

星間ガスの数値モデル化の試み

和田 桂 一

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: wada.keiichi@nao.ac.jp

銀河の重要な構成要素のひとつである星間ガスは多相かつ複雑な空間構造を持っていますが、これまで銀河スケールのコンピュータシミュレーションでは、多くの場合、単純な星間ガスのモデルが使われて来ました。ここでは、星間ガスの物理過程を表す基礎方程式群を高分解能で数値的に解くことで得られる、より現実的な星間ガスの数値モデルとその応用について、われわれの最近の仕事から紹介します。

1. 銀河円盤ガスの多相構造と数値モデル化

銀河は恒星系、星間ガス、星間塵、そして“ダークマター”によって構成されていますが、ここでは、星形成や銀河構造形成、さらには銀河間ガスにも深くかかわっている、星間ガスに着目します。一口に星間ガスと言っても、数 10 K 以下の低温で、かつ数密度が 1000 cm^{-3} 以上の高密度分子ガス、数 1000 K, 1 cm^{-3} 程度の“暖かい”中性水素ガス、 10^{5-6} K , 0.01 cm^{-3} 程度の高温・低密度の電離水素ガスといったさまざまな相が混在していると考えられています。高密度・低温ガスは、「雲状」の構造を作り(分子雲、巨大分子雲)、その間を、低密度の暖かいガスまた高温ガスが埋めているという状態です。

さて、星間ガスを含んだ銀河力学のシミュレーション(例えば、銀河形成過程、あるいは、渦状腕の形成過程、銀河-銀河の潮汐相互作用や合体過程など)はさかに行われていますが、従来は、上のような星間ガスの複雑な多相構造は無視して、もっと単純な近似をしてきました。大きく分けて、星間ガス全体を 1) 離散的な「雲」の集合体として表す、2) 一様な流体として表す、のモデル化がよく使われてきました。1) は、星間ガスの質量の相当部分が離散的な雲(分子雲、中性水素雲)に

あるので、銀河全体にわたる星間ガスの動力学を調べるには十分という考え方にに基づきます(Sticky Particle 法は、この近似の一種)。一方、2) は、星間ガスを構成する離散的な雲や低密度・高温ガスは、平均自由行程が銀河のサイズに比べて十分小さいので、細かい構造や各相の性質の違いには目をつぶれば、全体としては流体、あるいは磁気流体として振舞うだろう、という考え方にに基づきます。1) の方法の欠点は、多くの仮定、パラメータを必要とすることです。例えば、離散的な雲のサイズ、その分布、形状、雲と雲が衝突した場合のエネルギー散逸率、雲の合体、または破壊の条件、さらに超新星爆発などによるエネルギー注入を雲の運動エネルギーにどう与えるか、などなど。これらのモデル化、パラメータの組み合わせは、多分に経験的なものです。一方、2) の近似では、解くべき方程式は、よく知られた Euler 方程式や MHD 方程式で、過去の流体/磁気流体力学の研究によって蓄積された多くの数値的な解法を利用することができます。ただし、方程式系を閉じるために、密度と圧力間の関係式(状態方程式)を仮定する必要があります。ここに不定性が残るのは避けられません。多相の星間ガスを有限の空間分解能(例えば、100 パーセク)でシミュレーションする場合の状態方程式がどうあるべきか、というのには明確な答えがないので、多くの場合、星間ガスの多

相性を無視して、ポリトロプガスまたは等温ガスとして近似してしまいます。

このように単純化すると、問題の解を数値的に得るのは比較的簡単になります。しかし、さまざまな波長で高性能の観測装置が登場してきた昨今、それらによる観測と比べるべき理論シミュレーションでも、近似の度合を減らしてより現実的な星間ガスの取り扱いをすべきだろう、というのが今回紹介する研究の動機です。

2. 星間ガスの2次元、 3次元大局数値モデル

爆発的星生成は、銀河形成や銀河の進化にとって、非常に重要なプロセスですが、その形成プロセス、発生の原因についての理論的な解明は、いまだに不十分です。その理由の一つとして、星形成という局所的な現象と銀河全体のダイナミクスを同時に扱うことのできる、「良い」星間ガスの数値モデルがなかったことがあげられます。そのためには、前節で述べた「方法1」のような現象論的モデルではなくて、現象を記述する基礎方程式を「なるべく」近似の度合を減らして、直接解く方法を探る必要があります。

さて、ここで、考慮する主な物理過程は、星間ガスの自己重力、放射冷却、超新星爆発などによる星間ガスの加熱、銀河回転です。私達は、基礎方程式群を高精度かつ安定に解くことができる手法を用いて、星間ガスの多相かつ非一様な構造と、その中での星形成、星風、超新星爆発による、フィードバックを self-consistent に組み入れた星間ガスの2次元および3次元数値モデルを開発してきました^{1)~3)}。もちろん、これでも星間ガスに関わる基礎物理過程が全て含まれているわけではありませんが(3節参照)、これまでの星間ガスのモデルから大きく前進し、以下で紹介するようにさまざまなことがわかってきました。

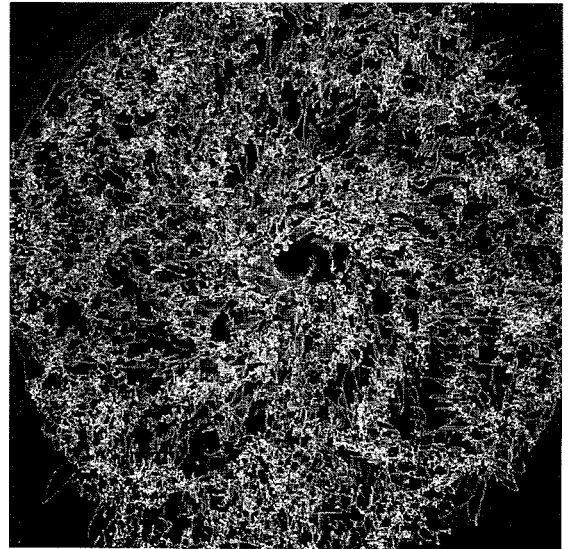


図1：2 kpc × 2 kpc の領域の準平衡状態での星間ガスの密度分布。4096² の格子点を用いたモデル。図の中心が銀河中心。

2.1 2次元星間ガスの特徴的な空間、 速度構造とその形成過程

シミュレーションは、恒星系あるいはダークマターがつくり出す重力ポテンシャル(ここでは、時間変化しないとします)の中で回転平衡にあるガス円盤(半径1 kpc、質量 $10^8 M_{\odot}$ 、温度 10^4 K)から始めます。この円盤の密度分布は、この初期温度に対して、ガス円盤が重力的に安定になるように与えます。密度分布には、ごく小さい「揺らぎ」を与えておきます。この初期条件は、熱的に不安定な状態にあります。不安定な状況から出発して、最終的にどのような安定、準安定状態が得られるかに興味があるわけです。ここで、流体および自己重力計算に用いる格子点数は、 $1024^2 \sim 4096^2$ 、すなわち100万から1680万点です。

放射冷却によって、熱的に不安定なガス円盤の温度は急激に下がります。すると、重力的に安定だったガス円盤が不安定になり、「揺らぎ」の種が自己重力によって非線形成長し、高密度のフィラ

メントやクランプに分解しはじめます。これらのフィラメントやクランプは、さらに自己重力や銀河回転によって合体、衝突、潮汐相互作用をしながら変形、成長し、複雑な空間構造が形成されます(図1)。ガス質量の大部分は高密度で体積の小さい領域に集中し、残りの低密度ガスは体積で大部分を占めています。ガスの温度は、高密度領域では数10 K以下、低密度領域では、衝撃波加熱によって 10^{4-5} Kと高温になります。このように、非線形成長の結果、銀河円盤中の星間ガスは、低温・高密度ガスと高温・低密度ガスが複雑に絡み合った空間構造となり、これを私達は“tangled-web model”(こんがらかった、くもの巣モデル)と呼んでいます。この状態は、現実の星間ガスの多相構造とよく似ています(例えば、<http://heritage.stsci.edu/2001/10/supplemental.html>)。高密度・低温ガスは、分子雲や中性水素雲に相当し、低密度・高温のホールは、「暖かい中性水素ガス」に相当します。さらに重要なのは、この構造が「大局的には準平衡状態」にあるということです。すなわち、個々の細かい構造(クランプやフィラメント)は、時事刻々その形を変え、温度分布もまた変わりますが、全体としての「こんがらかったくもの巣」構造や統計的性質は、大きくは変化しません。つまり、銀河円盤全体としては力学的に安定であるが、パーセクスケールで見ると、星形成の現場とりなりうる力学的、熱力学的に不安定な低温高密度ガスが存在するという事です。また、各相のガスは非常にダイナミックであり、その速度場は乱流的であることがわかっています(2.2節)。

他にも、いくつか新たな発見がありました。1) 星間ガスの各相間は圧力平衡には必ずしもない、また、2) 各相は、離散的に存在しているのではなく、相と相の間の相当量の「熱的に不安定な」ガスになめらかにつながっている、という点です。これらの性質は、星間ガス構造は熱的に安定か不安定かだけで決まっているのではなく、ガスの自己重力、銀河回転、乱流運動による動圧などによるダ

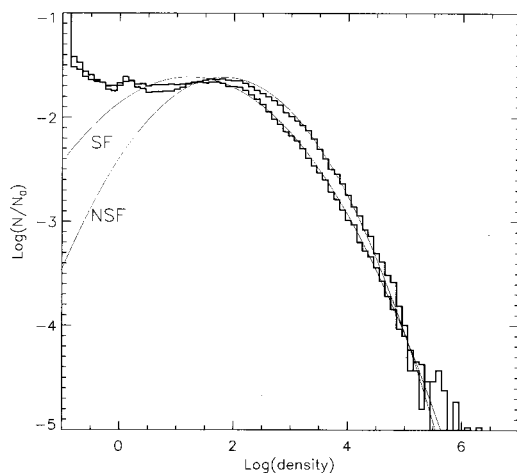


図2：密度分布関数。横軸：密度の対数、縦軸：その密度のガスが占める体積の割合。NSF: 超新星からのフィードバックなしのモデル。SF: 星形成からのフィードバックありのモデル。青曲線で対数正規分布を示す。

イナミクスが重要であるということに起因しています。実際、最近の観測によれば、熱的に不安定な領域にある中性水素ガスが銀河円盤中の相当量の体積を占めているということも示唆されています。

2.2 統計的性質

つぎに、シミュレーションの結果得られた複雑な tangled-web 構造の統計的な性質を調べて見ると、驚く程単純であることがわかりました。図2は、密度の分布関数(ある密度のガスがどれだけの体積を占めているかというヒストグラム)ですが、高密度側のガスは、およそ5桁にわたって、1つの対数正規分布(Log-Normal)に従うことがわかります。対数正規分布は、正規分布の裾野が長く延びたような分布で、星の初期質量関数や、地震の発生頻度、為替変動の確率分布まで、世の中のおよそありとあらゆる統計に現れる分布関数ですが、ここでは、高密度ガスの形成過程が「強度の非線形現象」の結果であることを統計的な議論から示すことができます²⁾。つまり、密度を変化させ

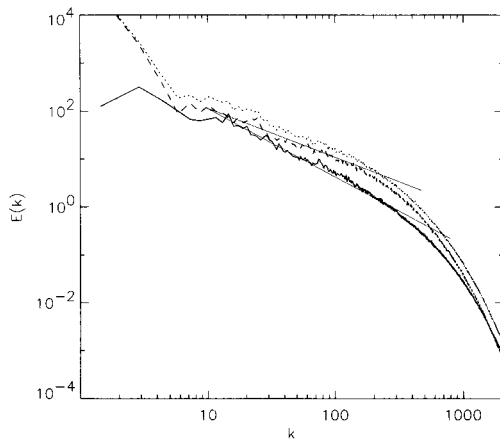


図3：エネルギースペクトラム。縦軸：パワー，横軸：波数，実線：圧縮性成分，破線：非圧縮性成分，点線：全エネルギー。青で示した2本の直線は，それぞれ $E(k) \propto k^{-1.5}$ ， $k^{-0.8}$ 。

るプロセスそのものの種類によらず，むしろ統計的な性質から星間ガスの大局的な密度分布が決まっているということです。以上の結果からも，星間ガスは，離散的であるというよりも，低密度から高密度まで「連続的に」分布しているという特徴が見えてきました。

一方，速度分布の統計的性質にも面白いことがわかりました。図3は，準定常状態の運動エネルギーのパワースペクトラム，すなわち，波数空間での運動エネルギー分布です。空間構造の複雑さとは対称的に空間スケールでおよそ3桁にわたって単純な巾法則を示していることがわかります。また，波数が小さい，すなわち大きいスケールほどエネルギーを持っており，十分発達した乱流が示すパワースペクトラムと同じ特徴を示します。

星間ガスは，乱流状態であると観測から示唆されていますが，乱流の発生とその維持のメカニズムはまだよくわかっていません。星間乱流は，普通圧縮性で，衝撃波と放射冷却を通じてエネルギーを散逸します。そのため，エネルギー供給がない場合，音波が系を横切る程度の時間で，乱流が減衰

してしまうことが，数値実験から示唆されています。これは磁場を考慮した場合でも同様です。したがって，乱流を引き起こし，また，散逸とつりあうだけのエネルギー供給が必要であるとされています。これまで，エネルギー源として，磁気回転不安定や，超新星爆発，大質量星からの星風，原始星からの双極流などが考えられていました。一方，私達のモデルでは，超新星爆発などのエネルギー供給や磁場がなくても，上で示したような乱流構造が定常的に維持されます。それはなぜでしょうか。上で述べたように，ガス円盤は初期に重力的に不安定なので，揺らぎが成長します。その際に，銀河回転運動以外の速度が生じます。また，異なった相間では圧力平衡が成り立っていないために，局所的な圧力勾配によっても加速度が生じます。この系では，銀河回転を引き起こす外場が運動エネルギーの大部分を占めており，その1/10程度がガスの自己重力エネルギー，その数分の1程度がガスの熱的なエネルギーです。したがって，ガスは乱流エネルギーを衝撃波によって散逸しても，豊富に存在するポテンシャルエネルギーからガスの自己重力を通じてエネルギーを受け取ることができるのです。その結果，準平衡状態の乱流運動が保たれていると考えられます。

2.3 非一様星間ガス中の星形成

さて，従来の銀河形成や銀河スケールのシミュレーションでは，星形成や星形成からのエネルギーフィードバック，例えば，超新星爆発や大質量星からの星風をモデル化するのに，さまざまな現象論的パラメータ（超新星爆発によるエネルギーの星間ガスへの運動エネルギーへの変換効率など）を導入していました。一方，私達の数値モデルでは，星間ガスの構造とダイナミクスが1パーセク程度以下の分解能で得られ，星形成領域である，高密度・低温の「分子ガス雲」，超新星爆発による高温・低密度ガスの進化，高温ガスと低温ガス雲の相互作用などを，ダイナミックに追うことができる

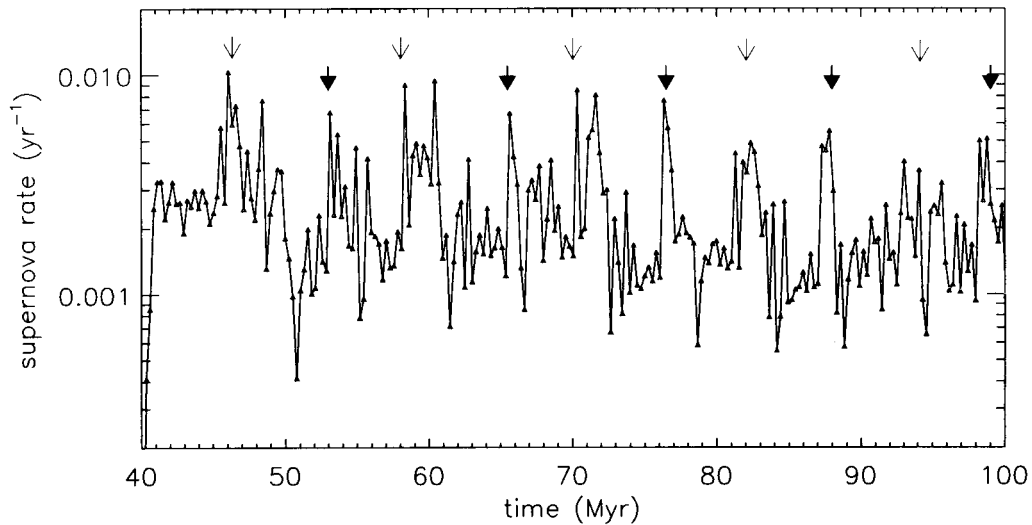


図4 単位時間あたりの超新星爆発率の時間変化。横軸の単位は100万年。黒矢印と青矢印で、因果関係があるピークを示した。

ために、現象論的パラメータの導入は最小限ですみます。

私達の取った方法は以下のようなものです。まず、低温（例えば30 K以下）、高密度（例えば個数密度が 10^4cm^{-3} 以上）の格子を同定し、その格子内で大質量星がどれくらい生まれるかを見積もります。生まれた大質量星を仮想粒子（星団と思ってよい）で置き換え、この仮想粒子の銀河内での運動を追います。およそ 10^{6-7} 年ほどたつと、超新星爆発が起こりはじめます。その際に、その仮想粒子が存在していた格子に、超新星爆発のエネルギーを熱エネルギーとして注入します。その結果、その格子を中心に超新星残骸が広がっていきます。ただし、まわりの星間ガスは非一様なので、その伝播は多くの場合非対称です。また、爆発する場所の密度によっては、エネルギーの大部分が放射冷却で失われる「不発の」超新星残骸もあります。つまり、超新星爆発のエネルギーのうち、星間ガスにどれだけが渡されるか、という効率の問題は、仮定としてパラメータを導入するのではなく、「結果として」得られるわけです。

図4に、図1のようなガス円盤中で起こる、超

新星爆発率の時間変化を示しました。一見すると、超新星爆発率は、不規則な時間変動を示しているように思えます。しかし、実はそれぞれのピークは関連していることがわかっています。ある瞬間に多くの超新星爆発が起こったとします。すると、膨張する超新星残骸に周りの非一様な星間ガスが圧縮され、それまで星形成の条件を満たしていなかったガスが星形成領域となり、大質量星が形成されます。このときに形成された多数の大質量星は、 10^{6-7} 年後に再び超新星爆発を起こし、また大質量星形成をトリガーします。その結果、大質量星の寿命程度の間隔で超新星爆発のピークが現れるので、それが積み重なって図4のような疑似カオティックな時間変動が得られます。

一般に爆発的星形成の寿命は 10^{7-8} 年とされていますが、以上の結果から、爆発的星形成は単一のイベントではなくて、短周期で星形成率が大きく変動しているということが予想されます。超新星爆発の影響が及ぶ範囲は限られているので、この時間変動は星形成領域が小さい程顕著なことが予想されます。

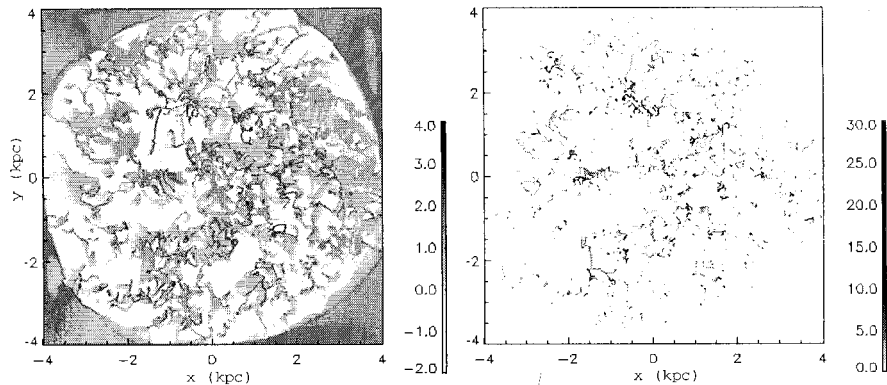
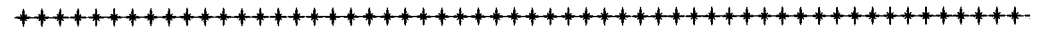


図5：数値シミュレーションの結果得られた、(左) 大マゼラン雲の中性水素、(右) 一酸化炭素の分布
縦軸、横軸の単位はキロパーセク。

2.4 観測との比較：大マゼラン雲

次に、私達のモデルを大マゼラン雲に適用し、最新の観測結果と比較した例を紹介します⁵⁾。天の川銀河系の衛星銀河の一つ、大マゼラン雲は、距離が近いこともあって、銀河全体の星間ガス構造や星形成活動の大局的な構造と局所的な構造が同時にわかる貴重な系外銀河です。最近、名古屋大学の「なんてんプロジェクト」⁴⁾や、オーストラリアのATCA (Australia Telescope Compact Array) といった電波望遠鏡によって分子ガスや中性水素ガスの大マゼラン雲全域にわたる詳細な構造が明らかになりました。私達は、 1024^2 の格子点を使い、8パーセク程度の空間分解能で、大マゼラン雲の全域をカバーしたシミュレーションを行い、計算結果から、一酸化炭素 ($\text{CO}_{J=1-0}$)、中性水素 21 cm 輝線の強度分布を求め、観測データと直接比較を試みました。

図5は、モデルから得た分子ガスと中性水素ガスの分布を示しています。「なんてん」やATCAのサーベイ結果から明らかになったように、分子ガスは、塊を作って離散的に分布しているのに対し、中性水素ガスは広がった分布を示し、図5(左)にみられるように、巨大な(差渡し1キロパーセク

程度)の「穴」を作ることがわかりました。これは、観測でも知られていて「スーパーバブル」と呼ばれています。この呼称は、これらの穴が超新星爆発などの爆発現象に起因すると考えられていることからついたものです。しかし、図5のモデルでは、星形成によるフィードバックが一切入っていません。にもかかわらず、このような「バブル状の」非一様な構造が形成されるのは、自己重力的、熱的不安定の非線形成長のためです。このような非一様、多相星間ガスでは、密度の低いガスは大きな体積を占めるのが当然なのです。さらに、大マゼラン雲では、銀河回転が「剛体回転的」なため、非線形成長が長波長まで成長することができます。超新星爆発によるエネルギーフィードバックを考慮した同様のモデルでは、ディスクの構造は、かえって一様に近くなり、バブル構造は細かくなります。エネルギー注入により、非線形成長が押えられるからです。超新星爆発、大質量星による星風に起因したバブルと重力不安定の非線形成長による「バブル」は、区別が付きにくく、おそらく大マゼラン雲には両者が混在していると考えられます。

図5(右)の結果から、分子ガス雲の質量分布を求めて見ると、「雲」は質量の小さいものの方が数が多く、その分布はおおむね「巾関数」、すなわち

$dN/dm \propto m^{-1.7}$ (N は雲の個数, m は質量)を示すことがわかりました。この巾関数の指数およびガス雲の質量分布 (10^4 – 10^6 太陽質量)は、「なんてん」の観測結果と非常によく一致します⁶⁾。また、低密度の中性水素ガスの体積分布関数も ATCA の結果をよく再現することがわかりました⁴⁾。

2.5 棒状恒星系中のガス構造

ここまで、ガスディスクの背景の重力ポテンシャル、すなわち、星、ダークマターの分布は回転軸対称であると仮定してきました。しかし、実際には、渦巻銀河の星の分布は、渦状腕や、棒状のバルジ構造のために、軸対称ではありません。その場合、星間ガス分布がどのようになるか調べて見ました。ここで示すのは、重力ポテンシャルが棒状の構造をしている場合です。これは古くから調べられてきた問題⁷⁾で、剛体回転する棒状構造による力学共鳴によって、ガス円盤中に渦状密度波、衝撃波が形成されることがわかっています。この問題では、従来星間ガスは一様な流体、または多数の粒子系の集まりとして扱われてきました。

図6 (=表紙)に、われわれの多相星間ガス数値モデルをこの問題に適用した場合を示します⁸⁾。これは、100パーセクと10パーセクに相当する「ビームサイズ」で「観測」した、低温(100 K以下)ガスの密度分布です。元の密度分布は、格子間隔約2パーセクの計算によって得たものです。低分解能で見ると、塊状に高密度領域がある、2本腕のスパイラル構造と、中心に「リング状」の構造があることがわかります。しかし、これが実際のガス分布を示していないことは、右の「高分解能」の結果と比較して見れば一目瞭然です。

図7 (=表紙)に拡大図を示しましたが、数100パーセクサイズの低温ガスの塊がいくつかあるように見えた渦状腕は、実際には、ずっと小さく、高密度の多数のクランプから形成されていることがわかります。同様に、中心部の「欠けたリング構造」も、その詳細構造は非常に複雑であることが

わかります。100パーセクの分解能は、観測した近傍(乙女座銀河団あたりの)系外銀河を野辺山ミリ波干渉計で分子ガス輝線を使って観測した場合にほぼ相当します。しかし、以上の結果から、残念ながらわれわれは、系外銀河の本当の分子ガスの構造についてまだ知らないことになります。現在、日米欧で計画が進行中の国際電波干渉計 ALMA¹⁰⁾では、野辺山ミリ波干渉計よりおよそ10~100倍、空間分解能があがることが期待されています。私達の結果から、ALMAでは、これまで分かっていなかった系外銀河の分子ガスの微細構造について劇的に知識が増えることが期待されます。近い将来、ALMAの観測結果と、数値計算結果を比較することで、いまだによくわかっていない、系外銀河での星形成と星間ガスの関連、たとえば、なぜ爆発的星形成が発生するのか、といった重要な問題に迫ることができると考えています。

2.6 3次元構造: AGN のまわりのトーラス

これまでの計算結果は、2次元の近似をしていました。次に、3次元性が重要な問題として、銀河中心核近傍の星間ガス構造について調べました^{1), 9)}。

活動的銀河中心核 (AGN: Active Galactic Nuclei) や銀河中心領域の爆発的星生成は、銀河形成や銀河の進化にとって、非常に重要なプロセスですが、その発生の原因、進化過程については観測的にも、理論的にも多くの未解決の問題があります。ここでは、特に、銀河中心から~100パーセク以内の領域での星形成とガスダイナミクスと、AGNとの関連について注目します。AGNは、主に可視域でのスペクトルから大きく2種類(1型と2型)に分類されており、これを統一的に解釈するモデルとして、「ダストトーラスモデル」が広く受け入れられていました。これは、AGNの「エンジン」である巨大ブラックホールと降着円盤の外側に幾何学的に厚いガスおよびダストのドーナツ状のトーラスが存在しており、われわれの視線方向と、そのトーラスとの位置関係によって、中心核が見える場

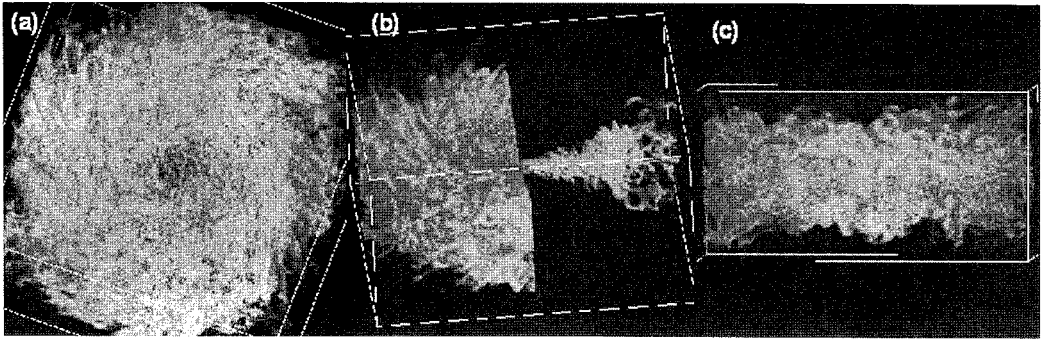


図8：銀河中心の巨大ブラックホール近傍の3つの視線方向に対するガス分布。(b)の右半分に断面図を示している。

合(1型), 隠される場合(2型)に分かれる, というものです。しかし, このトーラスの正体, すなわちその構造, サイズ, 成因と構造の維持メカニズムは全く分かっていません。これまで, 1パーセク程度の非常に密度の高いトーラスモデルから, 100パーセク程度に広がったディスク状のもの, または, 薄い円盤の端が湾曲したというモデル, さらに, 半球殻状の構造をしているという説までいろいろ提案されています。また, 最近のX線観測からは, 1型にもかかわらず, X線が吸収されているというAGNが多数発見されています。この場合, 中心核とわれわれの間にある吸収物質の柱密度は, $10^{21-24} \text{ cm}^{-2}$ が示唆されています。AGNを含む銀河の一種にセイファート銀河がありますが, この銀河も1型, 2型に大きく分類されています。しかし, 2型セイファートの多くは中心核近傍に爆発的な星形成を付随していることが報告されています¹¹⁾。この場合, 吸収物質は, 中心ブラックホールのごく近傍ではなく, 100パーセク程度まで広がっているということが示唆されています。

ここでは, 爆発的な星形成を付随する場合のトーラス構造について調べて見ました。トーラスの内部構造や, 超新星爆発とガスの相互作用, それに伴うエネルギー散逸過程は非常に複雑なので, 3次元数値流体計算が必要となります。私達は, 前節までで用いた数値計算法を3次元に拡張し, 銀河

中心近傍の巨大ブラックホール(太陽質量の100万~1億倍)近傍100パーセク以内の星間ガス構造のシミュレーションを行いました。ここで, 仮定したことは, 1)十分な量(太陽質量の1000万倍程度)のガスがある, 2)爆発的な星形成により, 超新星爆発からのエネルギーフィードバックがある, の2点です。あとは基礎方程式(質量, 運動量, エネルギー保存式, ポアソン方程式)を, $256^2 \times 128$ すなわち840万点の格子点を用いて解きます。超新星爆発からのエネルギーフィードバックは, 2.3節と同様にモデル化します。ただし, ここでは, 個々の星の位置は追わずに, ランダムにディスク面上に超新星爆発が発生するとします。エネルギー保存式では, 星間ガスの現実的な冷却関数($20 \text{ K} \sim 10^8 \text{ K}$)を用いて, 低温ガスから高温ガスまで扱います。

図8は, AGN近傍の星間ガスの準定常状態の密度分布を「ボリュームレンダリング」という手法を使って, 可視化したものです。これは, 3次元の複雑な形状をもつ物質の内部構造を示すのに適した方法で, ここでは, 密度分布に応じて, 視線方向の透明度を変化させることによって, 濃い物質と薄い物質の分布の3次元構造を表しています。図9から, 銀河中心の巨大ブラックホールのまわりに両面がくぼんだ凹レンズ状のガス構造が形成されることがわかります。膨らんだ円盤の内部は決

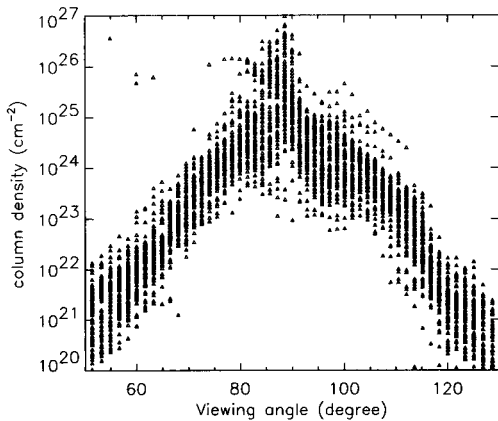


図9：視線方向に対する「トーラス」の柱密度分布。
横軸は回転軸からの角度（90°がエッジオン）。

して一様ではなくて、高密度のガス塊やフィラメント、低密度のホールから成っていることがわかります。これは2次元モデルと同様に、局所的には時間ともに構造が変化するのですが、全体としてのトーラス状（この構造をトーラスと呼んでいいものか疑問ですが）の構造はほぼ定常に保たれることがわかりました。

さて、このようなガス構造が形成されると、AGN 本体に対する遮蔽効果は、視線方向と円盤との角度によります。円盤に対して極方向から見る方が赤道方向からみるよりも吸収が少ないのは容易に想像できます。図8(a)では、銀河中心が見えているのに対し、図8(b), (c)では中心核は見えません。図9に、視線方向に対する柱密度をプロットしました。90度が円盤を真横から、0度が真上からみた場合に相当します。予想どおり、柱密度は視線方向が真横に近づくほど大きくなるのがわかります。しかし、重要なのは、柱密度に2桁にもなる大きな分散がどの視線方向にもある、つまり同じ視線角度に対し、少しでも違った方位角からみると、柱密度が大きく異なるということです。これは、円盤の内部の密度分布が非一様（対数正規分布）であることを反映しています。2次元の場合と同様に、「トーラス構造」は非線形性の強い

ランダムな過程の結果形成されたことを示しています。

観測から示唆される柱密度にも銀河によって2-3桁もの分散があります。もし、AGNの周りの星間ガスがここで示したような非一様な構造をしているとすれば、これは当然の結果のように思えます。すべてのAGNを、ここで示したモデルで统一的に説明できるわけではありませんし、無理に統一モデルをつくる必要もありませんが、少なくとも、いままで暗黙のうちに仮定していたような単純な構造の「トーラス」はAGNには存在していないと考えています。これは、いずれALMAや次世代宇宙望遠鏡NGSTが明らかにしてくれるでしょう。

3. まとめと今後の展開

星間ガスは、多相構造であることは観測から知られていることでしたが、私達のシミュレーションによって、大局的には安定でかつ星形成の現場となりうる低温で高密度のクランプが存在するという銀河円盤ガスの数値モデルを自然な仮定から作り出すことがわかりました。また、星間ガスの力学構造は非常にダイナミックであること示されました。超新星爆発は非常に高温ガス（100万度以上）生成し、星間乱流維持のエネルギー源として働きますが、超新星爆発がなくても、星間ガスの密度が重力、熱的不安定を引き起こすほど十分大きければ、銀河面内の乱流運動は自然に発生することがわかりました。一方、銀河面に対して垂直方向の構造形成には、超新星爆発は、2.6節で示したように本質的な役割を果たします。

従来のSPHなどの粒子法によるシミュレーションでは、低密度部分の空間分解能がないために、このような構造を表すことができませんでした。その意味で、一步現実の星間ガス構造を計算機内につくり出すことに近付いたわけです。ただし、実際には星間ガスの構造形成、ダイナミクスに関わる物理過程はここで考慮した以外に多岐にわたります。もっとも重要なのは星間磁場とガスとの相互

作用, および大質量星による星間ガスの電離過程とそのダイナミクスへのフィードバックでしょう。これらは個別には, いろいろと調べられていますが, 一様密度, 等温ガス, ポリトロープガス, 非自己重力ガス, 局所近似という簡単化のもとでの取り扱いがほとんどです。今回我々が示したような, 非一様, 非定常な多相ガスで, これらの物理がどのような役割を果たすのかを理解することがより現実的な星間ガス数値モデルに求められます。また, 上で示した3次元モデルは, 空間分解能の制限から銀河中心に限りましたが, より広範囲の銀河円盤に応用することは原理的に可能です。それによって, 例えば, 銀河円盤中の星間ガスとハローとの物質のやりとり, 爆発的星形成による銀河風の発生と構造, 恒星系円盤の渦状密度波と非一様星間ガスとの相互作用, などの重要な問題に迫ることができると考えています。

謝 辞

Johns Hopkins 大学の Colin Norman 教授をはじめとする本研究の共同研究者の方々に感謝いたします。また, 長期にわたる海外出張を認めていただいた, 国立天文台理論天文学研究系の皆さんに深く感謝致します。本研究は, 国立天文台天文学データ解析研究センターの大規模シミュレーションプロジェクトの採択プロジェクトとして実施されてきました。本稿をもって, 2001 年度大規模シミュレーションプロジェクト (課題番号 hkw26a) の成果報告といたします。

参 考 文 献

- 1) Wada K., 2001, ApJ, 559, L41
- 2) Wada K., Norman C.A., 1999, ApJ 516, L13
- 3) Wada K., Norman C.A., 2001, ApJ 546, 172
- 4) 天文月報 2002 年 1 月号「なんてん特集」
- 5) Wada K., Spaans M., Kim S., 2000, ApJ 540, 797
- 6) Fukui Y., et al., 2001, PASJ 53, L41
- 7) 和田桂一 1993, 天文月報 vol.86, no.11, 469
- 8) Wada K., Koda J., 2001, PASJ 53, 1163
- 9) Wada K., Norman C.A., 2002, ApJ 556, L21
- 10) 天文月報 2001 年 12 月号「アルマ特集」
- 11) Levenson N.A., Weaver K.A., Heckman T.M., 2001, ApJ 550, 230

Numerical Modeling of the Interstellar Medium

WADA KEIICHI

National Astronomical Observatory of Japan

Abstract: The interstellar medium in galaxies has a complicated multi-phase structure. However, in numerical simulations of galaxies, simple models of the ISM have been used. We have recently developed a new high-resolution numerical method for simulating dynamics of the multi-phase ISM on a galactic scale. In this paper, we introduce our recent results on two- and three-dimensional modeling of the ISM.