

爆発的星形成を引き起こす歪んだポテンシャル

和田 桂一

〈北海道大学理学部物理学教室 〒060 札幌市北区北10条西8丁目〉

e-mail: wada@phys.hokudai.ac.jp

銀河におけるガスの急激な中心集中は、スターバーストと呼ばれる爆発的な星生成現象を発生させると考えられています。そのガス集中メカニズムを探るため、軸対称から歪んだ星の系がつくるバーポテンシャル中のガスダイナミクスを計算機流体シミュレーションで調べた研究を紹介し、ガスの自己重力を考慮した計算から、バーポテンシャルの回転速度がある値のとき、大量のガスが急激に銀河中心領域へ供給されることがわかりました。また、銀河中心領域で観測される分子ガス構造がどのようにしてできたかについて考察します。

1. スターバースト

銀河における星形成過程にはいくつかの種類があります。その一つが、 10^7 - 10^8 年という（銀河の年齢に比べ）短時間に、O型星などの質量が大きく明るい短寿命の星が1万から数10万個も局所的に形成される現象で、スターバースト（爆発的星生成）と呼ばれています。

こう書くとあたかも特異な現象の様に感じられるかも知れませんが、スターバーストは銀河の主要な星生成モードの一つであるというのが最近の認識です。IRAS衛星による赤外線サーベイでスターバーストをおこしている銀河が多数観測されたこともその理由のひとつです¹⁾。

スターバーストで生まれた星は 10^6 - 10^7 年経つと超新星爆発を起こしてその短い一生を終え、その結果発生するスターバーストウインドによって、星間あるいは銀河間ガスを重元素で汚染します。これはその後生成される星や銀河の進化にとって重大な影響を及ぼすと考えられています。

さらに、銀河中心核付近で発生したスターバーストはその後活動的銀河中心核 (AGN) へと進化

するのではないかとの説もあります²⁾。

2. ガス供給のメカニズム

スターバーストは、星の原料であるガスが短時間に、かつ大量に狭い領域に集中することによって引き起こされるのだらうと考えられています。したがって、ここではスターバーストの発生メカニズムを「ガス集中メカニズム」と考えることにします。スターバーストは銀河どうしが非常に接近または衝突して、星の分布が非常に歪んだもの、あるいは棒状の星の分布をもつ銀河（棒渦巻銀河）の中心付近に多く観測されています。このことから、歪んだ重力ポテンシャル（以下バーポテンシャルと呼びます）がガスを中心集中させる原因ではないかと類推されます。

我々の目的はこのような歪んだポテンシャルがガスの運動に作用し、急激かつ大量にガスを銀河中心領域へ供給することができるのかを理論的に明かにすることです。

円盤銀河の中のガスは星のディスクの中を銀河中心に対し回転しています。このようなガスを中心へ落とすためには、その角運動量をなんらかの方法で奪う必要があります。非軸対称的に歪んだポテンシャル（棒状分布する星や近傍を通過する

Keiichi Wada: Starbursts and Gas Dynamics in a Barred Potential

銀河からの潮汐力)はガスに対してトルクを与え、その角運動量を急激に変化させる可能性があります。

バーポテンシャルの「効果」は角運動量輸送だけではありません。中心力を受けて回転しているガスの角運動量を減少させるとその軌道は円軌道から大きく外れ、近心点は中心に近付きますが、遠心点は中心から遠く離れたところになります。常に軌道を中心付近へとどめておくにはさらにガスの持つエネルギーを減少させる必要があります。銀河の中のガスは音速の数10倍で運動している圧縮性流体と考えられ、バーポテンシャルによって衝撃波が生じやすい状況にあります。衝撃波が発生することで、ガスはそのエネルギーをより急激に失うことができるのです。

3. ガスリングの形成と崩壊

3.1 計算機シミュレーション

それでは本当にバーポテンシャルによってガスを銀河中心へ大量に供給することができるのでしょうか？ その条件は？ これらの疑問に答えるには計算機によるシミュレーションが有力な方法です。

シミュレーションによるガスダイナミクスの研究は、銀河のスパイラルアームの生成メカニズムや棒渦巻銀河で観測されるダストレーン、ガスの非円運動の起源などの興味から70年代から行われてきました。それらの研究でバーポテンシャルの剛体回転の速度によって、ガスの分布が大きく変化することが示されました。特にバーポテンシャルの角速度が「ある値」の時、ガスがリング状に集まるといった興味深い結果が、いくつかの異なった計算方法、モデルで示されました³⁾⁻⁵⁾。

これらのシミュレーションでは星間ガスのモデルは大きく分けて(1)ガス雲(クラウド)の集合(2)連続流体のどちらかで表されています。(1)の場合、クラウドを非弾性衝突する粒子で表します。(2)では流体の方程式を数値的に解

きます。我々は今回(2)のモデルを、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)という手法で計算しました⁶⁾。これは流体を密度に応じた広がりをもつ粒子の集合で表す方法で、密度のコントラストが時間的空間的に激しく変化するような場合に精度良く計算できるという特徴があります。したがって、今回の問題のようなガスが局所的に集まるようなシミュレーションには非常に有効な手法です。

3.2 リンドブラッドレゾナンス

このあとの話の理解のために、ここで、リンドブラッドレゾナンスと呼ばれる共鳴現象について簡単に説明しておきます。

このレゾナンスの存在は、「弱い」バーポテンシャル中を運動する粒子の軌道への摂動の線形解析から示されます⁷⁾。バーポテンシャル中を回転する粒子には半径方向の振動(エピサイクリック振動数： κ)、回転運動の振動(角振動数： Ω)、そしてバーポテンシャルの剛体回転(バー振動数： Ω_b)の3つの振動が存在します。今、バーポテンシャルの回転系で閉じた軌道を考えて、

$$\Omega_b = \Omega \pm \kappa / 2 \quad (1)$$

という関係を満たすようなバーポテンシャルの回転速度 Ω_b のとき、この軌道に与えた半径方向の微小な摂動が発散します。これを「リンドブラッド共鳴」と呼び、特に(1)式のプラス符号の場合はOuter Lindblad Resonance(以後OLR)、マイナス符号の場合はInner Lindblad Resonance(ILR)と呼ばれています。 $\kappa/2$ の2はポテンシャルの軸対称からの「ずれ」が「楕円的」であることからきています。この共鳴は物理的には調和振動子の強制振動における共鳴と同じです。

3.3 非自己重力ガスの場合

我々の計算では、銀河の星の系がつくるポテンシャルをガスディスクに対する外場として扱います。図1はそのポテンシャルに対して、 Ω 、 $\Omega \pm \kappa/2$ を半径に対して描いたものです。我々はバーポテンシャルの回転速度をパラメータにとり、銀河

円盤中のガス分布の時間変化を SPH でシミュレートしました。他の主なパラメータはバーポテンシャルの「強さ」とガスディスクの質量です。我々の計算ではバーポテンシャルは非常に弱く、軸対称成分に対してせいぜい数%程度の「歪み」なのですが、この程度であってもガスのダイナミクスは非常に大きな影響を受けます。

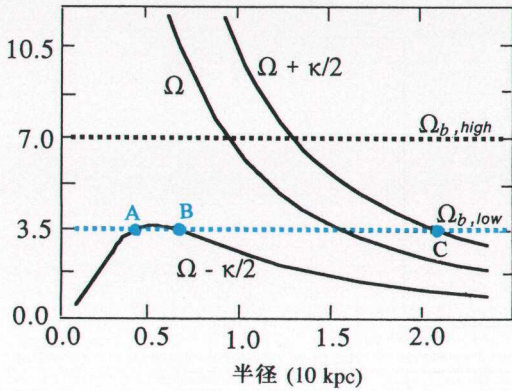


図1 Ω , $\Omega \pm \kappa/2$ の半径に対する変化。 Ω は回転角速度、 κ はエピサクリック振動数。 $\Omega_{b,low}$ (青の破線) が図2, 3, 4 および表紙カラー写真で示したモデルのバーポテンシャルの回転速度。 A, B 点が ILR, C 点が OLR と呼ばれるレゾナンスポイント (本文参照)。

図2 は自己重力を無視した場合の計算結果で、バーの回転速度が $\Omega_{b,low}$ のとき (ILR が存在する), ILR 付近にバーポテンシャルの長軸にそった安定なガスリングが形成される過程を示しています。このようにガスの自己重力を無視すると、銀河中心領域にバーポテンシャルだけではガスを大量に供給することはできません。

それではなぜこのようなリング状にガスが集まるのでしょうか。バーポテンシャルの回転系からみた楕円形の閉軌道はレゾナンスを越える度にその向きを90度づつ変えることがリンドブラッドレゾナンスを導いた線形解析から示されます。ところがガスの場合、粘性が効くため急激に軌道が変化できず、徐々に楕円軌道の向きが変わっていきます。そのため、2本のスパイラル状のガス密度の高い部分が形成されます。これらのスパイラルアームに対してバーポテンシャルからトルクが働き、角運動量輸送がおきます。その結果、ガスは ILR と OLR 付近へ集まります。図2 からわかるように ILR 付近の安定なガスリングはこれらのスパイラルアームに徐々にガスが集まった結果形成されるのです。

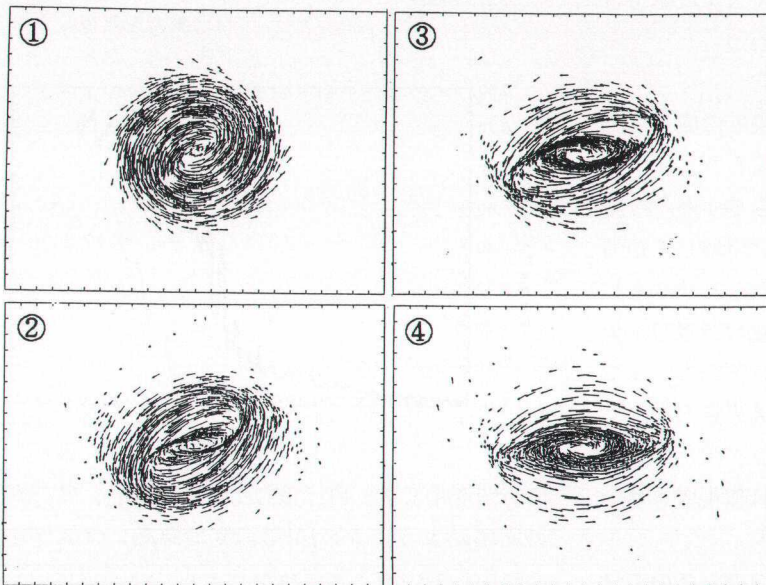


図2 バーポテンシャルの回転系からみた、自己重力を無視した場合のガスディスクの時間変化。バーポテンシャルの長軸は図の横方向に固定されている。矢印はガスの各点での速度を表す。各図の範囲は48kpc×36kpc。各図の時間間隔は約2億年。初期のガスディスクの半径は10kpc、2つのILRはそれぞれ、中心から4, 6kpcの位置にある。

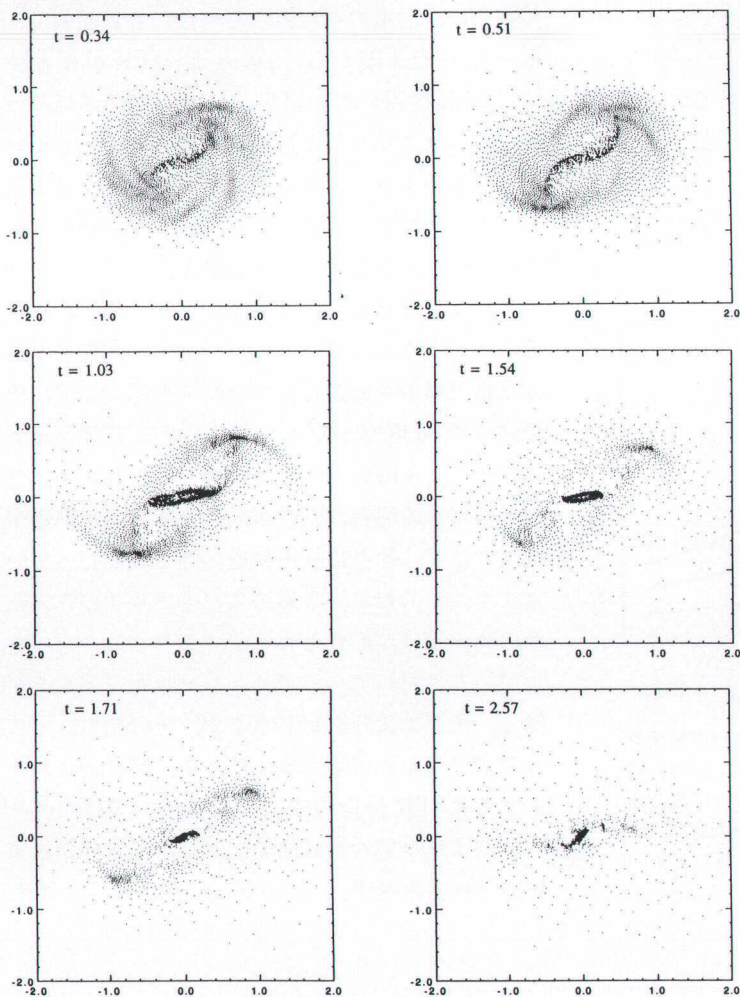


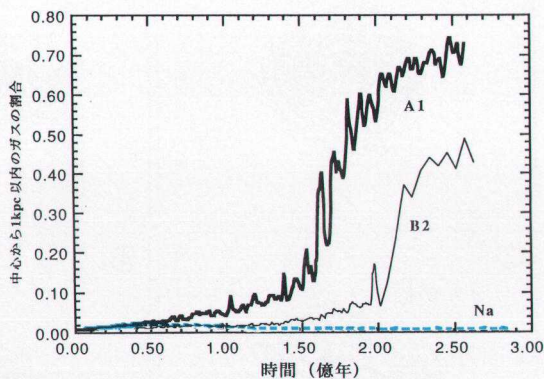
図3 図2と同じモデルについて自己重力を考慮した場合のガス分布の時間変化。図2と同様にパーポテンシャルの回転系からみている。左上の数字は時間で単位は1億年。各わくの大きさは40kpc×40kpc。

3.4 自己重力ガスの場合

ところが、ガスの自己重力の効果も考慮して計算を行ってみると結果ががらりと変わります。ガスリングは前と同様に形成されるのですが、今度は自己重力不安定をおこし、急激に崩壊して銀河中心へ大量のガスが供給されることがわかりました(図3)。このモデルのガスの質量は背景のポテンシャルに対し、13%です。10%以下のモデルでも同様の結果が得られました。ガスの量が少なくてもパーポテンシャルによってリング状にガスが集中すると、その自己重力の効果は無視できないのです。

図4は銀河中心から1kpcの領域のガスの質量

図4 銀河中心から1kpc以内のガスの質量の時間変化。縦軸はガスの総質量に対する比。A1は図3のモデル。B2はA1よりパーポテンシャルが弱い。Na(青破線)はA1と同じパーの強さだが、自己重力を無視したモデル。



の時間変化です。自己重力モデルの場合、リングの崩壊によって 5×10^7 年程度で急激にガスが中心集中していることがわかります。パーポテンシ

ャルがより強いほど、この集中の始まる時期が早まります。初期のガス分布の変化は自己重力モデルと非自己重力モデルの間で大きな違いはないことから、リングが形成されるまではバーポテンシャルがガスダイナミクスを支配していることがわかります。ただし、自己重力モデルではガスリングは歪みがより強く、かつ、常にバーポテンシャルに対して、先行するように回転します。その結果、非自己重力モデルに比べ、角運動量がより急速に減少することがわかりました。

ガスリングの崩壊はリング両端付近にガス塊が形成されることから始まります。このガス塊は銀河中心方向に落下し、そこで互いに衝突を何度か繰返してエネルギーを散逸しながら、やがて中心に高密度のコアを形成します(表紙カラー)。

このような歪んだガスリング、そしてガス塊の形成と崩壊は、クラウドモデルを用いた福長らのシミュレーションでも得られており^{5,9)}、星間ガスのモデルなどの細かい点にはあまり依らず、 $\Omega - \kappa/2$ の最大値付近にバーの回転速度がある(ILRが存在する)ということが重要な「初期条件」であると考えられます。

銀河の棒状構造は円盤状恒星系の一種の自己重力不安定モードと考えられています。バー形成に関するN体計算によれば、バー形成時の回転速度 Ω_b は $\Omega - \kappa/2$ の最大値よりも大きいのですが、徐々に減速して $\Omega - \kappa/2$ の最大値付近にとどまります⁹⁾。実際の銀河でもこれが事実だとすると、「バーの回転速度が減少してILRが出現したところで、図3のようなガスの分布の変化が起こって、急激に銀河中心へガスが集中し、スターバーストが励起される」というスターバースト発生機構のシナリオが描けます。

4. 銀河中心領域の分子ガス構造

4.1 x1, x2 軌道とガス分布

最近、一酸化炭素(CO)などの輝線を用いた電波干渉計による高分解能の観測により、スターバ

ースト銀河や棒渦巻銀河中の分子ガスがリングやリッジ状構造、塊状構造などを持つことがわかってきました¹⁰⁾。これらの観測結果を説明する試みとしてケニーらの研究があります¹¹⁾。彼らはスターバースト銀河、棒渦巻銀河中のガス分布に関して、このx1, x2軌道群にそってガスが運動していると考えれば、観測が良く説明できると主張しています。このx1, x2軌道群というのはコントポラスらが求めたバーポテンシャル中の閉じた軌道の数値解のことです¹²⁾。x1はバーポテンシャルの長軸に対し平行、x2は垂直な軌道群です。バーポテンシャルが弱いとき2つのILRの内側ではx2が、外側ではx1軌道群が優勢になります。

ケニーらは3つの棒銀河中心部のCO輝線マップから、一对のピーク構造(ガスの集中)を発見し、「これらのピークはx1とx2軌道の交差する点にできたのだろう。外側のILRはその付近にある」と主張しています。これと似た議論がしばしばみられますが、実際の銀河に単純にあてはめるのは危険ではないかと私は考えています。ここで議論は、ガスが「オービットレーサー」である、つまり「x1やx2軌道にそって運動する」との仮定に基づいています。しかし、そもそもレゾナンスやx1, x2軌道の概念は、ガスの運動とはまったく無関係の、しかも自己重力を無視した議論に基づいて出てきたものです。自己重力は前の章で示したようにガスダイナミクスに非常に大きい影響を与えます。また、自己重力の性質から、ガス分布の非軸対称性はガスが集中すればするほど強まります。その結果、ガスの自己重力ポテンシャルも考慮した場合、「弱いバーポテンシャル」というレゾナンス理論の仮定はやぶれてしまいます。このような状況では、ガスを「オービットレーサー」と考えることは無理があるのではないのでしょうか。

4.2 セルフコンシステントシミュレーション

これに対し、我々が最近行っている、銀河を恒

星系としてN体で表し、その中のガスディスクと同時にその運動を追いかける3次元のセルフコンシステントな計算は、観測される分子ガスの構造を説明するひとつの可能性を示唆しています。

ガスはバー的に歪んだ星のポテンシャルの影響と自己重力のため、バーに対して先行する細いリッジ構造を作り、さらにこのリッジにそって中心方向へ流れ込みます。ガスは角運動量を持っていますから、このガスリッジは回転方向へと次第に巻き込まれ、2つのピークとそこからたなびくスパイラル構造が形成されます。この過程でみられる構造は上で述べたケニーらの3つの銀河やIC 342, M 83などの銀河のガス分布とよく対応します。さらに面白いことに、ガスの集中過程の最後の段階で星の棒状構造が消えてしまう傾向がみられました。実際、M 101やIC 342などの銀河では星の分布の歪みは弱く、このプロセスとの関連が興味深いところで、さらに詳しく調べているところです。

5. おわりに

以上、バーポテンシャル中のガスダイナミクスについて、我々の研究を中心に理論の立場から紹介しました。最近、シミュレーションに関しては星の系とガスの系を両方、しかも3次元で扱う研究を行っているグループがいくつか出てきました。しかしながら、より現実的なモデルを用いたセルフコンシステントな計算には結果が得られてもその物理的解釈が難しいという問題があります。残念ながら、バーポテンシャル中のガスダイ

ナミクスについて、特に自己重力を考慮した場合、現象を理論的にすっきり説明できる段階には至っていないというのが現状です。また、我々も含め、多くの人がとりあえず無視をしている星生成の影響など、さらに現象を複雑化しそうな頭の痛い問題がまだ残っています。むしろ、シンプルなモデルを用いて基本的な物理過程を押える研究にたちかえることも大事かもしれません。また、この分野でもせつかく日本は世界をリードする観測を行っているのですから、積極的に理論グループが観測グループとお互いの結果について議論することも必要だと思っています。

参 考 文 献

- 1) Soifer, B. T. et al. 1986, *Astrophys. J.*, **303**, L41.
- 2) 谷口義明 1993, 科学, 63(5).
- 3) Schwarz, M. P. 1985, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **212**, 677.
- 4) Combes, F., Gerin, M. 1985, *Astron. Astrophys.*, **285**, 426.
- 5) Fukunaga, M. Tosa, M. 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **43**, 469.
- 6) Wada, K., Habe, A., 1992, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **258**, 82.
- 7) Binney, J., Tremaine, S. 1987, in *Galactic Dynamics* (Princeton Univ. Press, Princeton), P146.
- 8) Fukunaga, M. 1993, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press.
- 9) Sellwood, J. A. 1981, *Astron. Astrophys.*, **99**, 362.
- 10) Ishizuki, S. et al. 1990, *Nature*, **344**, 224.
- 11) Kenney, J. et al. 1992, *Astrophys. J.*, **395**, L79.
- 12) Contopoulos, G., Mertzanides, C. 1977, *Astron. Astrophys.*, **61**, 477.