

宇宙惑星科学

牧野淳一郎

惑星学専攻

事務連絡

- 今日の小レポートなし

事務連絡

- 評価は小テスト(初回はなし)とレポートで行う。

講義概要

1. ビッグバン宇宙論: 2コマ分くらい
2. 天体形成 (主に銀河): 2コマ分くらい
3. 星形成・進化、惑星形成: 3コマ分くらい

講義の目的

- 惑星形成を、宇宙における階層的構造形成全体の中で理解する
- 同時に、惑星形成研究を天文学・天体物理学研究の中で位置付ける
- そのために宇宙の始まり、銀河等の天体形成、星形成、惑星形成の順にトップダウンで話を進める

ビッグバン宇宙論

- 宇宙論の歴史
- 現在の描像
- 残っている問題
 - インフレーション
 - ダークマター
 - ダークエネルギー

天体形成

- 大規模構造・重力不安定(ジーンズ不安定)
- 重力熱力学的不安定
- 円盤構造、軸対称不安定、スパイラルモード
- 銀河形成
- 銀河と太陽

星形成と惑星形成

- 星形成
 - 星形成を考えるいくつかの立場
 - 初代星
- 恒星進化
 - 星の一生
 - 中性子星・ブラックホール・重力波
- 惑星形成の標準ないし京都/林モデル
 - **minimum solar nebula model**
 - シナリオ紹介
 - 理論的問題
 - わかっていないこと

ジーンズ方程式との比較

- 音速に関する項 $v_s^2 k^2$ は普通の波動方程式になる項で、どちらでも同じ形
- 重力の項は、ジーンズ不安定では $-4\pi G \rho_0$ だったのが、円盤では $-2\pi G \Sigma |k|$ ところにも波数がいってくる。
 - ジーンズ不安定では重力は3次元的に無限一様に広がったもの同士=ポテンシャルは距離に比例
 - 円盤では重力は2次元的なので対数ポテンシャルになり、距離が近いほうが強い、
- κ^2 の項は、元々の重力ポテンシャル上のエピサイクル運動の効果

温度0の極限

$v_s = 0$ の極限、つまり、温度0の極限では

$$k_{crit} = \frac{\kappa^2}{2\pi G\Sigma}; \quad \lambda_{crit} = \frac{2\pi}{k_{crit}} = \frac{4\pi^2 G\Sigma}{\kappa^2} \quad (1)$$

という臨界波数と臨界波長があって、これより高い波数(短い波長)は不安定

ジーンズ不安定との違い:

- エピサイクル運動が重力を抑える効果になる
- 重力が2次元的で距離が近いと強くなるために、波長が短いと不安定で、成長速度も波長が短いほど大きい

有限温度の場合

あらゆる波数 k に対して振動数 ω が実数であるためには

$$\kappa^2 - 2\pi G\Sigma|k| + v_s^2 k^2 \geq 0 \quad (2)$$

であればよく、このためには

$$\frac{v_s \kappa}{\pi G \Sigma} > 1 \quad (3)$$

であればよい。

$$Q = \frac{v_s \kappa}{\pi G \Sigma} \quad (4)$$

のことを Toomre の Q 値と呼ぶ。

恒星円盤の場合

(流体との違いは、星同士が衝突するかどうか)

同じような分散関係から安定性限界を導くことができる

$$Q = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 G \Sigma} > 1 \quad (5)$$

ここで σ_R は半径方向の速度分散である。ジーンズ不安定の場合と違って、係数が流体の場合と微妙に違う (π と 3.36)。

「現実の」円盤

ここまでの解析の仮定:

- ディスクが無限に薄い
- 重力場や回転の影響はローカルなポテンシャルの微分だけで書ける

従って、「波長が半径 R に比べて十分小さく、なおかつディスクの厚さに比べて十分長い」場合しか正しくない。

ディスクが厚さをもっている場合

- 十分短い波長では重力が3次元的になって普通のジーンズ不安定の表式になる
- 問題は、 λ_{crit} とディスクの厚さの関係

$$\lambda_{crit} = \frac{4\pi^2 G \Sigma}{\kappa^2} \quad (6)$$

なので、系のトータルの質量。半径、重力定数を1程度に規格化した単位系を考えると λ_{crit} はほぼ Σ だけで決まる(κ も1前後になるため)。原始惑星系円盤や惑星リングのような、 Σ が非常に小さい場合には λ_{crit} も系のサイズに比べて非常に小さくなる。

現実のディスク

- 原始惑星系円盤や惑星リングは非常に冷たくなければ安定である。
- 惑星リングの場合には実際に非常に冷たく、このために非常に小さなスケールで多様な構造が現れることが最近ではカッシーニ等の観測で明らかになっている。
- 原始惑星系円盤の場合には、円盤ガスは安定というのが京都モデル。但し観測的にはリングやスパイラルがどんどん見つかってきている。
- 円盤銀河の場合には、面密度は1まではいかにしても0.1より大きい程度になり、このために λ_{crit} は結構大きい。このため、普通の恒星円盤では厚さは臨界波長より小さく、 Q 値がそれなりに安定性を表す

スパイラルモードの場合

- 現状の系外銀河や原始惑星系円盤では結構色々なスパイラル構造が見つかっている
- でも、解析的に計算できるのは「**tight winding 近似**」くらい
- なので、その話のあと、数値計算ベースの話をしする

tight-winding 近似

tight winding の近似: 要するに、ピッチアングル(スパイラルアームと円の回転方向のなす角度)が小さい=大体軸対称と同じようにあつかえる

m 本腕モードの分散関係は

$$(\omega - m\Omega)^2 = \kappa^2 - 2\pi G\Sigma|k| + v_s^2 k^2 \quad (7)$$

と書ける

tight-winding 近似

- 安定・不安定の条件は $m = 0$ のモードと全く同じ
- 不安定な時には実部に $m\Omega$ が入る
- 不安定モードはラグランジュ的に回転にくっついて成長する

これは、**tight-winding** 近似してさらに半径方向に対して波長が短いという近似もしたので、 Ω の半径依存性もどこかで落として解析したような話になっている。

グローバルなスパイラルモード



M101 銀河。スピッツァー衛星
での赤外線画像

実際の銀河では、全く
tight-winding も局所近似も
成り立たないような大きな
スケールでのスパイラル構
造が見つかっている。
中間赤外で見える低温のガ
スは複雑な構造をもつ
大きなスケールでのスパイ
ラルアームがあるように見
える。

多くの銀河についてそういう構造があるように見える。

グローバルなスパイラルモードの理論的 困難

- そのような構造を定常的に維持するメカニズムはなにか
- そもそもそのようなメカニズムはあるのか

は依然未解決の問題。

- 不安定モードは基本的にローカルな角速度で回転するため、半径方向に広がったモードはどうしても差動回転の効果で時間がたつと巻き込んでしまう (巻き込みの困難)
- ある形をもったスパイラルアームが時間的に成長したり、定常状態になったりしてくれない

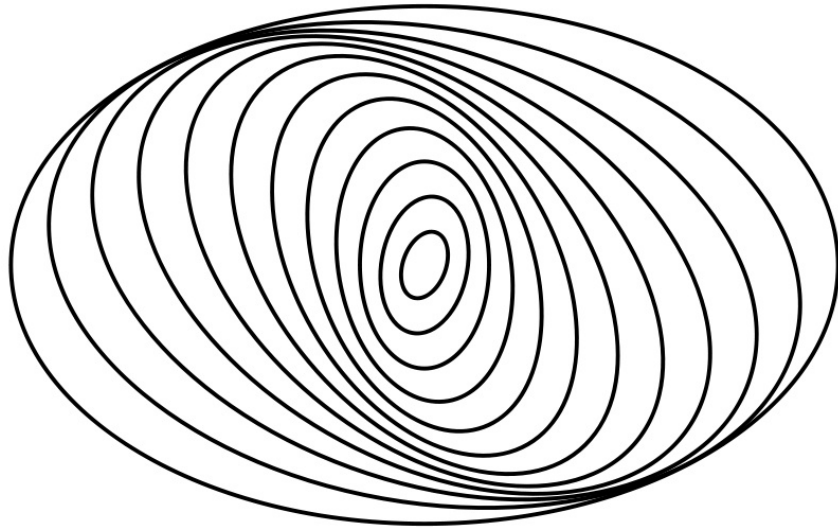
巻き込みの問題の回避(?)

これまで唱えられていた理論は例えば以下のようなものがある

1. 定常密度波理論(いわゆる Lin-Shu 理論)。これは、大雑把にはスパイラルアームは実体ではなく、「密度波」だというもの
2. 非定常理論。これは要するに、アームは次々にできたり消えたりするものである、というものである。

定常密度波理論

これは、大雑把にはスパイラルアームは実体ではなく、



こんな感じにうまいこと軌道がずれていくことでできる見かけのパターンであるとするものである。エピサイクル周期も半径に依存するし、なぜ同じ半径では大体位相がそろうのかとか、うまいことスパイラルパターンができるようにその位相が半径によってずれるのかとかは良くわからない。

定常密度波理論

これで全くなにも説明できないというわけではない。アームはともかくポテンシャルが実際に非軸対称の時に、このようなパターンは確かにできる

- 棒渦巻銀河
- 相互作用銀河

但し、棒渦巻銀河の詳細なシミュレーションでは、アームはバーの先端からでていますが時間変化は結構する(定常ではない)ということもわかってきた。

非定常理論

- 要するに、アームは次々にできたり消えたりするものである、という考え
- 。1970年代から1980年代にかけて、ディスク構造の多体計算は盛んに行われた。
- れらの計算では、 Q 値が1より少し大きい、軸対称モードに対しては安定なはずのディスクから計算を始めると、かなり強いスパイラル構造が数回転で成長する。しかし、数十回転までいかないうちに Q 値が大きくなり、そのような構造は消える。

非定常理論

- 実際の銀河では、ガスが放射冷却で温度を下げることができるので、ガスがあるうちは Q 値がある程度小さくたもたれていると考えることができ、このために常に不安定性により新しいアームが作られている、と考える。
- 90年代以降この辺はあまり研究されていなかった
- 最近の大粒子数での数値計算 (Fujii et al, 2011) では、初期の Q の値や粒子数によっては、ガスによる冷却効果がなくても非常に長い時間にわたって非定常なスパイラル構造が見える、ということがわかってきた。

Swing Amplification

上で述べたような、非定常な構造の進化を考える上で有用な概念の一つが **swing amplification** である。現象としては、これは、以下の図に示すようなことが起こる、というものである。

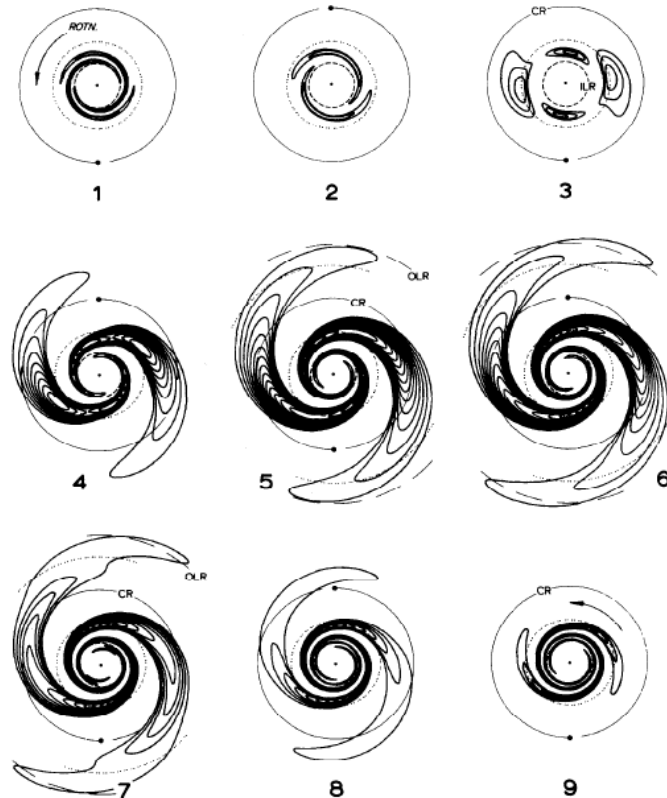


Figure 6-17. Evolution of a packet of leading waves in a stellar Mestel disk with $Q = 1.5$ and $f = 1$. Contours represent fixed fractional excess surface densities; since the calculations are based on linear perturbation theory, the amplitude normalization is arbitrary. Contours in regions of depleted surface density are not shown to minimize confusion. The time interval between diagrams is one-half of a rotation period at corotation. From Toomre (1981), by permission of Cambridge University Press.

Swing Amplification(2)

- 最初に **leading arm** (外側のほうが先に進んでいる) な摂動を与えると、これが最初は巻き込みがほどけていってそのうちに **trailing** に変化する。
- その間に、**trailing** で非常に振幅の大きなアームが一時的に見える。

単純にいてしまおうと、**leading** から **trailing** に変化する最中だと、モードの回転とエピサイクル運動の回転が同じ向きで、このために回転の効果がキャンセルされて普通のジーンズ不安定に近い状況になって摂動がどんどん成長できる、というような話である。

Swing Amplification(3)

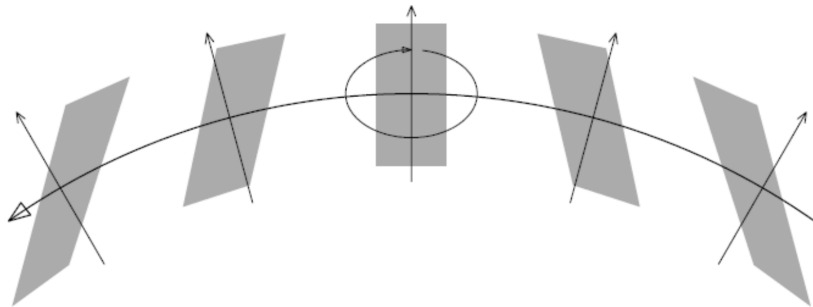


Figure 15.1: Evolution of an overdense perturbation in a shearing disk. The disk rotates counter-clockwise, as indicated by the heavy arc; a typical star moves around an elliptical epicycle in a clockwise direction. The perturbation (grey patch) initially has the form of a *leading* spiral (right), but is sheared into a *trailing* spiral (left) by the differential rotation of the disk. The epicycle and the perturbation rotate in the same direction, so stars stay in the perturbation longer than they would under other conditions.

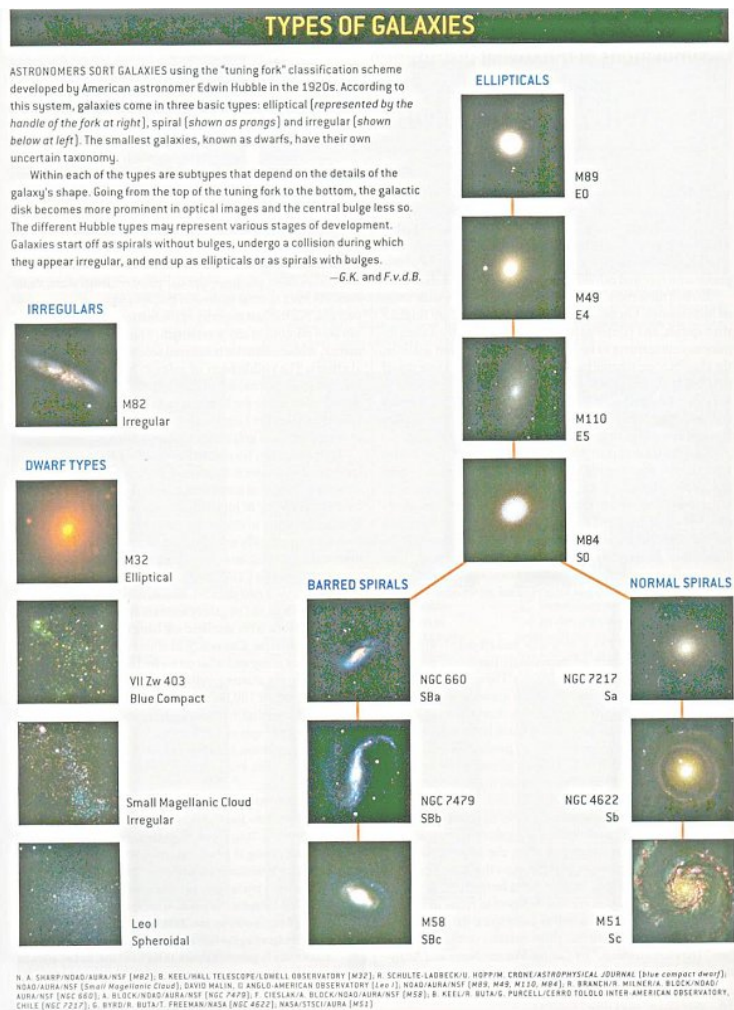
但し、これが機能するためにはどこからか **leading arm** な摂動が供給されなければならない。 N 体計算では、最初にランダムに粒子を置くと、ポアソンゆらぎからアームが成長していくが、

単純にポアソンゆらぎからの成長で、一回切りの現象だと思えば粒子数を増やせばアーム強度は小さくなるはずである。また、成長時間も粒子数に依存しないはずである。数値計算の結果は、最大のアーム強度は粒子数に依存せず、また成長は粒子数が大きいと遅い、ということを示唆している。

バーとバー不安定

- 上でみたように、スパイラル構造についてはそれを定常的に維持するメカニズムが何か、そもそもそんなものがあるのか、ということが良くわかっていない。
- しかし、グローバルな非軸対称モードとしてはスパイラルの他にバー不安定があり、これについては非線型領域で定常なバー構造が存在できることは古くからわかっている。
- **Q** 値的には安定なディスクであっても、ディスクだけでダークマターハローやバルジがないと必ずバー不安定を起こす、ということが1970年代から知られている。但し、グローバルモードであることから安定性条件等が単純な形で得られているわけではない。

銀河形成シミュレーション

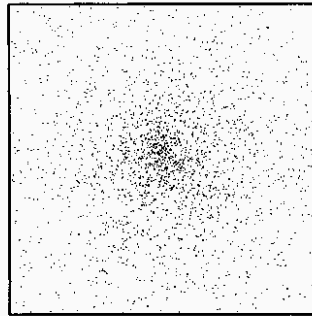
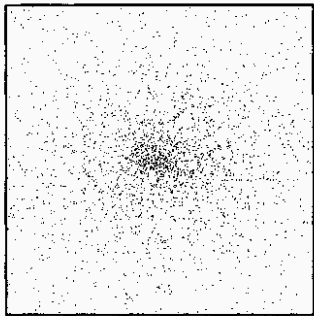


基本的な考え方:

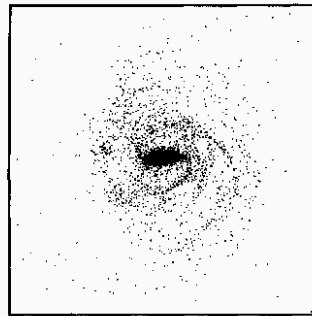
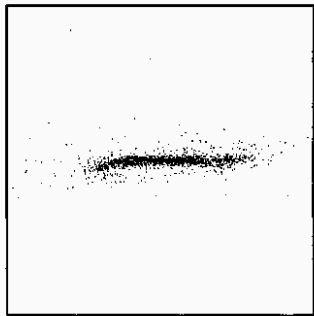
- 初期条件からの、銀河の「まると」シミュレーション
- 銀河の多様性の起源を理解したい

Katz and Gunn 1992

dark particles

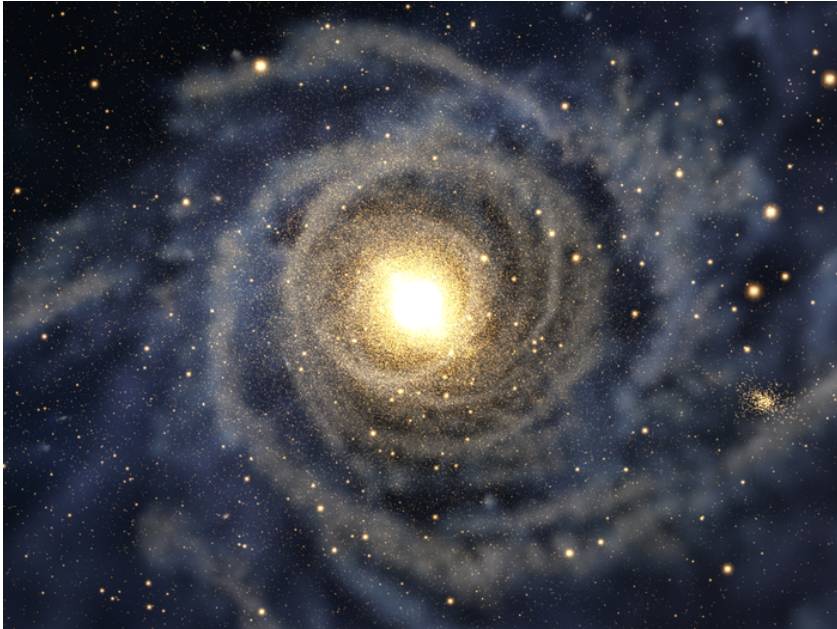


gas particles



- ダークマター+ガス+星
- 1万粒子くらい、 **Cray YMP** で **1000** 時間くらいの計算
- 1粒子の質量: **1000** 万 太陽質量くらい

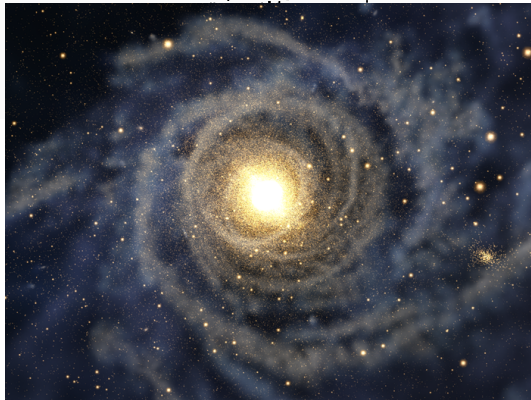
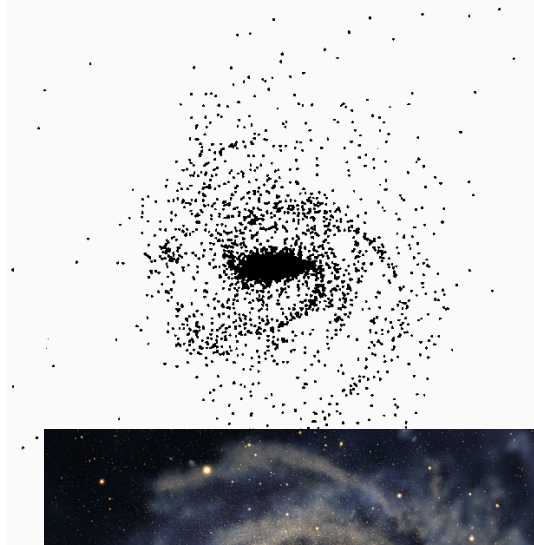
Saitoh et al. 2005/2019



2005 animation
2019 animation

- ダークマター+ガス+星
- 200万粒子、**GRAPE-5**で1年(!)くらいの計算
- 1粒子の質量: 1万太陽質量くらい

分解能を上げるといいことがあるか？



- そうでもない？
- 大事なこと: 物理過程のより適切な扱い
 - 星形成
 - 超新星爆発からのエネルギーインプット

星形成過程のモデル

- 本当に星1つを作るシミュレーション: 分解能が太陽質量より 4-5 桁高い必要あり
- 現在できる限界: 粒子の質量が太陽の 1000 倍。8 桁くらい足りない
- 星ができる過程のモデルが必要
 - ガスが十分に低温・高密度になったら、星に変わる、とする
 - いくつかフリーパラメータがある
 - できる銀河の構造がパラメータのとりかたによってしまう、、、
- 超新星の扱いにも同様な問題

どれくらいの分解能でどうすればいいか？

- 答があうようになったらわかる？
- ガス粒子が星形成領域や分子雲より大きいようでは多分駄目
- 理論的には、十分な分解能があれば単純にガスを星に変えるだけでよくなるはず。
- そこに近付いている？
- あと 1-2 桁？

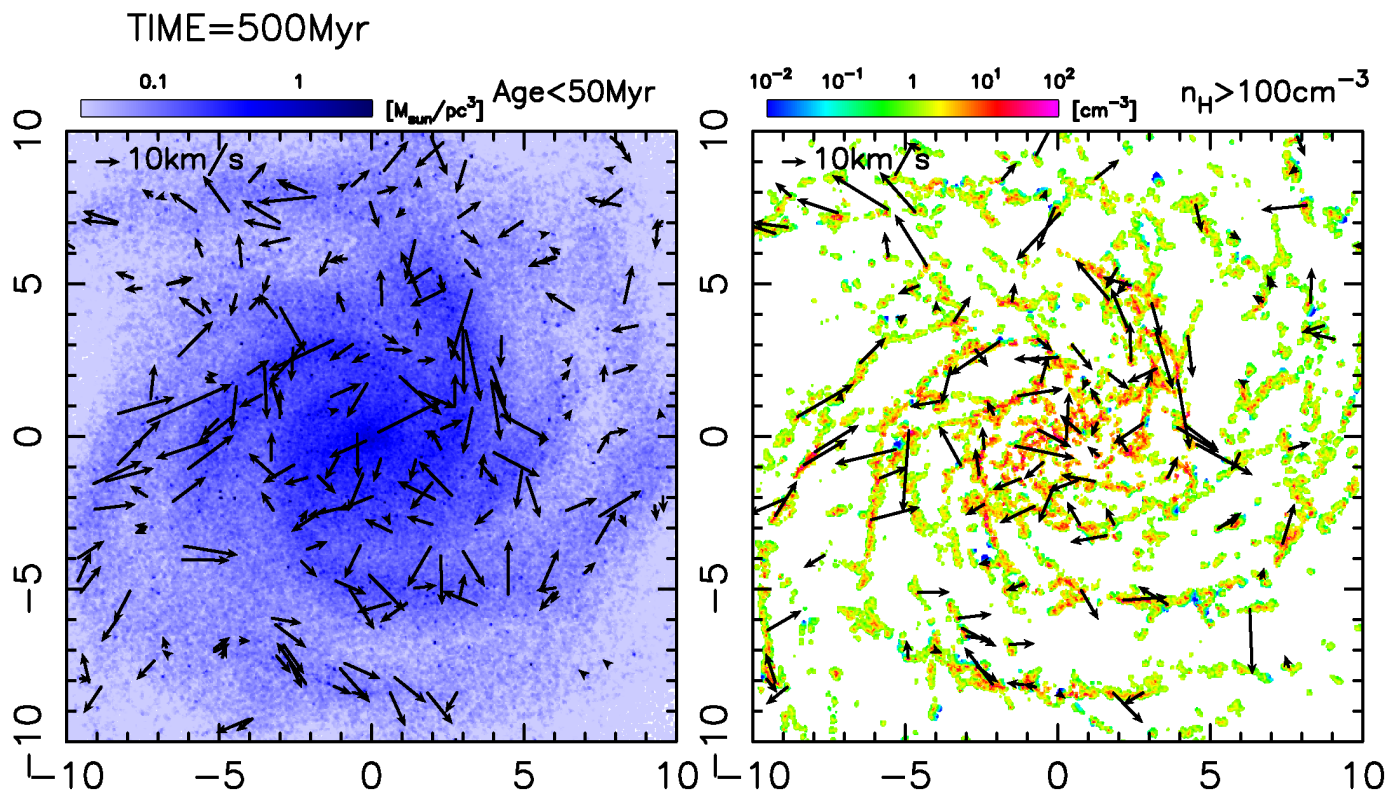
アニメーション

Star formation with SPH

Large scale structure formation with AMR

銀河円盤

渦巻構造と、円運動からのずれ animation (Baba et al 2009) 1 2



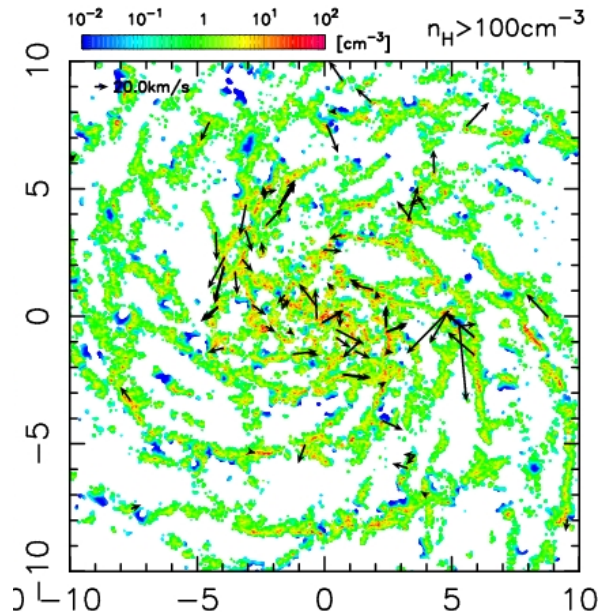
星の分布

冷たいガスの分布

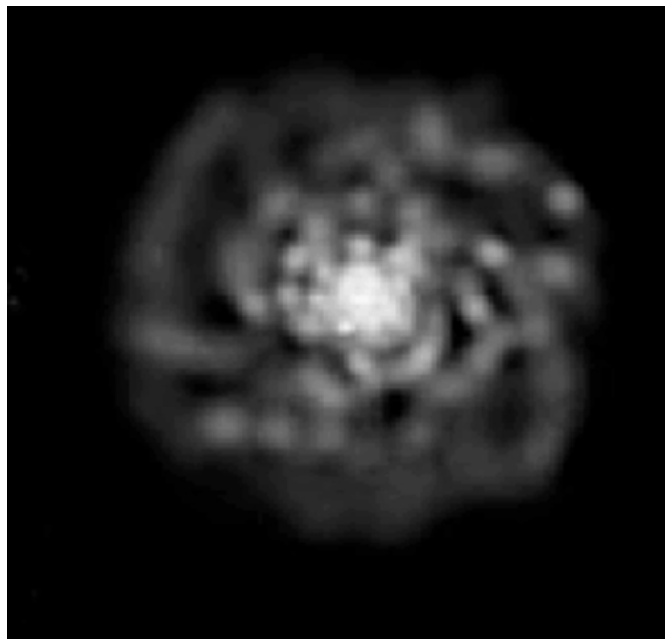
シミュレーションの詳細

- ガスが低温・高密度になるところまで解く
- 多数の **SPH** 粒子で高分解能シミュレーション
- 計算機には国立天文台の **Cray XT4**、斎藤貴之さん開発の **ASURA** コード
- **10pc** ソフトニング (\leftarrow **500pc**)
- ガスは温度 **10K** まで解く (\leftarrow 10^4K)
- 粒子質量 $3000M_{\odot}$ (\leftarrow 10^5M_{\odot})

高分解能モデルと観測



低分解能モデルと観測

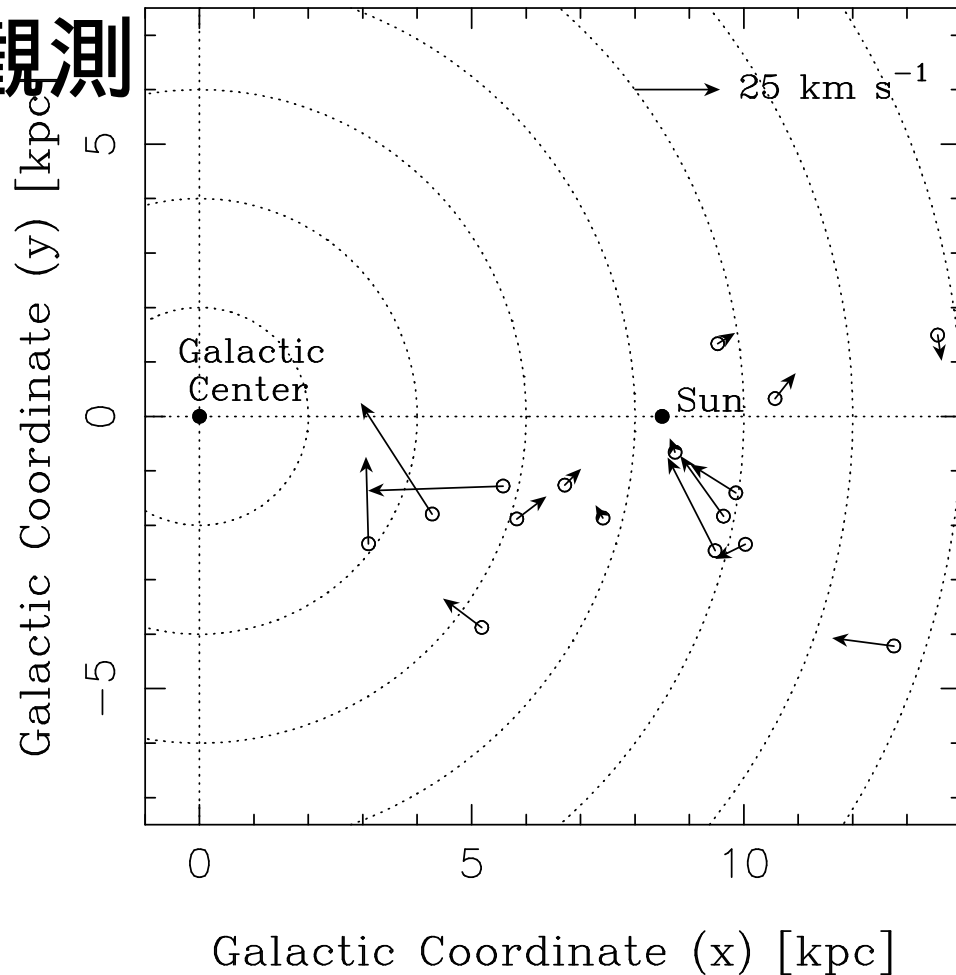


高分解能シミュレーションでわかってきたこと

- 星形成は大きなスケールの渦巻構造と関係
- 観測で見える複数アームがある渦巻は、定常ではなく形成・消滅を繰り返している
- この結果は、星形成のモデルの詳細にほとんど依然しない

電波干渉計による観測

- 2006: Xu et al, Science 311, 54
- Nov 2008: Burst of results from VLBA
- Several data from VERA

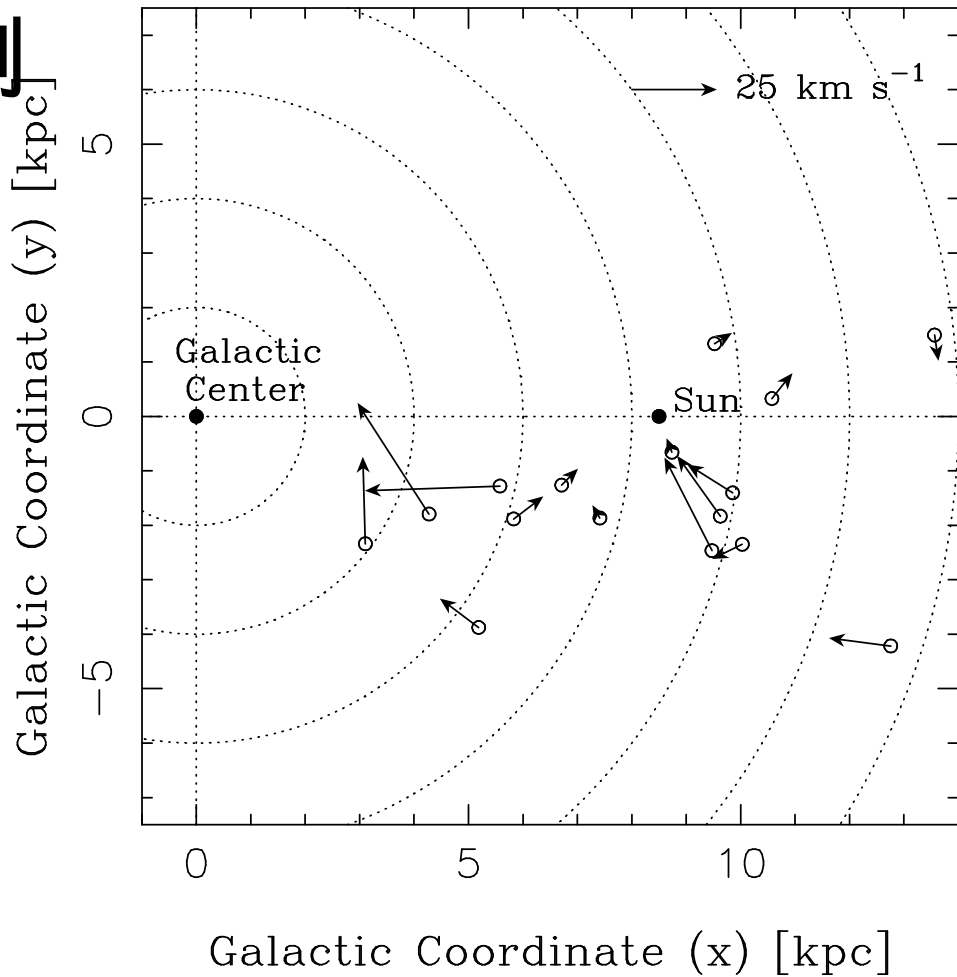


(Compiled by Dr. Asaki)

電波干渉計による観測

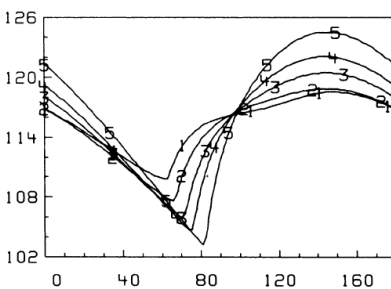
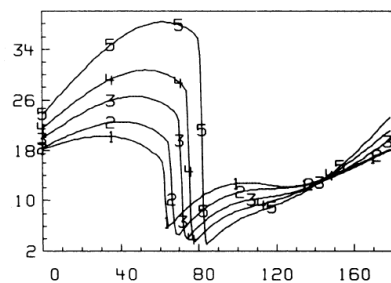
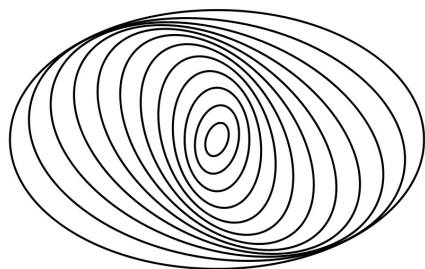
- 円運動からの大きなずれ ($\sim 30\text{km/s}$)
- 空間相関もあり？

このような大きな運動の起源は？



教科書に書いてあること

定常密度波



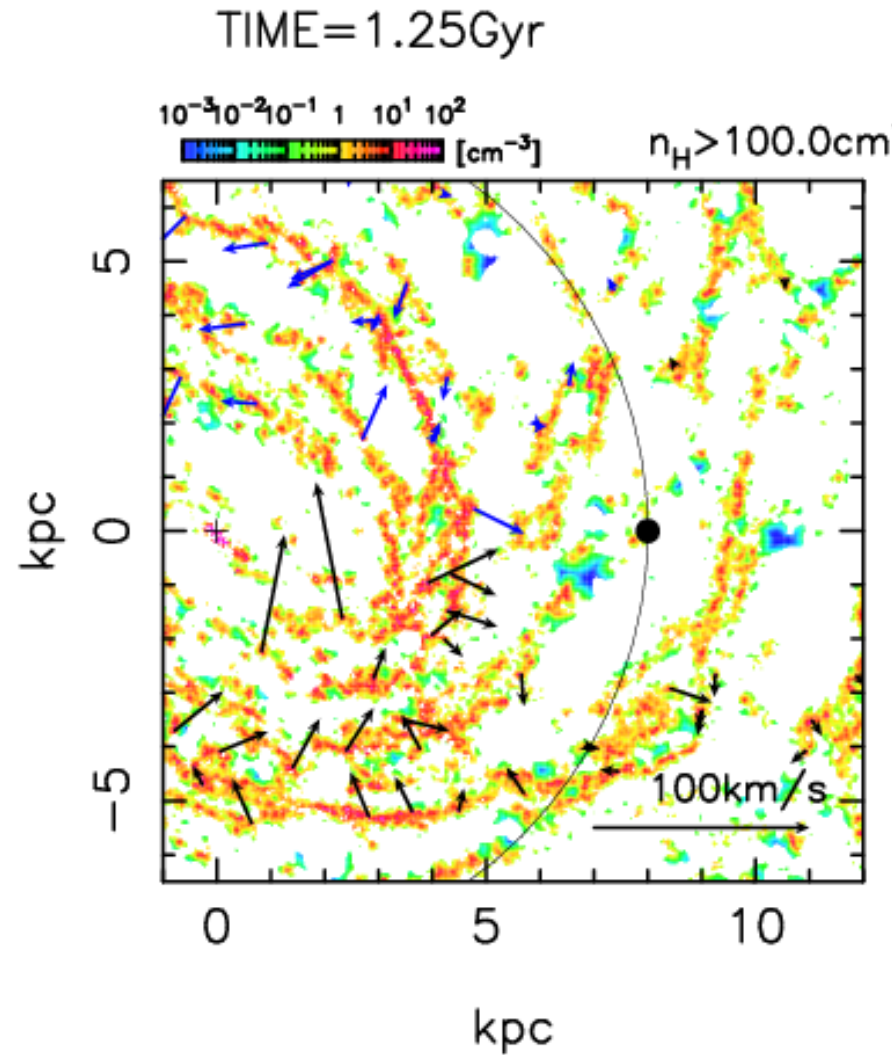
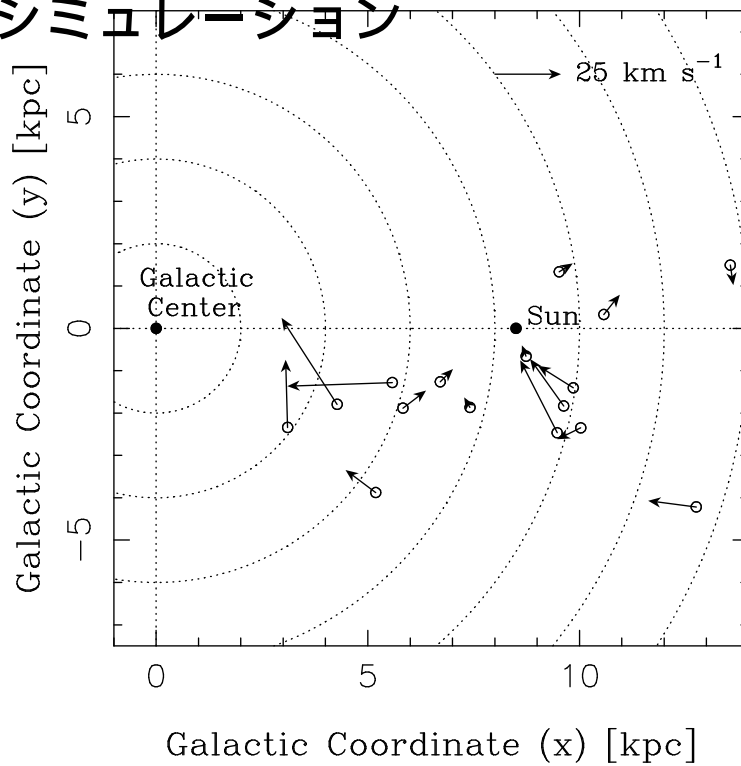
θ (deg)

- 渦巻構造は実体ではなく、密度波
- ガスは、渦巻が作るポテンシャルの底を通る時に圧縮されて、そこで星を作る
- 星やガスの円運動からのずれはごく小さい

観測ともシミュレーション結果とも全然あつてない、、、

比較

観測とシミュレーション

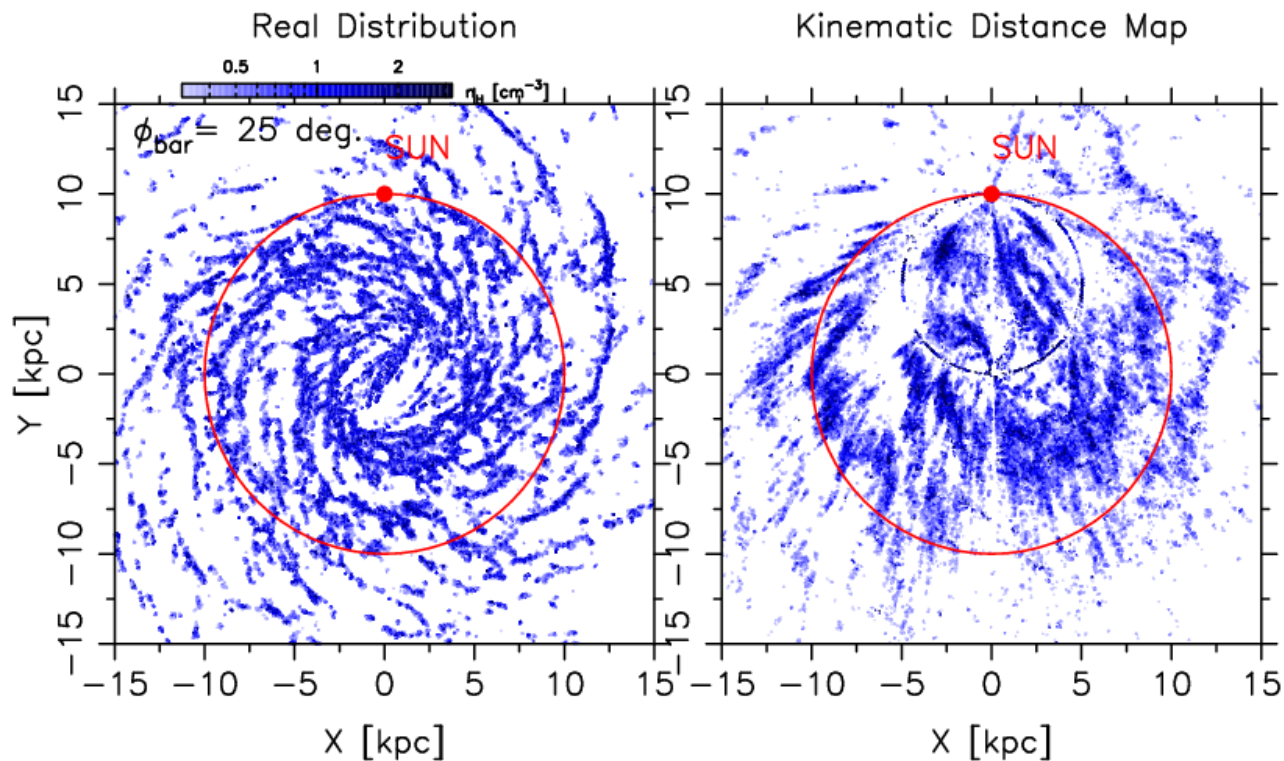


似ているような気が？

運動学的距離

TIME=2.00Gyr GAS ($T=10^{1.5}-10^{2.5}K$ $n_H=10^{-0.5}-10^{0.5}cm^{-3}$)

SUN : Pos=(0.0,10.0)[kpc] Vel=(169.5,0.0)[km/s]

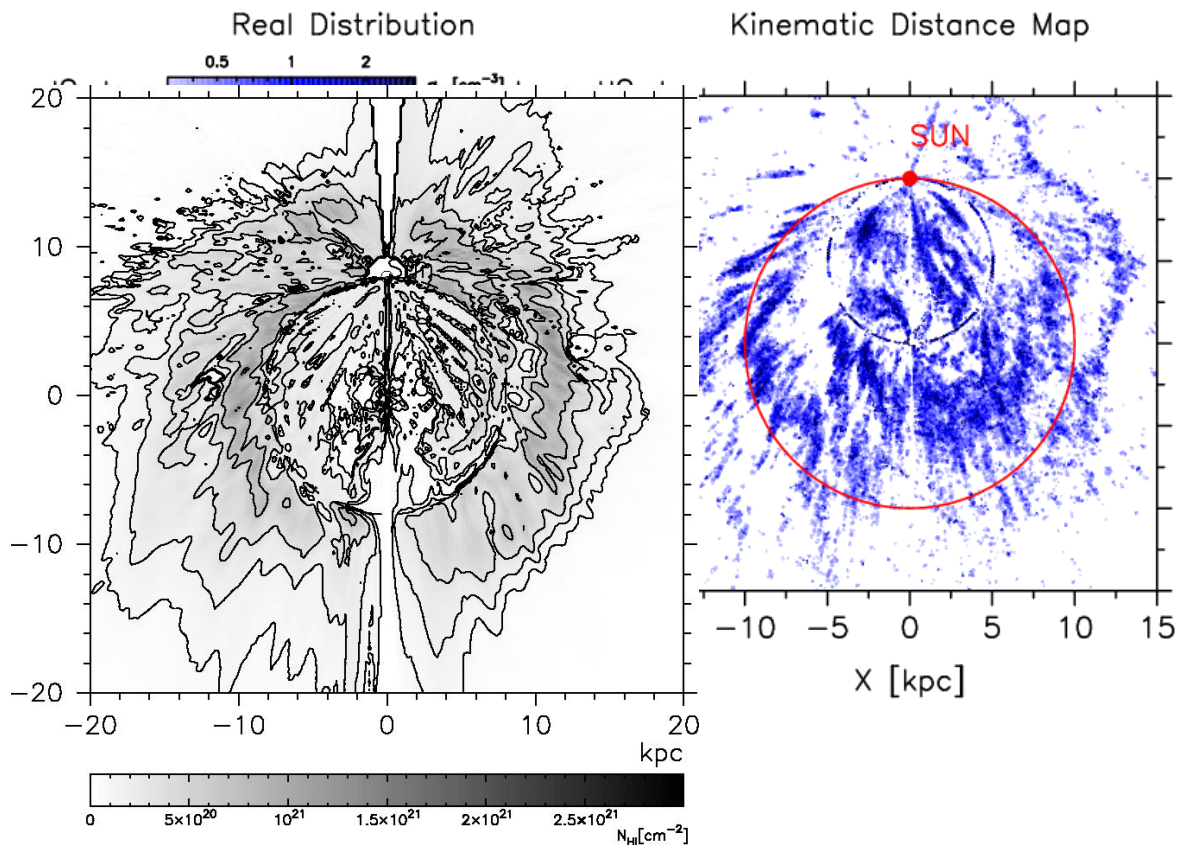


「円運動をしている」と仮定すると、速度の観測から距離が求まる
シミュレーション結果を観測すると、、、、

運動学的距離

TIME=2.00Gyr GAS ($T=10^{1.5}-10^{2.5}K$ $n_H=10^{-0.5}-10^{0.5}cm^{-3}$)

SUN : Pos=(0.0,10.0)[kpc] Vel=(169.5,0.0)[km/s]

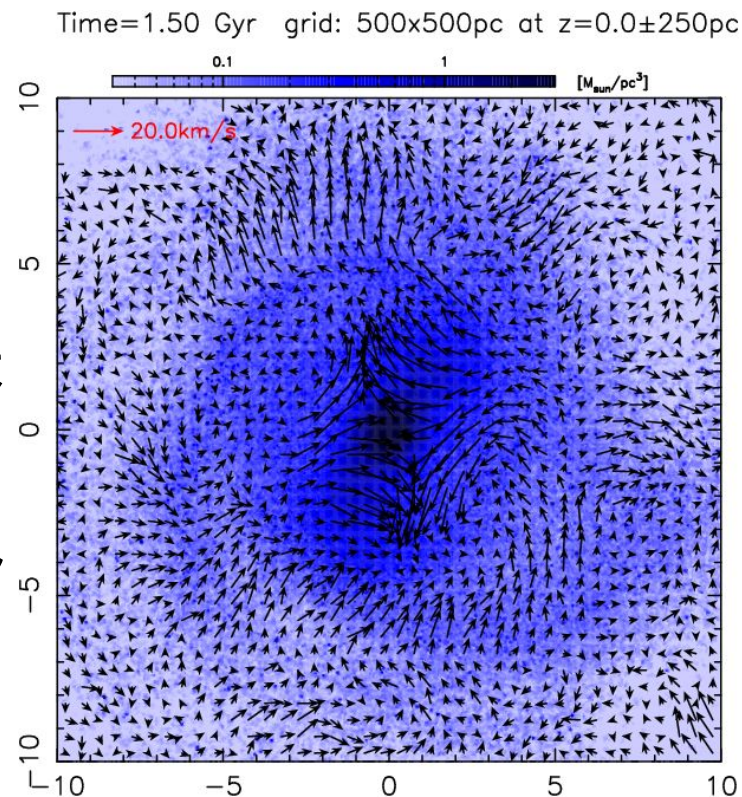


観測 (左) とシミュレーション (右) を比較すると、同じような構造

星のスパイラルの運動

星の運動の円運動からのずれ

- スパイラルアームは実体、密度波ではない
 - 古い星の平均の円運動からのずれも結構大きい
 - キロパーセクスケールの構造がある



ガス+星の銀河円盤シミュレーションのまとめ

- 高分解能計算ではスパイラルアームは自然にできる
- アームは定常ではなく、常に生成消滅している
- シミュレーション結果を「観測」すると、我々の銀河系の観測の色々な特徴を再現できる

星だけの円盤

(Fujii et al. 2010)

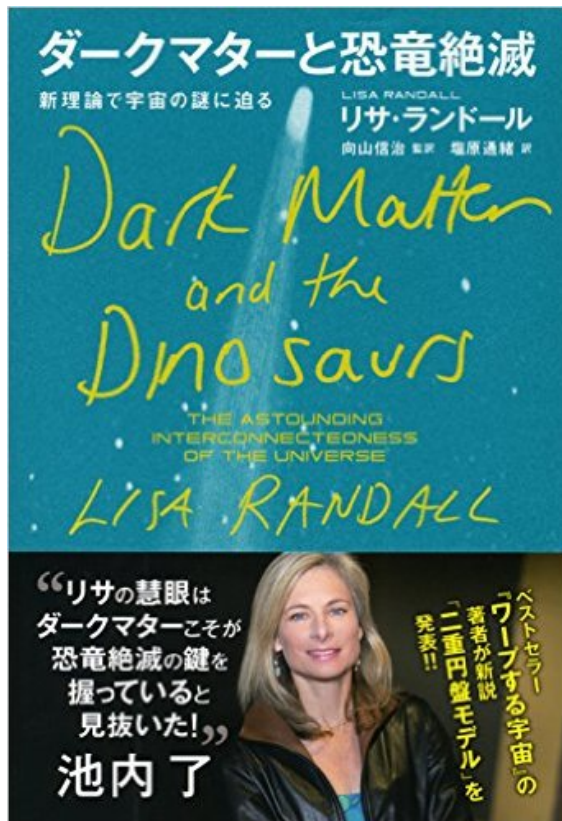
animation a1

animation a2

animation b1

- 軸対称モードに対しては安定 (a1, a2)
- スパイラルアームはできる
- 非常に長時間アームは消えない

余談: ダークマターと恐竜絶滅



- こんな本が数年前にでていた
 - リサ・ランドールは大変有名で業績もある素粒子物理の理論家
 - これは、「未知のダークマター」が薄い銀河円盤を作っていると恐竜絶滅が説明できるという説
 - 講義で議論したような円盤の安定性の検討がない(著者達の論文読んでも)。
- 検討すると強い不安定。多分間違っている。

星形成と惑星形成

- 星形成
- 惑星形成

星形成についてわかっていること

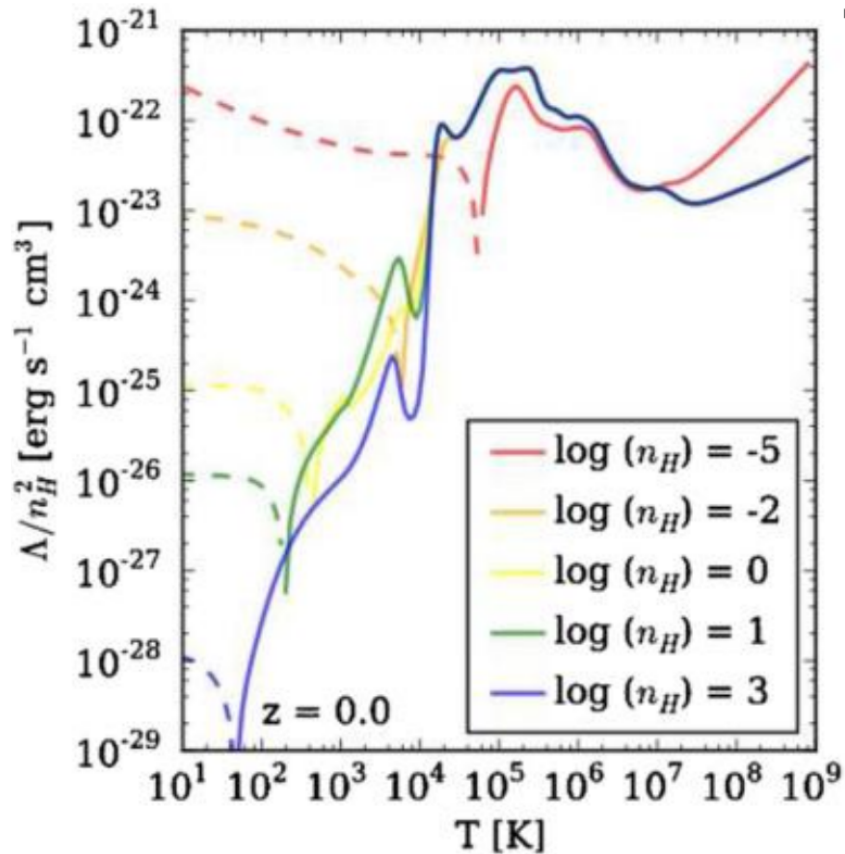
- 「星形成についてわかっていること」の整理はなかなか難しい。
- なので、まず、なぜ難しいか、を整理して、それからもう一度わかっていることを整理したい。

銀河形成の理論の側からみた星形成

- 銀河形成シミュレーションで、星ができたり超新星爆発したりもっともらしい振舞いをしていた
- 但し、星1つ1つのレベルまで計算しているわけではない。ガスやダークマターを表す粒子の質量が、最近の「高分解能」の計算でも太陽質量の1万倍くらいある
- なので、「星間ガスが冷えて、自己重力で集まってくると適当に星になる」と考える。

いろいろいい加減だが、「定性的には」正しい

ガスの冷え方



Kim et al. 2014(AGORA)

(破線は加熱。紫外線バックグラウンドによる)
密度が低い (0.01 個/cc とか以下) ガスは 10^4 K から冷えない
密度が高くなると平衡温度は下がる。但し、冷却率は 10^4 K 以下では小さい

冷却率を決めているもの

- 10^4K 以上: 水素ガスは電離してプラズマになっている。: 電子と光子の相互作用:**Bremsstrahlung** (制動輻射)
- 10^4K 以下: 水素はまず水素原子 (HI) になる。そうすると非常に冷却しにくくなる。水素ガスだけではほとんど冷えないが、(天文学でいう)「メタル」があると、ダストが形成され、ダストは固体なので熱輻射をだして冷える。水素原子とは衝突によって熱平衡にいくので、密度が高いと冷却率は大きくなる

「天文学でいう」メタルとは

- 水素とヘリウム以外の全ての元素のこと。炭素とか酸素も「メタル」なことが多い。天文学の論文で **metallicity** という言葉がでてくると大抵こっち。
- 地球科学とは結構違うのでこのへん注意が必要

銀河形成の観点からのガスの振舞い

理想化した話:

- ダークマター+バリオンの自己重力系が重力収縮していくと、ダークマターは冷えない(輻射をださない)ので最初の密度ゆらぎで決まる大きさに落ち着く
- バリオンは輻射をだして冷えて中心に集まる。角運動量で支えられた薄い円盤になる
- 薄い円盤はさらにスパイラルモードや、スパイラルアームの中での重力不安定を起こし、冷却しながら小さなものに分裂していく
- 星ができると、超新星爆発や若い星からの紫外線でガスは加熱されたり圧縮されたりする。

銀河形成の観点からのガスの振舞い

現実の話:

- 円盤形成・重力不安定による進化は確かに起こる
- その途中で、形成中の銀河同士が合体したり、小さな衛星銀河が落下してきたりする。
- ガス円盤同士も衝突して、衝撃波圧縮の結果爆発的星形成を起こす
- また、一部の(多くの?)ガスは角運動量を失って銀河中心に落ちる(バルジの起源?別の理論もある)

というわけで、ガスはかなりダイナミックに圧縮されたり加熱されたりする。

一方、星間ガスの理論の観点からの ガスの振舞い

- 初期状態として「無限一様で背景の輻射場と平衡なガスを考える」
- 熱不安定(温度が低いガスは平衡温度が低いのでさらに温度が下がる)によって、高温ガスの中に低温ガスの塊ができる
- 但し、これは星形成につながるかということそうならない。より高密度のガスを衝撃波圧縮等で作る必要がある

星形成のシミュレーションの観点

1つの星の形成シミュレーション

星形成シミュレーション

連星形成シミュレーション

- 初期に適当な密度をもつガス球を置く。通例としては、ある温度で自己重力平衡な解を密度あげて収縮するようにする。一様な磁場とか回転もあったりする
- そこからシミュレーション

色々なことが起こってその過程は沢山の人が詳細に研究している一方、「その初期条件に意味はあるのか」はなかなか難しい。

星形成のシミュレーションの観点

星団形成のシミュレーション

Star formation with SPH

- もっともらしく沢山星はできる。
- 初期条件は？
- 星ができるところを本当に計算できてるのか？

シミュレーションの問題点

- 星になる前のガスとできた星の両方を流体シミュレーションで一気扱うのは現在のところ不可能
- 星ができるタイムスケール: 周りのガスが全部落ちてくるまで。典型的には**100**万年くらいと考えられている。
- 星を流体として解く: タイムステップ**1分**くらいが必要 (内部は上手くやって解かないとしても)。
- **1**タイムステップ**1**ミリ秒でできても**10**年かかる。論文書けない、、、というのはさておき、計算精度も問題になる。

ではどうしているか

- 普通やっていること: 適当な半径 (1-5AU とか) から内側にはいったガスは「星」に落ちたとみなす (sink particle)
- これにはもちろん問題がある。本当は星の表面近くまで降着円盤が形成されるだろうし、円盤ガスの一部は磁場や輻射圧で赤道面から飛ばされたりするはず。そういう色々な効果を見捨てて単に中心星にくっつけると、成長速度やそもそも成長するかどうか計算できなくなっているかもしれない
- とはいえ、現状他に方法がない

星形成について整理

- 星は、重力不安定な高密度・低温なガスが重力収縮してできる、というのは間違いない
- が、「重力不安定な高密度・低温なガス」がどこからどうやって供給されるかは理論的には明確にわかっているわけではない。観測すれば見えるのでそういうものはある。
- シミュレーションも、計算機の世界という以上に原理的困難がまだある。

理論的には

もうちょっとわかっていると考えていること(あまり初期条件に依存しないこと)もある。

- ファーストコアの形成
- 林フェーズ

このへんの話をしておく。

ファーストコア

「なんらかの理由によって」重力収縮に対して不安定な、ほぼ一様密度のガスがあるとしよう。

で、ほぼ球対称な領域が収縮をはじめたとする。

- 収縮して密度があがると、輻射で冷えるタイムスケールが短くなる (輻射にも原子力同士の衝突が必要なため)
- そうすると、ほぼ等温のまま、高密度で小さなコアができていく (メカニズムは厳密には違うが、重力熱力学的崩壊に似た自己相似解が現れる)
- コア密度が高くなり過ぎると輻射に対して不透明になって、収縮が止まる

これがファーストコア

ファーストコアのあと

- 外側のガスがコアにふりつもる
- ふりつもりって、力学平衡にある質量が増えるにつれて急速に明るくなる。
- 周りにまだガスがあれば赤外線で見える。ガスがなくなったら可視光で見えるようになる
- まだ中心温度は核融合が起こるほど高くないので、星はこのあと収縮に重力エネルギーの放出で光る=原始星

原始星と林フェーズ

原始星の特徴

- 全体で対流が起こっている (輻射に対して不透明)
- この時、表面温度はほぼ一定 (説明省略、、、)
- このために、収縮していくに従って暗くなる。逆にいうと、最初の半径が大きい時には非常に明るくなっている

この段階を林フェーズ (京大にいた宇宙物理学者林忠四郎が発見したので) という

とはいえ

観測的には、原始星でおこっていることはもっと複雑

- 「原始星」といえるようになる頃には円盤ができていてそこから降着している
- この時、円盤の上下方向にジェット(双極分子流)がでることが観測的にわかっている。磁場によるもの(磁気遠心力風)が主要なメカニズムと考えられている。

といった話と、星形成領域、原始惑星系円盤を統合的に理解することはまだできていない(これは牧野の私見。できているという人もいるかも)