

銀河中心の巨大ブラックホールのガス供給への影響

福田 浩 之

〈北海道大学大学院理学研究科物理学専攻 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目〉

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

銀河中心領域では爆発的星形成や活動銀河核のように非常に活発な活動が観測されています。これらの活動は銀河中心領域にガスが集められること（ガス供給）によって引き起こされていると考えられています。我々は、銀河中心に普遍的に存在していると考えられている巨大ブラックホールがこのガス供給に与える影響について、シミュレーションを用いて調べました。その結果、巨大ブラックホールが存在することによってガスが中心に集められることが分かりました。また、この集められたガスの自己重力不安定によってさらにガスが中心に集められることも分かりました。

1. 銀河中心領域での活発な活動と ガス供給

様々な銀河の中心領域で、爆発的星形成や活動銀河核といった非常に活発な活動が観測されています。爆発的星形成は文字通り爆発的に高い頻度で星が形成される現象です。活動的銀河核はセイファート銀河やクエーサーに代表される、銀河中心の非常に小さい領域から通常の銀河の明るさと同程度から10倍以上の明るさでエネルギーが放出されている現象です。このような銀河中心の活発な現象に共通しているのは、その活動領域に大量にガスが供給されることが必要と考えられているということです。爆発的星形成では形成される星の材料として大量のガスが必要です。活動銀河核はそのエンジンとして銀河中心に巨大ブラックホール（太陽質量の100万倍から10億倍）が存在し、そこに落ち込んでいくガスが重力エネルギーを解放して光っていると考えられています。活動銀河核の寿命は約1億年と考えられており、その間ずっと光りつづけるためには燃料として大量のガスが必要となります。

2. ガス供給機構と リンドブラッド共鳴

ガス供給を起こす機構として現在考えられているのは、銀河に非軸対称に歪んだ星の分布が存在してその構造がつくる非軸対称な重力場がガスにトルクを及ぼして角運動量を失わせてガスを中心に集めるという機構です。非軸対称な星の分布は銀河によくみられるもので、棒渦巻銀河のバーが典型的なものです。それ以外にもバルジが楕円状の歪んだ構造をしているものも多く観測されています。また、銀河のそばを他の銀河が通りすぎるなどの銀河同士が相互作用する場合にガスが中心に集められることが理論・観測の両方で確かめられていますが、この場合も相手の銀河の重力によって銀河に非軸対称な構造がつくられてその影響でガスが集められることが知られています。この非軸対称な重力場によるガス供給により、銀河中心の爆発的星形成を引き起こすことができると考えられています。

この非軸対称に歪んだ構造（以下ではまとめてバーと呼ぶことにします）によるガス供給機構には、リンドブラッド共鳴と呼ばれる共鳴現象が重要な役割を果たしています。ここでリンドブラッド共鳴

について簡単に説明します。バーのつくる非軸対称な重力場中を回転している粒子の運動を考えます。この粒子が半径方向に振動する振動数はエピサイクル振動数と呼ばれ、 κ で表わされます。バーによる重力トルクの振動数は、バーの回転する角速度 Ω_b と粒子の回転する角速度 Ω を用いて $2(\Omega - \Omega_b)$ となります。2倍されているのは、バーが一回回転する間に重力場が二回振動するからです。この二つの振動数の大きさが一致するところで共鳴が起こり、粒子はバーによるトルクの影響を強く受け軌

道が大きく乱されます。この共鳴がリンドブラッド共鳴と呼ばれるものです。リンドブラッド共鳴の起こる条件式を書くと、 $\Omega_b = \Omega \pm \kappa/2$ となります。 Ω 、 κ は半径の関数ですから、上の式を満たす半径のところで共鳴が起こるわけです。上の式のマイナスの方の条件を満たす半径の方が内側にあるため、Inner Lindblad Resonance (ILR) と呼ばれます。

典型的な銀河での Ω_b 、 $\Omega - \kappa/2$ をグラフにしたものが図1です。1 kpc くらいのところに ILR があることが分かります。バーによってガスを集められるスケールは ILR の存在する半径程度、つまり数百 pc から 1 kpc くらいであることが分かっています。しかし、銀河中心での爆発的星形成領域には 100 pc 以下のものもありますし、活動銀河核はさらに小さく 10^3 pc 以下であることも分かっています。したがって、さらに中心にガスを供給する機構が必要になります。

3. 巨大ブラックホール

そこで我々は銀河の中心に存在していると考えられている巨大ブラックホール（太陽質量の 100 万倍から 10 億倍）の影響に着目しました。それは、

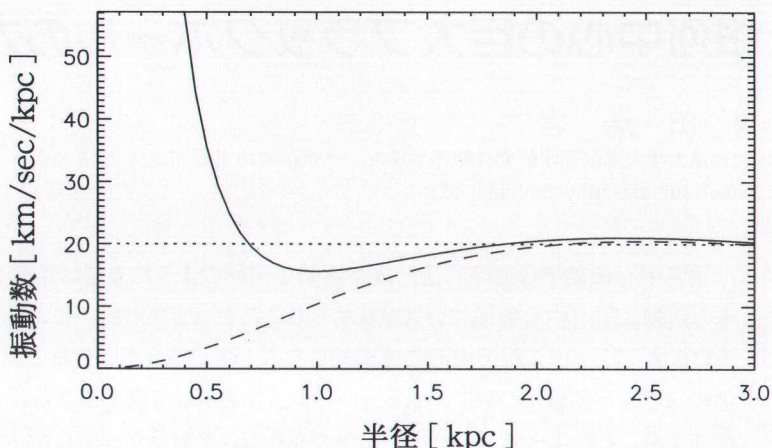


図1 $\Omega - \kappa/2$ の半径に対する変化。横軸は半径、縦軸は振動数。実線が巨大ブラックホールのない場合で破線が巨大ブラックホールの存在する場合。点線はバーの回転する角速度 Ω_b 。

巨大ブラックホールが存在することによって、これまで考えられてきた通常の ILR の内側にもう一つ ILR が生まれるからです（図1）。以後、普通の ILR と区別するために、この巨大ブラックホールによる ILR を Nuclear Lindblad Resonance (NLR) と呼ぶことにします。NLR が存在することによって通常の ILR よりも内側のガスの運動が影響を受けてさらに中心にガスが集められることが期待できます。

実際に巨大ブラックホールが存在する間接的な証拠も、ハッブル宇宙望遠鏡¹⁾や電波望遠鏡による銀河中心領域の観測²⁾からいくつかの銀河で見つかってきています。このことから、最近ではすべての銀河の中心に巨大ブラックホールが存在しているという説が主流になってきています。

4. シミュレーション

4-1 数値計算法について

我々は NLR の銀河内のガス運動への影響を SPH 法という数値計算法を用いて調べました³⁾。SPH 法はガスを粒子の集団で表わす手法で、密度

が高い領域の計算精度が良くなるという特徴があります。したがって、今回のようなガスが中心に集まるような現象を調べるのに適しています。

今回我々が行なったのは、半径 1 kpc のガスディスクが NLR の影響を受けて時間発展する様子の計算です。このガスディスクは ILR によって集められたガスに対応しています。ガスディスクは最初は一様な密度分布をもち、バー以外の軸対称な重力場とつりあう回転速度で回転しています。

4-2 ガスリング

我々の数値計算の結果得られた、ガスディスクの時間発展の様子が図 2 に示してあります。比較のために行った巨大ブラックホールの存在しない場合の計算 (図 2 左) では、ガスの分布がバーからのトルクを受けて歪みますが、ガスが中心に集められることはありませんでした。それに対して巨大ブラックホールの存在する場合 (図 2 右) は、ガスディスクにスパイラル状衝撃波が発生して、ガスがリング状に集まっていくのが分かります。このガスリングの半径は NLR の半径の約 5 分の 1 の 150 pc でした。この衝撃波は NLR が存在するために、NLR の存在する半径の近くにいるのガスの運動がバーからの重力トルクの影響を強く受けて軌道が大きく乱され、周囲のガスと衝突することによって起きています。

この時間発展の様子は、これまでの研究で知られている通常の ILR の影響でガスディスクが時間発展する様子とよく似ています。しかし、通常の ILR の場合にはできるガスリングの半径は ILR の存在する半径と比較的近いのに対して、NLR の場合には 5 倍もの差があるという点が大きく異なります。

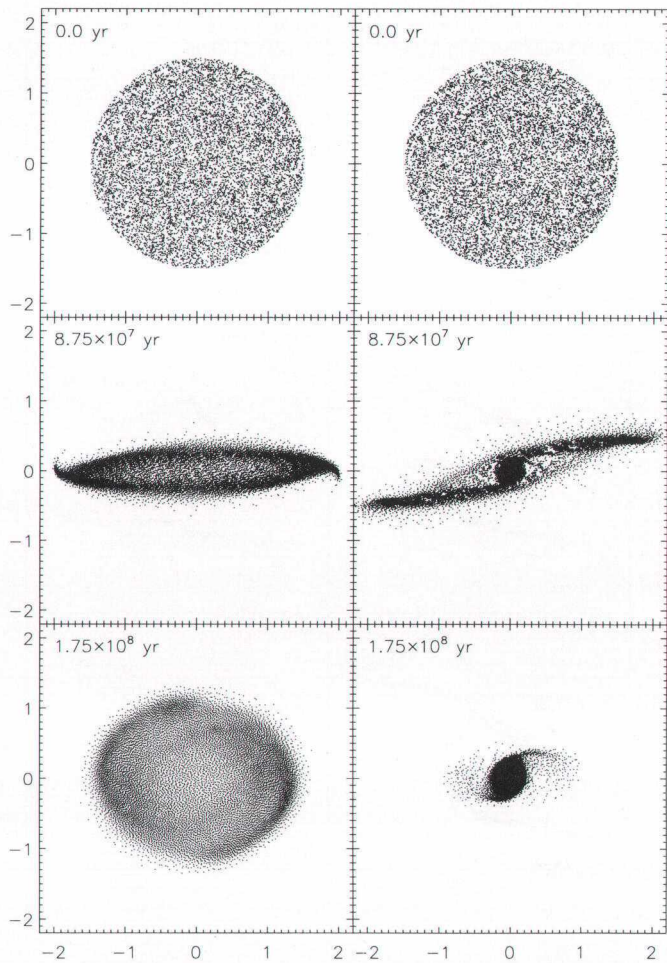


図 2 中心に巨大ブラックホールが存在する場合 (右の列) しない場合 (左の列) のガスディスクの時間発展。バーの長軸は図の水平方向になっています。各図の時刻は左上に示されています。縦横の座標の単位は kpc です。

す。この違いの原因としては、ILR は通常 2 つ組で存在するのに対して、NLR は単独であるということに起因していると考えられます。

以上のように NLR の影響で、1 kpc スケールにあるガスを 100 pc 程度まで集めることができるということが示されました。

4-3 ガスの自己重力の影響

ここまでの数値計算ではガスの自己重力を無視していました。これは、銀河に存在するガスの質

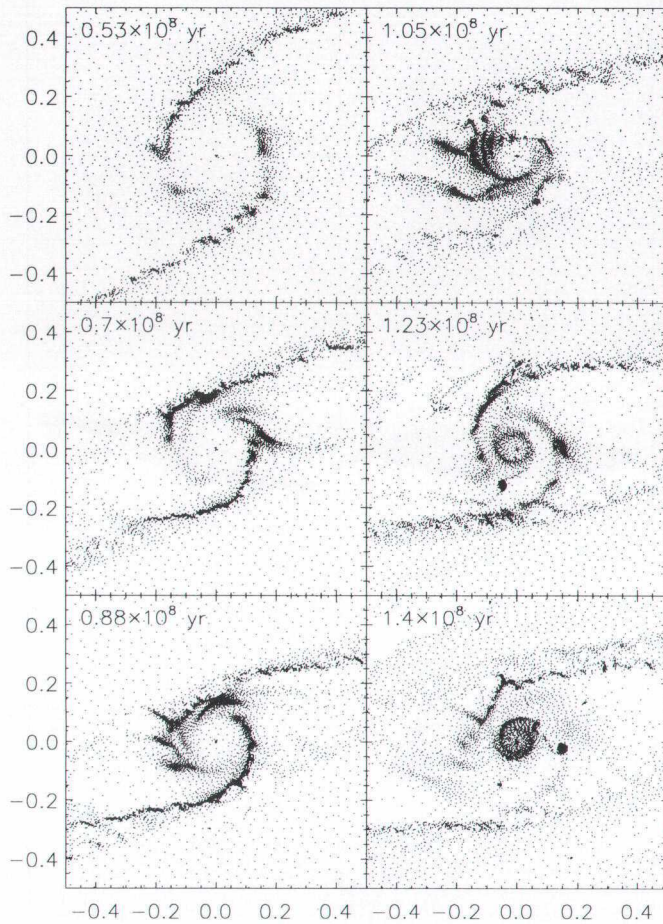


図3 ガスの自己重力を考慮した場合のガスリングの時間発展。図2と同様に、座標の単位は kpc、時刻は左上に示してあります。

量は典型的には星の数%程度であるため、ガスの及ぼす重力はあまり銀河内の運動に影響しないと考えられるからです。しかし、我々の結果のようにガスが大量に集められ密度が高くなった場合にはガスの自己重力が無視できなくなる場合があります。これまでの研究でも銀河の中心に集められたガスの自己重力の影響が重要になることは指摘されています⁴⁾。

我々の計算の結果できたガスリングは安定なものでしたが、ガスの自己重力の効果が無視できなくなり安定でいられなくなる、つまりガスリングが自己重力不安定になるのに必要なガスの量を見積

もってみると、銀河に存在する典型的なガスの量程度で十分であることが分かりました。つまり、ガスリングが自己重力不安定になることは十分期待できるということです。しかし、ガスリングがその自己重力でどのように時間発展するのかは数値計算をしてみないと分かりません。そこで我々は、ガスの自己重力を考慮した場合に、ガスリングの形成とその後の進化はどうなるのかを数値計算を用いて調べてみました⁵⁾。典型的なガスの量の場合に自己重力不安定になったガスリングの時間発展を図3に示しました。自己重力不安定になったガスリングでは、ガスが自己重力でつぶれていき、ガスの塊が次々と生まれていきます。そして、ガス塊は周囲のガスを取りこんだり他のガス塊と衝突・合体することによって成長していき、最終的には一つの巨大なガス塊(太陽質量の1千万倍)を形成しました。この巨大なガス塊が生まれると、このガス塊がバーのように非軸対称な重力場をつくりだしてガスをさらに中心へ落とすとしていくのです。この中心へ落とされたガスは中心に半径 50 pc くらいの小

さなガスディスクを形成しました。我々の今回の計算では計算精度の問題で、残念ながらこれより先の時間発展を追うことはできませんが、このガスディスクにも巨大なガス塊からの重力トルクが影響してさらにガスを中心へ集めることが期待されます。この機構は、連星系の降着円盤に星からの重力トルクが降着円盤に影響してガスを中心に落とすというモデル⁶⁾とにスケールの違いこそあれ非常によく似ています。

5. 観測

銀河の中心領域のガスの構造は、一酸化炭素な

どの分子輝線を電波望遠鏡などで観測することによって調べられています。我々のシミュレーションでみられたようなガスリングは実際の銀河の中心領域でもみつかっています。ただ、注意しなければならないのはこれらのリングは我々の調べたような巨大ブラックホールの影響がなくても、バーがあればつくることができるということです。巨大ブラックホールの影響でつくられるガスリングの特徴はスケールが小さいということです。見つかっているガスリングの多くは数百 pc から 1 kpc のスケールで、これらはたぶんバーのみの影響でつくられたものでしょう。しかし、IC 342⁷⁾ や NGC 253⁸⁾ といった銀河で見つかっている 100 pc 以下のスケールのガスリングは巨大ブラックホールの影響でできたことが期待できます。今はまだ例が少ないですが、今後の観測で銀河中心領域の高分解能観測が増えてくれば、巨大ブラックホールによってつくられたガスリングが多く見つかることが期待されます。

参考文献

- 1) Ford H. C., et al., 1994, ApJ, 435, L27
- 2) Miyoshi M., et al., 1995, Nat, 373, 127
- 3) Fukuda H., Wada K., Habe A., 1998, MNRAS, 295, 463
- 4) Wada K., Habe A., 1992, MNRAS, 258, 82
- 5) Fukuda H., Habe A., Wada K., 1999, ApJ, submitted
- 6) Yukawa H., Boffin H. M. J., Matsuda T., 1997, MNRAS, 292, 321
- 7) Ishizuki S., et al., 1990, Nat, 344, 224
- 8) Böker T., Krabbe A., Storey J.W.V., 1998, ApJ, 498, L115
- 9) 天文月報, 石黒他 92 巻 No.3, p.131, 1999

The effect of a supermassive black hole on gas fueling

Hiroyuki FUKUDA

Division of Physics, Hokkaido University, Sapporo 060-0810

Abstract: Activities in the nuclear region of galaxies have been frequently observed. These activities are believed to be induced by gas fueling into nuclear regions of galaxies. We have studied the effect of a supermassive black hole on gas fueling, and found that gas can accumulate in the nuclear region by the effect of a supermassive black hole. We have also found that the self-gravity of the accumulated gas can induce further gas fueling.

6. まとめ

以上、銀河中心の活動領域へガスを供給する機構への巨大ブラックホールの影響について、銀河の非軸対称構造についての我々の研究を紹介しました。今回は、銀河中心領域での活発な活動のエネルギー源としてのガス供給機構を調べましたが、ガスを中心へ集める機構は活動銀河核のエネルギー源になるだけでなく、活動銀河核に存在していると考えられている分子トラスの形成や巨大ブラックホールそのものの形成機構にも関係しています。この巨大ブラックホールの形成は銀河形成時に行われたと考えられていますので銀河の形成機構とも関係しているのです。このように重要な銀河中心領域ですが、今後、LMSA⁹⁾ などの高分解能の観測機器によって銀河中心領域の構造がこれまでより細かく見えてくると期待されています。我々もそれに向けて、銀河中心領域、特に活動銀河核のまわりの構造について研究を進めていきたいと思っています。