

# 「爆発的星形成活動—活動銀河中心核の関係」 の物理機構の探索 —輻射流体力学的見地より—



渡部 靖之

〈筑波大学大学院数理工学科学研究科/INAF—Osservatorio Astrofisico di Arcetri ((独)日本学術振興会特別研究員 PD)  
〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学計算科学研究センター/Largo E. Fermi 5, 50125, Firenze, Italy)  
e-mail: watabe@ccs.tsukuba.ac.jp

活動銀河中心核 (AGN) の周囲には、さまざまな領域で爆発的星形成活動が発見されています。この爆発的星形成活動と AGN の関係の物理機構を探る一つの研究例として、輻射流体力学的効果に注目した筆者の研究を紹介します。

## 1. はじめに

銀河のなかでも中心核付近が非常に明るいものを活動銀河中心核 (AGN) と呼びます。AGN の大きな特徴の一つとして、銀河中心 1 pc 以内の領域 (銀河全体の大きさの数千~数万分の 1 以内の領域) で銀河全体に匹敵する (もしくはそれ以上の) 莫大なエネルギーを放出していることが挙げられます。このエネルギー源として、銀河中心には太陽質量の 100 万倍以上の超大質量ブラックホールとそれを取り囲む降着円盤が存在し、降着円盤に落ち込んだガスの重力エネルギーが輻射に転換されることで明るく輝くと考えられています。しかし AGN としての活動性を生むためのガスは、どこから、どのように降着円盤まで運ばれるのでしょうか。この、銀河中心へガスを運ぶ物理機構ははまだ不明のままです。また、これまでの可視光観測では、AGN はスペクトル中に広輝線・狭輝線の両方が見られるものを 1 型、狭輝線のみのもを 2 型、と二つのタイプに分類されています。この AGN タイプの違いは、AGN 周囲の半径 1-10 pc 以内の領域に遮蔽物質 (ダスト

トラス) の存在を仮定し、これを見込む角度によって中心核が遮蔽されれば 2 型、そうでなければ 1 型と、観測事実を説明するための現象論的な AGN 統一モデル<sup>1)</sup>により現在まで理解されてきました。AGN 統一モデルの模式図を図 1 に示しました。しかしながら、このダストトラスの起源や構造、形成過程は不明、つまり AGN タイプの起源は全くもって不明なままです。これらの不明な問題点 (AGN の活動性、AGN のタイプ) に対して近年、解決の糸口となりうる多数の興味深い現象が報告されています。

## 2. 爆発的星形成活動と AGN の関係

近年の高分解観測により、銀河中心領域の爆発的星形成活動が多数発見され始め、しばしばそれらは、半径が数百 pc 程度のリング形状であることがわかってきました<sup>2)4)</sup>。全光度は太陽光度の 10 億-1,000 億倍程度と、AGN に匹敵するほど明るく輝いています。興味深い点は、2 型セイファート銀河の方が 1 型よりも銀河中心領域の爆発的星形成活動が多く付随していること<sup>5)9)</sup>、一方クェーサーはほとんどが 1 型として観測されて

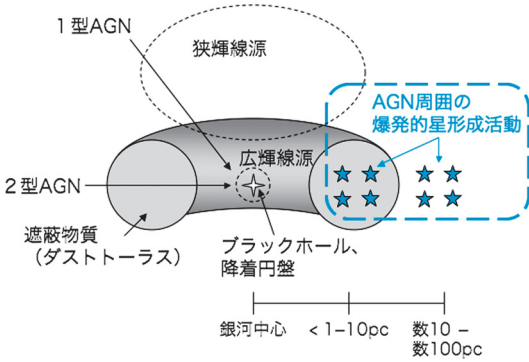


図1 AGN統一モデル(黒色)とAGN周囲の爆発的星形成領域(青色)の模式図: 銀河中心に超大質量ブラックホール、降着円盤が存在し、その周囲に広輝線源、さらに外側に狭輝線源が分布します(各輝線源の大まかな位置を点線で表してあります)。広輝線源を取り囲むダストトーラスの存在を仮定することによって、ダストトーラスを通して中心を見ると広輝線源が隠され、狭輝線のみしか見えないので2型、ダストトーラスを通さずに中心を見ると広輝線と狭輝線の両方が見えるので1型、とAGNタイプを分類します(1章参照)。また近年の観測で見つかり始めた数百pc領域の爆発的星形成活動と、100pc以内の爆発的星形成活動(遮蔽物質中の可能性が示唆されていますが、詳細は不明)の分布のイメージを青色で示しました(2章参照)。

いますが、母銀河で爆発的星形成を伴うものが多く存在する傾向<sup>10)-18)</sup>が、赤外、可視、紫外域の観測によって得られたことです。この「爆発的星形成」という母銀河の性質とAGNタイプの関係、「AGNの光度が低いセイファート銀河、光度が高いクェーサーとAGNタイプの関係」は、従来の見込み角の違いのみでAGNタイプを分類しようとするAGN統一モデルの枠内では理解しきれません。この観測事実は、「爆発的星形成活動とAGNタイプ」、また「AGN光度とAGNタイプ」の間に、何らかの物理的な関連があることを示唆しています。

また、爆発的星形成活動に起因する強力な輻射場がその内側のガスに及ぼす輻射流体力学効果

を考慮した「AGNの活動性と爆発的星形成活動の物理的關係」を探る理論研究も行われています<sup>19), 20)</sup>(詳細は4章)。さらに近年、3.3ミクロンPAH(芳香族炭化水素)輝線観測により、銀河中心から100pc以内の領域で起こる(上記の爆発的星形成領域とは異なり、さらに内側の領域の)爆発的星形成活動の存在が明らかになり始め(この爆発的星形成は遮蔽物質中で起きている可能性が示唆されていますが、詳細は不明)、この爆発的星形成活動の光度とAGNの光度には統計的な正の相関があることが示唆されています<sup>21)</sup>。これはAGNの活動性と爆発的星形成活動の關係についての物理的關係を考えるうえで興味深い観測事実であるといえます。これらの爆発的星形成領域が分布する領域を、図1に青色で示しました。

このように、AGN周囲にはさまざまな領域で爆発的星形成活動が存在し、かつ爆発的星形成活動はAGNの特徴と密接にかかわっていることが示唆され始めています。では、いったいどのような物理機構によって爆発的星形成活動とAGNが結びついているのでしょうか。この結びつきを理解するための一つの鍵として、輻射流体力学効果に注目し、筆者は研究を続けています。そこで以下では、筆者の研究結果をもとにして、輻射流体力学の見地からAGNと爆発的星形成活動の物理的關係を探ってみたいと思います。

### 3. AGNタイプの起源

はじめに、AGNタイプについて得られた結果を紹介します。AGNタイプと爆発的星形成活動の物理的関連を解明するためには、AGN周囲に存在する物質に対し、AGNや爆発的星形成領域からの輻射圧を考慮した動力学を解くことが必要不可欠となります。なぜならば、ダストを含んだガスに及ぼすAGNや爆発的星形成活動に起因する輻射圧は、周囲の重力や、AGN周囲の物質が爆発的星形成領域中の多重超新星爆発によって獲得する運動量と比較して無視できず、AGN周囲

の物質はさまざまな運動をされると考えられるためです。これまでに、輻射圧を考慮した AGN 周囲のガスの静力学的な平衡状態<sup>22)</sup>や、爆発的星形成領域から放出されたガスの流体力学的進化<sup>23)</sup>は研究されてきたものの、輻射圧の効果を含めた動力学は、これまでに研究されていませんでした。

そこで AGN と爆発的星形成活動に起因する輻射圧を考慮に入れた、遮蔽物質の動力学モデルを新たに構築し、遮蔽物質の時間発展を解くことを方策として研究を始めました<sup>24)</sup>。遮蔽物質の起源や時間進化を理論的に解明するため、爆発的星形成領域中の多重超新星爆発との相互作用で形成され、放出されるガス雲を遮蔽物質の起源と考え、ガス雲の動力学の三次元計算を行いました。重力源は AGN、爆発的星形成領域と銀河バルジ、輻射源は AGN (光度は 1 億年の間、一定と仮定) と爆発的星形成領域 (指数関数型の星形成率、星形成の継続時間は 1 千万年を仮定) です。ガス雲同士の衝突による光学的厚みの変化も考慮に入れて計算を行っています。衝突の扱いは密度、温度一定を仮定、最大半径をゾーン半径としており、ゾーン半径を超えたガス雲は重力収縮し、内部で超新星爆発が起こることによってガスが再び放出されることもモデル化して取り入れました。本研究のモデルの模式図は図 2 に示しました。

その結果、爆発的星形成領域の光度が AGN の光度より卓越する場合 (AGN がセイファート銀河に対応する場合)、爆発的星形成領域から放出されたガス雲は、爆発的星形成活動に起因する輻射圧によって上空に巻き上げられますが、系全体では輻射圧より重力が効きます。星形成活動が活発な 1 千万年程度の時間で大量のガス雲が放出され、これらによって AGN が遮蔽されます。その後、放出されたガス雲は系の力学的時間の 2 倍程度 (2 千万年弱) の時間で落下します。この時期には衝突を繰り返した光学的に厚いガス雲が AGN 周囲に分布し、これらによって AGN が遮蔽される構造ができあがります。このように爆発的星形

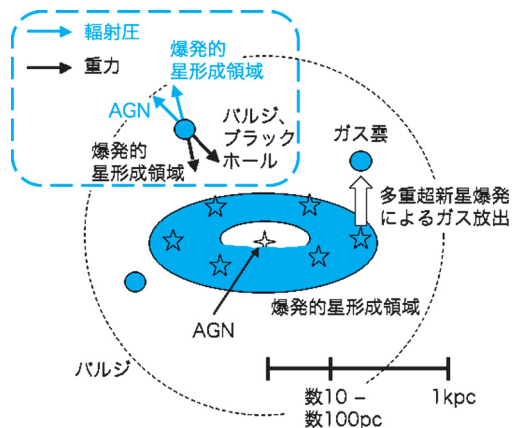


図 2 三次元動力学計算のモデルの模式図。AGN と AGN 周囲の円盤状の爆発的星形成領域が輻射源となります。爆発的星形成領域中の多重超新星爆発によって放出されたガス雲に対し、輻射圧 (青矢印) と重力 (黒矢印) が働きます。

成領域起源のガス雲は AGN 遮蔽に寄与でき、AGN がガス雲によって遮蔽されていない方向から見れば 1 型、ガス雲を通して見れば 2 型となるため、これはセイファート銀河のタイプの分類を説明します。さらに、これらの結果はセイファート 2 型銀河が 1 型よりも爆発的星形成活動を伴うという観測事実とも傾向が一致します。一方、AGN の光度が卓越する場合 (AGN の光度がクェーサーに対応する場合)、AGN からの輻射圧が重力よりも卓越するため、大部分のガス雲は銀河外へ吹き飛ばされ AGN 遮蔽にほとんど寄与できません。その結果、ほぼ 1 型として観測されるため、クェーサーに対応させることができます。以上の結果から、AGN を遮蔽する物質の起源は AGN 周囲の爆発的星形成領域であり、遮蔽物質の構造は、従来の AGN 統一モデルで言われていたトーラス形状、というよりは、多数のガス雲が AGN 周囲に分布している可能性が新たに示されました。

### 4. AGN の活動性の起源

次に AGN の活動性と爆発的星形成活動の関係について得られた結果を紹介します。これまでに、爆発的星形成活動に起因する強力な輻射場が、その内側のガスに輻射流体力学的効果を及ぼすことで、ガスの中心への収縮、降着過程を支配しうる理論研究が提案されています<sup>19), 20)</sup>。筆者が特に注目した点は、リング形状の爆発的星形成活動に起因した動径方向の輻射圧によって爆発的星形成領域の内側のガス円盤が圧縮され、輻射圧と重力、遠心力の回転平衡にあるガス円盤が形成される、という理論結果です。モデルの模式図は図3に示しました。ガス円盤について動径方向、方位角方向の輻射流体力学方程式を記述すると、動径方向の輻射圧が、その他輻射にかかわる項に対し早い時間で効くこと、かつガス円盤の回転時間と同程度かそれ以下の時間で効くことがわかります。典型的な時間は、動径方向の輻射圧に対しては数十万～数百万年程度、その他の輻射に関する項は数億～数十億年程度と見積もることができます。

しかし、輻射の効果が現実の天体のガス分布に影響を及ぼしているかどうかについては観測デー

タを用いた検証が必要となります。そこで、銀河中心から数百 pc 領域で起こる爆発的星形成活動に起因する動径方向の輻射圧の効果のみに焦点を絞り、既存の輻射流体力学モデルで予想されるガス分布が形成されているかどうか、また AGN との活動性との関係があるのかどうかという点について、観測データを用いて輻射流体力学的効果を引き出す検証を行いました。比較検証するために必要な観測データは、爆発的星形成領域の半径と全光度、爆発的星形成領域より内側の力学的質量（もしくはリング半径位置の回転速度）、ガス円盤サイズであり、これらがすべて必要となります。そこで、リング形状の爆発的星形成領域をもつ銀

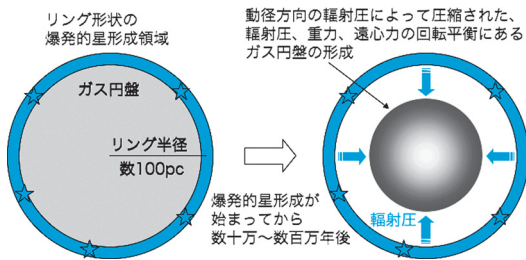


図3 輻射流体力学的効果が及ぼすガス円盤の圧縮について。初期にリング形状の爆発的星形成領域、その内側のガス円盤を仮定します(左図)。早い時間で効く動径方向の輻射圧によってガス円盤が圧縮され、重力、遠心力、輻射圧の回転平衡にあるガス円盤が形成されます(右図)。

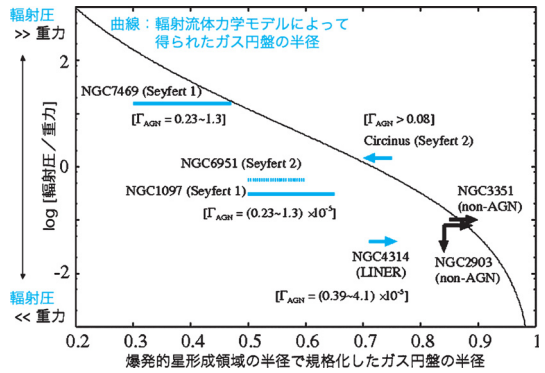


図4 爆発的星形成領域の半径で規格化したガス円盤の半径(横軸)と輻射圧と重力の比の対数(縦軸)の関係。縦軸は、ダストを含んだガスに対する(ダストの散乱吸収断面積を用いて評価した)爆発的星形成領域のエディントン光度で規格化した爆発的星形成領域の全光度、つまり輻射圧と重力の比を表します。縦軸の値が0より大きいときに、輻射圧が重力に対し卓越します。曲線は、輻射流体力学モデルによって得られたガス円盤の半径を示します。観測データから得られたガス円盤の半径を横棒で示しました。NGC6951は観測の不定性のため点線、また上限値、下限値しか得られなかったものは矢印で示しました。また、青色のデータはAGNを、図中の $\Gamma_{AGN}$ はダストを含まないガスに対する(トムソン散乱断面積を用いて評価した)AGNのエディントン光度を表しています。



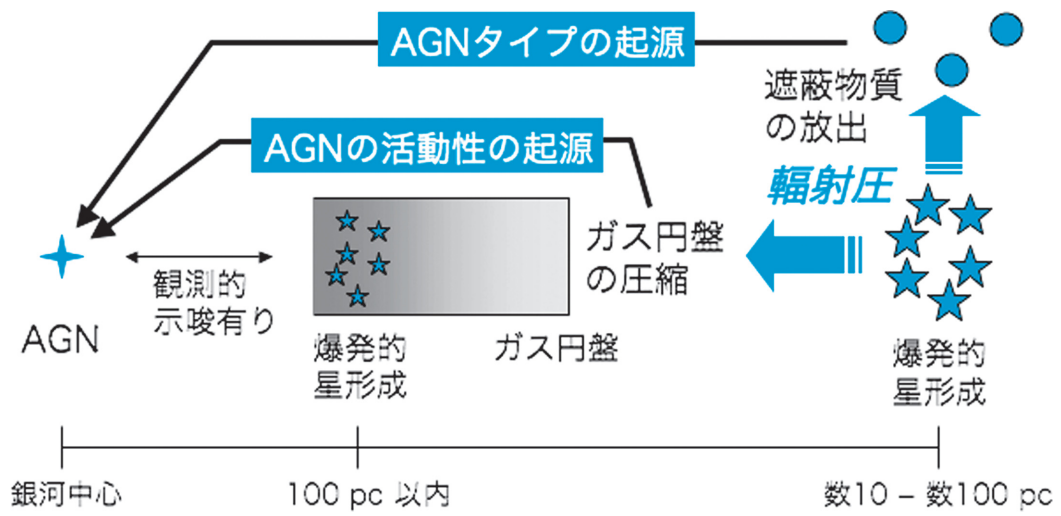


図5 本稿でまとめた爆発的星形成活動-AGN の関係の模式図. 爆発的星形成活動に起因する輻射圧によって巻き上げられたガス雲が AGN 遮蔽に寄与すること, また動径方向の輻射圧が内側のガス円盤の構造を決めること, さらにガス円盤の構造形成とともに AGN の活動性を誘起する可能性が示唆されました. また, 銀河中心から 100 pc 以内 (領域の詳細は不明) で起こる爆発的星形成領域の光度と AGN 光度の間には統計的な正の相関がみられていることも注目すべき現象の一つだと思われます.

河について, これらの必要なデータをさまざまな文献から集めた結果, 七つの銀河 (セイファート銀河: NGC7469, NGC1097, NGC6951, Circinus galaxy, ライナー: NGC4314, AGN をもたない銀河: NGC2903, NGC3351) についてデータをそろえることができました. 銀河の数が少ないため, また各データはさまざまな手法を用いて得られているデータのため, 個々の銀河のデータについて非常に注意深く調べました. 観測データを詳細に調べ, 不定性を考慮したうえで得られた結果が図4です<sup>25)</sup>.

この図では, 観測データを用いて見積もったガス円盤の半径と, 輻射流体力学的モデルで予測される半径 (曲線) が比較してあります. 結果, 爆発的星形成領域の内側に分布するガス円盤のサイズは, 輻射流体力学的モデルに基づく理論予測と傾向が一致していることがわかりました. さらに興味深い点として, 強い圧縮を受けたガス円盤をもつ銀河は AGN の活動性が見られ, かつ AGN のエディントン比とガス円盤の圧縮の強さにも正

の相関を示唆する傾向が新たに得られました. これは爆発的星形成活動に起因する輻射圧が, 内側のガス円盤の構造を形成し, かつ中心核の活動性を誘起する可能性を示唆しています. 以上の結果より, 母銀河で起こる星形成活動と, 銀河中心の活動性の関係について, 理論および観測データを用いて新たな知見を得ることができました. (なお, この結果に関しては信頼度をさらに高めるため, 今後もデータを増やし続けていきます.)

### 5. まとめと今後

本稿でまとめた爆発的星形成活動-AGN の関係の描像を図5に示しました. AGN 周囲の物質に対し, AGN や爆発的星形成領域からの重力, 輻射圧を取り入れた動力学を考慮した結果, これまで明らかにされていなかった AGN 周囲の遮蔽物質の起源や構造を理論的に初めて説明することができ, 得られた結果が観測を自然に説明する現実的な理論シナリオを提唱することができました. また本研究により, 爆発的星形成活動に起因

する輻射の効果が観測によって初めて検証され、さらに、AGNの活動性と、母銀河で起こる爆発的星形成活動の関連性も理論と観測両面から示唆することができました。

しかし、事は単純ではありません。私は本稿で、数十～数百 pc 領域に分布する遮蔽物質と爆発的星形成活動の関係について得られた研究結果を紹介しましたが、遮蔽物質は数十～数百 pc 領域に加え、さらに内側の領域 (1-10 pc 以内の領域) にも存在することが X 線観測によって示唆されています<sup>26)</sup>。例えば、この 1-10 pc 以内の領域のみに水素柱密度  $10^{24} \text{ cm}^{-2}$  を超える可能性<sup>27)</sup>や、AGNの光度変化によるものではなく、その周囲の物質分布の変化による水素柱密度の時間変動<sup>27)</sup> (極端な例としては、数日～数週間で水素柱密度が 1 桁程度変動<sup>28)</sup>) も報告されています。しかし、この領域でガスがどのように分布しているのか、すべての AGN で同じ構造なのかなど、未解決問題が数多く残されたままです。これらの問題は AGN の遮蔽に関してのみではなく、AGN への燃料供給の問題にも密接にかかわるものと思われます。さらに、銀河中心から 100 pc 以内の領域で起こる爆発的星形成が実際にどの領域で起きているのか、その詳細はまだ不明です。また、このような爆発的星形成が本当に AGN の活動性を生むためのガス降着に寄与しているのかどうか、寄与しているのならば、どのようなメカニズムによってガス降着が引き起こされているのでしょうか。そして、さまざまな領域で起きている爆発的星形成活動の間には関係があるのでしょうか。筆者は現在、これらの問題に関連した研究結果を国立天文台の今西昌俊氏、川勝 望氏とともにまとめています。また、現在の研究場所であるアルチェトリ天文台 (イタリア、フィレンツェ) の Guido Risaliti 氏やその他のメンバーとともに AGN 周囲の物質分布について、またさまざまな領域で起こる爆発的星形成領域と AGN の関係を探るために、新たな研究を始めています。

以上、AGN の未解決問題を解明する一つの手がかりとして、AGN 周囲の爆発的星形成活動が及ぼす輻射流体力学的効果に注目した研究の 1 例を紹介させていただきました。まだ決着が着いていない問題ばかりではありますが、だからこそ突き詰める楽しみを味わえる分野の一つだと思います。

## 謝 辞

本稿は、筆者が筑波大学宇宙理論研究室で修士および博士課程に行った研究をもとにしています。当時の指導教員 (現在の受入教員) である筑波大の梅村雅之氏には、研究の基礎となる心構えや考え方、また研究職に進むことの厳しさも教わりました。同研究室の平下博之氏には、(筆者の度重なる愚問に対しても) 何度も議論をしていただきました。両氏からご指導をいただけたことにたいへん感謝しております。また、同研究室でお世話になった研究員や院生の皆様、中井直正氏 (筑波大)、中本泰史氏 (東工大)、河野孝太郎氏 (東大)、大須賀 健氏 (理研)、研究の議論だけでなく、海外で研究を行うきっかけや助言を何度も与えていただいた嶺重 慎氏 (京大)、寺島雄一氏 (愛媛大)、川口俊宏氏 (青山学院大)、川勝 望氏 (国立天文台)、長尾 透氏 (国立天文台)、現在の研究場所を提供していただいている Guido Risaliti 氏にもたいへん感謝しております。また、このような筆者の研究を紹介する機会を与えていただいた編集長の和田桂一氏、本稿の執筆を勧めていただいた編集委員の今西昌俊氏にも深く感謝いたします。皆様には、少々身勝手な言い分ではありますが、研究結果をもって恩返しをさせていただきたいと思います。最後に、筆者が経済的に援助を受けている日本学術振興会に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Antonucci R., 1993, ARA&A 31, 473
- 2) Pogge R. W., 1989, ApJS 71, 433
- 3) Leitherer C., et al., 1996, ApJ 465, 717
- 4) Storchi-Bergmann T., Wilson A. S., Baldwin J. A., 1996, ApJ 460, 252
- 5) Heckman T. M., et al., 1989, ApJ 342, 735
- 6) Maiolino R., et al., 1997, ApJ 485, 552
- 7) Maiolino R., et al., 1998, ApJ 493, 650
- 8) Storchi-Bergmann T., et al., 2000, ApJ 544, 747
- 9) Gonzalez Delgado R. M., Heckman T., Leitherer C., 2001, ApJ 546, 845
- 10) Barvainis R., Antonucci R., Coleman P., 1992, ApJ 399, L19
- 11) Ohta K., et al., 1996, Nature 382, 426
- 12) Omont A., et al., 1996, Nature 382, 428
- 13) Schinnerer E., Eckart A., Tacconi L. J., 1998, ApJ 500, 147
- 14) Brotherton M. S., et al., 1999, ApJ 520, L87
- 15) Canalizo G., Stockton A., 2000, ApJ 528, 201
- 16) Canalizo G., Stockton A., 2000, AJ 120, 1750
- 17) Dietrich M., Wilhelm-Erkens U., 2000, A&A 354, 17
- 18) Solomon P., et al., 2003, Nature 426, 636
- 19) Umemura M., Fukue J., Mineshige S., 1997, ApJ 479, L97
- 20) Umemura M., Fukue J., Mineshige S., 1998, MNRAS 299, 1123
- 21) Imanishi M., Wada K., 2004, ApJ 617, 214
- 22) Ohsuga K., Umemura M., 2001, ApJ, 559, 157
- 23) Wada K., Norman C. A., 2002, ApJ 566, L21
- 24) Watabe Y., Umemura M., 2005, ApJ 618, 649
- 25) Watabe Y., Hirashita H., Umemura M., 2006, PASJ, submitted
- 26) Risaliti G., Maiolino R., Salvati M., 1999, ApJ 522, 157
- 27) Risaliti G., Elvis M., Nicastro F., 2002, ApJ 571, 234
- 28) Risaliti G., et al., 2007, ApJ 659, L111

**Investigation of Physical Mechanisms of “Starburst–Active Galactic Nucleus Connection” —From a Radiation Hydrodynamic Point of View—**

**Yasuyuki WATABE**

*Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba/INAF—Osservatorio Astrofisico di Arcetri (JSPS Research Fellowship PD), Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Ten-nodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan/Largo E. Fermi 5, 50125, Firenze, Italy*

**Abstract:** Recent observations have revealed the starburst regions in various places around the active galactic nuclei (AGNs). As one of the examples that investigate the physical mechanisms responsible for the starburst–AGN connection, I introduce my research focusing on the radiation hydrodynamic effects.