

令和 6 年 6 月 22 日現在

機関番号：37104

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14542

研究課題名（和文）系外ガス惑星の熱進化モデルの構築：ガス降着過程の影響の解明

研究課題名（英文）Thermal evolution models of giant planets: effect of gas accretion onto protoplanets

研究代表者

國友 正信 (Kunitomo, Masanobu)

久留米大学・医学部・講師

研究者番号：20794621

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：惑星形成の現場である原始惑星系円盤の進化に注目し、3つの成果を得た。原始惑星系円盤の長時間進化計算と恒星進化計算を結合させ、中心星からのX線・紫外線の照射が果たす役割を解明した。円盤ガスの組成が時間とともに変動することに注目し、円盤ガスの中心星への降着を考慮した恒星進化計算を行い、太陽の内部に従来の理論予想よりも大きな組成勾配が生じうることを発見した。さらに、円盤ガスの降着を考慮した理論モデルでは、長年議論になっていた太陽ニュートリノの問題を解決することができることを発見した。これは太陽物理学の問題を、これまで考慮されてこなかった星形成・惑星形成過程により解決する学際的な研究成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、これまで必ずしも考慮されてこなかった星と円盤の共進化過程に注目した学際性・新規性にある。原始惑星系円盤の進化に中心星の進化が重要であること、逆に円盤からの降着が中心星の進化に影響することを解明した。太陽物理の問題を、最新の星形成・惑星形成・原始惑星系円盤・恒星進化の理解を総動員し解決策を示した。太陽の形成・進化の理解という天文学・素粒子物理学の複数の分野にわたる重要な問題を解決したことに学術的意義がある。

本研究の社会的意義は、地球のような惑星の誕生の理解に必要な不可欠な原始惑星系円盤の進化過程、もっとも身近な恒星である太陽の誕生・進化過程の理解を進める貢献をしたことにある。

研究成果の概要（英文）：We focused on the evolution of protoplanetary disks where planets are formed and obtained three results. First, by combining long-term disk evolution calculations and stellar evolution calculations, we revealed the crucial role of the irradiation of high-energy photons from the central star. Next, we focused on the evolving composition of the protoplanetary disk gas and investigated the consequences of the accretion of the protosolar disk gas onto the young Sun. We found that the accretion can be imprinted in the solar interior as a larger compositional gradient than the standard solar models. Third, we found that the model with accretion matches observed neutrino fluxes, meaning that accretion can be the solution to the "solar modeling problem", which has been studied over the last two decades in solar physics. This is an interdisciplinary result resolving the issue in solar physics with star and planet formation processes.

研究分野：理論天文学

キーワード：原始惑星系円盤 惑星形成 降着 原始星 太陽 ニュートリノ

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の開始当初、木星のような巨大ガス惑星の熱進化の理論モデルに不定性が残されていた。ガス惑星は形成時に集積熱を保持しており、放射により熱を失うことで、光度や半径が時間とともに減少すると考えられている。しかし、形成時の集積熱に対する理解が乏しく、ガス惑星の熱進化に不定性が残されていた。これにより直接撮像された系外ガス惑星の質量を正確に決定できず、惑星の特徴づけの大きな障壁となっていた (Marley et al. 2007)。

ガス惑星の形成過程や集積熱を理解する上で、原始惑星系円盤の進化の理解は必要不可欠である。原始惑星系円盤は若い星を取り巻くガスとダスト (固体) からなる円盤であり、惑星が形成する現場である。ガス惑星の形成の標準的な理解は、まず原始惑星系円盤内の固体が集積し原始コアを形成した後、コアに円盤のガスが暴走的に降着し、大質量のガスおよび集積熱を獲得する、というものである。したがって円盤ガスの質量の時間進化が惑星の集積熱の獲得に大きく影響する。しかし、本研究の開始時には原始惑星系円盤がいつ、どのように散逸するのかについて理論的に説明されていない問題が残されていた。

ガス惑星の熱進化の理解には、円盤ガスの質量だけでなく組成の進化も本質的に重要である。円盤ガスの組成はダストの合体成長や移動に伴い大きく変動すると考えられている。天体内部の組成構造と熱構造は対流安定性を通して相互に影響しあうため、惑星が獲得する円盤ガスの組成は熱進化に影響しうる。円盤ガスの組成について理論的・観測的に盛んに研究されているものの、不定性が残されている状況だった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3つである。

- 原始惑星系円盤の進化・散逸過程について、観測事実と統合的な理論モデルを確立する
- 原始惑星系円盤の組成進化のモデルを検証する
- 円盤ガスの進化のモデルを用いて、ガス降着過程がガス惑星の熱進化に与える影響を解明する

## 3. 研究の方法

### (1) 円盤ガスの長期進化モデル：円盤長期進化計算と恒星進化計算の結合

原始惑星系円盤の進化過程は理論・観測双方から盛んに研究が行われてきた。過去の研究から、円盤ガスは中心星への降着と、円盤からのガスの流出 (円盤風) の2つの過程によって進化し、典型的に数百万年から1千万年程度で散逸すると考えられている。本研究では未解決問題の一つであった「円盤は中心星が重くなるほど速く散逸する」という観測事実を解明することに取り組んだ。系外ガス惑星は太陽より重い星の周りにも数多く検出されているため、この問題は重要である。

本研究では、これまで考えられてこなかった中心星の進化の影響を考慮した。円盤風の一つの機構として、中心星からのX線・紫外線の照射によって加熱された円盤上層のガスが熱的に流出する過程 (光蒸発) がある。中心星が円盤進化のタイムスケールで進化する場合、X線・紫外線の光度が変化し光蒸発の効率が変化する可能性がある。

数百万年にわたる円盤進化を計算するため、空間1次元のシミュレーションを行い、円盤ガス面密度の時間発展を計算した。すでに過去の研究 (Kunitomo et al. 2020) で開発済みの数値計算コードに、星のX線・紫外線の光度の時間進化を考慮した光蒸発の影響を組み込んだ。恒星進化計算は別の研究 (Kunitomo et al. 2011) で計算した結果を用いた。

本研究の理論モデルの構築は東京工業大学の井田 茂氏、竹内 拓氏、東京大学の鈴木 建氏、観測結果との比較はリーズ大学のOlja Panić氏、James M. Miley氏と共同して行った。

### (2) 円盤ガスの降着を考慮した太陽モデル：星形成論・惑星形成論・恒星進化論の結合

円盤内のダストの運動をシミュレートした過去の研究から、円盤ガスの組成は初期に高い金属量、後期に低金属量になることが示唆されている (例えば Appalgren et al. 2020)。前者は円盤内のダストが成長しガスの抵抗により中心星に急速に落下すること、後者は円盤内でのダストの枯渇や原始惑星による落下の阻害の影響による。この惑星形成理論が予言する円盤ガスの組成の進化を検証するために、円盤ガスの多くが中心星に降着することに注目した。若い太陽へ降着したガスの組成の痕跡が現在の太陽の内部に残されている可能性があるため、円盤ガスの降着による太陽の形成段階から現在までの進化を計算した。

計算には過去の研究 (Kunitomo et al. 2017, 2018) で開発した、原始星への降着過程を組み

込んだ恒星進化計算コードを用いた。このコードに新たに円盤ガスの組成の時間進化の影響を組み込んだ。

太陽は豊富な観測データがあるため、理論モデルを精密に検証することができる。太陽の内部構造は分光・日震学・ニュートリノ観測の3つによって制約されてきた。これらの観測から、円盤ガスの組成の進化を検証できるか検討した。

本研究の理論モデルの構築はコート・ダジュール天文台のTristan Guillot氏、観測との比較や結果の解釈はGuillot氏およびジュネーブ天文台のGaël Buldgen氏と共同して行った。

### (3) 円盤ガスの降着を考慮したガス惑星の形成・進化モデル

上記の研究成果を踏まえて、原始ガス惑星への降着を考慮したガス惑星の熱進化モデルを数値計算した。計算には上記(2)の恒星進化計算コードを用いた。

## 4. 研究成果

### (1) 星の進化が駆動する中質量星まわりの原始惑星系円盤の散逸

恒星進化を考慮した3太陽質量の星のまわりでの円盤進化の数値計算結果を図1(左)に示す。円盤ガスははじめ中心星への降着に伴い質量が減少し、ある時点で光蒸発の影響で円盤に穴が空く(1点鎖線)。その後、外側の円盤からの質量供給がなくなった内側の円盤は速やかに中心星へ降着し、外側の円盤も光蒸発により速やかに散逸する。このような面密度の進化は従来の理論(例えばClarke et al. 2001)と定性的に同じである。しかし、光蒸発の効率が一定であると素朴に仮定していた従来の理論とは異なり、光蒸発の効率は時間とともに大きく変化しうることが発見した。

太陽より重い星は進化のタイムスケールが短く、円盤が散逸するまでに星の構造が大きく変化することが知られている。初期は対流に起因する活発な磁気活動により星は強いX線が放射するが、時間が経つと星表面の対流活動が失われX線は弱くなる。一方で、時間とともに星の表面温度が高くなることで光球面から放射される遠紫外線が強くなることがわかった。光蒸発率が恒星進化とともに大きく変化しうるといふ発見は、惑星科学と恒星進化論を組み合わせた学際的な研究によって初めて明らかになったものであり、大きな意義がある。

図1(左)のような計算を様々な質量の星の場合に対して行い、円盤寿命が中心星の質量とともにどのように変化するかを調べた。図1(右)に示すように、恒星進化の影響を組み込んだ円盤進化計算では観測が示した「円盤は中心星が重くなるほど速く散逸する」という傾向を自然に再現することがわかった。

本研究の結果は、現実的な円盤進化的理論の構築に貢献したことのみならず、中質量星まわりの惑星形成の議論にもインパクトがある。一つの未解決問題として、中質量星まわりには星の近くをまわる惑星が乏しいという、太陽のような低質量星まわりの惑星系とは異なる特徴がある(Sato et al. 2008)。中質量星まわりでは円盤寿命が短く、遠くで誕生した惑星が星の近くまで移動できない可能性が指摘されているため(例えばBurkert & Ida 2007)、本研究で解明した中質量星まわりの円盤進化モデルはこの問題の解決にもつながることが期待される。

本成果をまとめた論文(Kunitomo et al. 2021)は国際学術誌The Astrophysical Journalにて掲載された。

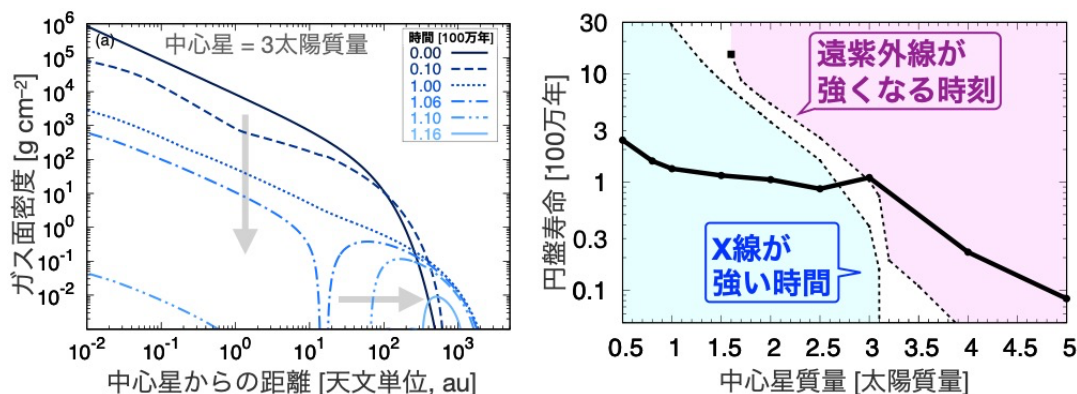


図1: (左)3太陽質量の星のまわりの円盤ガス面密度の時間進化。(右)円盤寿命の中心星質量への依存性(どちらもKunitomo et al. 2021の図を改変)。

### (2) 円盤ガスの降着が作る太陽内部の大きな組成勾配

惑星形成過程(ダストの成長・移動)による円盤ガスの組成の進化を考慮した、太陽の形成から現在までの進化を計算した。円盤ガス、すなわち星への降着流の組成は、惑星形成理論が示唆する初期の高金属量から後期の低金属量への進化を仮定した(図2左)。計算の結果、降着の影



響で現在の太陽の内部に大きな組成勾配が生じることがわかった (図2右)。この構造の理解には円盤ガスの降着だけでなく、星の構造も影響する。太陽質量の星は、形成し始めてからおよそ百万年までの初期は星全体が対流状態にあるため、降着したガスは星全体で混合する。そのため高金属量なガスの降着により、星全体が高金属量になる。後期段階では星の中心部では対流が起きなくなり、中心部は初期に作られた高金属量な構造が保持される。一方で低金属量な降着により、対流する星表面部のみ低金属量になる。

我々の太陽モデルは、星形成論・惑星形成論・恒星進化論の知見を組み合わせた世界で初めての研究成果であることに大きな意義がある。星・惑星形成過程を考慮せず「太陽は一樣な組成をもって誕生した」という素朴な仮説に基づく従来の太陽モデルは見直しを迫られることになる。

本成果をまとめた論文(Kunitomo & Guillot 2021)は国際学術誌 Astronomy & Astrophysics にて掲載された。

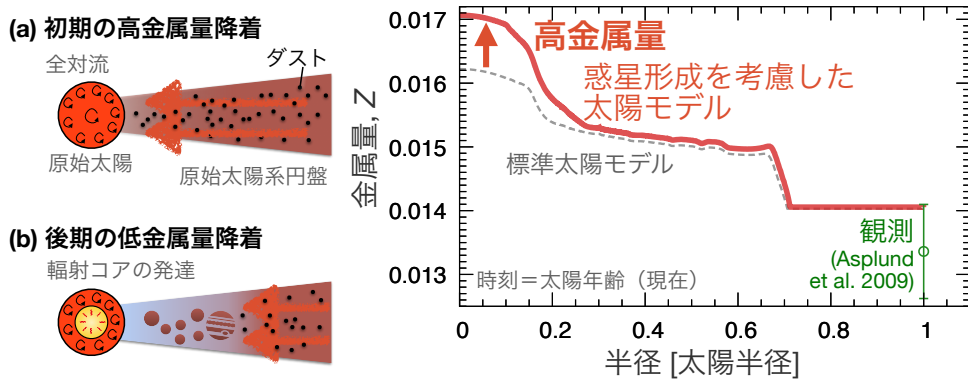


図2: (左)降着流の組成と原始太陽の内部構造の時間進化の概念図。(右)現在の太陽の金属量分布(Kunitomo & Guillot 2021 の図を改変)。

### (3) 円盤ガス降着による太陽モデリング問題の解決

研究成果(2)から、円盤ガスの組成が進化する場合、従来のモデルに比べて中心部の金属量が大きくなることがわかった (図2右)。どちらのモデルがより現実的かを太陽の観測によって検証した。太陽の中心部は電磁波によって見ることは不可能だが、太陽の中心部は核融合反応が起きているため、ニュートリノを用いて太陽中心部の情報を得ることができる。

計算の結果、円盤ガスの組成の進化を考慮した場合、ニュートリノ流束が大きくなり、より観測と整合的であることがわかった (図3)。つまり太陽ニュートリノの観測から、惑星形成理論が予想する円盤の組成進化を支持する結果が得られた。惑星形成過程が太陽ニュートリノに影響するというこれまで全く考えられてこなかった事実を発見した画期的な研究成果である。

この発見がもつ意味は大きく、特に太陽物理学の問題の解決につながると期待される。太陽の内部構造は分光・日震学・ニュートリノの3つの観測により、表面組成、内部の熱構造、中心部の熱構造が制約されてきた。約20年前に表面金属量の推定値が大きく下方修正されてから、従来の太陽モデルは3つの観測を同時に再現することができなくなった (Asplund et al. 2005, 2009, 2021)。この理論と観測の不一致は「太陽組成問題」、「太陽モデリング問題」と呼ばれ、盛んに議論されてきたが、未解決のままだった。この問題に対し、本研究により星・惑星形成過程を考慮すればニュートリノ流束 (図3) と低金属量な表面金属量 (図2右) を同時に再現できることがわかった。さらに近年実験により示唆されている太陽内部での不透明度 (オパシティ) の不定性を考慮すれば日震学観測も再現できることが示されている (Bailey et al. 2015, Buldgen et al. 2019, Kunitomo & Guillot 2021)。降着流の組成進化とオパシティの増大を考慮した我々のモデルは、表面金属量・日震学観測・ニュートリノ流束の3つを同時に再現する世界で初めてのモデルとなった。つまり、太陽物理学の長年の謎の一つの鍵を握っていたのが、これまで考えられてこなかった星・惑星形成過程だったと考えられる。現実的な太陽モデルの構築は太陽・恒星物理学だけでなく、星形成論、銀河、惑星科学、素粒子物理

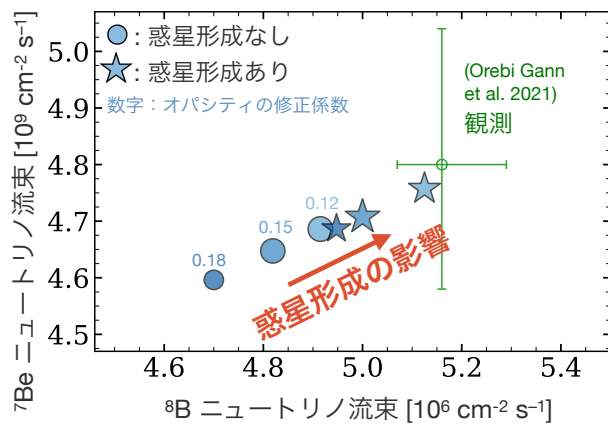


図3: ニュートリノ流束の計算結果と観測 (緑点) の比較 (Kunitomo et al. 2022 の図を改変)。丸が一定の組成の降着流を仮定した場合、星印が惑星形成過程による降着流の組成の時間変動を考慮したモデルの結果。それぞれオパシティの不定性を考慮した3つのモデルを示す。

学など多くの分野に影響する重要な問題であるため、波及効果は大きい。

本成果をまとめた論文 (Kunitomo, Guillot & Buldgen 2022) は国際学術誌 *Astronomy & Astrophysics* にて掲載された。

本研究(2)(3)で構築した太陽モデルは自転の影響を考慮しておらず、太陽表面のリチウムやベリリウムなどの軽元素量も再現できていない。自転による混合過程の影響などを考慮した、さらに現実的な太陽モデルの開発に向けて、本研究を基盤研究(C)24K07099 へと引き継ぎ継続して取り組んでいる。

#### (4) 円盤ガスの降着を考慮したガス惑星の形成・進化モデル

原始ガス惑星の形成期を含めた進化計算を行った。15 地球質量の低質量な原始ガス惑星に対して円盤ガスを降着させ、1 木星質量の惑星の形成を計算し、その後の長時間進化を計算した。過去の研究で示されているとおり、降着期の集積熱の違いにより、およそ数百万年まではガス惑星の光度・大きさにばらつきが生じることが確かめられた。

数十億年に及ぶガス惑星の進化過程を正確に予言するためには、降着による形成過程と天体内部の混合過程を統合的に考慮する必要がある。混合過程として、循環・シア不安定性・磁気 Taylor 不安定性など自転が駆動する天体内部の混合が重要であると考えられている (Eggenberger et al. 2022)。太陽での研究を参考に混合過程の計算手法のモデル化を行い、計算コードの開発を行った。現在も研究を進めており、形成過程と混合過程を統合したモデルの開発は今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kunitomo Masanobu, Guillot Tristan, Buldgen Gael	4. 巻 667
2. 論文標題 Evidence of a signature of planet formation processes from solar neutrino fluxes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244169	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 該当する

1. 著者名 Kunitomo Masanobu, Guillot Tristan	4. 巻 655
2. 論文標題 Imprint of planet formation in the deep interior of the Sun	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A51 ~ A51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141256	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 Masanobu Kunitomo, Shigeru Ida, Taku Takeuchi, Olja Panic, James M. Miley, Takeru K. Suzuki	4. 巻 909
2. 論文標題 Photoevaporative Dispersal of Protoplanetary Disks around Evolving Intermediate-mass Stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 109 ~ 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abdb2a	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19件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Kunitomo, M., Guillot, G. & Buldgen, G.
2. 発表標題 Effects of pre-main sequence evolution
3. 学会等名 Future of Solar Modelling (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kunitomo, M., Guillot, G. & Buldgen, G.
2. 発表標題 Evidence of a signature of planet formation processes from solar neutrino fluxes
3. 学会等名 Protostars & Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kunitomo, M., Guillot, T. & Buldgen, G.
2. 発表標題 Solar neutrino fluxes show the signature of planet formation processes
3. 学会等名 Cool Stars 21 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kunitomo, M., Guillot, T. & Buldgen, G.
2. 発表標題 Solar neutrino fluxes show the signature of planet formation processes
3. 学会等名 IAU GA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kunitomo, M., Suzuki, T. K., Inutsuka, S., Ida, S., Takeuchi, T., Panic, O., & Miley, J. M.
2. 発表標題 Dispersal of protoplanetary disks by the combination of thermally and magnetically driven disk winds
3. 学会等名 IAU GA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T., Buldgen, G.
2. 発表標題 太陽ニュートリノによる太陽の形成・進化過程の制約
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T., Buldgen, G.
2. 発表標題 惑星形成が太陽ニュートリノフラックスに及ぼす影響について
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T., Buldgen, G.
2. 発表標題 降着流の組成進化を考慮した太陽の形成・進化モデル
3. 学会等名 第35回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kunitomo, M. & Guillot, T.
2. 発表標題 Consequences of planet formation on the stellar composition
3. 学会等名 The Star-Planet Connection (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Kunitomo, M. & Guillot, T.
2. 発表標題 Effect of protostellar accretion on the thermal and chemical evolution of stars
3. 学会等名 Star Formation: From Clouds to Discs (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kunitomo, M. & Guillot, T.
2. 発表標題 Imprint of planet formation in the deep interior of the Sun
3. 学会等名 2021 Sagan Exoplanet Summer Virtual Workshop - Circumstellar Disks and Young Planets (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T.
2. 発表標題 惑星形成が太陽ニュートリノフラックスに及ぼす影響について
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T.
2. 発表標題 惑星形成が太陽内部構造に及ぼす影響について
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T.
2. 発表標題 惑星形成が太陽内部構造に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國友 正信, Guillot, T.
2. 発表標題 惑星形成が太陽内部構造に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國友 正信, 井田 茂, 竹内 拓, Olja Panic, James M. Miley, 鈴木 建
2. 発表標題 中質量星周りの円盤の消失における恒星進化の影響について
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國友 正信, 井田 茂, 竹内 拓, Olja Panic, James M. Miley, 鈴木 建
2. 発表標題 中質量星周りの円盤の消失における恒星進化の影響について
3. 学会等名 第33回 理論懇シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanobu Kunitomo, Takeru K. Suzuki, Shu-ichiro Inutsuka, Shigeru Ida, Taku Takeuchi, Olja Panic, James M. Miley
2. 発表標題 Dispersal of protoplanetary disks: Effects of photoevaporation with stellar evolution and MHD winds
3. 学会等名 Cool Stars 20.5 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanobu Kunitomo, Tristan Guillot
2. 発表標題 An imprint of planet formation in the deep interior of the Sun
3. 学会等名 Cool Stars 20.5 (国際学会)
4. 発表年 2021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

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			
スイス	ジュネーブ大学			
英国	リーズ大学			
フランス	コート・ダジュール天文台			