

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800100

研究課題名(和文) マルチグループ輻射流体計算によるAGNトラスから降着円盤へのガス供給過程の解明

研究課題名(英文) Study on gas supply process from AGN tori to accretion disks with multi-group radiation hydrodynamic simulations

研究代表者

行方 大輔 (NAMEKATA, Daisuke)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：40610043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：活動銀河核の活動性の理解に資するべく、活動銀河核トラスから巨大ブラックホール降着円盤へのガス供給過程に関連する理論的研究を行った。多次元輻射流体計算によって、活動銀河核の輻射にさらされた分子雲の進化の典型的なパターンを明らかにし、輻射による分子雲の破壊時間が力学的時間と比べて十分に短いことを示した。ダスト昇華半径付近には、ほぼ中性な、幾何学的に薄いガス円盤が形成され、円盤表面から高速なアウトフローが吹くことを明らかにした。現実的な条件下で、アウトフロー率がエディントン質量降着率の20～40%程度であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have conducted theoretical studies relevant to the gas supply process from active galactic nucleus (AGN) tori to supermassive black hole (SMBH) accretion disks to advance our understanding of the AGN activities. Using multi-dimensional radiation hydrodynamic simulations, we have revealed typical evolutionary patterns of molecular clouds directly exposed to AGN radiation and have shown that the destruction timescales of the clouds are shorter than the dynamical timescales. We have also found that a nearly-neutral, geometrically-thin, dense dusty gas disk forms near the dust sublimation radius and a high-velocity outflow is launched from the disk surface. The mass outflow rate is as large as 20-40 % of the Eddington mass accretion rate under realistic conditions.

研究分野：理論天文学

キーワード：活動銀河核 活動銀河核トラス 星間ガス 輻射流体力学 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) AGN と銀河形成

活動銀河核(AGN)は、宇宙で最も明るい天体であり、宇宙のごく初期の段階(宇宙誕生後~10億年)から存在することが知られている。AGNは、銀河中心の巨大ブラックホール、その降着円盤、及び、それを取り巻くトーラス状の星間ガス構造(AGNトーラス)から構成される天体である。降着円盤内のガスは、降着運動に伴う重力エネルギーの解放・散逸によって、非常に高温まで加熱され、可視光からX線波長帯で膨大なエネルギー(~ 10^{45-46} erg s⁻¹)を放射している。この強力な放射光は、AGNの相対論的ジェットとともに、銀河内、及び、銀河間の星間ガスを加熱・電離し、銀河の形成過程に影響を与えたことが、例えば、観測で得られた銀河の光度関数と理論予測の比較等から示唆されている。このように、AGNの活動性の詳細(強さ、活動サイクル等)を理解することは、銀河形成を理解する上で必要不可欠である。

(2) 角運動量輸送問題と検証すべき点

AGNの活動性は、AGNトーラスから降着円盤へのガス供給によって維持される。したがって、ガス供給率やガス供給の持続性を理解することが重要である。AGNトーラスのガスは重力と遠心力がほぼ釣り合った状態にあるため、ガス供給が起こるためにはガスの角運動量が外側に輸送されていなければならない。この角運動量輸送過程として、2つの輸送モデルが提案されている：星形成に伴う超新星爆発によって、トーラス内部に強力な乱流が形成され、乱流粘性によって角運動量を輸送するモデル(乱流粘性モデル)、ガスクランプ同士の非弾性衝突によって角運動量を輸送するモデル(運動粘性モデル)。これらのモデルは共存可能であり、降着円盤からの放射が十分遮蔽されるAGNトーラスの外側領域ではこれらのモデルは十分に正当化される。しかし、AGNトーラスのダスト昇華半径近傍では、ダストによる遮蔽効果が失われ、降着円盤からの強力な可視・紫外光放射が、星間ガスの深部まで到達するようになる。星間ガスの加熱・電離によって、星形成は大きく阻害され、低密度のガスクランプは光蒸発する可能性がある。十分に高密度なガスクランプは生き残ることが可能ではあるが、そのようなガスクランプの存在、形成過程や力学的な寿命は未解明である。このように、ダスト昇華半径近傍において、2つの角運動量輸送過程がどれほど効果的に働くのかは明らかではない。AGNトーラスから降着円盤へのガス供給を理解するためには、この点を明らかにする必要がある。

(3) 降着円盤へのガス供給の理解に向けて

ガスクランプは角運動量輸送に重要な役割を果たすだけでなく、星形成の舞台となる。そのため、この領域のガスクランプの形成及

び進化を調べることが、ダスト昇華半径近傍での角運動量輸送効率の理解に重要である。ガスクランプの形成は、局所的な自己重力不安定による重力収縮か、乱流による圧縮によって起こるため、ダスト昇華半径付近での星間ガスの密度・温度構造および乱流強度を調べるのが重要である。一方、ガスクランプの進化は、ガスクランプ自身の性質(質量やサイズ等)の他、降着円盤からの放射、周囲の星間ガスや他のガスクランプとの相互作用に依存する。ガスクランプでの星形成の特性(星形成率、初期質量関数)も究極的にはこれらの要素によって制御されるはずである。

強い放射場にさらされるダスト昇華半径付近では、星間ガスの密度・温度構造は、降着円盤からの直接光によるガスの光加熱や光電離だけでなく、トーラス自身からの間接光(水素ガスの再結合光、ダストによる光散乱・熱放射)による光加熱・光電離によって決定される。また、理論的研究から放射圧がトーラスの垂直構造を支えるのに役割を果たすほど強力であることが示されている。したがって、ダスト昇華半径でのガスクランプの形成・進化過程を調べるためには、ガスとダストを含む化学電離反応を考慮した自己重力放射流体計算による時間発展計算が必要である。

2. 研究の目的

上記の研究背景(申請時)を踏まえ、我々には以下の研究目的を立てた：

- (1) 降着円盤からの放射やAGNトーラス自身の放射の下でのガスクランプの進化過程、特に力学的寿命や星形成の特性を明らかにする。特に、ガスクランプの性質(質量やサイズ)や放射場強度への依存性を明らかにする(以下、**課題1**とする)。
- (2) ダスト昇華半径付近の星間ガスの密度・温度構造を計算し、ガスクランプの特徴的な質量やサイズ、および、それらの確率分布を明らかにする。これらは巨大ブラックホールの質量や降着円盤の放射強度、或は、AGNトーラス質量等のAGNを特徴づけるパラメータ(AGNパラメータ)にも依存すると考えられ、その依存性についても明らかにする(以下、**課題2**とする)。

3. 研究の方法

上記の2つの研究課題の遂行では、当初想定していなかった技術的困難が判明したこともあり、方針を修正せざるを得ない点もあった。この点も含めて、以下に研究方法を説明する。

(1) 課題1の研究手法

「2.(1)」で述べた点を明らかにするため、まずガスの自己重力と光電離反応を考慮した3次元放射流体計算コードを開発した。こ

のコードは SPH 法に基づいている。申請時点では、トーラス自身からの赤外線放射の輸送計算をモンテカルロ放射輸送計算法で実現する予定であった。しかしながら、以下で述べる技術的困難のため、課題 1 は AGN からの直接光のみを考慮して実施することとした。技術的困難は次の通りである：領域分割された空間で放射輸送計算を行うと、散乱によって、異なる領域を何度も往復する光子パケットが発生しうる。これによって、通信量が増え、高い並列化効率を実現できなくなる¹。

上記で開発したコードを用いて、AGN の放射にさらされるガス雲の 3 次元放射流体計算を行った。AGN の放射強度とガス雲の光学的厚みを変えて計算を実施し、ガス雲の進化の特徴やガス雲の破壊のタイムスケールを調査する。

(2) 課題 2 の研究方法

「2.(2)」で述べた点を明らかにするため、我々はまず化学反応を考慮した軸対称マルチグループ放射流体計算コードを開発した。コードはメッシュ法に基いており、赤外線再放射輸送も考慮されている。初期条件として、ダスト昇華半径付近にガス円盤を置き、そこに AGN の放射を当てた場合の進化を放射流体計算によって調べる。このとき、形成されるガス構造の特徴やアウトフロー率等を調査する。申請時点では、AGN パラメータへの依存性も調査項目であった。しかし、当初想定になかった問題(後述)に対応するため、典型的なパラメータでの調査に注力した。上記で述べた問題は以下である：(i) 正確な X 線加熱率の評価のため、化学反応ネットワークの拡張が必要であることが判明したこと、(ii) これまで数値天文学で用いられてきた Short-Characteristics 法に放射エネルギーの保存が大きく破れる問題があることが判明したこと。

¹ 赤外線再放射を SPH 法上で扱う方法として流束制限拡散(FLD)法が存在する。この方法を使用する場合においても、次の技術的困難が存在する：今、トーラスからの赤外線放射を等方的な放射場として与えたいが、これを実現するためには、複雑な形状を持ちうる分子雲の表層を高速に同定して、表層に所属する SPH 粒子の放射エネルギー密度を一定にしなければならない。本研究では高速に表層を同定するアルゴリズムの開発には時間を要すると判断し、直接光のみを考慮する方針に転換した。課題 2 の研究の結果、ダスト昇華半径より外側では、それほど赤外線放射が効かないことが明らかになっており、結果的に、この判断は悪い判断ではなかったと言える。

4. 研究成果

以下に、各研究課題についての研究成果の内容を、今後の展望も含めて述べる。

(1) AGN に照射されたガス雲の進化について
ガス雲の被照射面における電離パラメータに応じて、ある光学的厚みの値が存在し、ガス雲の光学的厚みがその値より十分に小さければ光蒸発駆動型進化を示し、十分大きければ放射圧駆動型進化を示すことがわかった。いずれの進化型の場合においても、初期に十分な質量があればポスト衝撃波層で星形成が期待される。電離パラメータとガス雲の密度によって、ポスト衝撃波層の表面密度の時間増加率が異なり、ポスト衝撃波層における重力不安定の起こり方に違いがあることを例証した。これは様々なタイプの星形成が起こる可能性を示唆している。この結果は査読論文として出版された(Namekata et al., 2014)。また、球対称 1 次元放射流体計算を用いて、より広い範囲の電離パラメータと光学的厚みに対して、ガス雲の寿命を決定づける衝撃波速度を測定した (Namekata 論文準備中)。今後の 1 つの課題は、具体的に星の質量関数を求めることである。

(2) ダスト昇華半径付近のガス円盤の構造について

ブラックホール質量 10^7 [太陽質量] の AGN に対して調査を行った結果、次のことを示した：

準定常状態においては、ほぼ中性で、幾何学的に薄い、高密度なガス円盤がダスト昇華半径付近に形成され、この円盤の表面から高速な (~ 200 - 3000 [km/s]) アウトフローが吹く。円盤表面付近では熱不安定起源と思われるガス雲が形成されるが、ガス雲は形成と破壊を繰り返す一過的なものであることもわかった。アウトフロー率は、AGN の X 線光度の割合やダストサイズに依存して、 0.05 - 0.1 [太陽質量/年] の範囲を取る。これは質量-エネルギー変換効率が 0.1 の場合の Eddington 質量降着率の 20 - 40% 程度に相当する。

銀河半径 1 パーセク以内におけるアウトフローの水素柱密度は約 10^{21} [平方センチメートル] である。このように、AGN からの照射とダスト再放射だけでは、先行研究で予想された幾何学的に厚く、光学的にも厚い静水圧構造をダスト昇華半径付近に形成させるのは困難である。

この結果は、査読論文として受理され、現在印刷中である (Namekata & Umemura 2016)。今後、降着円盤へのガス供給率を明らかにするためには、降着円盤外側とトーラスの接続領域におけるガスダイナミクスの研究が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

行方大輔、梅村雅之、
Subparsec-scale dynamics of a
dusty gas disk exposed to
anisotropic AGN radiation with
frequency-dependent radiative
transfer, *Monthly Notices of the
Royal Astronomical Society*, 査読
有、2016 (印刷中)、doi:
10.1093/mnras/stw862

行方大輔、梅村雅之、長谷川賢二、
On the evolution of gas clouds
exposed to AGN radiation - I.
Three-dimensional radiation
hydrodynamic simulations, *Monthly
Notices of the Royal Astronomical
Society*, 査読有, Volume 443, 2014,
pp.2018-2048
doi:10.1093/mnras/stu1271

〔学会発表〕(計13件)

行方大輔、梅村雅之、輻射流体計算で探
る活動銀河核トーラスのダスト昇華半
径付近のガス構造、平成27年度国立
天文台天文シミュレーションプロジェ
クト ユーザーズミーティング、2016
年1月28日-29日、国立天文台水沢キ
ャンパス(岩手県奥州市)

行方大輔、梅村雅之、輻射流体計算で探
る活動銀河核トーラスのダスト昇華半
径付近の構造、ALMA ワークショップ
「AGN銀河の中心1kpc 1pcスケール
での質量降着機構の解明に向けて」、
2015年12月21日-22日、国立天文台
三鷹キャンパス(東京都三鷹市)

行方大輔、梅村雅之、Radiation
hydrodynamic simulations on the
possibility of radiation-supported
AGN tori, Symposium on “Quarks to
Universe in Computational
Science(QUCS 2015) ”、2015年11月4
日-8日、奈良春日野国際フォーラム 麓
〜I・RA・KA〜(奈良県奈良市)

行方大輔、梅村雅之、輻射流体計算によ
るAGN トーラス内縁構造に関する調
査、「超巨大ブラックホール研究推進連
絡会」第3回ワークショップ、2015年
10月17日-18日、甲南大学(兵庫県神
戸市)

行方大輔、梅村雅之、活動銀河核トーラ
ス内縁部の輻射流体計算、日本天文学
会2015年秋季年会、2015年9月9日-11
日、甲南大学(兵庫県神戸市)

行方大輔、活動銀河核トーラス研究の現
状、2015年度第45回天文・天体物
理若手夏の学校(招待講演)、2015年7
月27日-30日、信州・戸倉上山田温泉 ホ
テル圓山荘(長野県千曲市)

行方大輔、ダスト再放射を考慮した輻射
流体計算コードの開発、HPCI 戦略プロ
グラム分野5全体シンポジウム、2015
年3月11日-12日、紀尾井フォーラム(東
京都千代田区)

行方大輔、ダスト再放射を考慮した輻射
流体計算コードの開発、平成26年度国
立天文台天文シミュレーションプロジ
ェクト ユーザーズミーティング、2015
年1月20日-21日、国立天文台三鷹キ
ャンパス(東京都三鷹市)

行方大輔、ダストからの赤外線再放射を
考慮した輻射流体計算コードの開発、第
27回理論懇シンポジウム「理論天文
学・宇宙物理学と境界領域」、2014年
12月24日-25日、国立天文台三鷹キ
ャンパス(東京都三鷹市)

行方大輔、梅村雅之、長谷川賢二、AGN
の輻射にさらされたガス雲の輻射流体
計算II、日本天文学会2014年春季年会、
2014年3月19日-22日、国際基督教大
学(東京都三鷹市)

行方大輔、梅村雅之、長谷川賢二、AGN
の輻射にさらされたガス雲の輻射流体
計算、初代星・初代銀河研究会、2014
年1月22日-24日、鹿児島大学(鹿児
島県鹿児島市)

行方大輔、梅村雅之、長谷川賢二、AGN
の輻射にさらされた分子雲の寿命、平成
25年度国立天文台天文シミュレーシ
ョンプロジェクト ユーザーズミーティ
ング、AGNの輻射にさらされた分子雲
の寿命、2014年1月28日-29日、国立
天文台三鷹キャンパス(東京都三鷹市)

行方大輔、梅村雅之、長谷川賢二、AGN
の輻射にさらされた分子雲の寿命、第
26回理論懇シンポジウム「2020年代を
見据えた理論宇宙物理・天文学」、2013
年12月25日-27日、東京大学柏キャン
パス(千葉県柏市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

行方大輔 (NAMEKATA, Daisuke)
筑波大学計算科学研究センター・研究員
研究者番号: 40610043

(2) 研究協力者

梅村雅之 (MEMURA, Masayuki)
筑波大学計算科学研究センター・教授
研究者番号: 70183754

長谷川賢二 (HASEGAWA, Kenji)
名古屋大学大学院 理学研究科
宇宙論研究室(C研)・助教
研究者番号: 20536627