平成 20 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

N 体恒星銀河円盤における星間ガスの振る舞い及び渦状腕構造の進化

馬場淳一 (東北大学 大学院 理学研究科 天文学専攻 D3)

利用カテゴリ　XT4C ・ GRAPE-A

1　研究背景と目的

本研究の目的は渦巻き銀河／棒渦巻き銀河の N 体恒星円盤と多相星間ガスから成る self-consistent な系の数値シミュレーションを行い，近傍の円盤銀河の動力学構造を解明することである．

宇宙背景輻射の詳細な観測や大規模銀河サーベイなどにより，宇宙の構造形成の標準モデルとして冷たい暗黒物質モデルがその地位を確立しつつある．これは宇宙の初期条件が明らかになりつつあることを意味する．しかし，これは銀河団よりも大きな空間スケールに対してであり，個々の銀河スケール以下のスモールスケールに対しては，その正当性は未知である．実際に，スモールスケールにおいては多くの難点が知られている．その一つに，冷たい暗黒物質の正体はいくつか候補は提唱されているものの理論的に全く不明であることがあげられる．さらに．個々の銀河の形成過程，特に円盤銀河の形成に関しても問題点が挙げられる．これは冷たい暗黒物質モデルに基づく銀河形成シミュレーションにより円盤銀河の形成を調べると，バリオン成分の角運動量がダークマターに輸送され過ぎてしまい，実際に観測される円盤銀河よりも小さくなってしまうという問題である．銀河スケール以下の大量に存在するダークマターサブストラクチャにバリオン成分が沈降してしまうことが原因の一つと考えられている．ここ数年で分解能の向上とバリオン成分の加熱過程 (超新星爆発，背景紫外線加熱など) の考慮により解決の方向に向かっているものの，宇宙論的銀河形成シミュレーションの空間分解能は ∼sub-kpc かつ質量分解能は $\sim 10^5$ M_{sun} であり (e.g. Governato et al. 2007)，円盤銀河を特徴づける渦状腕／棒状構造といった内部構造を分解することはできていない．つまり，銀河形成シミュレーションの結果得られた円盤銀河が実際の円盤銀河に相当するかは自明ではないのが現状である．

一方で，渦状腕構造に関する銀河動力学の研究は歴史の長く，標準的には恒星渦状腕構造の正体は「密度波」であると解釈されている．密度波仮説は 1960 年代に Lin & Shu により提唱されその後一定の支持を得たが，線形性や準定常性が仮定されており (準定常線形密度波)，現実の渦巻き銀河に適用するには不十分である．特に，準定常性の仮定に関してはその動力学的根拠は薄く，非定常計算で検証すべき重要な課題である．また，密度波仮説は渦状腕構造の正体に関して解釈を与えているものの，その発生過程に関しては述べていないのも課題である．Goldreich & Lynden-Bell (1965) や Toomre (1981) などにより，Shearing Sheet モデルの線形理論に基づき密度超過領域の銀河差動回転による引き延ばし方向と星のエピサイクル運動方向の同期による増幅機構 (Swing Amplification 機構) を経て渦状腕を形成する可能性が指摘されているものの，密度波仮説との関係は不明瞭である．このように近傍の円盤銀河における渦巻き構造に於いても，個々の現象や物理過程に関する解釈は提唱されているものの，整合的な理論計算により十分に理解されたとは言

えず，重要な課題が未解決のまま残されている．これは銀河形成シミュレーションにより再現すべき近傍銀河の真の構造が明確になっていないことを意味する．そこで，私は高分解能の渦巻き／棒状渦巻き銀河の self-consistent な数値シミュレーションを行い，近傍円盤銀河の真の構造を明確にする必要があると考え本研究を行った．

2　モデルと手法

前節で述べたように，本研究は近傍の円盤銀河の動力学構造の解明を目指しているため．初期条件としては既に形成された銀河円盤を仮定する．具体的には，まず，恒星のみの銀河円盤 (バルジなし，固定ダークハローポテンシャル，N 体銀河円盤) を用意し，その表面に渦状腕が自然発生させた (本研究では，渦状腕構造の動力学的進化に着目したため，その発生過程に関しては調べてない．後述)．そして，渦状腕をともなった N 体恒星円盤に質量割合で１割の星間ガスを追加した．このとき，星間ガスは恒星円盤の指数関数密度分布のスケールレングスの２倍のスケールレングスの指数関数密度分布とし温度は 10000K とした．

星間ガスの計算には Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用い，考慮する物理プロセスは自己重力，輻射冷却，遠紫外線加熱，星形成，超新星爆発による加熱である．本研究では SPH 粒子質量を ~ 3000 M_{sun} まで下げ分解能を上げているため，20K までの輻射冷却も考慮可能となり，星形成条件も従来の銀河シミュレーションよりも現実的な星形成領域に近くなるように選んでいる (詳しくは，Saitoh et al. 2008)．ただし，輻射冷却の計算では，衝突電離平衡状態のガスにおける冷却率をテーブルとして予め用意し温度の関数として参照した．また，遠紫外線加熱では輻射輸送を解かず，一様かつ定常な輻射場を仮定している．計算に用いたシミュレーションコードは天の川創成プロジェクトで斎藤貴之研究員が開発した ASURA である．

3　結果

以下に本研究における主要な成果を記す．

3.1　現実的な渦巻き銀河を再現

現実の渦巻き構造の観測的特徴は，腕構造が外側で分裂し multiplicity の上昇，渦状腕構造に沿った星形成領域，複雑なフィラメント構造を伴った星間ガスの渦状腕構造，渦状腕構造に沿ったダストレーン (低温ガス) と星形成領域の分布の間のオフセット，などが挙げられる．図１に示すようにこれらの多くの特徴が本研究により再現されている．さらに，本研究では星間ガスにに関しては，低温ガスまで取り扱っているため，輻射輸送計算により疑似観測 (観測的可視化) を行うことで直接的に詳細な観測データ (e.g. ALMA) との比較が可能となる．これにより，これまでに提唱された渦巻き構造に関する理論モデルの検証とともに，数値シミュレーションに考慮すべき物理過程やその数値的モデル化の吟味にも重要なフィードバックが得られると期待できる．例えば，本研究では重要な観測的特徴の一つであるダストレーンと星形成領域の分布の間のオフセットはあまり明確に再現

されていないようであり，これは本研究では組み込まれていない OB 星による光電離紫外線による低温ガスの加熱過程 (分子雲の破壊に相当) が必要なことを示唆している可能性がある．

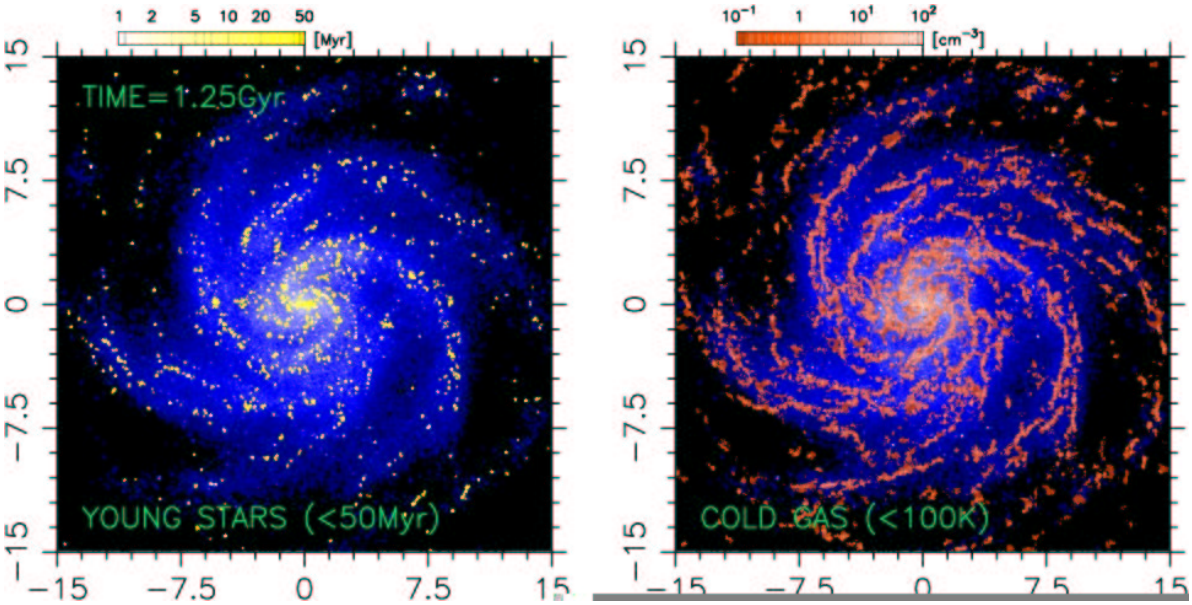

図 1: 左：恒星円盤上に生じた渦状腕構造 (青色) の上に重ねた星間ガスから新たに形成された若い星の分布 (黄色)．右：左図と同様．ただし，低温ガスの分布を重ねた．

3.2 恒星渦状腕の性質

本研究で得られた渦状腕構造はコントラストが高く，近赤外線観測で得られている数 10%という高いコントラスト (e.g. Rix & Zaritsky 1995) と整合的であった．渦状腕構造は非線形な構造であることを意味する．また，渦状腕構造は内側ほど速く回転する差動回転を行っていた．これは渦状腕構造が巻き込まれていることを表している．しかし，渦状腕構造は分裂，合体を繰り返す銀河回転程度の時間尺度で変動するダイナミックな構造であり,「巻き込みのジレンマ」として問題とされていたようなぐるぐる巻きの構造にはならない．渦状腕構造がダイナミックに変動するメカニズムには，銀河円盤を構成する大きな動径方向の振動をする星々の同調現象が関係すると考えている．渦状腕構造を構成する星は時間とともに変化するため，この意味に於いては「密度波」である．しかし，大きな動径方向の振動 (非線形エピサイクル振動) する星が関係しているため，従来の密度波の描像とは異なると考える．詳細は今後解析を進め調べる．

3.3 星間ガスの役割

N 体シミュレーションによる先行研究 (Sellwood & Carlberg 1984) によると，恒星円盤上に生じた渦状腕構造は数銀河回転程度の時間尺度で減衰し消えていくことが指摘され

ていた．そのため，恒星渦状腕構造を維持する何らかのメカニズムが必要であると考えられ，　特に星間ガスによる散逸が有力視されてきた．星間ガスはエネルギーを散逸するため円運動に近い軌道 (速度分散が小さく力学的に冷たい) をとるようになり，そこから形成される新たな星も同じく円軌道に近く，恒星円盤を力学的に冷やすと考えられていたためである．本研究においても，星間ガスを考慮しないモデル (Pure N 体計算) を実行した．その結果，確かに恒星渦状腕は減衰はするものの完全には消えず，かつ，恒星円盤において顕著な力学的加熱 (Toomre の Q パラメータの上昇，円盤の厚さの上昇) は見られなかった．これは先行研究では恒星円盤の緩和過程が効きすぎていた (数値 2 体緩和) ことを示唆する．この違いは，先行研究では粒子数が少なすぎた効果と，銀河円盤を 2 次元に近似していたことが原因と考えられる．特に後者に関しては，2 次元円盤においては緩和時間が系の力学的時間尺度と粒子数に依らず同程度となることが指摘されている (e.g. Rybicky 1971)．

一方，本研究では星間ガスを考慮しているため，星間ガスの効果を直接的に調べることができる．その結果，Pure N 体計算と大きな違いはみられず恒星渦状腕は減衰した．これは先に述べた非定常な渦状腕構造の影響で，星間ガスの運動が力学的に暖かく (速度分散が大きく) なっており，従来期待されていたような振る舞いはしていないことが原因と考えられる．実際，星間ガス，特に星形成を起こす低温ガスの運動は，恒星系の運動に近く非円運動を行っている．渦状腕構造の維持のためには，星間ガスによる散逸の他のメカニズムを考える必要があるだろう．

4　今後の課題と展望

今後は，前節に記した結果の恒星渦状腕構造の動力学的性質，およびそれにおける星間ガスの役割を解明する必要がある．引き続き本件に関して解析を進めるとともに，他の渦巻き形態の再現も試みる．他の渦巻き形態も調べることで，より一般的な理解が進むと期待される．渦巻き形態を決める主要なパラメータはダークハローに対する銀河円盤の相対的な質量であることが示唆されており (Carlberg & Freedman 1985)，これを参考に再現を試みる．渦巻き銀河形態の中でも，特に，棒渦巻き銀河の高分解能な N 体＋多相星間ガスシミュレーションは天の川銀河の構造の理解に重要であり，本研究のような高分解能の現実的な理論計算の結果は，次世代アストロメトリ観測データの解釈にも役立つであろう．

最後に，今年度は self-consistent な渦巻き構造の動力学的進化に着目したため，その発生過程に関しては調べていない．その発生過程において Swing Amplification 機構が働いているかなど興味深い点が多く，次年度では発生過程に関しても調べる予定である．