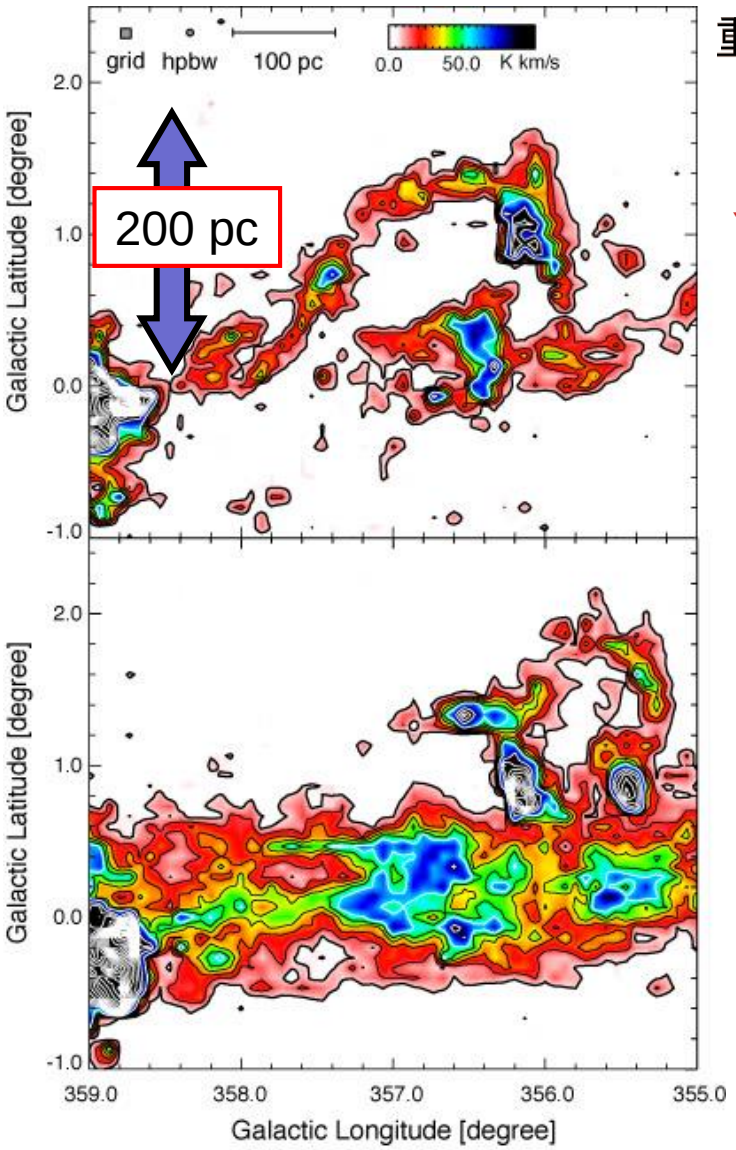
- これまでの観測・理論研究から、銀河系中心でMHD現象がガスの運動・形成に大きな影響を与えることが明らかに

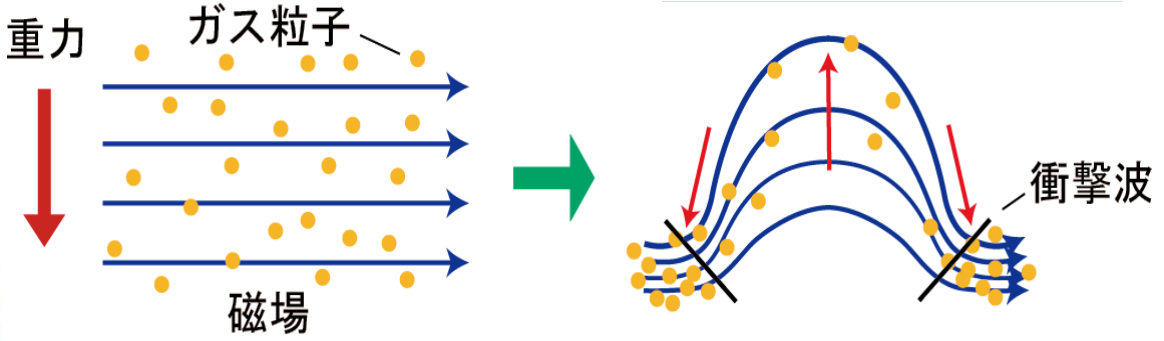
<u>大きな課題：星形成の理解</u>

- 最近の理解
  - ガスの乱流がdense gasでの星形成を抑制 (Barnes+17)
  - 10–20Myrスケールのepisodicな星形成 (Kruijissen+14; Torrey+16)

  –> 銀河バーによるガスのinflowが間欠的に星形成を促進 (Krumholz & Kruijissen 15)
- CMZのMHD的な取り扱いはまだ十分に浸透していない

CMZのパーカー不安定性

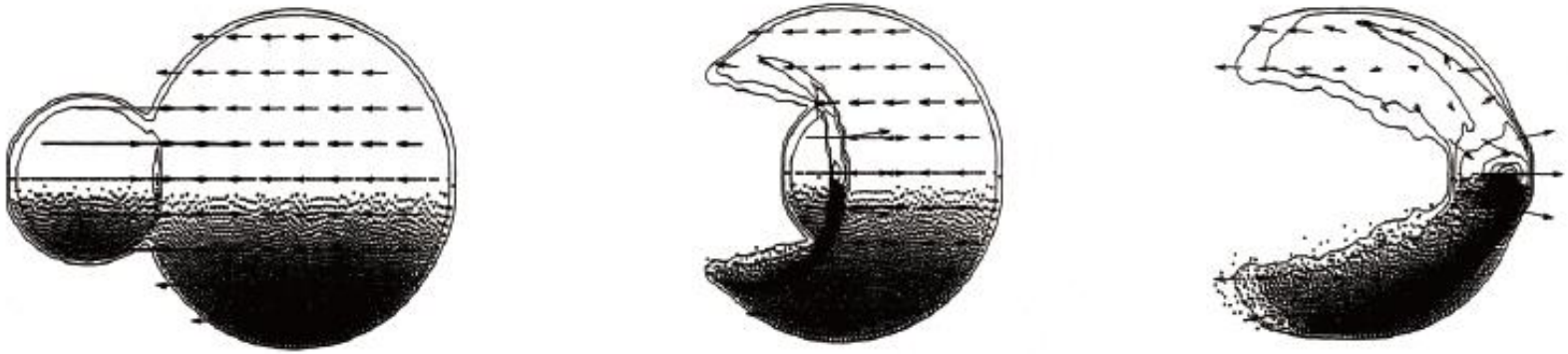




- パーカー不安定性はフットポイントにガスを集める作用 (Parker 66)
- フットポイントではガスの落下による衝撃波 (Matsumoto+88)

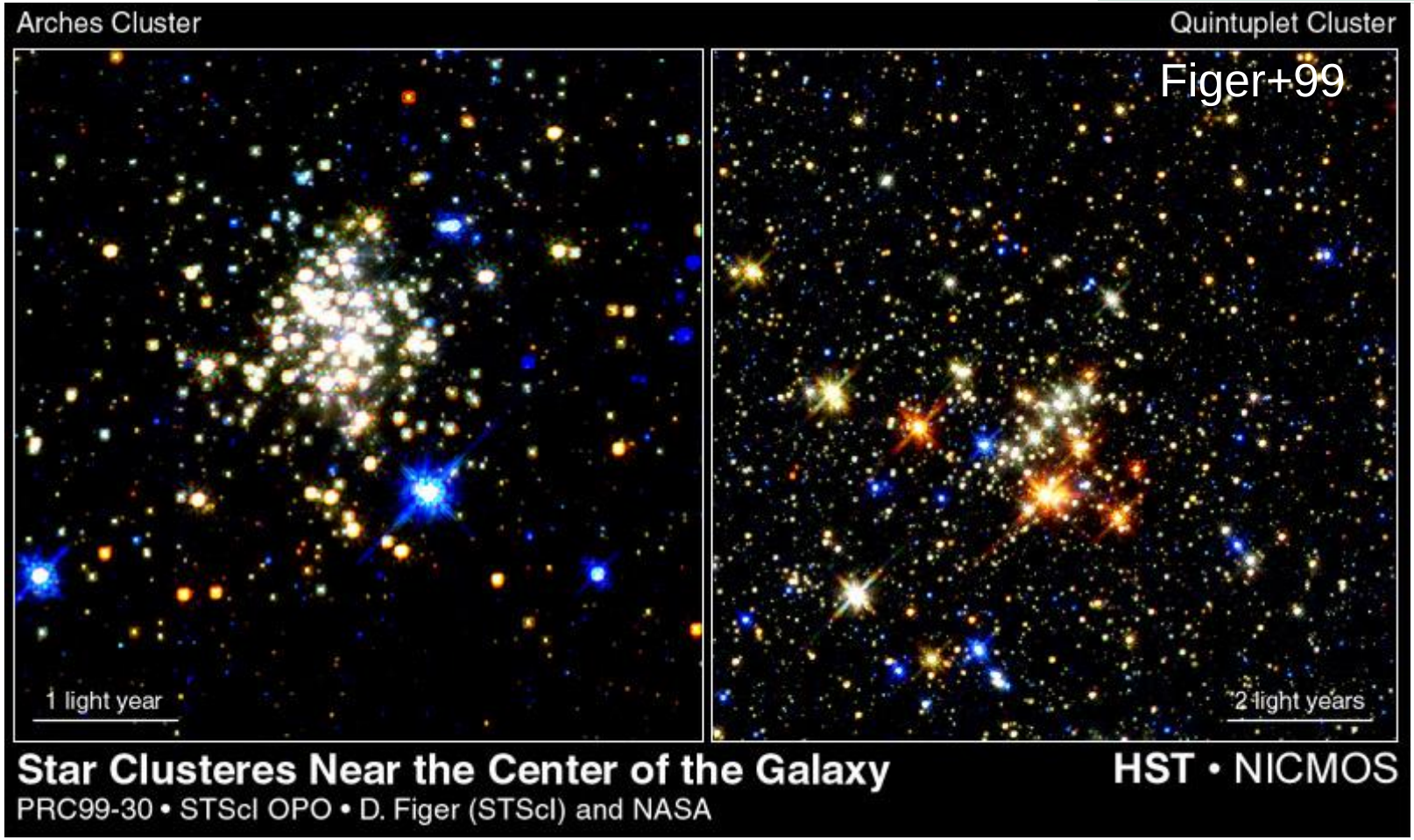
分子雲衝突による大質量星形成

- 分子雲同士の衝突が大質量星形成をトリガー
  - 高い質量降着率で短時間(~0.1Myr)に形成
- 2つの分子雲の大きな速度差(10-20km/s)が観測的特徴
- 最近、観測的理解が大きく進展 (e.g., Torii+11,15,17; Fukui+14,16などいっぱい)



Habe & Ohta 1992

Super star clusters in the GC



巨大星団での分子雲衝突

Westerlund2

NGC3603

RCW38

[DBS2003]179

- 銀河系の既知の若い巨大星団は8例
- うち星雲が付随する星団4例の全てで分子雲衝突の観測的証拠

cluster	Age [Myr]	LogM$_*$ [M$_{sun}$]	Size [pc]	分子雲
NGC3603	2.0	4.1	0.7	○
Westerlund2	2.0	4.2	0.8	○
[DBS2003]179	2-4	3.8	0.5	○
Westerlund1	3.5	4.0	1.0	×
Trumpler 14	2.0	4.5	0.5	--
Arches	2.0	4.3	0.4	×
Quintuplet	4.0	4.0	2.0	×
RCW38	<1.0	--	0.8	○

まとめ

- 銀河系中心部研究にMHDを取り入れることで、（課題は多くあるものの）様々な観測結果の解釈に成功（しつつある）
  - パーカー不安定性による磁気浮上ループ
  - MRIによるCMZ円盤動径方向のガスの運動（l–v図での平行四辺形状のガス分布）
  - 磁気タワーが作る分子雲柱構造とDHN
- 銀河系中心領域の本質に迫っている確信
- 分子雲構造・星形成・X線ガンマ線（粒子加速）まで含めた統一的理解にむけて、松元先生、町田さん、今後ともよろしくお願いします。