

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800094

研究課題名(和文) 星・惑星形成過程における角運動量散逸の時間進化の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study on time variation of angular momentum dissipation in star-and planet-formation processes

研究代表者

安井 千香子 (Yasui, Chikako)

国立天文台・TMT推進室・助教

研究者番号：00583626

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)：星は、星間分子雲とよばれるガス雲の角運動量を起源とする降着円盤が形成され、その質量降着により形成される。しかし、降着円盤の膨大な角運動量を逃がさなければ、中心星への質量降着、ひいては星形成自体が困難であり、これを十分に説明する決定的なモデルはまだ確立されていない。われわれは、円盤の異なる進化段階において支配的な角運動量散逸メカニズムを、近赤外線輝線の高分散分光から導出した。その結果、初期には星風によるガス放出が、その後、星-円盤相互作用と円盤風によるガス放出が最も有効に働くという時間変化が初めて明確に捉えられた。

研究成果の概要(英文)：Stars are formed from the gravitationally induced collapse of molecular gas. Although any small initial rotation of the star-forming cloud is enormously magnified by conservation of angular momentum during collapse, angular momentum dissipation mechanisms have not well established yet. We derived dominant processes in different evolutionary phases of protoplanetary disks with near-infrared high-resolution spectroscopy. As a result, time variation of dominant processes are suggested for the first time: gas ejection by stellar wind is effective in the early phase, while star-disk interaction and gas ejection by disk wind are then effective.

研究分野：天文学

キーワード：星・惑星形成 赤外線天文学 原始惑星系円盤

### 1. 研究開始当初の背景

銀河宇宙の最も基本的な構成要素である星は、星間分子雲とよばれるガス雲中で自己重力による収縮によりガス雲の角運動量を起源とする降着円盤が形成され、その質量降着により形成される(Stahler & Palla 2005)。しかし、降着円盤の角運動量を逃がさなければ、中心星への質量降着、ひいては星形成自体が困難であり、観測的には少なくとも99.9%もの膨大な量の角運動量を散逸させる必要があると分かってきた。これは『角運動量問題』と呼ばれ、その解決には様々なモデルが提案されているものの、決定的なものはまだ無い(Hartmann 2009)。また、角運動量の散逸が、どのような時期にどの程度起こるかという時間進化については全く手が付けられずにいる。実際、まだ十分な質量の円盤を持つ初期の星(CTTS)の回転速度が、円盤を失った段階にある(=降着円盤から十分な量の角運動量を受け取ったはずの)星(WTTS)よりも回転速度が大きいことが知られており(Bouvier 1997, A&A, 326, 1023)、円盤降着過程の間に生じた何か本質的なプロセスを見逃している可能性が考えられる。このように、角運動量問題解決のためには角運動量散逸の時間進化の解明が必須となる。

また、星が円盤の質量降着により形成されると同時期に、円盤の中では惑星が形成される。近年の系外惑星探査において、それらはあまりに多様な性質を持つことが分かってきた。その中で特に際立った特徴の1つとして、中心星のごく近く( $\sim 0.04\text{AU}$ )を回る短周期惑星の頻度が非常に高いという傾向が知られているが(Udry & Santos 2007, ARA&A, 45, 397)、形成された惑星がなぜ中心星に落ちてしまわないのかが大きな議論となっている(Kley & Nelson 2012, ARA&A, 52, 211)。考えられる有力な説の一つとして、円盤の角運動量散逸の過程でガスの円盤内側に空洞が生じることで、惑星の軌道移動がそれ以上進まないことが考えられている(Lin et al. 1996, Nature, 380, 606)が、その観測的検証は全く進んでおらず、惑星形成の観点からも角運動量散逸過程の時間進化の研究が強く望まれる。

### 2. 研究の目的

本研究では、円盤の異なる進化段階における角運動量の散逸量を近赤外線輝線の高分散分光から定量的に推定し、生成中の星の各種物理量との相関をもとに、角運動量問題の解決への手がかりを得ることを目的とする。近年の観測的研究により、原始惑星系円盤は約1000万年の寿命を持つが、円盤の消失はほぼ一瞬に( $\Delta t \leq 50$  万年)、しかも全体(ガス+ダスト/内側から外側まで)が同時に消失する(図1; Phase I $\rightarrow$ Phase III)ことが明らかになり(Williams & Cieza 2011, ARA&A, 49, 67)、そのために円盤の消失過程をトレースする明確な指標が存在しなかった。ただし、こ

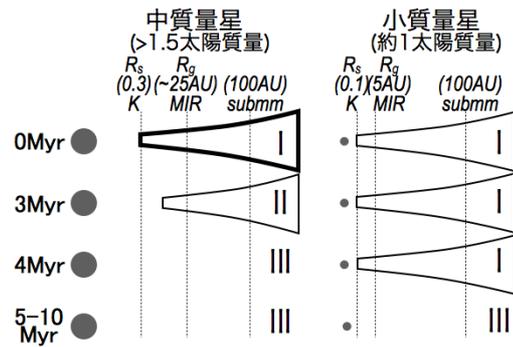


図1 中質量星のダスト円盤進化

中質量星のダスト円盤(左)は内側のみが早く消失し(Phase I $\rightarrow$ Phase II)、その後円盤全体が消失する(Phase I $\rightarrow$ Phase III)。一方、小質量星(右)のダスト円盤は、全体が一様に消失する(Phase I $\rightarrow$ Phase III)。

れはあくまでも星の中で大多数を占める太陽質量程度の星(小質量星)から得られた描像である。対して、われわれは太陽質量の約2倍以上の質量を持つ星(中質量星)のダスト円盤の時間進化を赤外線調べ、円盤のごく内側( $r \sim 0.3\text{AU}$ )がその外側よりも有意に早いタイムスケール( $\Delta t \sim 400$  万年)で消失することを独自に明らかにし(図1; Phase I $\rightarrow$ Phase II、その後 Phase III; Yasui et al. 2014, MNRAS, 442, 2543)、中質量星こそが時間進化を調べる上で非常に有効な天体であることを見いだした。また、円盤の角運動量の散逸量導出には高い波長分解能( $\lambda/\Delta\lambda \geq 10,000$ )での輝線分光観測が必要であり、ガス雲に埋もれた形成中の星の観測には透過力の高い赤外線での観測が必須となる。この2条件を満たす装置の開発には技術的に様々な困難があるため、世界的にみてもまだ数が少なく占有的な使用も難しい。研究代表者は大学院在学時より、近赤外線波長域( $\lambda = 0.9\text{--}1.35\ \mu\text{m}$ )において高い波長分解能  $\lambda/\Delta\lambda = 30,000$  を達成する分光器「WINERED」の開発に中心になって携わってきた(Yasui et al. 2008, SPIE, 7014, 701433)。この装置は2012年5月に京都産業大学神山天文台1.3m望遠鏡においてファーストライトを迎え、現在ほぼ占有的にサイエンス観測に使用することができる環境にあるため、多数の天体の観測による統計的な議論が可能となる。

### 3. 研究の方法

近赤外線の高分散分光器 WINERED を用いて、独自に進化段階を定めた中質量星についての分光観測を行った。ターゲットとしては、われわれ独自のリストでダスト円盤の進化段階が明らかになっている中質量星のうち、WINEREDで観測可能なJバンドで12等までの天体を選択し、パラメータをまとめた。その際、サンプル数が合計で100以上になるように、また異なる進化段階にある星がまんべんなく選択されるように、多数の文献を詳細に調査しまとめた。3年間で統計的に

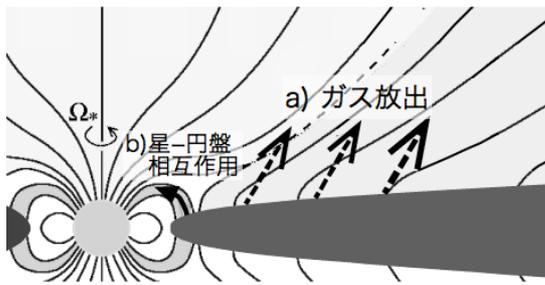


図2 角運動量散逸メカニズム

十分な数のモニタリング観測を行い、星生成過程の大問題である角運動量問題解決への手がかりを得るため、角運動量散逸メカニズムのうち、i) HeI ( $1.08\mu\text{m}$ )のラインより円盤からのガス放出による寄与(図2; a)を、ii) 一度に得られる複数の水素のライン( $P\beta$ ,  $P\gamma$ ,  $P\delta$ )より中心星磁場による円盤回転へのブレーキによる寄与を求め(図2; b)、また iii) 進化段階(時間)と角運動量散逸量や星の回転速度との関係を求め、角運動量の散逸がどの時期にどのようなプロセスによって生じているかを調べる。

#### 4. 研究成果

(1) 分光観測より得られた水素のライン(波長が短い順に、 $P\delta$ ,  $P\gamma$ ,  $P\beta$ )はいずれもそれぞれの星固有の様々なプロファイルを示したが、波長の長いラインほど顕著であることが分かった。そのため、これまでの  $P\gamma$  までの短波長観測では、スペクトルの特性がノイズに埋もれてしまっていた天体であっても、今回の  $P\beta$  ( $1.28\mu\text{m}$ ) 観測によりプロファイルの検出に成功し、物理状態を明確に解釈できるようになった。

その上で、水素のライン  $P\beta$  は、Phase I/II の全天体で検出されたのに対して、Phase III の天体では全く検出されなかった。 $P\beta$  のラインは、主に円盤から中心星への質量降着により生じることが知られているが、得られたスペクトルからは、Phase I/II 天体では質量降着が起こっているが、Phase III 天体では起こっていないが示唆され、先攻研究からの示唆と矛盾しない結果となった。 $P\beta$  のラインが検出された天体のうち、Phase I 天体のプロファイルにはいずれも長波長側からの吸収は見られなかったのに対して、Phase II 天体のプロファイルにはいずれもこの吸収が見られた。この吸収は、「b) 星-円盤相互作用」の影響を受けることで生じると知られているが、得られたプロファイルより、Phase I 天体では星-円盤相互作用の影響が無いのに対して、Phase II 天体ではこの影響があることを示す。このように、水素のライン  $P\beta$  のプロファイルより、円盤の進化に伴う角運動量散逸に有効となる作用の変化が初めて明確に示唆された。

(2) HeI ( $1.08\mu\text{m}$ ) のラインは、そのプロファイルより「a) ガス放出」や「b) 星-円盤相互作用」

が働くことを判断することができる。得られた HeI スペクトルを Phase ごとに図3に示す。今回の観測では、Phase I/II/III 全ての天体で、このラインが検出された。得られたスペクトルは、Phase I では主に幅の広い長波長側もしくは短波長側に吸収を持つスペクトル(P Cygni profile もしくは逆 P Cygni profile)を示したが、このことは、a) の作用の中でも主に星風が強いことを示唆する。Phase II では多くの天体が、長波長側や短波長側に幅が狭い吸収をもつスペクトルを示したが、このことは a) の作用の中でも主に円盤風が強く働くことを示唆する。一方、Phase III では、全天体で中心の星に対する波長のずれがゼロの成分に吸収を持つスペクトルが得られたが、これは円盤消失後の天体での彩層活動を示唆する。これまで、Phase III 天体では HeI のラインは検出されないと考えられていたことより、これは中質量星に特有の性質を示しているのかも知れない。

このように、水素のライン  $P\beta$  と同様に HeI のラインのプロファイルからも、円盤の進化に伴う角運動量散逸に有効となる作用の変化が初めて明確に見られた。

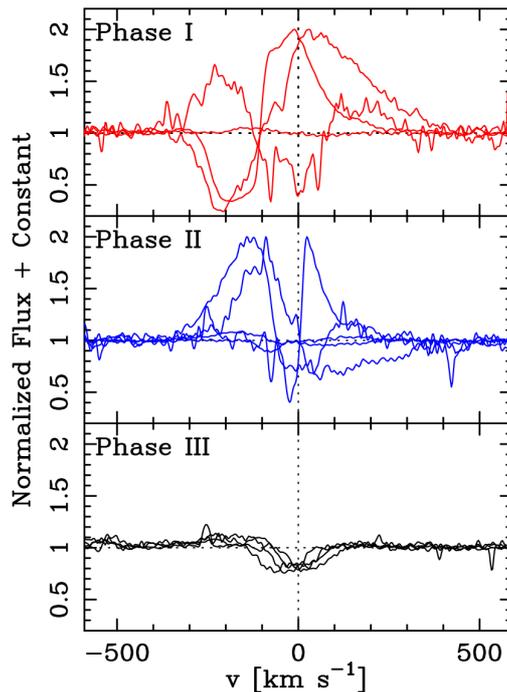


図3 得られたHeIスペクトル

(3) 以上、(1)水素のラインより得られた結果と(2)HeI のラインより得られた結果は互いに矛盾のない結果となり、円盤の進化に伴い、角運動量散逸について有効となる作用の変化が初めて明確に示された：円盤進化の最も初期の段階 Phase I においては「a) ガス放出」の中でも星風が、中期の Phase II においては「b) 星-円盤相互作用」に加えて「a) ガス放出」の中で円盤風が作用することが示唆された。更に、最終段階の Phase III にお

いては、HeI においてこれまでには見られなかった彩層活動の兆候が見られたが、これは中質量星に特有の性質を示しているのかも知れない。

<引用文献>

- ① 安井千香子 他、Warm infrared echelle spectrograph (WINERED): testing of optical components and performance evaluation of the optical system、Proceedings of the SPIE、Vol. 7014、2008、701433-701433-12.
- ② 安井千香子 他、Rapid evolution of the innermost dust disc of protoplanetary discs surrounding intermediate-mass stars、Vol. 442、2014、2543-2559

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 安井千香子 他、Low-metallicity Young Clusters in the Outer Galaxy. II. Sh 2-208、The Astronomical Journal、査読有、Vol. 151、2016、pp.115-12  
DOI: 10.3847/0004-6256/151/5/115
- ② 安井千香子 他、Herbig Ae/Be Candidate Stars in the Innermost Galactic Disk: Quartet Cluster、The Astrophysical Journal、査読有、Vol. 817、2016、pp.181-192  
DOI: 10.3847/0004-637X/817/2/181
- ③ 安井千香子 他、Rapid evolution of the innermost dust disc of protoplanetary discs surrounding intermediate-mass stars、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、査読有、Vol. 442、2014、pp.2543-2559  
DOI: 10.1093/mnras/stu1013

[学会発表] (計 3 件)

- ① 安井千香子、Rapid evolution of the innermost dust disk of protoplanetary discs surrounding intermediate-mass stars、ESO Workshop “Herbig Ae/Be stars: The missing link in star formation” (国際学会)、2014 年 4 月 10 日、チリ (サンチアゴ)
- ② 安井千香子、A spatially-resolved study of initial mass function in the outer Galaxy、IAU Symposium No. 321: Formation and evolution of galaxy outskirts (国際学会)、2016 年 3 月 14 日、スペイン (トレド)
- ③ 安井千香子、WINERED: high-resolution near-infrared spectroscopy of young intermediate-mass stars: insights into evolution of star-disk

interactions、「近赤外線高分散分光観測で探る恒星物理」研究会(国際学会)、2016 年 10 月 5 日、東京大学(東京都文京区)

[図書] (計 1 件)

- ① 井田茂、田村元秀、生駒大洋、関根康人、安井千香子 他、朝倉書店、系外惑星の事典、2016

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安井千香子 (YASUI, Chikako)  
国立天文台・TMT 推進室・助教  
研究者番号: 00583626

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し

(4) 研究協力者

該当無し