

令和 2 年 9 月 10 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03959

研究課題名(和文) 巨大ブラックホール周りの構造の起源と進化

研究課題名(英文) Evolution of the ISM around Supermassive Black Holes

研究代表者

和田 桂一 (Wada, Keiichi)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号：30261358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：銀河中心の巨大ブラックホールからなる活動銀河中心核(AGN)について理論的研究と多波長観測との比較をおこなった。特に多次元の輻射磁気流体計算と多波長擬似観測を組み合わせ、1) トーラスやそれぞれの起源と相互関係、2) 構造を決める物理とパラメータ、3) 質量降着過程や、埋もれたAGNの起源などについて、特に近傍AGNの観測結果をよく説明する理論モデル(輻射噴水モデル)の構築に成功した。これらは今後、クェーサーや埋もれたAGNの宇宙論的進化過程や巨大ブラックホールの成長過程の理解、高赤方偏移AGNの観測データの理解に役立つ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の現象論的な「トーラス」モデルと決定的に違うのは、基礎物理過程に立脚した多次元輻射流体計算に基づいて、低光度AGNから大質量ブラックホールを持つ高赤方偏移クェーサーまで統一的に扱える方法論を確立した点、また、輻射輸送計算と組み合わせることで、多波長観測データと直接比較できる、など、多くの可能性と将来性を示し、実際、近傍AGNに関して多波長観測(電波、可視・赤外、X線等)との直接比較に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically studied the active galactic nucleus (AGN), which consists of a supermassive black hole (SMBHs) at the centre of many galaxies. In particular, we combined the multi-dimensional radiative magnetohydrodynamic calculations and multi-wavelength pseudo-observations. We compared the numerical results with the multi-wavelength observational studies to understand 1) the physical origin of the obscuring tori, 2) physics and parameters that determine the structure of the ISM around SMBH, 3) mass accretion processes and the origin of the buried AGN. We have succeeded in developing a theoretical model (radiation-driven fountain model) that explains the observational results of nearby AGNs. These studies are useful to understand the cosmological evolution of quasars and buried AGNs.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：巨大ブラックホール 星間ガス 磁気流体計算 輻射輸送計算 多波長観測

1. 研究開始当初の背景

クェーサーに代表される活動銀河核 (AGN) は、100万~10億太陽質量の、膨大なエネルギーを放出している。その宇宙論的進化は、銀河の進化とも密接に関連しているらしいことが近年の観測により明らかになりつつある。AGNは銀河サイズに比べ極端に小さいが、多波長観測の分光学的特徴等から、その内部にはさらに6桁以上ものスケールにわたる多様な構造 ($\sim 10^{-4}$ - 100パーセク) が存在しているとされる。それらは (1) 広輝線領域 (BLR)、(2) 遮蔽トーラス (torus)、(3) 狭輝線領域 (NLR) と理解されていた。このようなAGN構造は銀河によらず基本的に同じであり、分光学的特徴 (1型、2型セイファートなど) は、観測者がtorusを見込む角度によって説明できるとする「統一モデル」が提唱された。

しかし、最近、torusの最内縁 (0.1パーセク) 付近はESOのVLT望遠鏡を用いた光赤外干渉計によって、ダストからの赤外線放射が直接見えてきつつある。また、間接的には光赤外域の時間変動を使った手法により内縁半径が求められるようになってきた (e.g. MAGNUM)。また、Suzaku, XMM-Newton等のX線衛星サーベイから、濃いガスに光学的に深く埋もれたAGNの新しい種族が多数発見され、AGNを取り巻く星間ガス構造の光度依存性も明らかになってきている。これらの最近の観測からはすべてのAGNが同じ構造を持つという、単純な「統一モデル」は否定されつつある。また、上記のような現象論的説明では、AGNの様々な要素の構造、起源を物理的に説明していることにはならず、結果として、AGN理論構築はこの20年間ほとんど進んでいなかった。

また、SDSS/BOSSの分光サーベイから多数の2型クェーサー (ガスに埋もれたタイプのクェーサー) が発見され、AGN構造も宇宙論的にも進化していることが示唆されてきている。さらに、SMBHと銀河は、相互に関連しながら形成されてきたという宇宙論的共進化が観測データから示唆されている。しかし、上述のようにAGNの構造は近傍銀河においてすら解明できていないため、共進化についての本質的な理解は不十分であった。

2. 研究の目的

1のような研究状況を踏まえ、本研究の目的は、(1) 多次元の輻射磁気流体計算と多波長擬似観測を元に「BLR, torus, NLR」それぞれの起源と相互関係、(2) 構造を決める物理パラメータ、(3) 質量降着過程や、分子アウトフローの起源、(4) クェーサーや埋もれたAGNの宇宙論的進化過程とAGN構造との関係、(5) 巨大ブラックホール成長過程における質量降着の役割を、HSCサーベイを始めとする多波長観測との連携により明らかにする。

また、本研究の独自性としては、(1) 最近観測を始めた、あるいは期間中に観測を開始する高空間分解能・高感度の電波・赤外干渉計観測 (ALMA, VLTI/GRAVITY/MATISSE, CHARA)、世界初のカロリメータ分光による硬X線観測 (Astro-H) による巨大ブラックホール近傍の広い波長域データと直接比較し、さまざまな物理状態にある星間ガスの空間・速度構造にはじめて迫れること。(2) われわれが独自開発したAGN近傍の多次元輻射磁気流体計算を駆使できること、(3) (1)と(2)を連携させることで、宇宙論的進化を議論できるAGN理論モデルの構築ができること、が挙げられる。

3. 研究の方法

銀河中心のSMBHから $r = 100$ パーセク以下のにわたる現象の理論計算を行う。AGN関連の多次元輻射磁気流体計算に高い実績のある理論研究者と、光赤外、電波、X線観測のエキスパートで研究グループを組織し、降着円盤領域とtorus領域間のアウトフロー、非球対称輻射場、降着による相互作用を調べる。非平衡化学進化を含む3次元輻射磁気流体計算と多次元輻射輸送計算による擬似観測によって、AGNのさまざまな構造の起源を探ると共にALMA, VLTI等の最新の観測装置への観測提案を行う。また、これらを元に現実的なAGN統合進化モデルを構築する。最終的にAGNの宇宙論的進化モデルとしてまとめ、遠方クェーサーの探査結果を解釈する。理論計算は、H23-25年度「基盤研究(C)」において進めた多次元輻射 (磁気) 流体計算 (Wada 2015 など) を発展させる。また、観測結果との直接比較のために、流体計算結果を用いて輻射輸送計算による擬似観測を行う。トーラス領域 ($\sim 0.1 - 100$ pc) と降着円盤領域 ($\sim 10^{-4} - 10^{-2}$ pc) は、それぞれで高精度計算するとともに、それぞれターゲットとなる観測結果と比較する。さらにこの2つの領域は非球対称な輻射場とoutflow、質量降着によって物理的に結びついていると考え、その相互作用を調べる。

(1) torus/NLR領域では、AGNからの強いX線、極紫外線(FUV)輻射による化学組成の変化 (X-ray Dominated Region: XDR)を、流体と同時に計算する 輻射化学流体計算を行う。H₂, HI, CO, OH, H₂O, CI, CII などの重要な分子組成の3次元分布とその時間変化を調べる。

(2) ALMAによる観測との比較。ターゲットは、ダストを含む低温分子ガスの構造とダイナミクスである。ALMA Cycle-3のプロポーザルが採択され、はじめて理論計算で予想される分子ガス構造が観測的に検証されることが期待できる。また、最近いくつかのAGNで観測されている分子アウトフローのメカニズム (AGN or Starburst or both) を探るため、ALMA (band-7)を用いた観測 (NGC 1377)と理論計算を比較する。

(3) (1)のモデルに基づき、AGN輻射によって暖められたダストからの放射構造の3次元モンテカルロシミュレーションを行う。一部の結果はSchartmann et al. 2014として出版されている。その結果、1型・2型SeyfertのSEDをよく説明できることが分かったが、その一般性をさまざまなブラックホール質量、エディントン比で調べる。得られる赤外線放射構造は、VLT/MIDIの高分解能観測との比較する

(4) AGNの広いダイナミックレンジを統一的に扱う一歩として、降着円盤領域での輻射流体計算結果を用いて、その影響による非球対称輻射場をトーラス領域の輻射流体計算に取り入れ、アウトフロー、トーラス、電離ガスなどの構造形成に与える影響を調べる。

(5) AGNやStarburstの観測的分類に使われる狭輝線領域 (NLR) の分光診断図 (いわゆるBPTダイアグラム) を(1)のモデルに基づき計算し、実際のAGNの存在との関連を調べる。

4. 研究成果

2016年度

多次元輻射流体計算にもとづき、AGN近傍 sub-pc -数 10 pc 領域のガス構造を決める新しいメカニズムとして、我々が提案している Radiation-driven Fountain (輻射駆動噴水モデル) を最も近傍の2型セイファート銀河である、Circinus Galaxy に適用した結果、SEDなどが観測と一致することを示した論文を出版した (Wada et al. 2016)。研究成果はダートマス大学での国際会議 (8月)、東京大学 (8月)、呉市 (10月)、国立天文台 (2月) の国内研究会、日本天文学会春季年会 (3月) で発表し、関連研究者と議論した。スウィンバン工科大学に滞在し、M.Schartmann 博士らと AGN、中心スターバーストの数値計算に関する共同研究を行った (12月)。数値計算・解析を行う計算機システムを構築した。大学院生を東京工業大学に派遣し、AGN 周辺の星間ガスへの輻射フィードバックを計算する粒子法による数値流体計算コードの研究を開発者に行った。Circinus galaxy のモデルをもとに、分子ガス、電離ガスの輻射輸送計算を行い、観測結果と比較する研究を行った (日本天文学会で大学院生が発表した)。

2017年度

2016年度に出版した、Radiation-driven Fountain (輻射駆動噴水モデル) を最も近傍の2型セイファート銀河である、Circinus Galaxy に適用した理論モデル (Wada et al. 2016) に対して、モンテカルロ法による3次元非LTE輻射輸送コードを用いて、一酸化炭素輝線強度分布を計算し、星間ガスの物理状態との関係、水素分子ガス質量への換算比、などを明らかにした。その結果を査読雑誌に発表した (Wada et al. 2018)。研究成果はイタリア・セストでの国際会議 (7月)、日本天文学会秋季年会 (9月北海道大学) で発表し、関連研究者と議論した。和田は、マックスプランク研究所 (ガルヒン・ドイツ) に滞在し、M.Schartmann 博士、A. Burkert 教授らと AGN、中心スターバーストの数値計算に関する共同研究を行った (7月)。Circinus galaxy のモデルをもとに、分子ガス、電離ガスの輻射輸送計算を行い、観測結果と比較する研究を行った。本研究費によって雇用したポスドク研究員 (工藤祐己) が着任し、磁場が入った場合のAGN近傍星間ガスの計算を行い、日本天文学会春季年会 (3月、千葉大学) で発表した。ALMA 観測データ (Circinus galaxy) と理論モデルの比較に関して、国立天文台の泉拓磨氏らと共同研究を行い、ALMA Cycle 6 の観測提案に活かした (このプロポーザルは採択された。2018年度の項参照)。また、典型的な2型セイファート銀河 NGC 1068 の中心部の高分解能 ALMA 観測に参加し、成果を査読雑誌に発表した (Imanishi et al. 2018)。

2018年度

本年度は(1) トーラス領域の輻射流体計算結果から、3次元 non-LTE 輝線輻射輸送計算を行い、分子・原子輝線強度 (CO, HCN, OH, CI など) を計算し、ALMA Cycle-4&5 で採択された観測データと比較するほか、Cycle-6 に観測提案を行い、プロポーザルが採択された (PI: Izumi)。 (2) 本研究費で雇用したポスドク研究員 (工藤) が中心となり、トーラス領域の磁気流体シミュレーションを磁気流体多次元コード CANS+ (千葉大学開発) を用いて行い、磁気流体不安定性による乱流構造についての成果を Kudo, Wada(2018)として国際研究会で発表した。 (3) 銀河スケールからのガス供給と SMBH への降着率の関係を明らかにするため、SPH ベースの ASURA コード (斎藤貴之 (現神戸大) 開発) を用いて、SMBH を含む銀河合体の計算を修士課程の学生とともに行った。 (4) トーラス領域の輻射流体計算結果から CLOUDY(Ferland 2017)を用いた多次元電離ガス計算を行い、狭輝線領域が再現されるか調べ、Wada et al. 2018 として出版した。 (5) ドイツマックスプランク研究所に滞在し、共同研究者の M. Schartmann 博士らと、銀河中心領域のスターバーストについての理論計算の研究打ち合わせを行った。 (6) 準解析的銀河・AGN 進化モデルへの物理モデルの組み込みについて、SWANS/SNAWS チームと共同研究をおこなった。 (7) 日本天文学会秋季年会 (姫路市) 等で研究成果の発表を行った。

2019年度

本年度は(1) 本研究費で雇用中のポスドク研究員が中心となり、トーラス領域の磁気流体シミュレーションを多次元磁気流体コード CANS+を用いて行い、磁気流体不安定性についての成果を Kudoh, Wada(2019)として論文にまとめ、アメリカ天文学会誌 The Astrophysical Journal に投稿した (現在、最終査読プロセス中)。 (2) 銀河スケールからのガス供給と SMBH への降着率の関係を明らかにするため、SPH ベースの ASURA コードを用いて、minor merger process の計算を修士課程の学生とともに行った。その結果巨大ブラックホールを含む銀河合体では、降着率が最大になる際に、供給されたガスが中心核近傍に滞在し、中心核からの輻射を遮蔽することがわかった。この現象は観測される DOGs(Dust Obscured Galaxies)という種族を説明すると考えられ、現在詳細な解析を行っている。 (3) イタリアでの国際会議 (Behind the Curtain of Dust III)において、(2)の成果を中心に研究発表した。 (4) スウェーデン、シャルマース工科大学オンサラ天文台に滞在し、NGC 1377 の AGN からの分子ジェットの起源について共同研究を行った (出版準備中)。 (5) (1)の結果を中心に日本天文学会 (熊本大学) で発表した。 (6) AGN の遮蔽構造についての理論モデル (輻射圧と星形成によるフィードバックを考慮) を用いた論文を Astrophysical Journal に発表した(Kawakatu et al. 2020)。 (7) トーラス領域の電離ガス・分子ガス構造に対して、X線や分子吸収線による輻射輸送計算について、京都大学や東京大学の研究者と共同研究を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kudoh Yuki, Wada Keiichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Magneto Rotational Instability in Magnetized AGN Tori	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 139 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies6040139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wada Keiichi, Yonekura Kensuke, Nagao Tohru	4. 巻 867
2. 論文標題 Circumnuclear Multiphase Gas in Circinus Galaxy. III. Structure of the Nuclear Ionized Gas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 49 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Izumi Takuma, Wada Keiichi, Fukushige Ryosuke, Hamamura Sota, Kohno Kotaro	4. 巻 867
2. 論文標題 Circumnuclear Multiphase Gas in the Circinus Galaxy. II. The Molecular and Atomic Obscuring Structures Revealed with ALMA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae20b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wada, Keiichi; Fukushige, Ryosuke; Izumi, Takuma; Tomisaka, Kohji	4. 巻 852
2. 論文標題 Circumnuclear Multi-phase Gas in the Circinus Galaxy. I. Non-LTE Calculations of CO Lines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 88, 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa9e53	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imanishi, Masatoshi; Nakanishi, Kouichiro; Izumi, Takuma; Wada, Keiichi	4. 巻 853
2. 論文標題 ALMA Reveals an Inhomogeneous Compact Rotating Dense Molecular Torus at the NGC 1068 Nucleus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L25, L32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aaa8df	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Schartmann, M.; Mould, J.; Wada, K.; Burkert, A.; Durr, M.; Behrendt, M.; Davies, R. I.; Burtscher, L.	4. 巻 473
2. 論文標題 The life cycle of starbursting circumnuclear gas discs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,	6. 最初と最後の頁 953, 968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Aalto, S.; Muller, S.; Costagliola, F.; Sakamoto, K.; Gallagher, J. S.; Falstad, N.; K. Henig, S.; Dasyra, K.; Wada, K.; Combes, F.; Garcia-Burillo, S.; Kristensen, L. E.; Martin, S.; van der Werf, P.; Evans, A. S.; Kotilainen, J.	4. 巻 608
2. 論文標題 Luminous, pc-scale CO 6-5 emission in the obscured nucleus of NGC 1377	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics,	6. 最初と最後の頁 A22, A30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730650	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wada, Keiichi; Schartmann, Marc; Meijerink, Rowin	4. 巻 828
2. 論文標題 Multi-phase Nature of a Radiation-driven Fountain with Nuclear Starburst in a Low-mass Active Galactic Nucleus	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L19, L26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/828/2/L19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Aalto, S.; Costagliola, F.; Muller, S.; Sakamoto, K.; Gallagher, J. S.; Dasyra, K.; Wada, K.; Combes, F.; Garcia-Burillo, S.; Kristensen, L. E.; Martin, S.; van der Werf, P.; Evans, A. S.; Kotilainen, J.	4. 巻 590
2. 論文標題 A precessing molecular jet signaling an obscured, growing supermassive black hole in NGC 1377?	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A73, 12pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201527664	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Keiichi Wada
2. 発表標題 Dynamical pictures of tori and the multi-phase ISM
3. 学会等名 TORUS 2018 The many faces of the AGN obscuration (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Kudoh, Keiichi Wada
2. 発表標題 3D Magnetohydrodynamic Simulations of AGN Torus
3. 学会等名 THE POWER OF FARADAY TOMOGRAPHY --- TOWARDS 3D MAPPING OF COSMIC MAGNETIC FIELDS ---
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 AGN輻射噴水モデルII
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 工藤祐己
2. 発表標題 大局的3次元磁気流体計算による銀河中心核トラスの磁氣的活動性
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 Molecular, atomic, and ionized gas in AGN with starburst
3. 学会等名 Behind the curtain of dust II: The molecular and multi-wavelength view of activity in ULIRGs (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 AGN輻射駆動噴水モデル: Circinus galaxyでの検証
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 How can AGNs be obscured with the radiative and starburst feedback
3. 学会等名 Hidden Monsters: Obscured AGN and Connections to Galaxy Evolution (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 Multi-phase nature of the radiation-driven fountain with the nuclear starburst
3. 学会等名 HSC-AGN workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 Magneto-hydrodynamic modeling of the ISM around AGNs
3. 学会等名 Probing AGNs and Star formation: theory and observation (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田桂一
2. 発表標題 Probing AGNs and Star formation: theory and observation
3. 学会等名 IAU symposium.359: Galaxy evolution and feedback across different environment (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	工藤 祐己 (Kudoh Yuki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	長尾 透 (Nagao Tohru) (00508450)	愛媛大学・理工学研究科・教授 (16301)	
連携研究者	川勝 望 (Kawakatu Nozomu) (30450183)	呉工業高等専門学校・自然科学系分野・准教授 (55401)	
連携研究者	河野 孝太郎 (Kohno Kotaro) (80321587)	東京大学大学院・理学系研究科・教授 (12601)	