星形成ゼミ

担当:SFN#341 24-28 2021/06/25 総研大 D2 竹村英晃

SFN#341 24-28

- 24. Thermal Wave Instability as an Origin of Gap and Ring Structures in Protoplanetary Disks
- 25. Multicolor Variability of Young Stars in the Lagoon Nebula: Driving Causes and Intrinsic Timescales
- 26. Tree-based solvers for adaptive mesh refinement code FLASH II: radiation transport module TreeRay
- 27. No impact of core-scale magnetic field, turbulence, or velocity gradient on sizes of protostellar disks in Orion A
- 28. TIMES I: a Systematic Observation in Multiple Molecular Lines Toward the Orion A and Ophiuchus Clouds

Thermal Wave Instability as an Origin of Gap and Ring Structures in Protoplanetary Disks

Takahiro Ueda, Mario Flock, Tilman Birnstiel

ABSTRACT

Recent millimeter and infrared observations have shown that gap and ring-like structures are common in both dust thermal emission and scattered-light of protoplanetary disks. We investigate the impact of the so-called Thermal Wave Instability (TWI) on the millimeter and infrared scattered-light images of disks. We perform 1+1D simulations of the TWI and confirm that the TWI operates when the disk is optically thick enough for stellar light, i.e., small-grain-to-gas mass ratio of $\gtrsim 0.0001$. The mid-plane temperature varies as the waves propagate and hence gap and ring structures can be seen in both millimeter and infrared emission. The millimeter substructures can be observed even if the disk is fully optically thick since it is induced by the temperature variation, while density-induced substructures would disappear in the optically thick regime. The fractional separation between TWI-induced ring and gap is $\Delta r/r \sim 0.2$ -0.4 at ~ 10 -50 au, which is comparable to those found by ALMA. Due to the temperature variation, snow lines of volatile species move radially and multiple snow lines are observed even for a single species. The wave propagation velocity is as fast as ~ 0.6 au yr⁻¹, which can be potentially detected with a multi-epoch observation with a time separation of a few years.

- 原始惑星系円盤のミリ波と赤外線の観測において、Thermal Wave Instability(TWI)が与える影響を、 1+1Dシミュレーションで調べた。
- ・ 円盤が星の輻射について光学的に厚い場合(small-grain-to-gas mass ratio≥0.0001のときなど)、TWI
 がはたらくようになり、ミリ波と赤外線の両方でギャップを見られるようになる。
- ギャップは温度の違いによって見られるので、光学的に厚い場合にも見られる。
- リングとギャップの間隔は10-50auの位置において、Δr/r~ 0.2-0.4でALMAの観測結果と整合的。
- 揮発性の物質のsnow lineが移動し、単一の物質においても複数のsnow lineが生じることになる。
- 波の伝播速度は~ 0.6 au yr-1で、multi-epoch observationで観測的に確かめられるかもしれない。



- 原始惑星系円盤に対するALMA観測によって、ギャップやリング構造が見つかっているが (Andrews et al. 2018)、起源はいまだわかっていない。
 - 惑星由来(e.g., Pinilla et al. 2012; Dipierro et al. 2015)
 - Snow line (Zhang et al. 2015; Okuzumi et al. 2016; Pinilla et al. 2017)
 - ダストとガスの相互作用による不安定性 (Takahashi & Inutsuka 2014, 2016)
 - 磁気流体力学的効果 (Flock et al. 2015; Ruge et al. 2016; Krapp et al. 2018; Riols et al. 2020)
 - ほとんどのメカニズムにおいて、密度の変化からsubstructureを作るが、光学的に厚い波長でも substructureが観測されている(e.g., Carrasco-Gonz ´alez et al. 2019; Macias et al. 2021)。
- 赤外線の散乱光でもリングやギャップのような構造が観測されている (Avenhaus et al. 2018; Garufi et al. 2018)。
- リング/ギャップ構造を作れるメカニズムが Thermal Wave Instability (TWI; D'Alessio et al. 1999; Dullemond 2000; Watanabe & Lin 2008; Siebenmorgen & Heymann 2012; Ueda et al. 2019)。
 - 円盤表面に小さなバンプができると、中心星側は照らさ れて、反対側は影になる。
 - 照らされた側は、mid-planeの温度が上がるにつれてさ らに膨らみ、反対側は温度がさらに下がる。
 - 加熱効率は中心星からの放射と円盤表面のなす角に依存し、バンプは内側に移動し、バンプの後ろに新しいバンプが生まれる。



Illuminated frontside | Shadowed outer side

シミュレーション 軸対象の円盤についての1+1Dシミュレーション (Watanabe & Lin 2008)

- エネルギー方程式 $\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)} \frac{k_{\rm B}\Sigma_{\rm g}}{\mu m_{\rm H}} \frac{\partial T_{\rm m}}{\partial t} = 2(F_{\rm s} F_{\rm m} + F_{\rm e}),$ (1) ($\gamma = 1.4$)
 - ・ $R_* = 2.08R_{\odot}$ 、 $M_* = 1M_{\odot}$ 、 $T_* = 4000$ K 、 $L_* = 1L_{\odot}$ 、 T_s :表面のダストの温度、 $T_e = 10$ K
 - 中心星からの放射のflux:
 - ダストからの放射のflux:

外部からの放射のflux:

•

$$F_{\rm s}(r) = \{1 - \exp\left(-2\tau_{\rm m}(T_{\rm s})\right) \frac{L_{*}}{8\pi} \left\langle \frac{A_{\rm s}}{r^{2}} + \frac{4R_{*}}{3\pi r^{3}} \right\rangle, (2)$$

$$F_{\rm m}(r) = \{1 - \exp\left(-2\tau_{\rm m}(T_{\rm m})\right) \sigma T_{\rm m}^{4}, \qquad (3)$$

$$F_{\rm e}(r) = \{1 - \exp\left(-2\tau_{\rm m}(T_{\rm m})\right) \sigma T_{\rm e}^{4}, \qquad (4)$$

(7)

- 加熱されたダスト粒子のfilling factor $A_{\rm s}(r) = 1 \exp\left[-\int_{z_{\rm s}(r)}^{\infty} \kappa_{\rm s}(T_{*})\rho_{\rm d}(r,z')dz'\right],$ (5)
- ダストの密度分布 $\rho_{\rm d}(r,z) = \frac{\Sigma_{\rm d}}{\sqrt{2\pi}h_{\rm d}} \exp\left(-\frac{z^2}{2h_{\rm d}^2}\right),$ (6)
 - ・ 円盤が垂直方向に静水圧平衡にあると仮定 $t_{\rm th} = \frac{\gamma + 1}{2(\gamma 1)} \frac{k_{\rm B} \Sigma_{\rm g}}{\mu m_{\rm H} \sigma T_{\rm m}^3}$. ・ →dynamical timescale $\Omega_{\rm K}^{-1}$ よりも $t_{\rm th}$ が短いときに成り立つ(≤ 50 au)。
- 光学的厚み $au_{\mathrm{m}}(T_{\mathrm{m}};r) = \int_{0}^{z_{\mathrm{s}}(r)} \kappa_{\mathrm{m}}(T_{\mathrm{m}})\rho_{\mathrm{d}}(r,z')dz',$ (8)
- ガスの面密度 $\Sigma_{g} = 1700 \left(\frac{r}{au}\right)^{-3/2} \exp\left(-\frac{r}{r_{d}}\right) g \text{ cm}^{-2}$
- ダストの面密度 $f_{d2g,s}\Sigma_{g}$, $f_{d2g,s}$:小さなダストのダストガス比(0.01 0.0001)



- $f_{d_{2g,s}} = 0.01$ の場合、 $\tilde{t} = 10$ で40 auにある波が $\tilde{t} = 11.2$ で10 auに達している。→速度~0.625 au yr⁻¹
- 速度は中心にいくにつれ遅くなり、≤0.3 auで消える(速度はダストガス比に依存)。
- 温度の変動のタイムスケールもダストガス比に依存。

結果(輻射輸送)

 $f_{\rm d2g,s} = 0.01$

- RADMC-3Dでモデル画像→地 球から140 pcの距離にあるとし [au] て0.03"のビームでスムージング
- ダストは次の分布をもつとする
 - 小さなダスト:最大半径は 10 µm、ダストガス比は $f_{\rm d2g,s}$
 - 大きなダスト:最大半径は 1mm、ダストガス比は $0.01 - f_{d2g,s}$
- ミリ波のリングとギャップの強度比は~3、赤外線では~103。
- ギャップとリングの間隔は、0.2-0.4r_{gap}で観測結果とほぼ同じ。
- 温度の差によってリング/ギャップが生じるので、円盤が光学的 に厚くても観測できる。
 - 密度差起源のリング/ギャップは光学的に厚い円盤では見え なくなる。

40 -

20

0

-20

-40-

 10^{-1}

10-2

10⁻³

 10^{-4}

0

20

-50





- snow lineの位置が時間変化する。
- ひとつの分子についても複数のsnow lineが存在し、 リングやギャップを作りうる。
 - snow lineの位置を調べるときには、円盤の 温度を正確に求める必要がある。
- 温度の変化のタイムスケールは、radial driftのタ イムスケールよりも短いので、ダストの焼結由来 のギャップ/リング形成は同時は起きない。
- ただし、昇華と再凝縮によってダストサイズに変 化が起きる可能性があり、substructureの形成に つながりうる。



No impact of core-scale magnetic field, turbulence, or velocity gradient on sizes of protostellar disks in Orion A

Hsi-Wei Yen, Bo Zhao, Patrick M. Koch, Aashish Gupta

ABSTRACT

We compared the sizes and fluxes of a sample of protostellar disks in Orion A measured with the ALMA 0.87 mm continuum data from the VANDAM survey with the physical properties of their ambient environments on the core scale of 0.6 pc estimated with the GBT GAS NH₃ and JCMT SCUPOL polarimetric data. We did not find any significant dependence of the disk radii and continuum fluxes on a single parameter on the core scale, such as the non-thermal line width, magnetic field orientation and strength, or magnitude and orientation of the velocity gradient. Among these parameters, we only found a positive correlation between the magnitude of the velocity gradient and the non-thermal line width. Thus, the observed velocity gradients are more likely related to turbulent motion but not large-scale rotation. Our results of no clear dependence of the disk radii on these parameters are more consistent with the expectation from non-ideal MHD simulations of disk formation in collapsing cores, where the disk size is self-regulated by magnetic field misaligned with the rotational axis. Therefore, our results could hint that the non-ideal MHD effects play a more important role in the disk formation. Nevertheless, we cannot exclude the influences on the observed disk size distribution by dynamical interaction in a stellar cluster or amounts of angular momentum on the core scale, which cannot be probed with the current data.

- 原始星周りの円盤の形成メカニズムを調べるために、円盤のパラメータ(サイズ、線幅、磁場)の相関関係を調べた。
- ターゲットはOrion A分子雲で、ALMA(VANDAM survey)、GBT、JCMT ACUPOLのデータを使用。
- 速度勾配と非熱的な線幅のみで正の相関が見られ、他では相関関係は得られなかった。
- 非理想MHD効果が円盤形成に重要な役割を担っていると考えられる。
- 現状のデータでは、円盤のサイズ分布に対する星団内の力学相互作用やコアスケールの角運動量の影響に ついて調べることはできない。



- Class 0/I天体の周りのケプラー回転する円盤の観測例はあるが、そのサイズは1桁以上異なる。
- このサイズの違いは円盤の時間進化や円盤のサイズの成長を抑制するプロセスによるかもしれないが、詳しくはよくわかっていない。
- 円盤の成長と母体となる分子雲コアから原始星近傍へ質量や角運動量を運ぶプロセスとは関係がある。
- 角運動量が保存する流体力学的には、円盤のサイズはコアの角速度や円盤の質量に比例するはず。
- 母体の分子雲コアの回転軸と磁場の向きが揃っている場合において理想MHD的にはmagnetic brakingに よって円盤の成長が抑制される。
 - 向きが揃っていない場合にはmagnetic brakingの効率が下がり、大きな円盤形成される。
- 磁場の拡散が起こる非理想MHDの効果によっても、大きな円盤を形成することができる。
- (観測的には)どのメカニズムが円盤の形成と成長に大切なのかはわかっていない。
- 原始星周りの円盤のサイズ、ガスの運動、磁場の関係を調べることで、円盤の形成と成長のメカニズムに
 関する手がかりが得られると思われる。
 - →本研究









- サンプル数:56個(原始星は合計79個)
- Class 0:25個、Class I:13個、flat:18個
- single:26個、multiple system:30個
- ・ 半径はガウシアンでフィットした際の2σで定義し、分 解できない場合はビームの1σを上限値として設定。



- 天体間距離<800 auの円盤は連星の相互作用の影響を受けている可能性あり。→サンプルから除く(残り50個)
 - 結果は連星の相互作用の影響を受けていない。
- Tbolを進化の指標として用い、70 Kを境界に設定。
- ・ 進化に伴う円盤サイズの減少は確認できない。

•

- 同じ進化段階(Tbol)でも、円盤サイズの大きさには1 桁程度の開きがある。
 - ダストの成長はミリ波連続波で見える円盤のサイ ズを決める主要なプロセスではない。

データ







- 回転は長軸方向の速度勾配をうみ、円盤と 速度勾配のなす角は小さく揃っているはず。
 - 実際そうなっていない。 •



٠

速度勾配を長軸に射影しても、相関は見ら • れない。



- 理想MHD
 - 乱流と磁場一回転軸間のmisalignmentによってmagnetic brakingの効率が落ち、円盤が大きくなる(シミュレーション結果より)。
 - 観測結果と異なる。
- 非理想MHD
 - 乱流と磁場一回転軸間のmisalignmentの円盤の成長へさほど影響せず、 magnetic braking / diffusionによってサイズが決まる(シミュレーション結果より)。
 - パラメータ間の相関がないことと無矛盾。
 - 円盤のサイズは、宇宙線の電離率やダストサイズなどから決まる磁気拡散係数に依存する可能性がある。
- Class 0天体20個に対する観測では、磁場と円盤が揃っていない場合、エンベロープが大き な角運動量を持つ傾向にあることを示している。
- 本研究では、より小さなスケールにおいて、そのような傾向は見られていない。
 - 原始星近傍の100 auスケールではmagnetic braking / diffusionが効率的になる。
- コアスケールにおいて速度勾配と非熱的な線幅の間に相関が見られたので、速度勾配は large-scale motionではなく乱流によって生じていると考えられる。
- ・ Class 0天体に対する800-900 auの分解能の観測において、比角運動量 *j* のradial profile は、 $j \propto r^{1.8}$ となる(剛体回転は $j \propto r^2$ 、乱流は $j \propto r^{1.5}$ 、Pineda et al. 2019)。
 - 速度勾配や角運動量を正確に見積もるにはより高い分解能が必要。