

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 6月 1日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840046

研究課題名（和文） 「金属量」依存性による、原始惑星系円盤の散逸メカニズムの観測的
解明研究課題名（英文） Observational study of protoplanetary disk dispersal mechanism
using metallicity dependence

研究代表者

安井 千香子 (YASUI CHIKAKO)

国立天文台・ALMA 推進室・研究員

研究者番号：00583626

研究成果の概要（和文）：円盤の散逸メカニズムの解明は、惑星の形成過程を明らかにする上で極めて重要である。われわれは、散逸とくに関係すると考えられる「金属量」という有望なパラメータに着目し、低金属量下から高金属量下に移る幅広い金属量範囲にある多数の星形成領域について、「すばる」8.2m望遠鏡を用いた近赤外線高感度撮像観測し、金属量が高いほど円盤寿命が長いという金属量依存性を求めた。その結果、遠紫外線もしくはX線による光蒸発が最も有力な原始惑星系円盤散逸のメカニズムの1つであることを示唆した。また、中質量星での円盤寿命を初めて定量的に求め、小質量星の約半分であり、ごく内側が非常に速いタイムスケールで消失するという中質量星特有の円盤進化を示唆した。

研究成果の概要（英文）：It is essential to clarify the mechanism of protoplanetary disk dispersal for understanding planet formation processes. We observed star-forming regions in higher and lower metallicity environments with Subaru 8.2m telescope and found the metallicity dependence of disk lifetime: the longer lifetime in higher metallicity environments. Our results suggest that photoevaporation by FUV and/or X-ray is one of the most dominant mechanism in disk dispersal process. We also quantitatively estimated disk lifetime of intermediate-mass stars for the first time and found that the lifetime is about half of that for low-mass stars and that the innermost disk disappears in very short timescale while entire disk disappears almost simultaneously for low-mass stars.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,240,000	372,000	1,612,000
2011年度	1,130,000	339,000	1,469,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,370,000	711,000	3,081,000

研究分野：

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：星・惑星形成、赤外線天文学、電波天文学

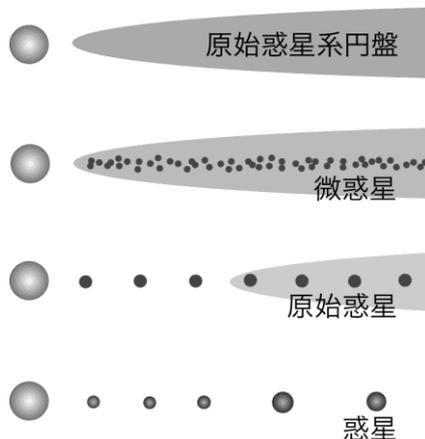
1. 研究開始当初の背景

| (1)惑星の形成過程の解明は、地球科学・生

命科学など、幅広い分野に大きく影響する、現代天文学最大のテーマの1つである。惑星は星の周囲を取り巻く原始惑星系円盤が散逸する中から生まれるため、円盤の散逸メカニズムの解明は、惑星の形成過程を明らかにする上で極めて重要である。

(2) 原始惑星系円盤の散逸過程の解明のために、ハッブル望遠鏡やスピッツァー望遠鏡といった最新の宇宙望遠鏡や、地上の大型望遠鏡を使った観測が世界中で進められている。しかし、最も近傍の原始惑星系円盤でさえ、近年ようやくその全貌の撮像に成功した段階であり、原始惑星系円盤が散逸する様子を直接捉えることは現在の技術では非常に難しい。そのため、数少ない観測からの示唆をもとに、様々な理論モデルが乱立する状況だった。

(3) そこでわれわれは、散逸にとくに関係すると考えられる「金属量」という有望なパラメータに着目した独自の観測研究をすすめている。「金属量」とは水素とヘリウム以外の重元素量のこと、この化学的要素は、様々な物理的要素と並び、天文学における重要な要素となっている。それにより、加熱・冷却過程といった天体の生成に最も影響する物理化学過程が大きく左右される。また、原始惑星系円盤の中では、金属量は数%に過ぎないが、それが生成される惑星の核となるため(図1)、金属量こそが惑星形成に直結する最重要パラメータの1つと考えられている。そして現在、系外惑星において唯一知られている明確な関係「惑星-金属量関係」(金属量が高い星ほど惑星を持つ確率が高いという観測的に得られた関係)からも、金属量こそが惑星形成を理解するためのキーパラメータである可能性が示唆されている。



【図1】惑星形成の標準モデル
原始惑星系円盤の散逸過程で、円盤中のダストを惑星が形成される。

2. 研究の目的

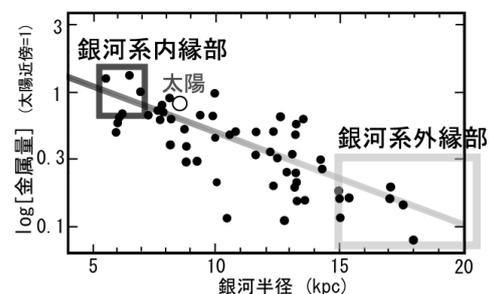
金属量は惑星形成においても非常に重要なパラメータであるが、近傍の天体により観測対象が認知されておらず、まったく手が付

けられていなかった。我々はこれまで、金属量が非常に低い銀河系の外縁部に着目し、そこでの星生成領域の近赤外線観測を行った。その結果、低金属量下では原始惑星系円盤の寿命が太陽近傍での寿命(約500万年)と比較して非常に早い(約100万年)という金属量依存性を初めて示唆した。円盤の寿命が短くなると惑星が作りにくくなることから、系外惑星で広く知られている「惑星-金属量関係」を説明する1つの初めての明確な観測的証拠を示した。

本研究では、「高金属量」下を含む幅広い金属量下での多数の星生成領域における原始惑星系円盤の寿命を求め、原始惑星系円盤進化の金属量依存性を統計的に調べる。その結果、現存する様々な理論モデルに制約をつけ、まだ解明されていない円盤散逸メカニズムの最初の手掛かりを得る。

3. 研究の方法

(1) ターゲットセレクション 私たちが住む銀河系は、半径約20kpcの円盤状に星が分布しており、太陽は銀河中心から約8kpcに位置している。そして、内縁部ほど金属量が高く、外縁部ほど低いという金属量勾配が知られており、その金属量は約1/10倍から10倍までの非常に幅広い範囲を取る(図2)。これまで、低金属量星生成領域として銀河系外縁部に十分な数のサンプルを選択し、すばる望遠鏡での近赤外線観測を進めてきた。一方、高金属量星生成領域は銀河系内縁部にあるが、そのような領域は星の密度が非常に高く観測が難しいために、カタログや系統的な研究はほとんど存在しなかった。しかし、この5年で全天の高感度な赤外線サーベイ(近赤外: 2MASS, 中間赤外: スピッツァー衛星)が完成し、本研究を進める上で極めて良いタイミングで星生成領域のカタログが整備され、10領域以上の多数のサンプルを用意する。



【図2】銀河系内の星生成領域の金属量

(2) 近赤外線観測 原始惑星系円盤の内側の有無は、円盤中のダストからの近赤外線(1-5 μ m)放射の超過により知ることができる。近赤外波長域の異なる3、4波長の観測だけから円盤の有無を判定することができるが、この非常に簡単な手法により円盤を持って

いる星の割合(「disk fraction」)を年齢の異なる多数の星生成領域で導出し、寿命を統計的に見積もることができる(図3)。本研究では、金属量が大きく異なる遠方の天体を狙うため、感度と空間分解能が必要となる。そこで、8mクラスの大型望遠鏡である「すばる」望遠鏡を用いた高感度なJHKバンド近赤外線撮像観測により、これまでの低金属量下の結果に加え、今までの研究でカバーできなかった高金属量サイドの星生成クラスターの観測を進め、高金属量下の円盤の内側の有無と寿命を明らかにする。その結果を既に得られている低金属量下、太陽金属量下での結果と合わせて円盤の内側が散逸するタイムスケールの金属量依存性を定量的に確認し、解析的なかたちで表す。異なる金属量下の星生成領域の詳細な観測例は過去に無かったために、諸量の導出手法を確立する。

(3)原始惑星系円盤の散逸過程の金属量依存性の導出と円盤散逸メカニズムの解明
観測的に得られた散逸過程の金属量依存性を、理論モデルで予想される金属量依存性と比較する。理論モデルにも、金属量依存性が有るものもあれば、無いものもある。観測から得られた金属量依存性と理論モデルで予想される金属量依存性と比較することにより、最も有望な散逸メカニズムを初めて観測的に特定する。

4. 研究成果

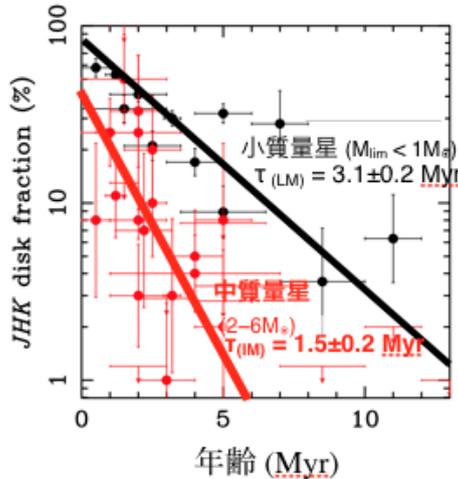
(1)低金属量下において円盤散逸が速くなるという結果の原因として、減光が少ないために光蒸発が効率的に起こる可能性が第一に考えられ、その中で通常考えられているガスが関係する極紫外線(EUV)ではなく、ダストすなわち金属が関係するX線もしくは遠紫外線(FUV)が主に効くという円盤散逸のメカニズムを初めて観測的に示唆した(雑誌論文②、学会発表④)。一般科学誌「NATIONAL GEOGRAPHIC」誌で紹介された)。このような示唆は、従来の太陽近傍の観測ではいくら詳細が見えても得ることは難しかった。

(2)次に、原始惑星系円盤の寿命についての研究を、惑星が生成されやすいと考えられる高金属量領域へ展開した。金属量が太陽近傍よりも3倍以上高いと考えられている銀河系内縁部の星生成クラスターについて、太陽より2倍から6倍重い星(中質量星)については近赤外線広域サーベイUKIDSSによるデータを用いて、また太陽と同程度の軽い星(小質量星)についてはすばる望遠鏡を用いた近赤外線観測により高感度高分解能なデータを取得し、両質量範囲について高金属量下の原始惑星系円盤の残存率を初めて導出した。それらと各クラスターの年齢の関係より、中質量星については、下記の(3)で新たに確立した手法より、太陽近傍では約300万年の年

齢でほとんど全ての星が既に原始惑星系円盤を失うことが導出されたが、高金属量下においては約2千万年の年齢の領域であっても約10%の星が未だに円盤を持っている可能性が示唆された。一方、小質量星についても、太陽近傍ではほとんど全ての星が約1千万年の年齢で原始惑星系円盤を失うことが知られているが、高金属量下においては、約2-3千万年の年齢の領域であっても約30%もの多くの星が未だに円盤を持っている可能性が示唆され、高金属量下では円盤の寿命が、太陽金属量下での円盤寿命に比べて極端に長いことを示唆した。

ただし、限られた観測日数の中で天候に恵まれなかった日があった点、従来の小質量星での比較に加え観測データの入手が比較的容易な中質量星についての比較の有用性を見出したものの、比較対象となる太陽金属量下においてさえ円盤寿命導出の定量的な研究が行われておらず、自ら残存率の導出方法の確立と円盤寿命の導出を行う必要が生じた点により円盤残存率を実際に導出することができた天体の数はまだまだ少ない。今後、引き続き数多くの天体について円盤残存率を導出し、それらと年齢との関係より、原始惑星系円盤寿命の金属量依存性について統計的な議論を行いたい。

(3)近赤外線(約1-2 μ m)の観測により、太陽より2倍から6倍重い星(中質量星)の円盤寿命導出の試みを行った。まず、感度が非常に高く比較的容易に観測が可能な近赤外線観測のみでも円盤を持つ星を検出する手法を確立した。この方法を用いて、求められたJHKIMDFは、クラスターの年齢とともにおよそ指数関数的に減衰することが分かり、減衰曲線のフィットから中質量星の characteristic decay timescaleが、 1.5 ± 0.2 Myrと初めて定量的に見積られた。これは、小質量星(約0.1-1太陽質量)における decay timescale(約3Myr)と比べておよそ半分であり、decay timescaleは中心星質量(M_*)に対して $M_*^{-0.5 \pm 0.2}$ に比例するという依存性となることがわかった。また、円盤の寿命について、近赤外線でトレースされる最も内側の円盤と、中間赤外線でトレースされるやや外側の円盤の進化には約4Myrの有意な差が存在することも分かった。このような時間差は小質量星では見られなかったことから、この長い“transition phase”は中質量星に特有の円盤進化を示唆した(学会発表①、②)。今後、ここで確立された手法を用いて、銀河系全体、更には系外近傍銀河の非常に幅広い領域について初めて円盤研究の展開が期待される(学会発表③)。



【図3】中質量星の円盤寿命
太陽近傍の星生成クラスターの JHK disk fraction と年齢の関係。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 小麦真也、安井千香子、他、Deep CO Observations and the CO-to-H₂ Conversion Factor in DDO 154, a Low Metallicity Dwarf Irregular Galaxy, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、63 巻、1 号、2011、L1-L5 頁)
- ② 安井千香子、小林尚人、Alan T. Tokunaga、齋藤正雄、東谷千比呂、Short Lifetime of Protoplanetary Disks in Low-metallicity Environments, The Astrophysical Journal Letters, 査読有、723 巻、1 号、2010、L113-L116 頁)
DOI: 10.1088/2041-8205/723/1/L113
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011PA SJ...63L...1K>
- ③ 池田優二、小林尚人 Kuzmenko P. J. Little S. L、安井千香子、他、Fabrication and current optical performance of a large diamond-machined ZnSe immersion grating, Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation. Edited by Atad-Ettedgui, Eli; Lemke, Dietrich. Proceedings of the SPIE, 査読無、7739 巻、2010、77394G-77394G-11 頁
DOI:10.1117/12.856631

[学会発表] (計 4 件)

- ① 安井千香子、中質量星における原始惑星

系円盤の寿命、日本天文学会春季年会、2012 年 3 月 12 日、龍谷大学 (京都府)

- ② 安井千香子、The Lifetime of Protoplanetary Disks Surrounding Intermediate-mass stars、2012 年 1 月 12 日、Austin Convention Center (アメリカ合衆国、テキサス州 オースティン)
- ③ 安井千香子、「AO で探る、系外銀河における星生成」、すばる望遠鏡次世代 AO ワークショップ、2011 年 9 月 9 日、大阪大学 (大阪府)
- ④ 安井千香子、低金属下における原始惑星系円盤の寿命、日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会、2011 年 5 月 24 日、幕張メッセ国際会議場 (千葉県)

[その他]

研究成果について、一般科学誌で紹介された。

- ① 「NATIONAL GEOGRAPHIC」誌 (December 2010)
“Heart of the Milky Way”
(p. 92-99, <http://ngm.nationalgeographic.com/2010/12/milky-way/crosswell-text/3>)
- ② 「ナショナル ジオグラフィック 日本版」 (2010年12 月号、日経ナショナルジオグラフィック社)
“天の川の新事実”
(62 頁, <http://nng.nikkeibp.co.jp/nng/magazine/1012/feature02/>)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安井 千香子 (YASUI CHIKAKO)
国立天文台・ALMA 推進室・研究員
研究者番号：00583626

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし