

# スパイラルアームの非円運動の観測と理論

国立天文台

理論研究部/天文シミュレーションプロジェクト (CfCA)

牧野淳一郎

with 馬場淳一 (東北大)、朝木義晴 (宇宙研)、三好真、  
齋藤貴之、和田桂一 (国立天文台)



# 概要

- 何故理論屋がここで話をするか？
- VLBI による銀河系円盤アストロメトリ観測のまとめ
- 従来 of 理論による解釈とその困難
- Self-consistent な銀河円盤シミュレーション
- スパイラル構造
- 棒渦巻銀河の場合
- 今後の方向

# 理論屋が何故話をするか

というか、話の要点:

- 恒星円盤の運動とガスの進化 (冷却・星形成・超新星による加熱) を直接数値シミュレーションすることが最近ようやく可能になってきた。
- そのようなシミュレーションでは、非常にもっともらしい渦巻構造ができる。渦巻に伴う若い星や星形成領域の運動は、従来の密度波理論での予想とは全く違う。
- VLBI アストロメトリによる観測では、そういう運動が既に受かっているという気がしなくもない。
- これらは銀河系の円盤の運動の理解を根本から変えるかもしれない。

# 理論屋が何故話をするか

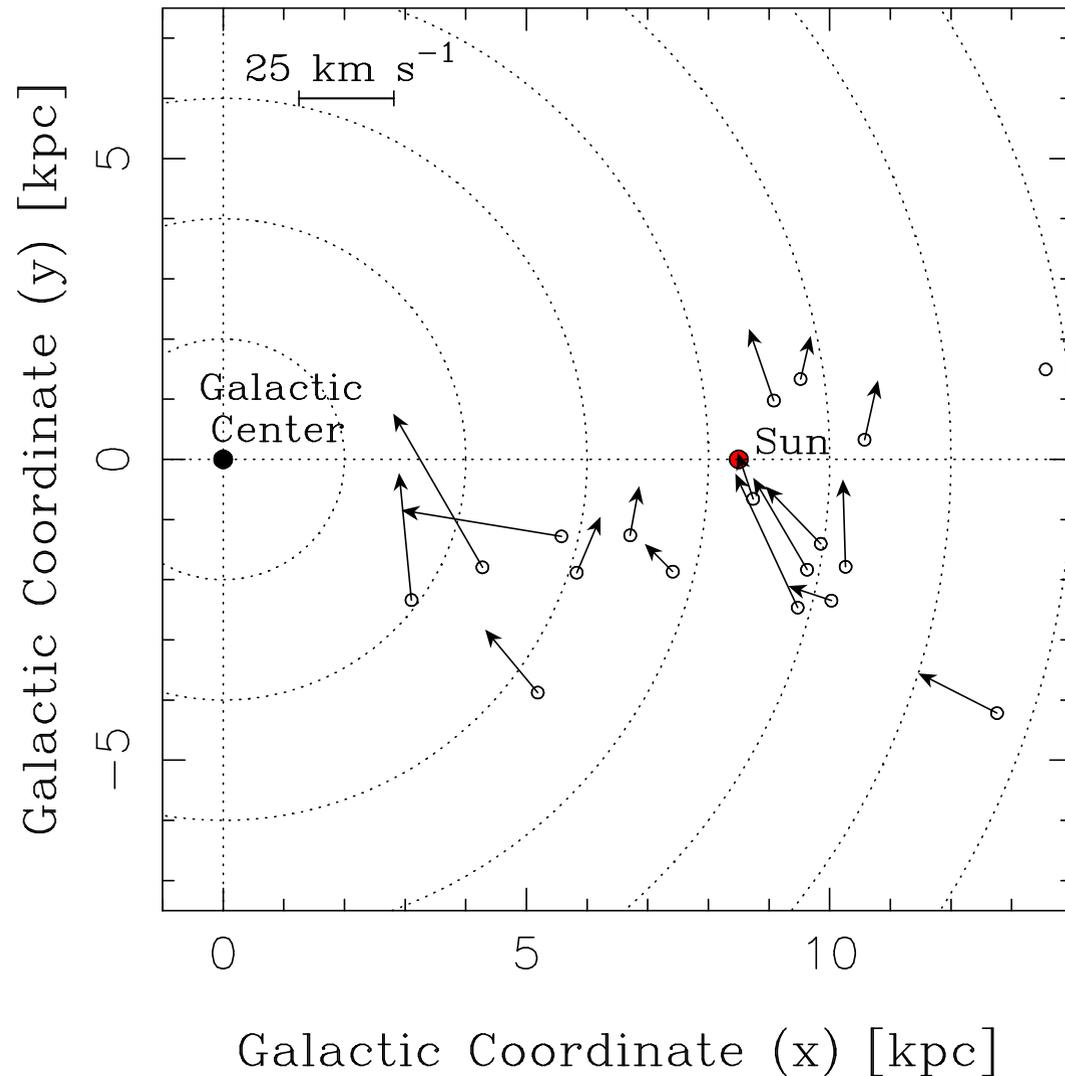
というか、話の要点:

- 恒星円盤の運動とガスの進化 (冷却・星形成・超新星による加熱) を直接数値シミュレーションすることが最近ようやく可能になってきた。
- そのようなシミュレーションでは、非常にもっともらしい渦巻構造ができる。渦巻に伴う若い星や星形成領域の運動は、従来の密度波理論での予想とは全く違う。
- VLBI アstrometry による観測では、そういう運動が既に受かっているという気がしなくもない。
- これらは銀河系の円盤の運動の理解を根本から変えるかもしれない。
- 牧野の実家は大垣である

# VLBI による銀河系円盤観測

- 2006 年に Science に (Xu et al, Science 311, 54)
- 2008 年 11 月に VLBA を使った論文がバースト的にでた。
- VERA の成果も。

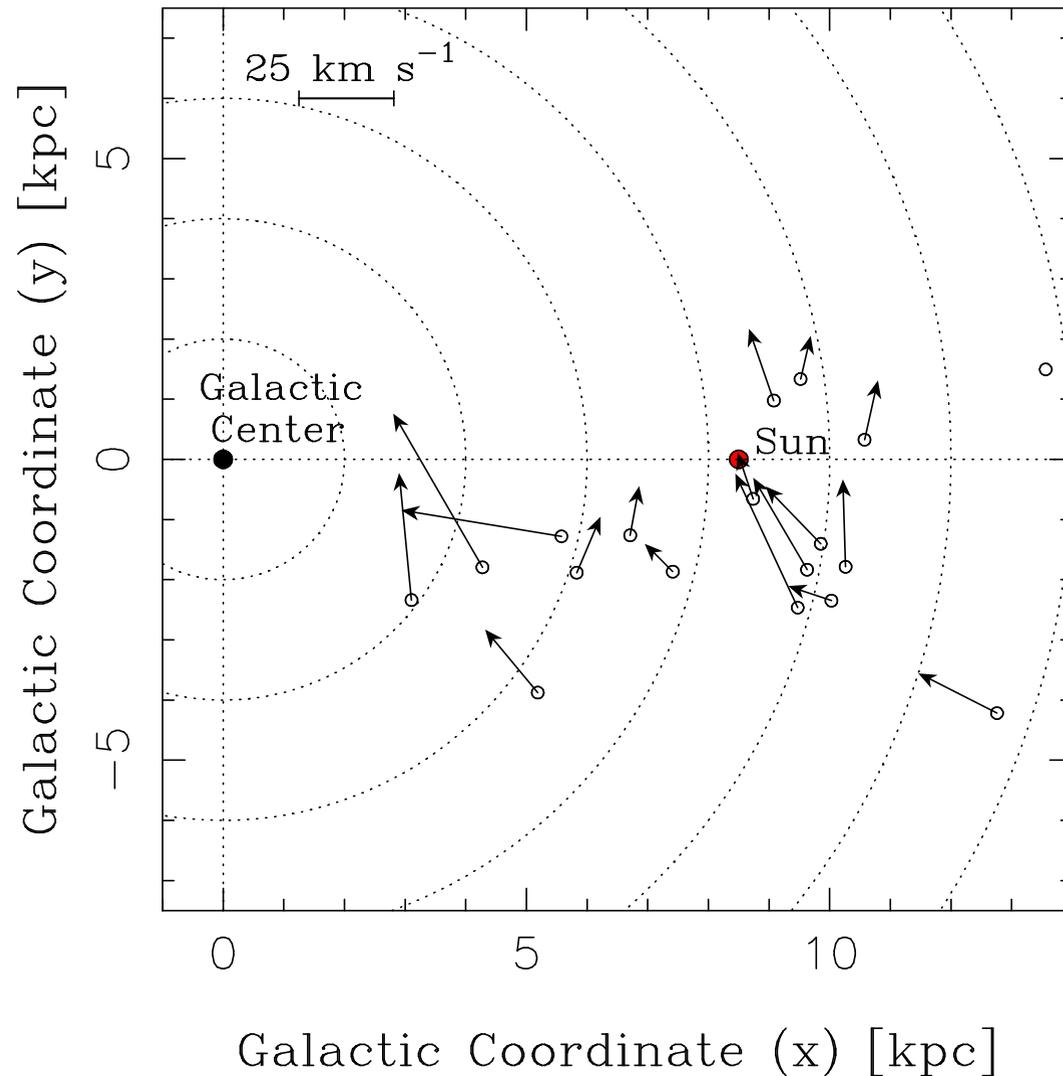
これらを全部まとめてみたのが図。(朝木さん作成)



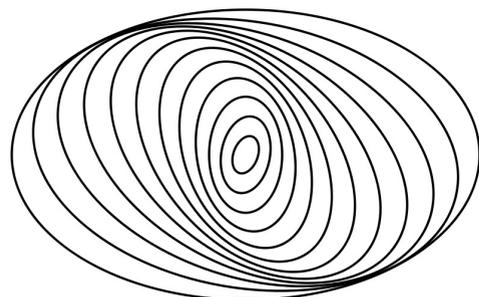
# VLBI による銀河系円盤観測

- やたら円運動からのずれが大きい  
(典型的に 30km/s 程度)
- 傾向としては銀河中心向き、回転と逆向き
- 場所によって(同じアームでも)向きがバラバラ

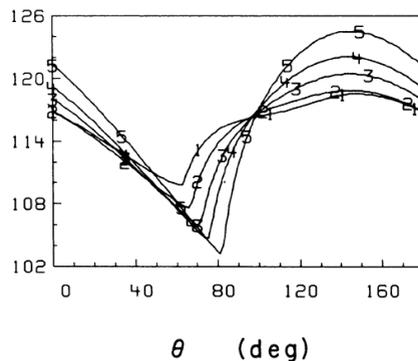
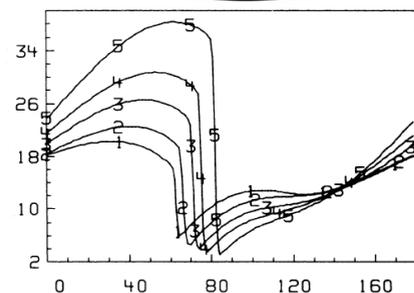
伝統的な渦巻モデル (Lin-Shu 密度波理論) で大丈夫か？



# 密度波理論って？



- スパイラル構造は実体ではなくて、中立安定な線形モード。
- ガスは星が作るポテンシャルの底を通る時に衝撃波を作る。そこで圧縮されて星形成する。
- 結構極端なポテンシャルを仮定しても 10km/s 以上円運動からずらすのは簡単ではない。
- アームにそって、特異速度は殆ど変化しないはず。



というわけで、なんか違うのでは？という気がする。

# スパイラル構造のシミュレーション

- 密度波理論は 1960 年代の話
- もうちょっと近代的な話は？

と思うわけですが、これが実はまだなかった。理由:

- 適切な計算プログラムがなかった。
- 何をすべきかよくわかってなかった。 **というか、わかっていなかったわけではないけど、、、**

# 問題は何か？

スパイラル構造、そこでのガスの圧縮、冷却、星形成を扱う



高い質量分解能、空間分解能、時間分解能が必要

	普通の計算	したい計算
粒子質量	$10^6 M_{\odot}$	$10^3 M_{\odot}$
空間分解能	500pc	10pc
時間分解能	$10^6$ 年	$10^3$ 年

計算コードの改良と速い計算機の利用でこの改良を目指す:

国立天文台理論研究部/天文シミュレーションプロジェクト  
「天の川創生プロジェクト」

# 天の川創生プロジェクト



目標:  $10^{8\sim 9}$  程度の粒子数での N 体 + SPH 計算による銀河形成シミュレーション

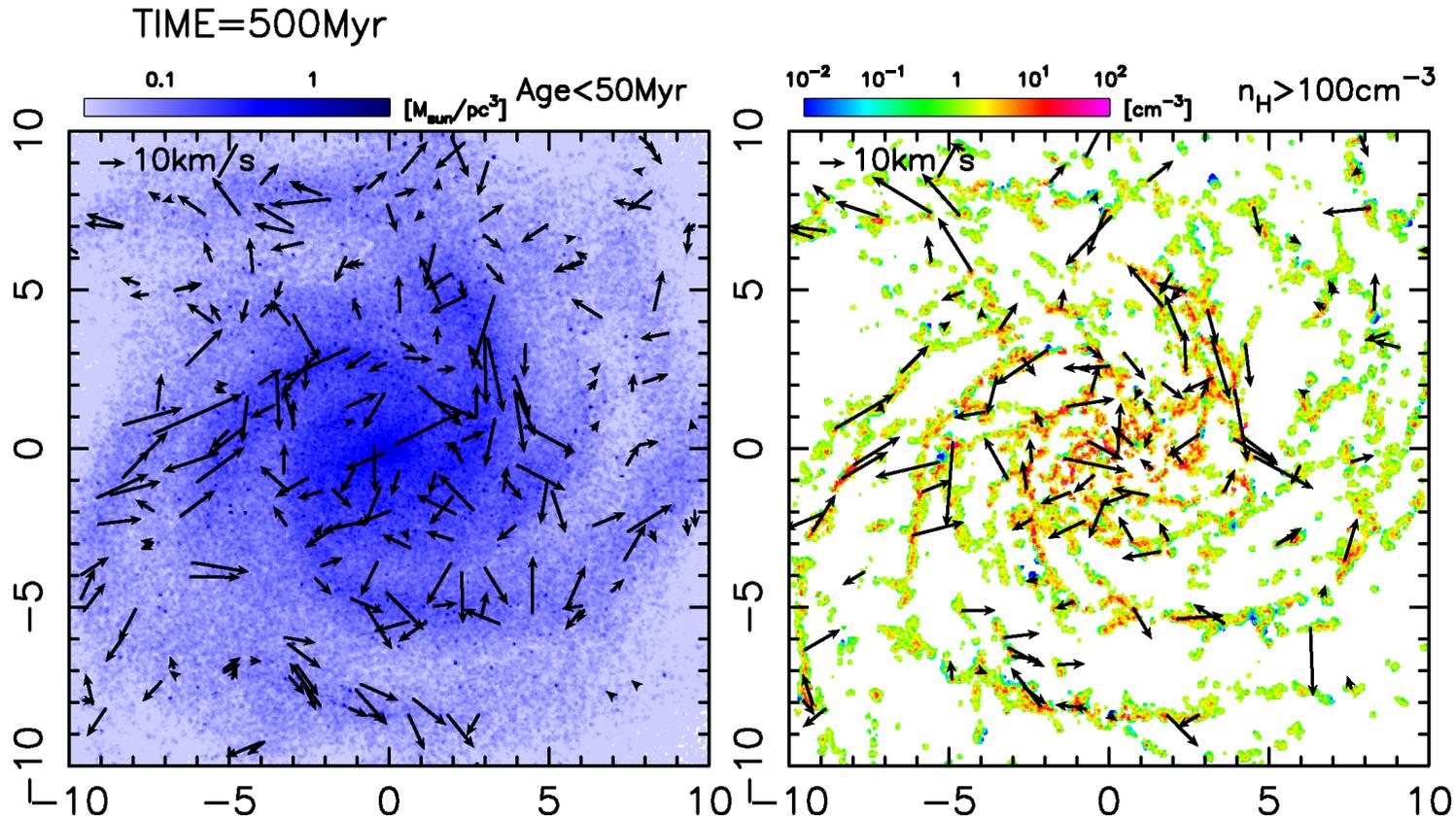
個々の星形成領域、個々の超新星爆発シェルを分解することで、「第一原理」に近い銀河形成シミュレーションを実現する。

2007-2008 年度の達成

- 並列コードで世界最先端水準の大規模シミュレーションが可能になった
- ディスクのガスの多相構造の計算
- 合体銀河におけるスターバースト
- 孤立した円盤銀河でのスパイラル構造の形成・維持

# 銀河円盤シミュレーション

外場ダークハロー中での星+ガス円盤の進化 (アニメーション 1 2 )  
スパイラル構造と特異速度場

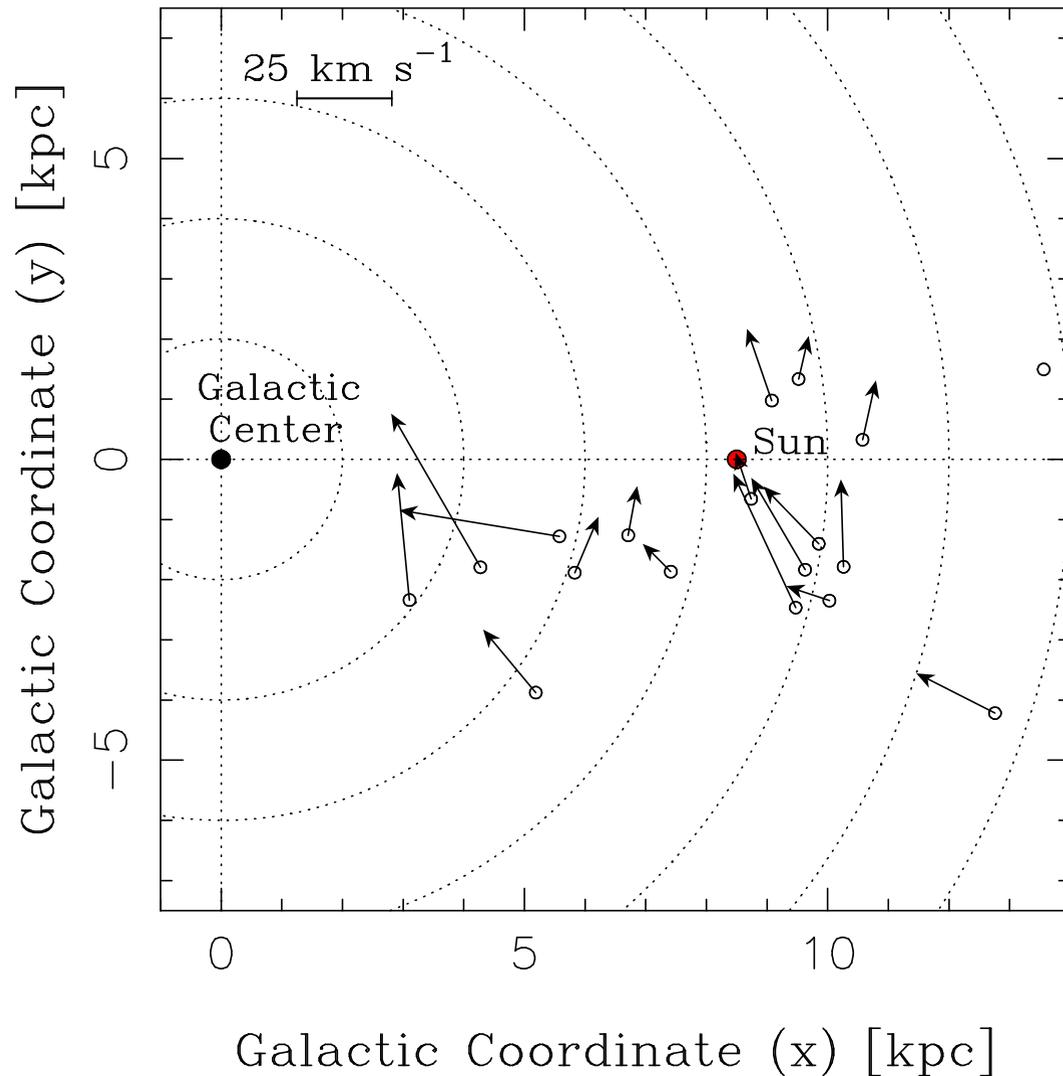


左: 星の密度、若い星の円運動からのずれ  
右: 低温ガスの密度、円運動からのずれ

# VLBI による銀河系円盤観測

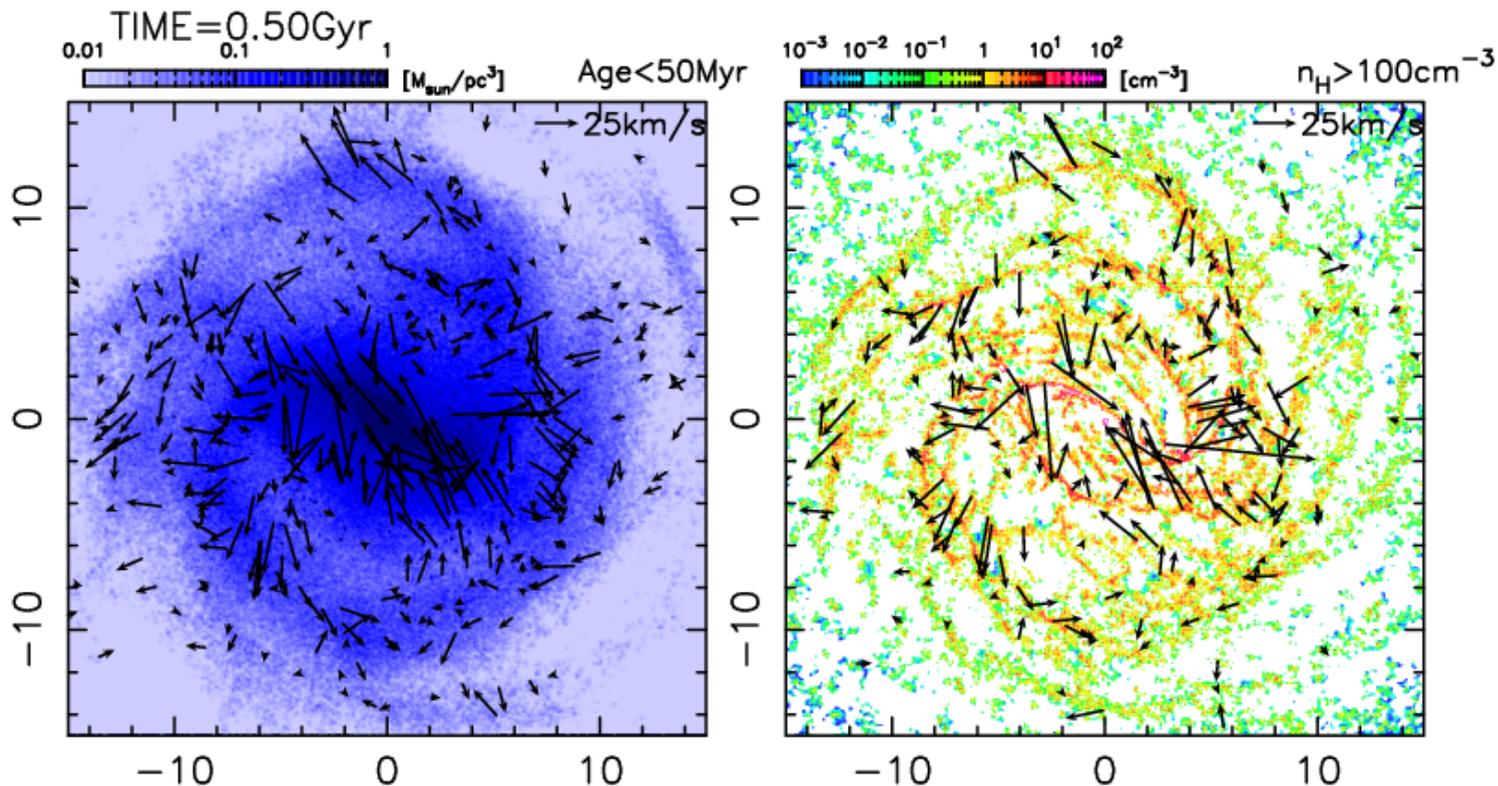
- やたら円運動からのずれが大きい (典型的に 30km/s 程度)
- 傾向としては銀河中心向き、回転と逆向き
- 場所によって同じアームでも向きがバラバラ

我々のシミュレーションでは自然に説明できる



# 棒渦巻銀河

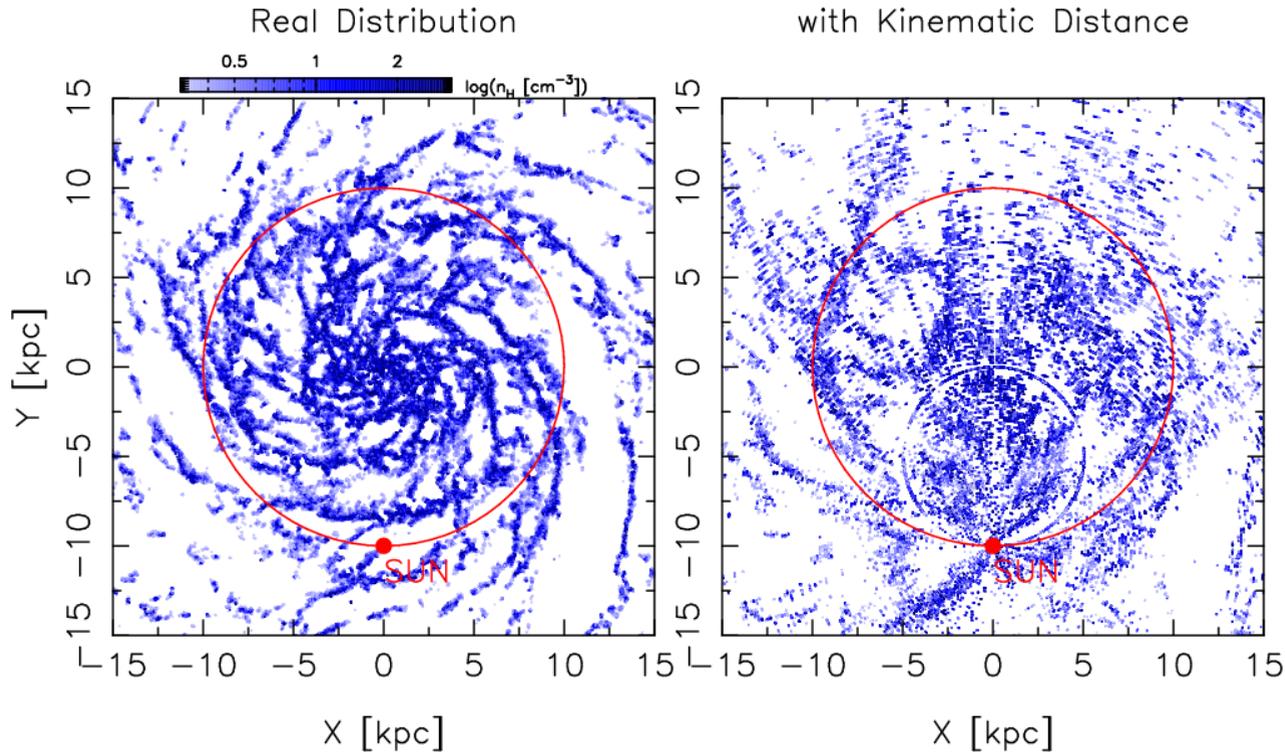
バーポテンシャルを仮定しなくても、ガスディスクの質量を大きくすればバーができる。



特異速度場が複雑で速度が大きい傾向はバーなしと同じ

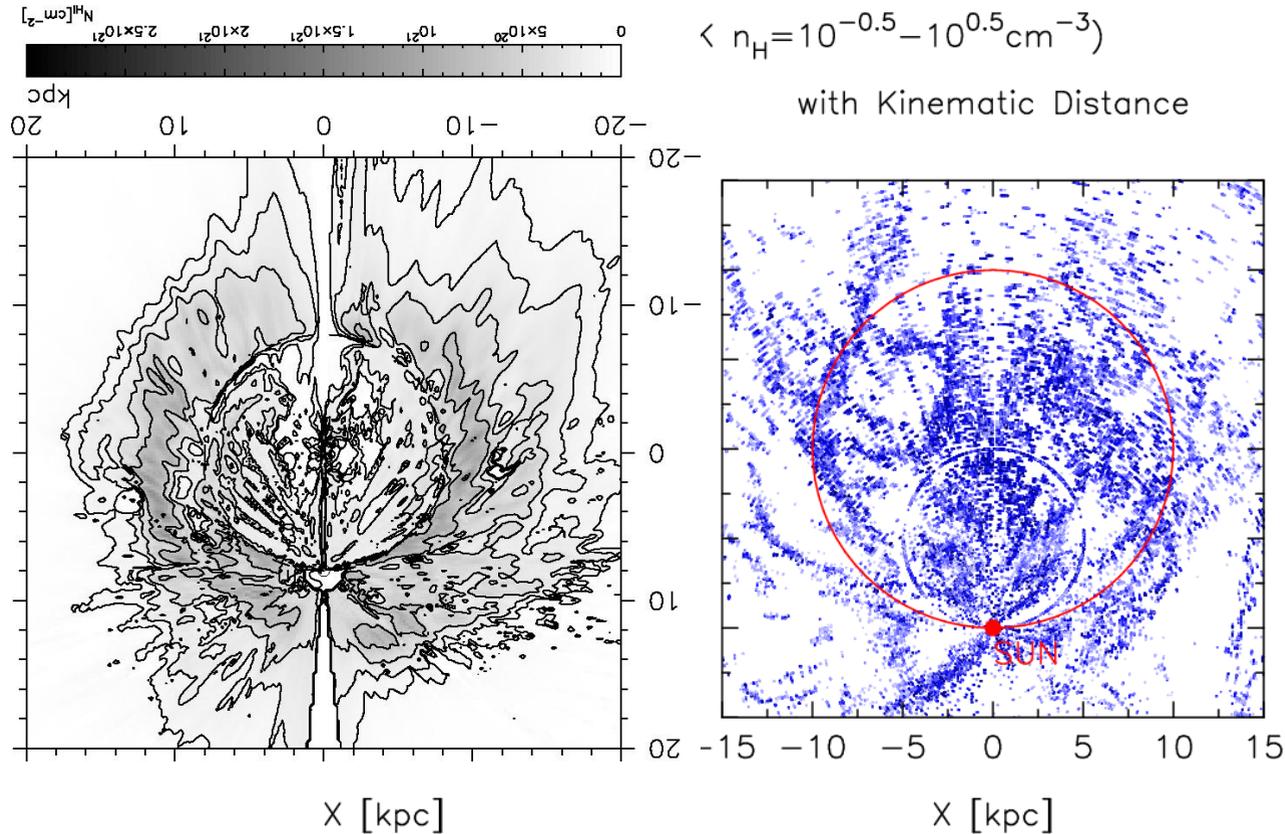
# 運動学的距離

TIME=0.50Gyr GAS ( $T=10^{1.5}-10^{2.5}K$   $n_H=10^{-0.5}-10^{0.5}cm^{-3}$ )



左:実際の位置、右:観測点からの運動学的距離でプロット

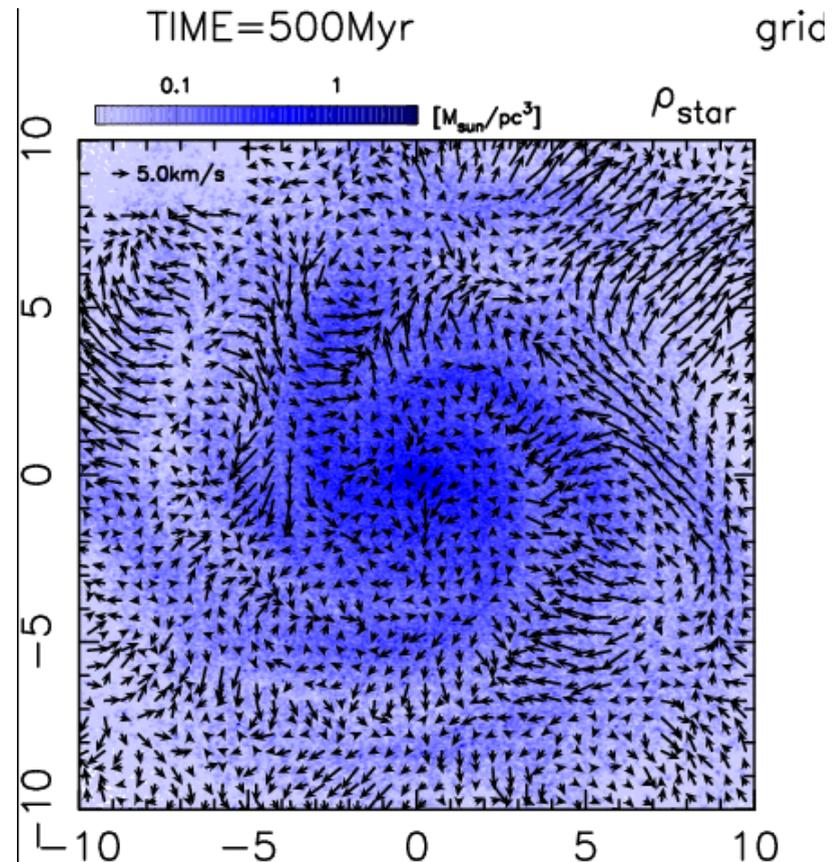
# 運動学的距離



左: HI observation (Nakanishi and Sofue 2003)  
似た構造が見える。「本当の」構造も似ている？

# LSR は大丈夫か？

- アームが実体、自己重力的：
  - 古い星も全部アームの形成・分解に参加、円運動からずれた速度をもつ
  - 数 kpc 程度の空間相関あり
- 現在の、HIPPARCOS による LSR は円運動からかなりずれている可能性あり



円運動を仮定した円盤構造の解析は全て怪しい

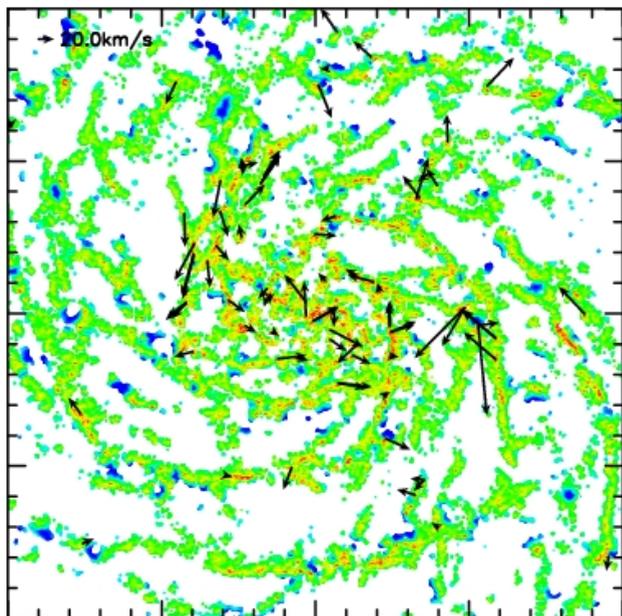
# シミュレーションは信じてよいのか？

- 普通は、驚くような新しい結果がでたらシミュレーションが間違っている。
- 今回は多分そうでもないのでは？とやった人は思っている (いつもそう思っているという話はある)

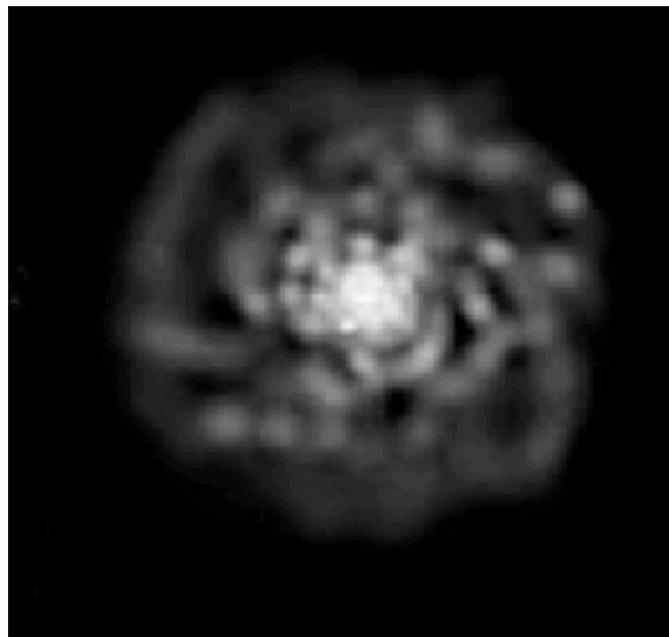
理由:

- こういうものである、という理論モデルも昔からある (Goldreich & Lynden-Bell 1965 とか)
- 少なくとも定常密度波モデルに比べて無理がない
- 系外銀河と結構似ている。

似てる？



似てない？



# 今後の銀河系研究に必要なもの

- 円運動を仮定しない構造・運動の推定
  - 太陽の3次元運動の直接決定
  - なんらかの方法での距離の直接決定による銀河系マップ
- シミュレーションで銀河の詳細な構造を再現する方法の確立
  - バー強度、サイズ等のサーベイ
  - その他？

# まとめ

- 銀河円盤内メーザー源の VLBI 観測からは、これらの運動が円運動から大きくずれていることが明らかになった。
- 恒星円盤、ガスを self consistent に解く高分解能な銀河円盤シミュレーションでは、自発的にスパイラルアームが形成され、観測されたような大きな特異速度も、大きさを含めて再現される
- 観測・シミュレーションを信じると、円運動を仮定した銀河の構造の復元 (運動学的距離等) は ×
- 局所平均で円運動にならないので、現在の LSR 自体が × かもしれない
- 円運動の過程を必要としない観測による構造の決定が必須
- VLBA, VERA の他、南天は？

# 並列コード ASURA

開発の中心: 斎藤貴之研究員

- 並列 Tree による重力+SPH コード。並列化は再帰的多重分割
- 重力計算には GRAPE または Phantom GRAPE (x86 計算機で SSE 拡張命令や逆数平方根近似命令を使って、通常の 10 倍程度の速度で重力計算するライブラリ)
- 計算には GRAPE-7/PC クラスタ/Cray XT4 を使用。
- $10^7$  個以上の SPH 粒子を使い、10K 程度までの低温、高密度ガスを扱うことに成功 (従来は  $10^4$ K 程度で冷却を止めていた)