

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：17701  
研究種目：挑戦的研究（萌芽）  
研究期間：2018～2021  
課題番号：18K18774  
研究課題名（和文）活動銀河核での惑星系形成の可能性を探る

研究課題名（英文）Planet formation around AGNs

## 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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：ミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星への成長プロセスについて理論的に考察し、巨大ブラックホール周囲の雪線の外側（数パーセク）に、地球質量の10倍程度の「惑星」（プラネットと名付けた）が形成されることを理論的に示し、査読論文が米国天文学会誌（Wada, Tsukamoto, Kokubo 2019）に掲載された他、多数の国内外メディアでも紹介された。さらに、塵の凝集過程と物理的条件をより詳細に調べ、blanetは、比較的低輝度の活動銀河核の周りに形成されやすいことやその形成時間について解明し、米国天文学会誌に掲載された（Wada, Tsukamoto, Kokubo 2021）

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星形成と超巨大ブラックホールというこれまでまったく無関係だった2つの研究分野が理論的に関連することが世界で初めて示され、天文学や物理学の応用性や理論天文学の手法の有効性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：We found that a new class of planets, 'blanets' (i.e., black hole planets), can be formed from dust monomers around supermassive black holes (SMBHs) in the galactic center (Wada et al. 2019). We then investigated the dust coagulation processes and physical conditions of the blanet formation outside the snow line in more detail, especially considering the effect of the radial advection of the dust aggregates. We confirmed the necessary conditions for the blanet formation. The formation timescale of blanets is 70-80 million years for the SMBH mass of one million solar masses. The mass of the blanets ranges from 20 to 3000 Earth mass. Our results suggest that blanets could be formed around relatively low-luminosity AGNs during their lifetime (< 100 million years). The Discovery of blanets in external galaxies requires a breakthrough in observational technology.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：系外惑星 活動銀河中心核 ダスト 超巨大ブラックホール

## 1. 研究開始当初の背景

1995年のペガサス座51番星の発見以来、太陽系外の惑星の発見が相次ぎ、2020年現在4000個以上発見されている。いまや惑星は太陽に固有のものではなく、宇宙に普遍的に存在することが明らかになった。その全貌はまだ明らかではないが、太陽系は多様な惑星系の一形態に過ぎないことがわかってきたように、われわれの惑星形成について常識はこの20年間で大きく変化した。枠形成理論には落下問題などいくつかの理論的困難が指摘されているが、現実には惑星系が存在できるということは、その障害を回避できるということである。ここではそれらの理論的進展を踏まえ、星周囲以外での惑星形成の可能性を考える。

## 2. 研究の目的

惑星形成の非・常識的シナリオに挑戦する。活動銀河中心核 (AGN) 周りに豊富に存在するダストに着目する。AGN 近傍において、1) ダスト成長、2) ダストから微惑星形成、3) 微惑星から惑星系形成、の3つの過程を調べることによって、4000個以上発見されている系外惑星系とは似ても似つかないかもしれない、全く別の天体形成の可能性を理論的に追求する。ここでは、1) 原始惑星系円盤の応用としての微惑星形成と 2) 星周囲ではあり得ない環境下での微惑星形成、そして、3) ブラックホール重力場中での微惑星・惑星成長過程、という3つのまったく新しい観点から研究する。それにより、「星形成起源ではない惑星」の研究につながる可能性や、周恒星惑星系とは異なり、AGN というスペクトルが星とは全く異なる放射源まわりの「惑星系」を考えることで、我々の知識の地平線を広げる。

## 3. 研究の方法

研究代表者が近傍 AGN の研究で成功している「輻射磁気流体多次元計算」、「輻射輸送計算」(Wada 2012, Wada et al. 2016)と、原始惑星系円盤でのダスト成長理論モデルを組み合わせ、ダストが AGN 近傍で成長し、微惑星となるかを、解析的手法や数値シミュレーションにより調べる。微惑星系の進化は、衝突系重力多体計算によって原始惑星への成長過程を調べる。特に、1) 原始惑星系円盤の標準理論の延長としてのダストからの微惑星形成と 2) 星周囲とは異なる環境下での微惑星形成とその条件、そして、3) 巨大ブラックホール重力場中のダスト成長過程、に着目する(図1)。

## 4. 研究成果

(1) ミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星へと hit-and-stick phase や衝突圧縮 phase、自己重力収縮などの成長プロセスについて詳細に考察し、巨大ブラックホール周囲の雪線の外側(数パーセク)に、地球質量の10倍程度の「惑星」(ブラネットと名付けた)が形成されることを理論的に示し、論文が米国天文学会誌(Wada, Tsukamoto, Kokubo 2019)に掲載された。また、プレスリリースを国立天文台と鹿児島大学で共同で行い、新聞他多数のウェブサイトやニュートン3月号といった雑誌メディアでも紹介された。シャルマース工科大学オンサラ天文台(スウェーデン)、愛媛大学、神戸大学、マックス・プランク研究所(MPE)において、本研究内容の談話会を行った他、関連研究者と議論を行った。

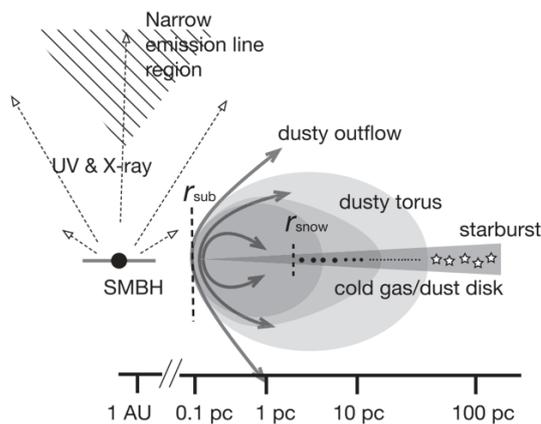


図1：AGN周囲のdust分布 (Wada et al.

2021)

(2) Wada et al. 2019をさらに発展させ、雪線の外側（数パーセク）での塵の凝集過程と物理的条件をより詳細に調べた。特に、ダスト凝集体の半径方向のドリフトの影響を考慮して、より詳細な研究を行った。その結果、乱流粘性を記述する無次元パラメータ $\alpha$ が、核周円盤では0.04より小さければ、ダストアグリゲイトの破壊を防ぎ、成長することができることがわかった。雪線付近における天体の形成タイムスケールは、巨大ブラックホール質量が100万太陽質量の場合、70–80 x 100万年であることがわかった（図2）。われわれはこの天体を"blanet"と名付け、その質量は約20地球質量から3000地球質量になることもわかった。また、blanetは、比較的低輝度の活動銀河核の周りに形成されやすいこともわかった（図3）。これらの結果をアメリカ天文学会誌 *Astrophysical Journal*において出版した（Wada, Tsukamoto, Kokubo 2021）。また、研究成果を日本天文学会春季年会（東京工業大学・オンライン）で発表した他、大阪大学、サンパウロ大学、国立天文台等のセミナーで発表した。

(3) blanet形成後の系の力学進化を調べるため、衝突系N-body code GPLUMを用いて、snowlineの外側にできると予想されるblanet系の力学進化の重力多体計算を行った(Ookaki 2022, 卒業研究)。衝突合体により、一部のblanetが数倍まで質量を増やし、周りの粒子を散乱することがわかった。今後はより長時間積分によりblanet系の力学進化を明らかにする必要がある。また、活動銀河核近傍の輻射流体計算により、ダストの昇華半径構造や円盤アウトフローの構造、円盤でのガス降着について調べた（Kudoh, Wada出版準備中）。これらにより、巨大ブラックホール周囲でのダスト成長や、それに伴う、赤外光度の変動などを用いたblanetの間接的検出の基礎となる知見を得た。

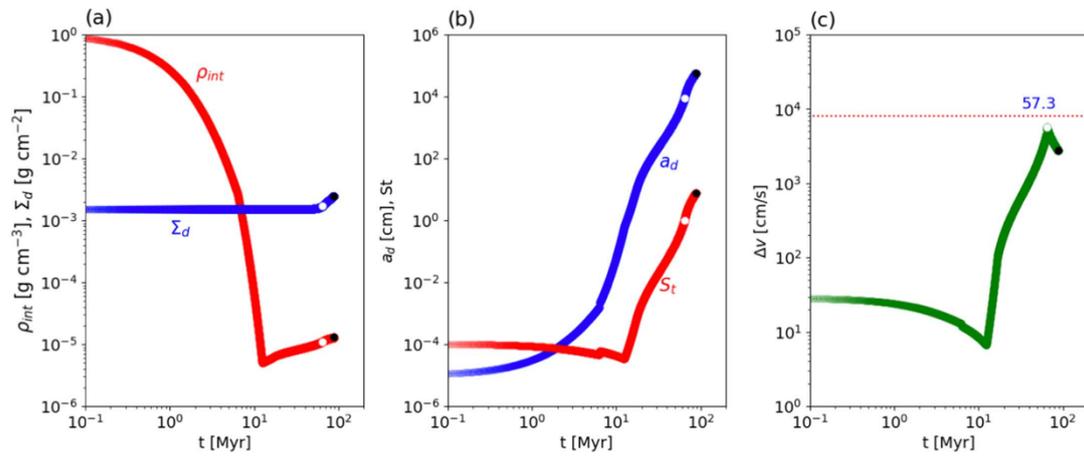


図2 AGN周囲のdust monomerの時間進化。a) dust内部密度、表面密度、b)ダストサイズ、stopping time、c) 衝突速度 (Wada et al. 2021)

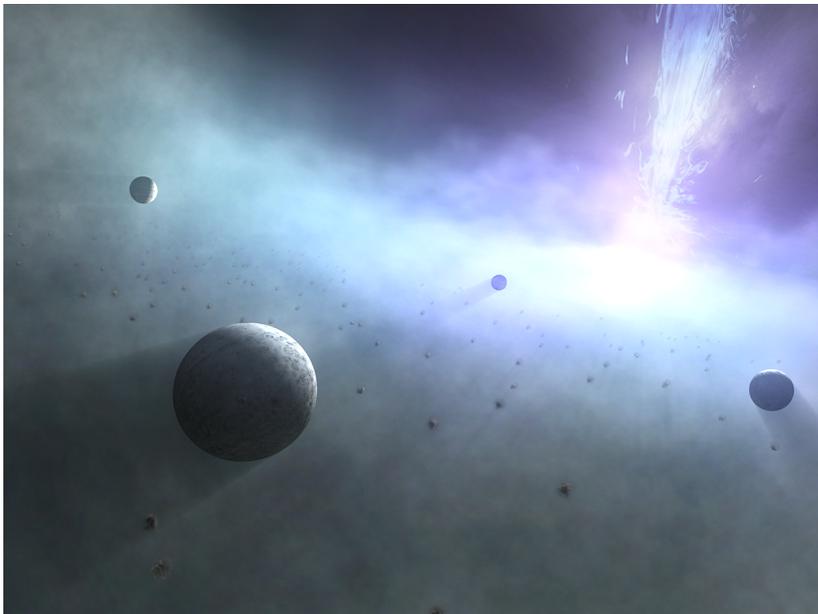


図3 : AGN周りの"blanet"の想像図©鹿児島大学

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wada Keiichi, Tsukamoto Yusuke, Kokubo Eiichiro	4. 巻 909
2. 論文標題 Formation of “Blanets” from Dust Grains around the Supermassive Black Holes in Galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96, 96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abd40a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wada, Keiichi; Tsukamoto, Yusuke; Kokubo, Eiichiro	4. 巻 886
2. 論文標題 Planet Formation around Supermassive Black Holes in the Active Galactic Nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 107, 113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab4cf0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和田桂一、塚本裕介、小久保英一郎
2. 発表標題 超巨大ブラックホールを周回する岩石・氷天体 blanet の形成
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ブラックホールの周りに広がる新たな「惑星」の世界  
<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20191125-cfca.html>

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 分 担 者	小久保 英一郎  (Kokubo Eiichiro)  (90332163)	国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・教授    (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------