

原始惑星系円盤での惑星形成と ALMAによって明らかになった円盤構造



金川 和弘

〈Institute of Physics and CASA*, Faculty of Mathematics and Physics, University of Szczecin, Wielkopolska 15, PL-70-451 Szczecin, Poland〉

e-mail: kazuhiko.kanagawa@usz.edu.pl

ALMA 望遠鏡による原始惑星系円盤の直接撮像観測によって、原始惑星系円盤のギャップ構造などの惑星形成領域の詳細構造が明らかになりつつある。このギャップ構造を作る有力なメカニズムの一つが巨大惑星と原始惑星系円盤との潮汐相互作用である。本稿では、惑星が作る円盤ギャップ構造と惑星質量の関係についての筆者の最近の研究成果を紹介する。また、実際にギャップの観測結果からどのように惑星質量が見積もられるかを HL Tau 円盤を例にとって紹介したい。

1. はじめに

恒星が誕生すると同時にその周囲には主に水素とヘリウムからなるガスと少量の固体微粒子（ダスト）からなる原始惑星系円盤が形成される。円盤内でできた惑星は周囲の円盤ガスと相互作用しながら円盤内を進化する。近年の系外惑星探査によって間接的または直接的に1,000個を超える系外惑星が発見されており、Hot Jupiterのような中心星に非常に近い公転軌道をもつ惑星や逆に中心星から非常に離れた場所に巨大な惑星など系外惑星の分布には大きな多様性があることが確認されている。現状、この系外惑星の多様性がいかにして作り出されたかを解明するためにさまざまな理論研究が活発に続けられており、その原因の一つは原始惑星系円盤内で惑星がどのように進化するのかにあると考えられている。

近年の観測技術の発展は目覚ましく、ALMA（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）などの大型望遠鏡による原始惑星系円盤の直接撮像観測の空間分解能は惑星形成領域を分解するまでに達している。その結果、原始惑星系円盤がギャップ

などの詳細構造をもつことが明らかになった。このようなギャップの形成メカニズムについては、ダストの焼結によるもの¹⁾、円盤デッドゾーン形成に伴うもの²⁾、またはダストとガスの摩擦を考慮した永年重力不安定によるもの³⁾などさまざまなモデルが提唱されている。しかし、惑星と円盤との重力相互作用によるギャップ形成は依然として有力な形成メカニズムである。本稿では特に、惑星によるギャップ形成と円盤ギャップの関係について議論する。従来はその観測的な困難さから、円盤中での惑星進化の研究は主に理論的側面から進められてきた。しかし、円盤の惑星形成領域が直接観測可能になった現状において、観測されたギャップやスパイラルといった惑星の痕跡（と思われるもの）から、円盤中の惑星形成および進化について観測的に制約を与えることが可能かもしれない。

本稿ではまず惑星と円盤ギャップ構造の関係についての理論的研究^{4),5)}を紹介し、実際にその関係を用いて観測されたギャップ構造からどのように惑星質量が見積もれるのかを HL Tau 円盤の場合を例にとって解説したい。また他の例とし

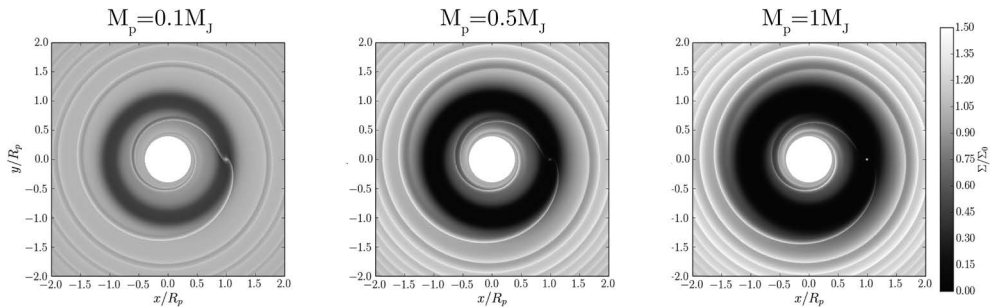


図1 流体シミュレーションで得られた惑星によって作られるギャップ構造の例. カラーマップはガス面密度を表している. 惑星質量は左からそれぞれ $0.1M_J$, $0.5M_J$, および $1M_J$ (ここで M_J は木星質量). 円盤のアスペクト比と粘性はそれぞれ $h/R=0.05$, $\alpha=10^{-3}$. 惑星質量が大きいほど幅広で深いギャップができているのがわかる.

て, TW Hyaの円盤にもギャップ構造が見つかっており, 同様の惑星質量の見積もりが行われている. そちらについては, 本特集の塚越崇氏の文章をご覧ください.

2. 惑星が作る円盤ギャップの構造

円盤内の巨大惑星は周りの円盤ガスと重力相互作用することで円盤ギャップを形成する. この円盤-惑星相互作用の詳細な物理については武藤恭之氏の天文月報の記事⁶⁾や筆者の惑星科学会誌の記事⁷⁾にまとめられているので, そちらをご覧ください. ここで, 巨大惑星がどのようなギャップ構造を作るのかを議論していきたい.

ギャップ形成の詳細に立ち入る前に, まず惑星質量によってギャップの深さや幅にどれくらいの違いができるのかを数値流体シミュレーションの結果で見たいと思う. 図1では, 惑星質量がそれぞれ $M_p=0.1M_J$, $0.5M_J$, および $1M_J$ のときの2次元数値流体シミュレーションの結果である (ここで M_J は木星質量). 円盤のアスペクト比および粘性の値はそれぞれ $h/R=0.05$, $\alpha=10^{-3}$ としている^{*1}.

惑星質量が木星質量の10分の1程度の場合では, ギャップの底部分のガス面密度が初期値の半分程度という比較的浅いギャップができているのがわかる. ギャップの全幅も円盤のスケールハイトの4倍程度であり, 比較的狭い. 惑星質量の増加に伴って, ギャップの底の面密度は減少し, 惑星が木星質量のときにはギャップ底のガス面密度は初期値の1,000分の1程度まで減少している. ギャップの全幅は惑星軌道長半径とほぼ同程度 (円盤スケールハイトの約20倍) もあり, 惑星質量が小さい他の場合と比べて明らかに広がっていることがわかる. このように, ギャップの深さや幅といった量は惑星質量に強く依存する量であり, しかもこれらの量はギャップが直接撮像された場合には自然に得られる観測量である. それでは惑星質量とギャップの深さ, 幅といった量の間にはどのような定量的な関係があるのだろうか? 以下では, 惑星がギャップを作るメカニズムを解説しつつ, それらの間の関係について紹介する.

2.1 惑星によるギャップ形成メカニズム

円盤ギャップの構造は惑星と円盤の重力相互作用に起因する惑星トルクと円盤ガスの粘性拡散の釣り合いによって理解できる. まずは惑星トルク

*1 ここではいわゆる α 粘性モデルを用いている. このとき粘性係数 ν は α を用いて, $\nu=\alpha c_s h$ と表される (c_s , h は円盤ガスの音速とスケールハイト).

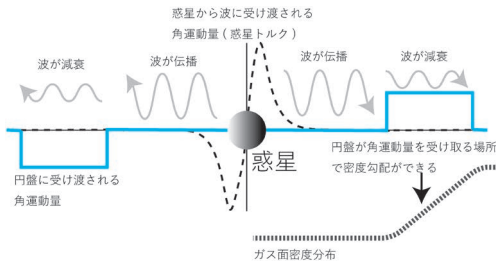


図2 惑星によるギャップ形成における惑星，密度波，および円盤の間の角運動量のやり取りの模式図。

から簡単に説明しよう。通常，原始惑星系円盤では中心星の重力が遠心力とほぼ釣り合った状態にあり，円盤ガスおよび惑星はいわゆるケプラー回転（差動回転）している。このような円盤では，惑星重力によって密度揺らぎ（密度波）が作られる。この密度波にさらに惑星重力によるトルクが働くことで，惑星と波は角運動量を交換する。ケプラー回転する円盤では惑星よりも内側では波の回転速度は惑星のそれよりも速いため，内側の波の回転速度は惑星との重力相互作用によって減速され，負の角運動量を受け取る。惑星の回転速度は逆に加速され，正の角運動量を受け取る。同様に，惑星より外側の円盤では波は惑星より遅く回転しているため，波は正の角運動量を受け取り，惑星は負の角運動量を受け取る。惑星と密度波との角運動量の交換はこのように行われる。では，波が角運動量を受け取った場所で密度ギャップができるのだろうか？ 実はギャップ形成を理解するためにはもう一つ密度波が円盤内を伝播することを考える必要がある。

密度波を介した惑星と円盤ガスの角運動量のやり取りは図2のように行われる。惑星によって励起された密度波は惑星から遠ざかる方向に音波のように伝播する。そのとき，惑星より得た正（または負）の角運動量は波と一緒に運ばれることになる。そして波の減衰とともに，波によって運ばれていた角運動量は周囲の円盤ガスに受け渡される。前述のように惑星軌道より外側の領域では，

波は正の角運動量を惑星から受け取っている。そのため，波の減衰とともに円盤ガスは波から正の角運動量を受け取ることで，円盤外側方向に移動する。同様に，惑星軌道の内側では円盤ガスは負の角運動量を受け取り円盤内側方向に移動する。その結果，惑星軌道に沿ってガス密度は減少し，図1で見たような軸対称なギャップ構造が作られる。ここで，波は単に角運動量を運ぶだけであるので，最終的に円盤が単位時間当たりを受け取る角運動量は惑星によるトルクの値に等しい。

一方で，円盤内の乱流に起因するガスの粘性は密度のギャップ構造を均すように働く。したがって，最終的に惑星が作るギャップは惑星-円盤相互作用に起因する惑星トルクと粘性拡散による角運動量フラックスの釣り合いによって決まる定常状態に落ち着く。

2.2 ギャップの深さと惑星質量

惑星トルクと粘性による角運動量フラックスの釣り合いを用いて，ギャップの深さと惑星質量の関係を見積もってみよう。粘性による角運動量フラックス F_v は，

$$F_v = -2\pi R^3 \nu \Sigma \frac{d\Omega}{dR} = 3\pi R^2 \Omega_K \nu \Sigma \quad (1)$$

ここで， R , ν , Σ はそれぞれ円盤の半径，ガスの粘性係数および面密度を表しており， Ω_K はケプラー回転の角速度である。惑星の位置 ($R=R_p$) からギャップの外側 ($R=R_{out} > R_p$) までの領域を考えよう（以下の議論は惑星より内側の領域を考えた場合でも同様に成立する）。その間の粘性角運動量フラックスはギャップ外側と惑星近傍での F_v の差， $F_v(R_{out}) - F_v(R_p)$ で与えられる。ギャップの外側では，波はほぼ完全に減衰し，角運動量を円盤に受け渡しているはずである。したがって，以下の関係式が成り立つ。

$$F_v(R_{out}) - F_v(R_p) = T_p \quad (2)$$

ここで， T_p は惑星近傍からギャップの外側までの領域にかかっている惑星トルクの合計である。

また、 F_ν に含まれる Ω_K や ν といった量は円盤の半径に対して弱くしか依存しない量である。ギャップの幅が R_p よりも小さい場合を考えると、これらの量はギャップの中で一定と考えてよいだろう。同じ近似の範囲内で、 $R_{out}^2 = R_p^2$ とできる。したがって、式(2)は

$$3\pi R_p^2 \Omega_p \nu (\Sigma_0 - \Sigma_{min}) = T_p \quad (3)$$

ここで、 $\Omega_p = \Omega_K(R_p)$ であり、 Σ_0 および Σ_{min} はそれぞれギャップの外側、惑星の位置（ギャップの底）のガス面密度を表す。

次は密度波理論¹¹⁾を用いて、円盤にかかる惑星トルクの大きさを見積もってみよう。密度波理論によると、惑星からの距離が円盤のスケールハイトより小さい領域ではガスの音速によって密度波の励起が妨げられるため、ほとんどトルクは働かない。それよりも外側の領域では、トルクは惑星からの距離の4乗に反比例して急速に減少する。すなわち、主に惑星トルクがかけられるのは惑星からスケールハイト程度離れた場所ということになる。図1で見たように、ある程度深いギャップではギャップの幅は円盤スケールハイトよりも広がることが経験的にわかっている。ここではギャップ幅は惑星トルクがかけられる場所に比べ十分広く、トルクは主に $\Sigma = \Sigma_{min}$ の領域にかかるということを仮定しよう。この仮定は、密度波が円盤スケールハイトよりも十分に長い距離を伝播し、その後角運動量を円盤に受け渡すということに対応する。その場合、 T_p は以下のように見積もることができる。

$$T_p = 0.12\pi \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^3 R_p^4 \Omega_p^2 \Sigma_{min} \quad (4)$$

ここで、 M_p, M_* はそれぞれ惑星と中心星の質量であり、 h_p は惑星の位置での円盤スケールハイトを表している。

式(3)に式(4)を代入して、 Σ_{min} について解くと以下の関係式を得る。

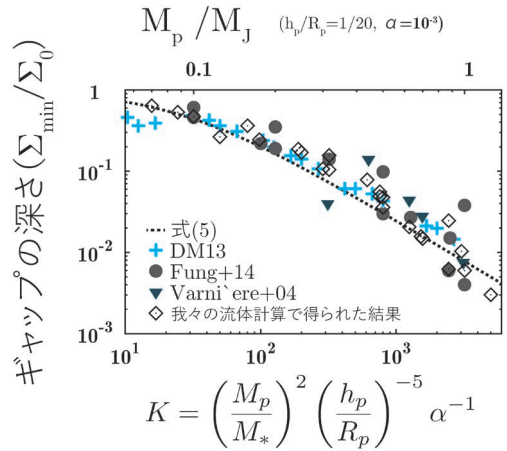


図3 ギャップの深さと無次元パラメータ K (式6)との関係。記号はそれぞれ数値流体計算^{5), 8)-10)}で得られたギャップの深さで、黒線は式(5)で得られるギャップ深さの見積もりを表している(文献4の図1を改変)。

$$\frac{\Sigma_{min}}{\Sigma_0} = \frac{1}{1 + 0.04K} \quad (5)$$

ここで K は無次元のパラメータで以下のように定義される。

$$K \equiv \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-5} \frac{1}{\alpha} \quad (6)$$

さて、式(5)によってギャップの底とギャップの端のガス面密度の比（ギャップの深さ）が見積もれるわけであるが、この見積もりがどこまで正しいのだろうか？ 図3に式(5)によるギャップ深さの見積もりと先行研究とわれわれの数値流体シミュレーションで得られたギャップの深さをプロットした。シミュレーションの結果は若干ばらついているが、おおむね式(5)で再現されていることがわかる。

式(5)を惑星質量によって解くことで、惑星質量とギャップの深さの関係を導くことができる。

$$\frac{M_p}{M_*} = 5 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{\Sigma_{min} / \Sigma_0} - 1\right)^{1/2} \times \left(\frac{h_p / R_p}{0.1}\right)^{5/2} \left(\frac{\alpha}{10^{-3}}\right)^{1/2} \quad (7)$$

上式のように、惑星質量はギャップの深さのほか
に円盤の粘性とアスペクト比にも依存している。
円盤粘性は観測の難しい量であるが、幸い惑星質
量への依存性は大きくない。円盤アスペクト比は
円盤の温度と関係しており、観測可能な量である。
円盤アスペクト比への依存性が大きいため、円盤
アスペクト比の小さな違いであっても、惑星質量
の見積もりには大きな影響を及ぼすことに注意が
必要である。また図3で見たように、数値流体シ
ミュレーションの結果も若干のばらつきをもって
いるため、式(7)による見積もりには、ファクター
程度の不定性があると考えべきだろう。

2.3 ギャップの幅と惑星質量

前節ではギャップの深さから惑星質量を見積も
る方法について議論した。しかし、深いギャップ
ではギャップの底のガス面密度を測定することが
難しいため、観測的に正確に求めることは比較的
難しい。もしギャップの幅から惑星質量を見積も
ることができれば、観測的により容易に惑星質量
を求めることができるだろう。

図2で示したように、ギャップの幅は惑星から
のトルクだけでなく、惑星が励起する密度波がど
こで減衰するのかに強く依存している。先行研究¹²⁾
では、惑星質量が小さく密度波の振幅が小さ
い場合の波の伝播および減衰については調べら
れてきた。しかし、ギャップが形成されるような
状況では、密度波の振幅は大きく、その伝播・減
衰過程は非線形な現象である。その振る舞いを調
べるには数値流体シミュレーションを用いること
が必要となる。そこで筆者らは、惑星質量と
ギャップの幅の関係を調べるために、さまざまな
惑星質量、円盤アスペクト比、円盤粘性について
数値流体シミュレーションを行った。図4に、シ
ミュレーションから得られたギャップの全幅 Δ_{gap}
と次のような無次元パラメータ K' の関係を示す、

$$K' \equiv \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-3} \frac{1}{\alpha} = K \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^2 \quad (8)$$

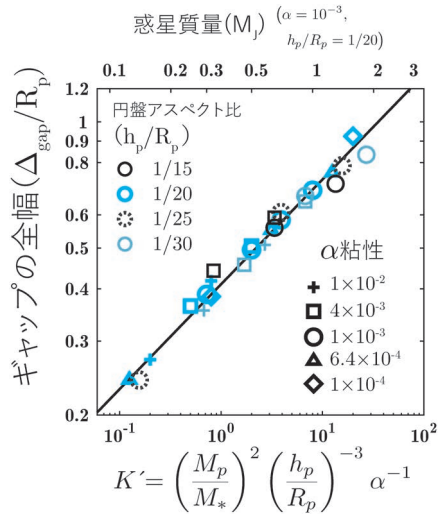


図4 数値流体シミュレーションによって求められた
ギャップの全幅と無次元パラメータ K' の関係。
ギャップの全幅 Δ_{gap} はギャップの端をガス面密度が
ギャップ外側の値の半分になった場所として、その
間の距離として測っている (文献5の図3を改変)。

ここで、ギャップの全幅はギャップの端をガス密
度がギャップの外側の値の半分まで減少した場所
として、その間の距離として測った。図からわか
るように、ギャップの幅はパラメータ K' の関数
であり、以下の経験式によってよく再現される。

$$\frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p} = 0.41K'^{1/4} \quad (9)$$

前述したように、ギャップの幅は密度波の減衰過
程と密接に関連しており、ギャップ幅の経験
式(9)は密度波が円盤中でどのように伝播してい
るのかも記述している。本稿では紙面の都合で割
愛するが、筆者の最近の論文¹³⁾ではギャップ幅
から密度波の伝播・減衰過程を議論しているの
で、ご興味がある方はそちらもご覧いただきたい。

式(9)を惑星質量について解くことで、ギャッ
プ深さの時と同様に、ギャップの幅と惑星質量の
関係が得られる。

$$\frac{M_p}{M_*} = 2.1 \times 10^{-3} \left(\frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p}\right)^2 \left(\frac{h_p}{0.05 R_p}\right)^{3/2} \left(\frac{\alpha}{10^{-3}}\right)^{1/2} \quad (10)$$

ギャップ幅からの見積もりも、式(7)と同様に、円盤アスペクト比に比較的強く依存することに注意が必要である。

式(7)と式(10)によって、ギャップの深さおよび幅から二つの惑星質量が見積もられる。もし、その二つが同じような値である場合、そのギャップは惑星が作った可能性があるといえる。逆に、深さと幅からの見積もり値が全く違う場合は、惑星由来でないギャップ形成である可能性を検討すべきだろう。

3. 観測への応用：HL Tau円盤の場合

これまで議論してきたように、式(7)と式(10)を用いることで、円盤ギャップが観測されたとき、ギャップの深さおよび幅の両面から惑星質量を見積もることができる。ここでは、ALMA望遠鏡の長基線キャンペーン観測で得られたHL Tau円盤の高空間分解観測データ¹⁴⁾を用いて、惑星質量の見積もりを行ってみたいと思う。図5にALMA Band 6 (230 GHz帯)での輝度温度分布とBand 6とBand 7 (345 GHz帯)のデータを用いて計算した円盤のガス面密度および円盤のアスペクト比をプロットした。ガス面密度分布はダスト/ガス比を50と仮定し、ダスト面密度から計算した。ダスト面密度や円盤アスペクト比を計算する際の詳しい解析方法は、筆者の論文⁴⁾を

ご覧いただきたい。輝度温度分布をみると、R=19 AU, 30 AU, および80 AUに三つの軸対称な暗いリング状の構造が確認できる。また、解析によって得られたガス密度分布をみてみると、輝度温度分布で暗いリングであった場所の面密度が下がり、ギャップ構造になっていることがわかる。

3.1 円盤中のガス分布とダスト分布

ここで気をつける必要があるのは、今回ギャップが確認されたのが連続光のデータであるということである。これらは円盤中のダストの熱放射の分布を反映していると考えられる。式(7)や式(10)によって惑星質量を見積もる場合、円盤中のガスとダストがよく混ざっている状況である必要がある。円盤内のダストのガスへの追従性はストークス数と呼ばれる以下の無次元パラメータで表される、

$$S_t = \frac{\pi s \rho_s}{2 \Sigma} \quad (11)$$

ここで、 s および ρ_s はダスト粒子の半径と内部密度である。 $S_t \ll 1$ であれば、ダストの分布はガスの分布とほぼ同じであると思って良い。図5(b)でわかるように、HL Tauは比較的質量の大きなガス円盤をもっている。例えば、 $s=1 \text{ mm}$ 、 $\rho_s=1 \text{ g/cm}^3$ のダストを考えた場合、ストークス数は $S_t=1.5 \times 10^{-3}$ ($\Sigma=100 \text{ g/cm}^2$ のとき)程度であり、HL Tau円盤ではガスとダストの分布はほぼ

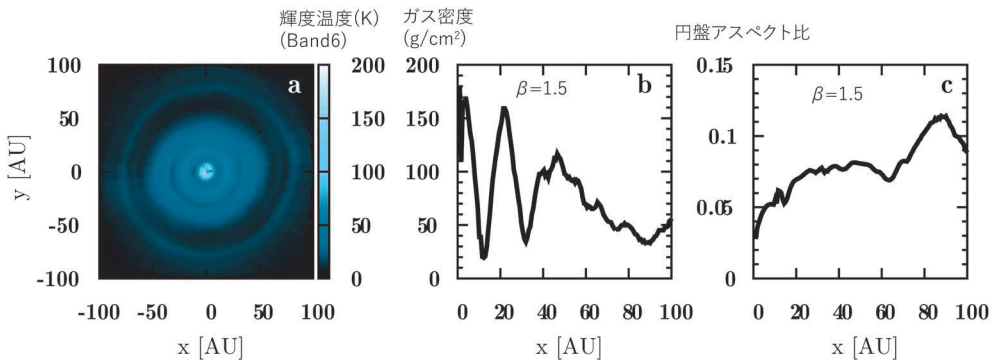


図5 HL Tau円盤のALMA Band 6 (230 GHz帯)の輝度温度 (a) と、 $x=0$ 方向に沿った円盤ガス密度 (b) と円盤アスペクト比 (c)。データの解析には茨城大学の塚越崇氏、百瀬宗武教授に協力していただきました。

同じであると考えることができる。

3.2 惑星質量の見積もり

それでは、式(7) および式(10) を用いて、ギャップが惑星で形成されたとしたときの惑星質量を見積もってみよう。それぞれのギャップの深さおよび幅の測り方や具体的な値は論文⁵⁾を確認していただくとして、ここでは見積もり結果だけを紹介する。まずギャップの深さから見積もった惑星質量は、円盤内側から順に $0.3M_J$ (10 AU), $0.3M_J$ (30 AU), および $0.7M_J$ (80 AU) (中心星が太陽質量のとき)となる。ただし、10および30 AUのギャップについては幅が観測のビームサイズと同程度であり、観測された深さは実際の深さに対して均されている可能性があるため、この見積もりの値は最小値であると考えたほうが良い。同様に、幅から見積もった惑星質量は $1.4M_J$ (10 AU), $0.2M_J$ (30 AU), および $0.5M_J$ (80 AU) (中心星が太陽質量のとき)となる。 $R=30$ および80 AUのギャップでは、ギャップ深さと幅からほぼ同様の惑星質量が見積もられたが、 $R=10$ AUのギャップでは、幅からの見積もりが深さからの見積もりに対して大きくなっている。これは、前述したように、ギャップ幅がビームサイズと同程度であるために、観測されたギャップ深さは実際の深さより大幅にならされているためと思われる。前節でも述べたように、上記の見積もりは円盤アスペクト比に強く依存する。また、ギャップの深さや幅はここで仮定したダストの性質(例えば β の値)に多少依存する。そのため、上記の見積もりにはファクター2程度の不定性があると考えたほうが良いだろう。

最後に、上記の見積もりで得られた惑星質量を用いたガスとダスト2流体の数値シミュレーションの結果を簡単に紹介しておきたい。図6は、ガス・ダスト2流体の数値流体シミュレーションで得られた0.1および1 mmのダストのBand 6での光学の厚さ(方位角平均)の動径分布である。上で行った見積もりのように $R=10$ AU, 30 AU,

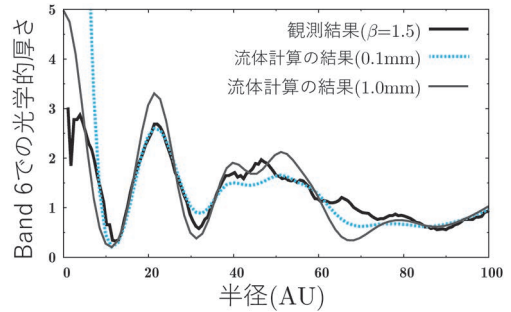


図6 方位角方向に平均した0.1と1 mmダストの光学の厚さの動径分布と観測から得られた光学の厚さの分布。

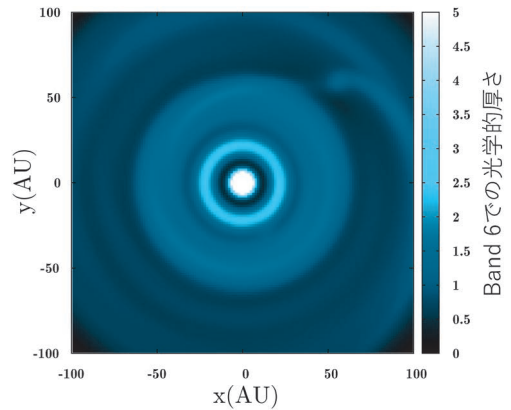


図7 ガス・ダスト2流体シミュレーションで得られた0.1 mmのダストの光学の厚さの分布。観測結果と比較するために、ビームサイズと同程度の gaussian フィルターで均している。

80 AUの位置にそれぞれ $M_p=1.4M_J$, $0.2M_J$, $0.5M_J$ の惑星を置き、観測と比較できるように、ビームサイズと同程度の広がり gaussian フィルターで全体を均している。内側二つのギャップでは、0.1および1 mmダストの両方において、観測結果から得られた光学の厚さとよく一致していることがわかる。一番外側のギャップについては、シミュレーション結果のほうが観測データよりも若干深いギャップになっている。円盤外側ではガス密度が低下するため、ダストはガスと分離しやすい傾向にある。そのため、一番外側の惑星については、多少惑星質量を過大評価している可能性が

ある。図7は、図6で示した0.1 mmダストの光学的厚さの2次元分布である。一番外側のギャップでスパイラルが見られるなどの違いは見られるが、円盤上には図5と同程度の深さおよび幅をもつ三つのギャップができており、おおむね観測結果を再現していることがわかる。

4. まとめと今後の展望

本稿では、惑星によるギャップ形成のメカニズムについて議論し、惑星質量とギャップの深さや幅といった量との定量的関係を紹介した。その関係を用いて、観測されたギャップ構造が惑星によって作られたものであるとすると、観測データからどのように惑星質量が見積もれるのか、その方法を用いてHL Tau円盤の観測データを用いて紹介した。今後はALMAなどによって、ダスト連続光だけでなくガス輝線でも、多くの円盤でギャップ構造などの詳細構造が見つかることが期待される。そのような観測結果を説明する際に、われわれのモデルは有用である。また、原始惑星系円盤において惑星がどのように進化するのかということは、系外惑星の多様性の一因となっていると考えられている。今後、ギャップなどの円盤構造から惑星の情報を特定していくことで、円盤観測から惑星の形成や進化に迫ることができるのではないかと期待している。

謝辞

本稿は、国際学術誌の査読論文^{4), 5)}に基づいています。共著者の方々にはこの場を借りて深く御礼申し上げます。また、本稿の図5はALMA長基線キャンペーンの結果を用いています。関係者の方々には深く感謝いたします。筆者は、新学術領域研究(23103004, 26103701)およびポーランド国立科学センターMAESTRO Grant DEC-2012/06/AS/T9/00279から支援を受けています。本研究で行った数値流体シミュレーションは、国立天文台シミュレーションプロジェクトのCray

XC30を用いて行いました。最後にこのような執筆の機会を与えていただき、また原稿を注意深く読んでいただいた編集委員の平松正顕氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Okuzumi S., Momose M., Sirono S.-i., Kobayashi H., Tanaka H., 2016, *ApJ* 821, 82
- 2) Flock M., Ruge J. P., Dzyurkevich N., et al., 2015, *A&A* 574, A68
- 3) Takahashi S. Z., Inutsuka S.-i., 2016, *AJ* 152, 184
- 4) Kanagawa K. D., Muto T., Tanaka H., et al., 2015, *ApJ* 806, L15
- 5) Kanagawa K. D., Muto T., Tanaka H., et al., 2016, *PASJ* 68, 43
- 6) 武藤恭之, 2010, *天文月報* 103, 688
- 7) 金川和弘, 2015, *遊星人* 24, 332
- 8) Varnière P., Quillen A. C., Frank A., 2004, *ApJ* 612, 1152
- 9) Duffell P. C., MacFadyen A. I., 2013, *ApJ* 769, 41
- 10) Fung J., Shi J.-M., Chiang E., 2014, *ApJ* 782, 88
- 11) Goldreich P., Tremaine S., 1980, *ApJ* 241, 425
- 12) Goodman J., Rafikov R. R., 2001, *ApJ* 552, 793
- 13) Kanagawa K. D., Tanaka H., Muto T., Tanigawa T., 2016, arXiv: 1609.02706
- 14) ALMA Partnership, Brogan C. L., Pérez L. M., et al., 2015, *ApJ* 808, L3

Planet Formation in Protoplanetary Disks and Disk Structures Revealed by ALMA

Kazuhiro KANAGAWA

Institute of Physics and CASA, Faculty of Mathematics and Physics, University of Szczecin, Wielkopolska 15, PL-70-451 Szczecin, Poland

Abstract: Observations done by ALMA have been revealed detail structures of a planet forming region, such as a gap, by directly observing protoplanetary disks. The disk-planet interaction is hopeful mechanism to create a gap structure in the disk. In this article, I review recent studies on a relationship between the gap structure and the planet. Moreover, I show how to constrain the planet mass from the observed gap structure on the disk of HL Tau.