銀河の非円運動—理論と観測

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

馬場淳一 (東北大)、朝木義晴（宇宙研)、三好真、斎藤貴之、

和田桂一 (国立天文台)

Center for Computational Astrophysics

天文学会春期年会 2009/3/27

概要

- VLBA, VERA による銀河円盤内メーザー源の観測では、星形成領域は 20-30 km/s に及ぶ大きくシステマティックな非円運動をもつ
- これは、古典的なスパイラル構造の密度波モデルでは理解困難である。
- 馬場講演で示された、現代的なシミュレーションでは、このような大きくシステマティックな非円運動が自然に現われる。
- この、大きな非円運動の存在は、いわゆる運動学的方法によるアームの同定といった、円運動を仮定した方法は危ない、ということを意味している。

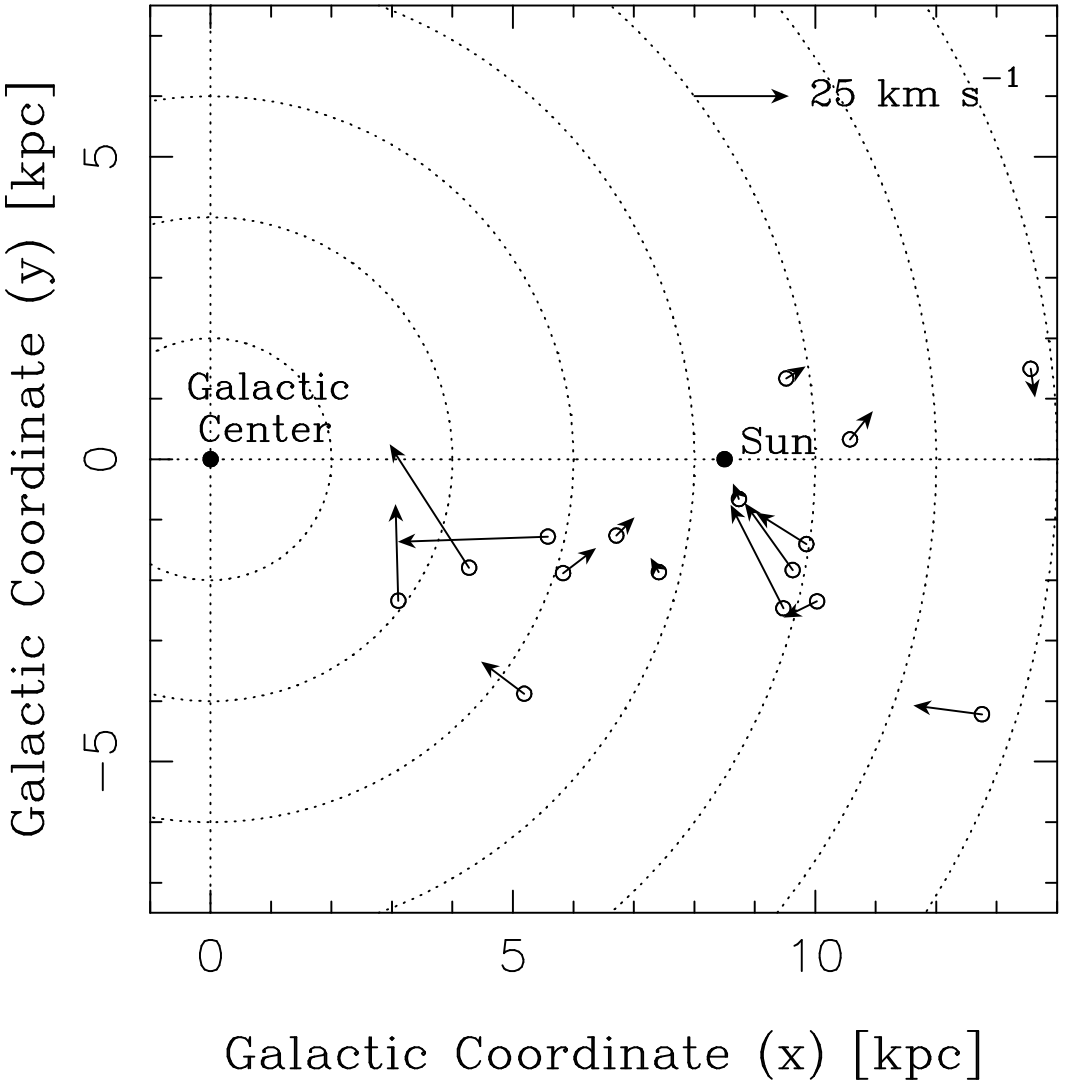
発表構成

- VLBI による銀河系円盤アストロメトリ観測のまとめ
- 従来の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
- 今後の方向

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。

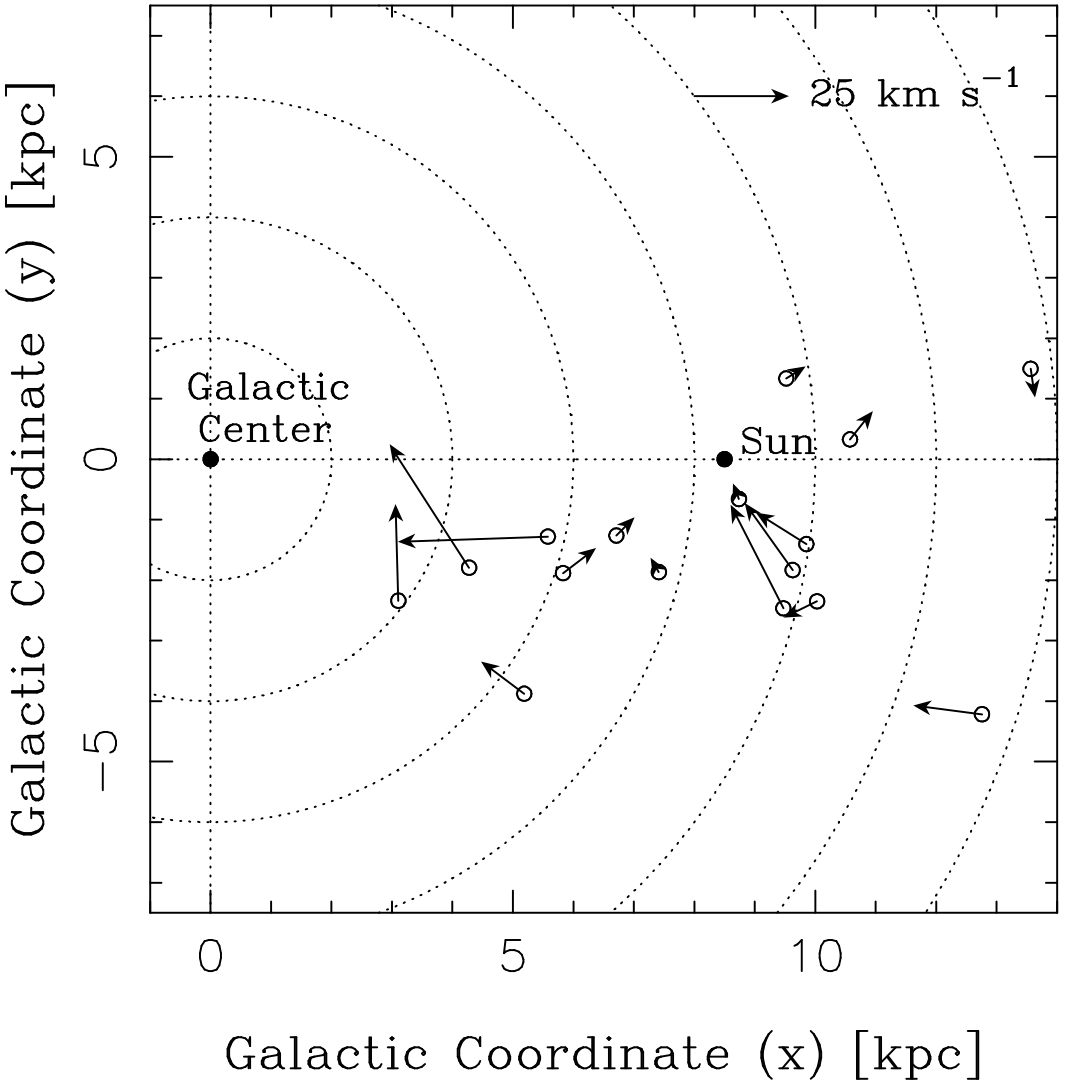
これらを全部まとめてみたのが図。(朝木さん作成)



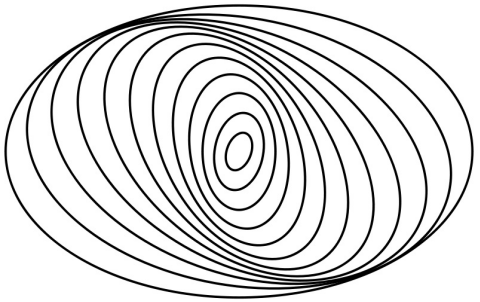
VLBI による銀河系円盤観測

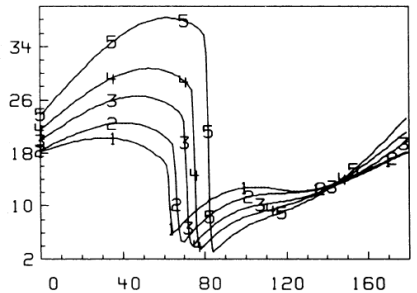
- やたら円運動からのずれが大きい (典型的に 30km/s 程度)
- 傾向としては銀河中心向き、回転と逆向き
- ある程度空間相関あり？(データ点少ないが、、、)

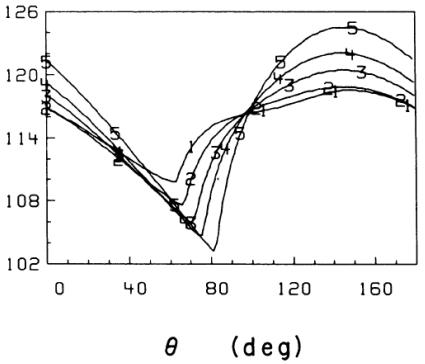
伝統的な渦巻モデル (Lin-Shu 密度波理論) は大丈夫か？



密度波理論って？







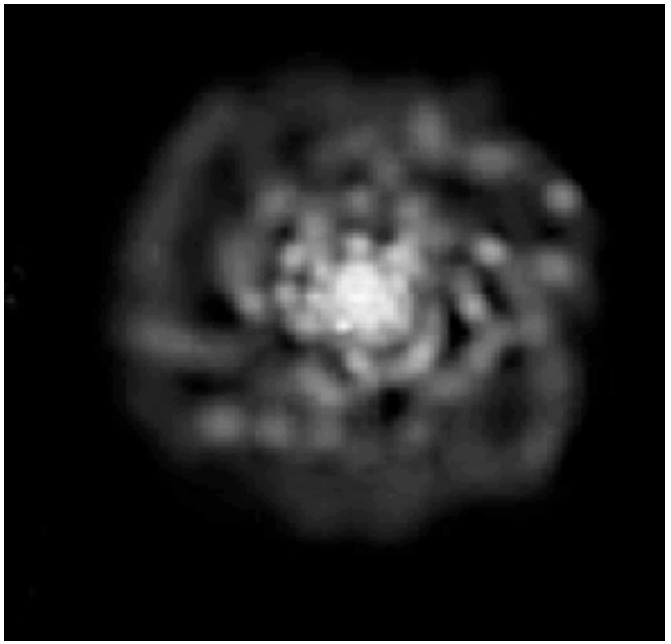
- スパイラル構造は実体ではなくて、中立安定な線形モード。
- ガスは星が作るポテンシャルの底を通る時に衝撃波を作る。そこで圧縮されて星形成する。
- 結構極端なポテンシャルを仮定しても $10\mathrm{km/s}$ 以上円運動からずらすのは簡単ではない。
- アームにそって、特異速度は殆ど変化しないはず。

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

最近のシミュレーションの例:

Governato et al. 2007



SPH 粒子質量 $> 10^5 M_\odot$
重力ソフトニング 325pc
3×10^4K 以下で星形成

本当はもっと低温、高密度ガスを解きたいけど、計算進まなくなる、、、

星形成領域なんかない
巨大分子雲もない

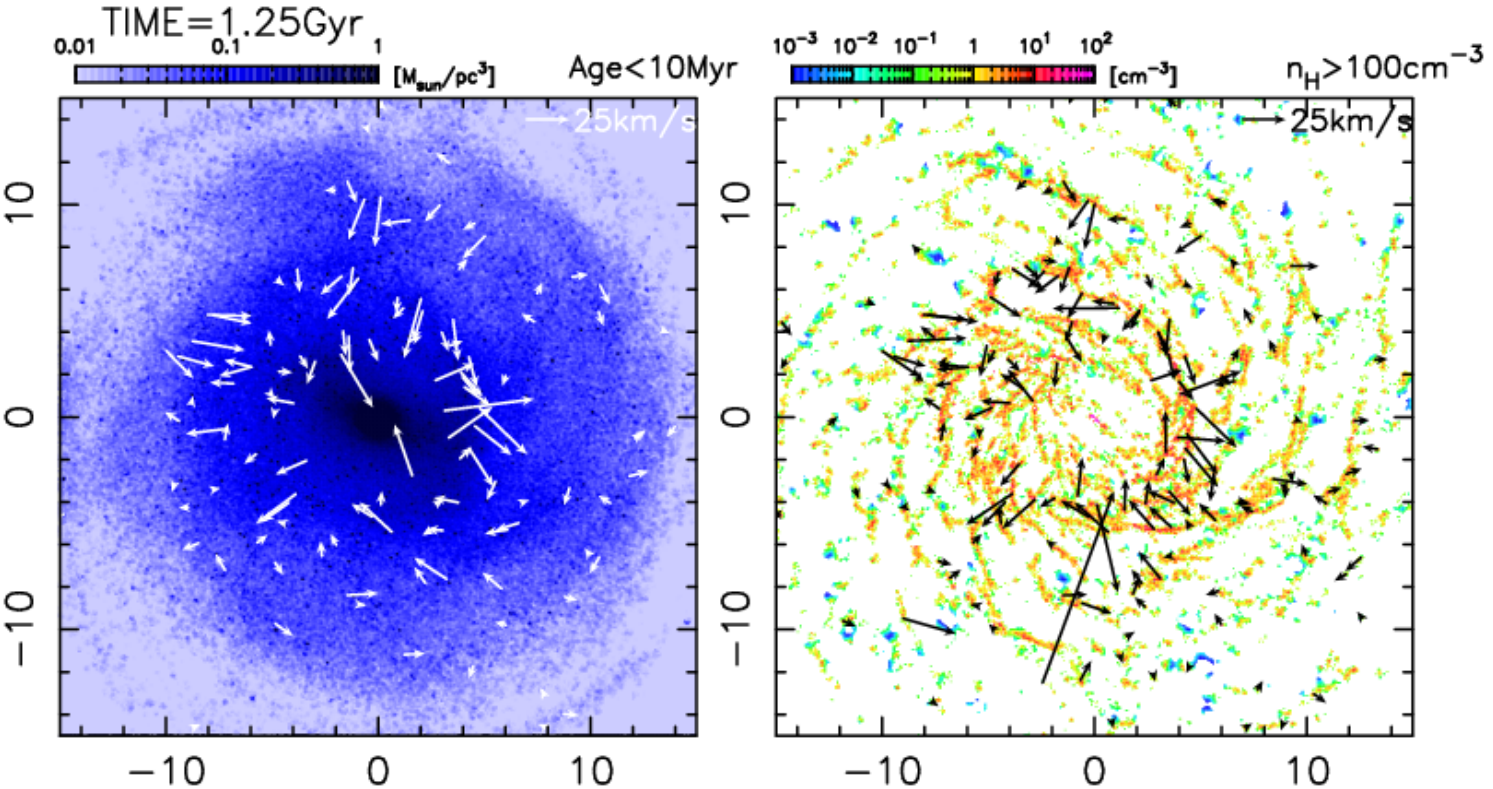
スパイラルアーム: 心眼で見るとある？

我々の(馬場さんの)シミュレーション

- 高密度・低温なガスまで力任せに解く
- 大粒子数、短い時間刻みが必須
- 高速な並列コード(ASURA、斎藤講演)+高速な計算機(GRAPE, Cray XT4)
- 10pc ソフトニング ($\leftarrow$ 500pc)
- 10k まで冷却解く ($\leftarrow 10^4$K)
- 3000 太陽質量 ($\leftarrow 10^5 M_\odot$)

結果

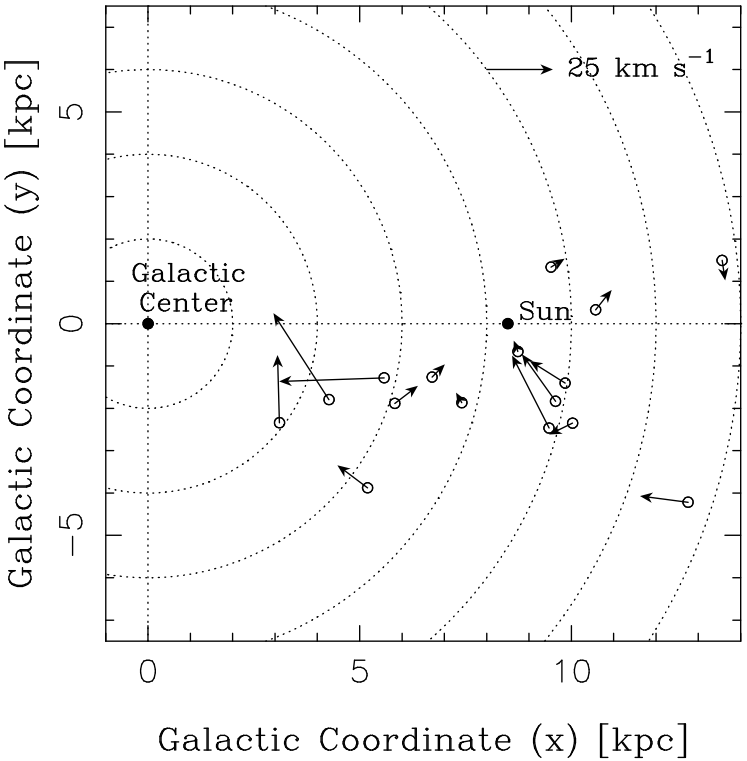
外場ダークハロー中での星＋ガス円盤の進化 (アニメーション　1　2)

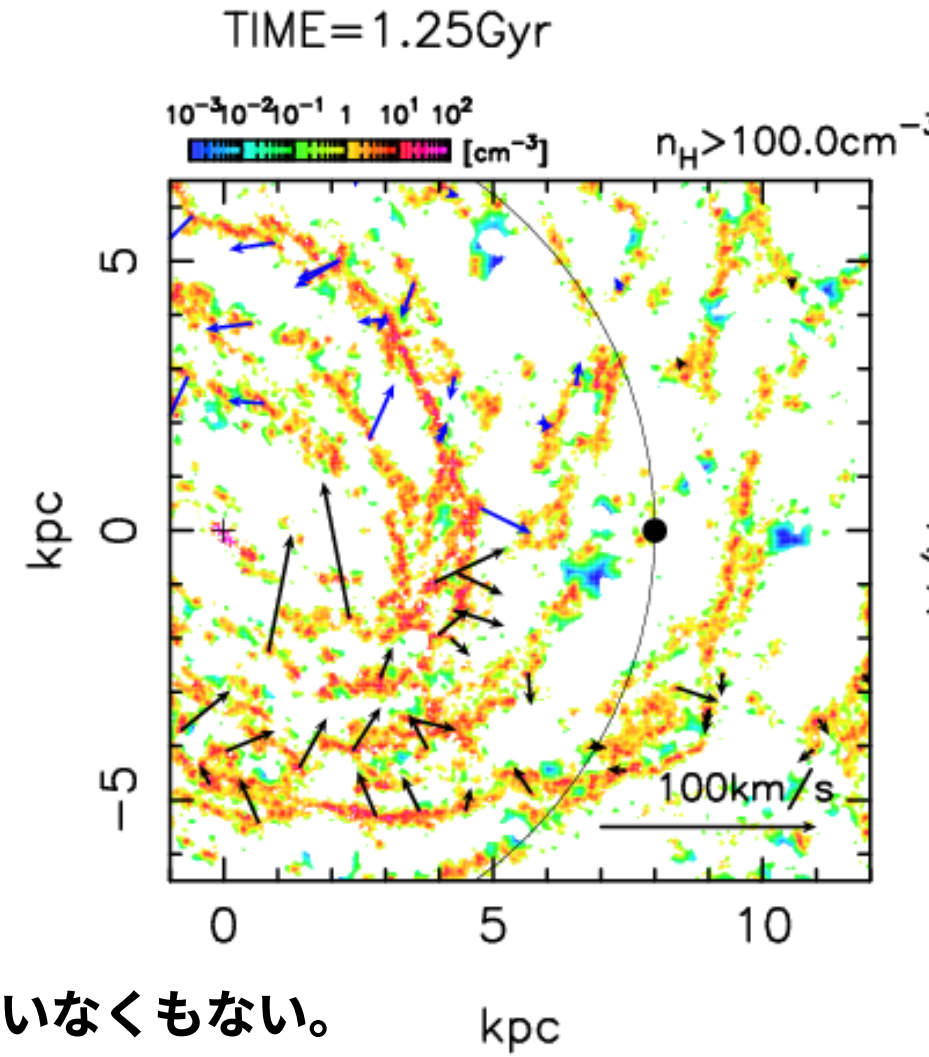


左:星の密度、若い星の非円運動 右: 低温ガスの密度、非円運動

観測で見えたような大きな非円運動がでる

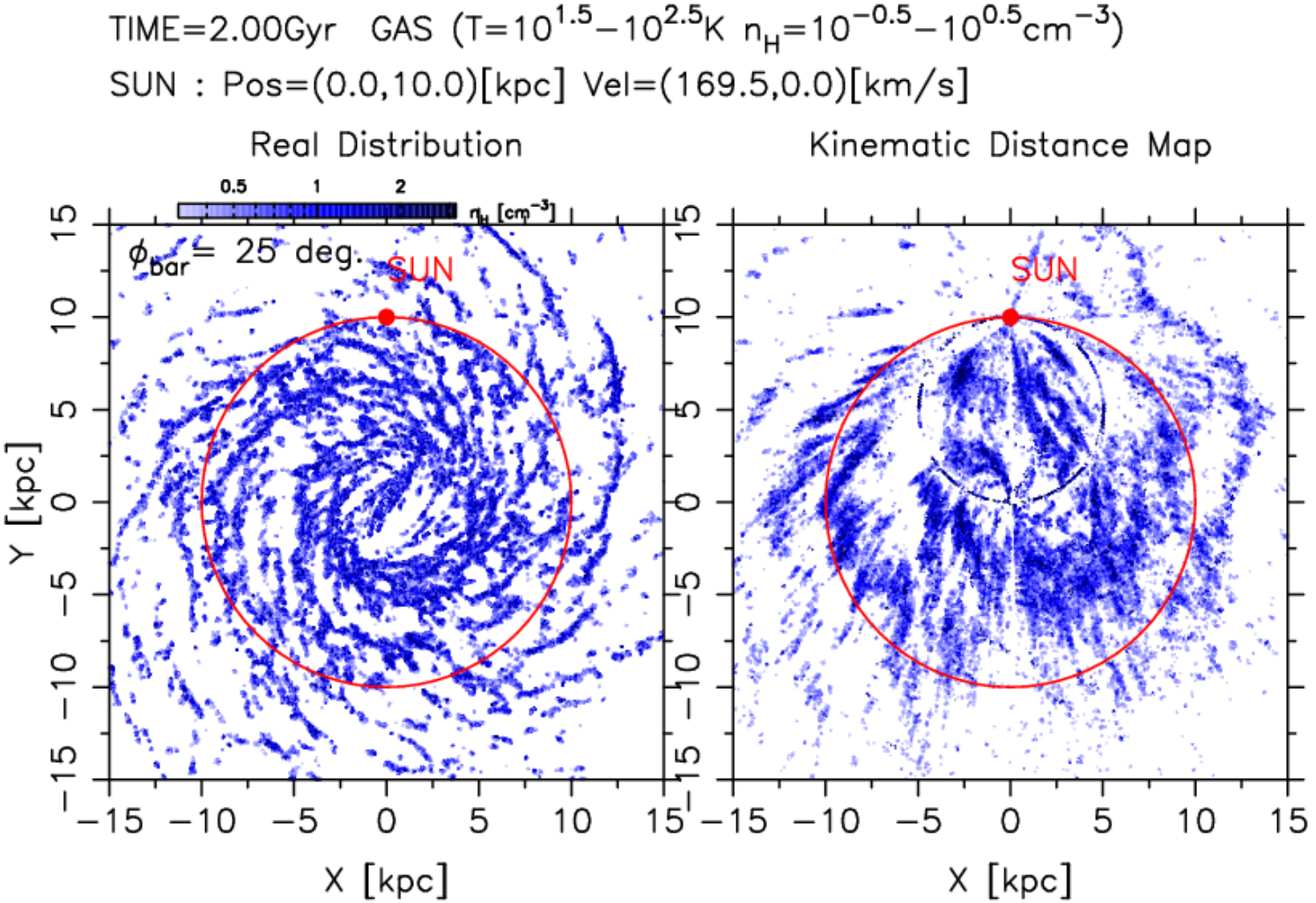
観測と比べてみる





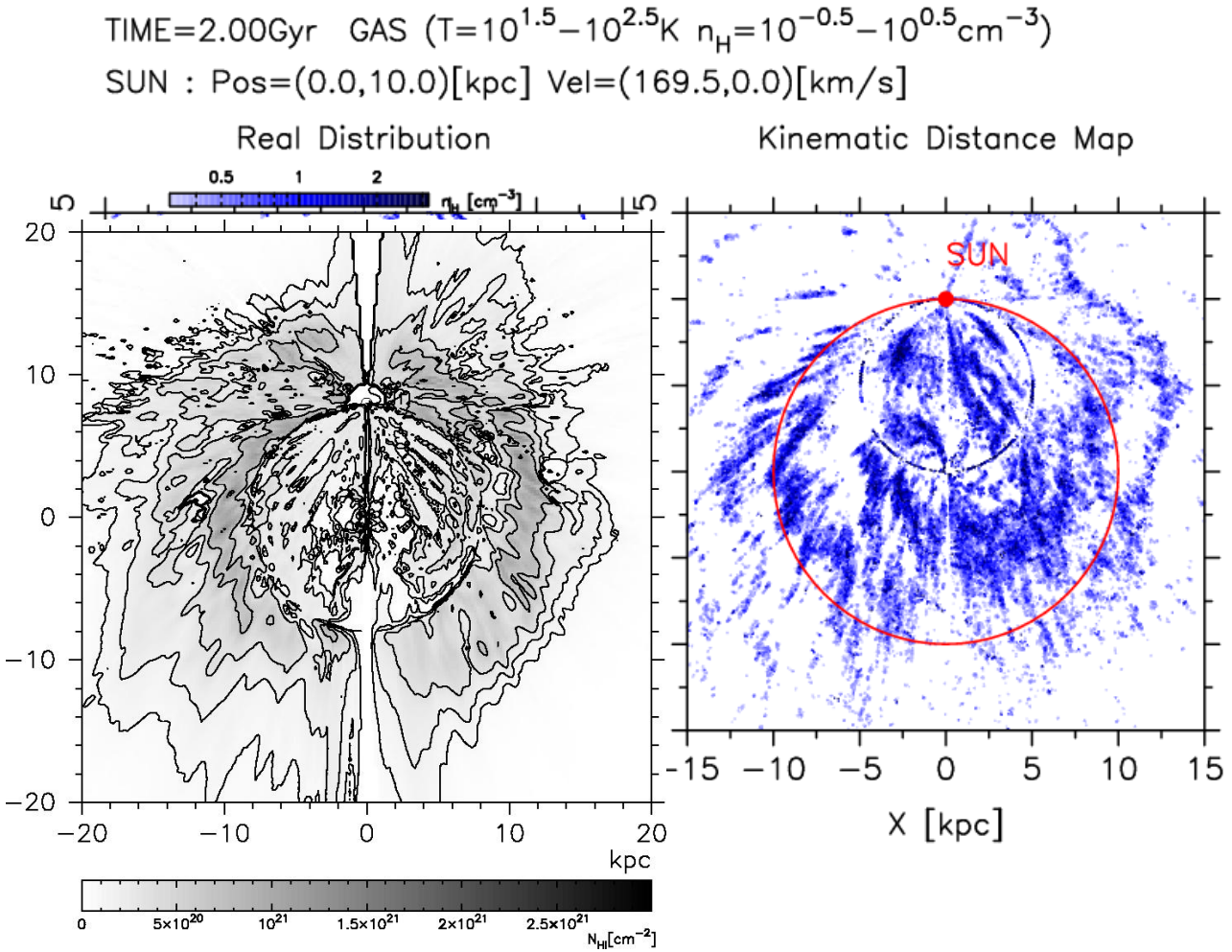
バーの位置を一応それらしくすると似ていなくもない。

運動学的距離



左:実際の位置、右:観測点からの運動学的距離でプロット
なんだか全然違う。

運動学的距離

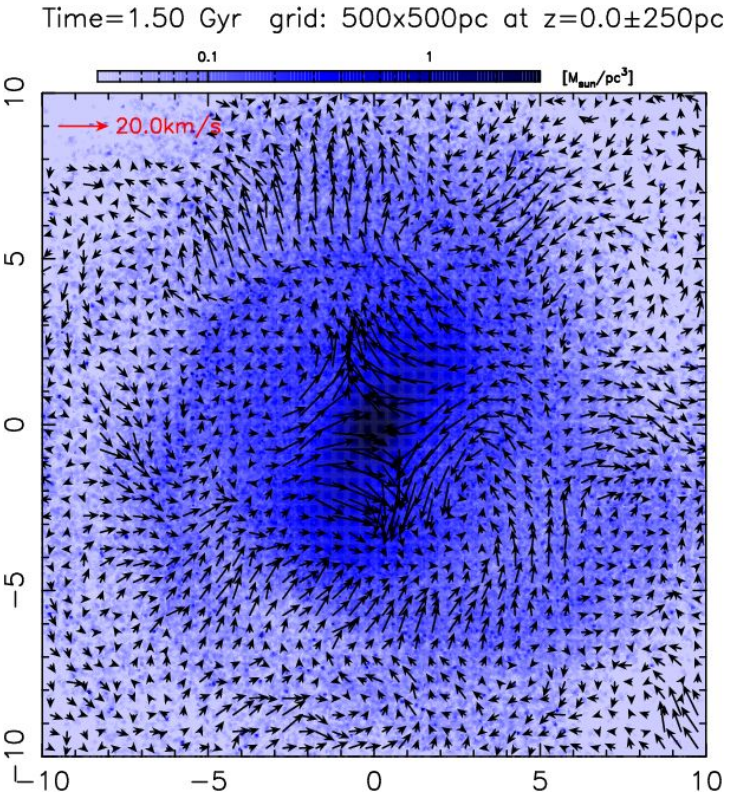


左: HI observation (Nakanishi and Sofue 2003)
似た構造が見える。「本当の」構造も似ている？

LSR は大丈夫か？

500pc ボックス内の星の平均速度 (平均の円運動を除いたもの)

- アームが実体、自己重力的:
  - 古い星も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
- VLBI での観測自体、LSR、回転曲線に関する仮定による



円運動を仮定した円盤構造の解析は全て怪しい

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
- 円運動の仮定を必要としない観測による構造の決定が必須

おまけ

何故牧野が銀河円盤の観測なんて話を？

去年の春くらい: 三好さんから、「少ない数のメーザー源の測定でも理論やシミュレーションと比べてなんかできないか」と聞かれる
去年の 10 月末: 馬場君の結果を見る。運動が大きいので見えるのでは？という話をする。
11 月: 既に VLBA で 2006 年に論文 1 つある、と聞く。さらにこの月に 10 天体以上の論文がまとめてでる。やはり非円運動大きい。

理論 (シミュレーション) と観測は結構あってるのでは？

今後の銀河円盤研究

- 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
  - l-v 図との比較法
- 系外銀河での構造・速度マップ (局所銀河群、将来的には ALMA)

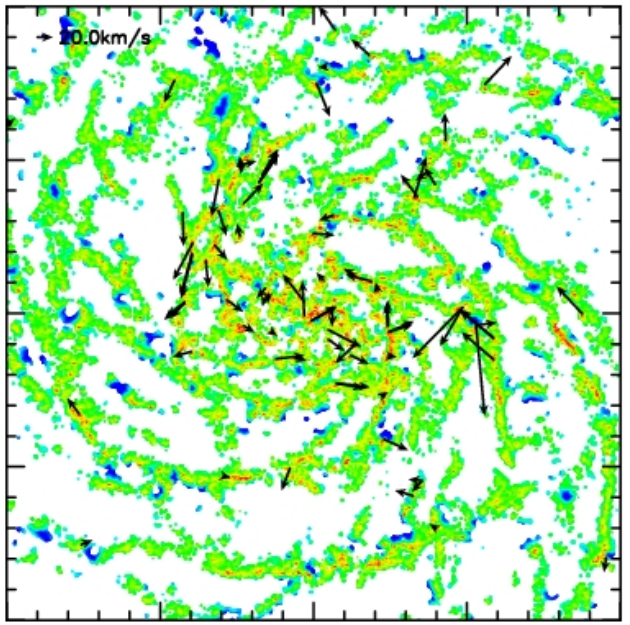
シミュレーションは信じてよいのか？

- 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)

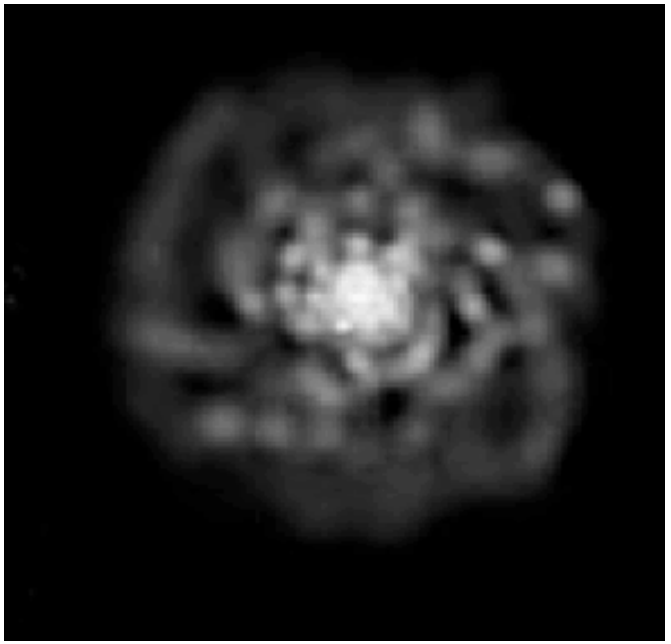
理由:

- 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、と思うでしょ？



似てない？



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 10^4K 程度で冷却を止めていた)