

# 惑星の仮面をつけたベガ型星

竹内 拓<sup>1</sup>

## 1. 塵をもちいた惑星探し

ほかの星から太陽系を眺めると、太陽のつぎに明るいのは木星ではない。地球からは黄道光として観測される、小惑星帯から撒き散らされた塵からの光が、木星より100倍も明るいのである。太陽系を望遠鏡で眺める宇宙人は、太陽のまわりに塵が円盤状に漂っているのを観測するだろう。そしてこの宇宙人は、塵の円盤が少しいびつな形をしていることに気づくに違いない。太陽から1天文単位(1AU)のところには塵はリング状に集まっている。リングの明るさは一様ではなくむらがあり、一カ所、小さな穴が空いたようなところがある。穴は1年の周期で太陽のまわりを回っている[1]。宇宙人は、この構造が1AUのところにある1地球質量の惑星の重力によって形成されたと考え、ちょうど穴のところに惑星があることを知るようになるだろう。

1995年にベガサス座51番星のまわりに木星型惑星が発見されて以来、太陽系外惑星が続々と見ついている。これらの惑星はいずれも木星と同程度の質量をもつものであり、主星の運動のふらつきを調べることによって探索されている。もしこのような惑星をもつ恒星のまわりにも塵が漂っており、太陽系の黄道光のように光っていれば、その光の形はゆがんでいることだろう。このゆがみを見つければ、主星の運動を調べる以外の、新しい惑星発見の方法になる。地球くらいの軽い惑星でも黄道光の形をゆがめるので、主星の運動を調べるときより軽い惑星を探索することができる。

エリダヌス座  $\epsilon$  星 ( $\epsilon$  Eri) は、このようなゆがみが

見ついている代表的な星である[2]。  $\epsilon$  Eriのまわりには、塵が半径60AUほどのリング状に分布している。この形は、リングの内側にある惑星の重力が円盤に穴をあけて作ったのではないかと期待されている。この星は年齢が10億年より若い程度であるが、もっと若い星でも似たような構造が見ついている。HR4796AとHD141569Aは、それぞれ800万年、500万年くらいの年齢であるが、やはり、リング状の円盤を持っている(図1, [3][4])。リングの内径はそれぞれ60AU、150AUである。このリング構造が、太陽系のように惑星の重力でできたものであるとすると、それは重大な発見である。これらの星は、数百万年という短時間で約100AUのところでの惑星形成を完了していることになる。しかし、標準的な惑星形成論では100AUもの離れたところに、たった数百万年で惑星を作ることは難しい[5]。すると、これらの惑星は「標準的」ではない方法で作られたことになる。たとえば、星が形成されたときに同時に、

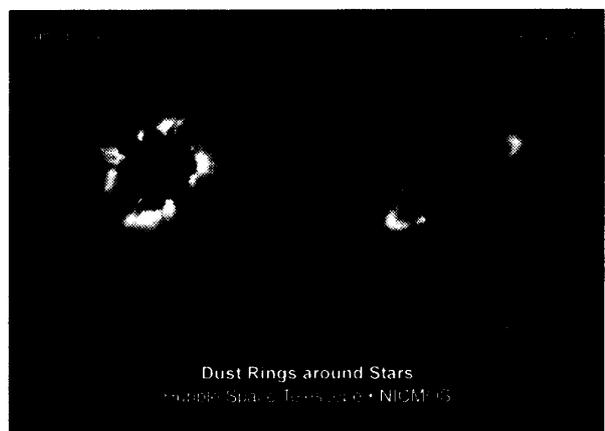


図1: HD141569A とHR4796Aの近赤外線(波長1.1  $\mu$ m)による像。塵が星からの光を散乱し、リング状の構造を映し出している。

<sup>1</sup> カリフォルニア大サンタクルツ校

星のまわりのガス円盤が重力的に分裂することによってできたのかもしれない。あるいは、標準的な惑星形成論が間違っているのかもしれない。

しかし、このリングは惑星によってできたものだろうか。惑星があればリングはできるだろう。だが惑星がなくても、リングができればいいか。そうであれば、これらの若い星はまだ惑星を持っていないことになる。これらの星が、「標準的」ではない惑星形成を示しているとは言えないのである。

本論文では、惑星がなくても塵の円盤にリング構造ができることを示したいと思う。そのために私は、HR4796AやHD141569Aが円盤内に塵だけではなくガスも持っていることを要求する。すると、ガスの抵抗と星の輻射圧が協力し合って、円盤にリング状の構造を作るのである[6]。このリング構造が観測されたリングを説明すれば、HR4796AやHD141569Aが惑星をもっている必要はない。さて、うまく説明されるであろうか。

## 2. ベガ型星のダスト円盤

星のまわりを漂う塵は、赤外線による熱放射を観測することによって見つけられる。この塵はベガのまわりにはじめて発見されたため、赤外領域に塵からの熱放射をもつ主系列星をベガ型星と呼ぶ。IRAS (Infrared Astronomical Satellite) の観測によると、太陽近傍の主系列星の約15%が塵からの熱放射を持っている[7]。IRASの感度では、太陽のまわりにある黄道光を太陽系外から検出することはできないので、この割合は、今後、観測の感度が高くなると、もっと大きくなると思われる。太陽もベガ型星のひとつである。しかし、ほかの星については塵の円盤の像を撮影することは難しく、これまでに数個の星についての像が撮られているだけである。

塵からの放射が撮像されたもっとも有名な星は、が座 $\beta$ 星( $\beta$  Pic)である。主星を隠してまわりの像だけを撮影するステラーコロナグラフによって撮られた

$\beta$  Picの像は、星のまわりの塵が円盤状に分布していることを示していた[8]。そのほかのいくつかの星についても円盤状に塵が分布しているところが撮影されている。そこで、この塵の円盤のことをダスト円盤と呼ぶ。

ベガ型星はダスト円盤をもつ主系列星であるが、生まれたばかりの若い星も、ダスト円盤を持っている。Tタウリ型星やHerbig Ae/Be型星と呼ばれる若い星の多くは、星のまわりの塵からの強い熱放射を示しており、円盤状に分布する塵の像が撮られている。これらの星のまわりには、塵と同じようにガスもまた円盤状に分布しており、ガスと塵からなる原始惑星系円盤を形成している。この原始惑星系円盤の中で塵がくっつきあって成長していき、やがて惑星が誕生すると考えられている。

原始惑星系円盤が、時には主星と同じくらいの明るさの強い赤外放射をもち、多量のガスを含むことに比べると、太陽系の黄道光は太陽の10-7倍の明るさしかなく、まったくガスを含まない。この性質の違いは、塵の成因の違いを現している。原始惑星系円盤は、もともと分子雲の中にあったガスと塵が、そのまま円盤状に若い星のまわりを回っているものである。一方、太陽系の黄道光の塵は、いったん小惑星のような大きな天体が作られ、原始惑星系円盤のガスがなくなったあと、小惑星の衝突によって再び太陽系内に撒き散らされたものである。 $\beta$  Picのダスト円盤も、塵がおたがいに衝突して破壊されるまでの時間が星の年齢より短いことから、小惑星のような天体からつねに新しい塵が供給されていると思われる。このようなダスト円盤を2次的円盤という。

ダスト円盤が、原始惑星系円盤から、太陽やベガ型星などの2次的円盤に進化する過程で、円盤内のガスは失われ、塵は原初的なものから、小惑星などの天体の中で作り直されたものに変化している。そしてこの過程のどこかで、惑星が形成されている。ダスト円盤の進化を探ることは、惑星形成の現場を目撃すること

にはかならない。ダスト円盤が質的な変化を遂げると思われる年齢1千万年程度の星は、惑星の形成を目的の当たりにできる星々である。

そこで、第1節で触れたHR4796AとHD141569Aが、惑星形成の現場として、多くの天文学者の注目を集めている。ダスト円盤の観測から、これらの星は数百万年で100AUのところ惑星を作った豪傑と目されているのである。しかし「惑星が存在する」という考えはつねに魅力的だが、私たちは慎重にならなければならない。「惑星がないかもしれない」という疑いを可能な限り排除しなければならないのである。

これらの星はまだ若く、原始惑星系円盤から2次的円盤への、つまりガスがある円盤からない円盤への遷移の途上にある。このような円盤を遷移的円盤と呼ぶ。遷移的円盤は、原始惑星系円盤よりはるかに少ないかもしれないが、ガスを持っているかもしれない。じっさい、年齢が約2千万年の  $\beta$  Picは50地球質量程度のガスを持っている[9]。そのような円盤の中では、塵の運動は、ガス抵抗と星からの放射の両方の影響を受ける。一方、原始惑星系円盤では、塵の密度が濃いために星の光は円盤の中には届かない。また、2次的円盤にはガスはない。これらの円盤では、塵にガス抵抗と星の放射圧が同時に働くことはない。しかし、遷移的円盤ではそれが起こる。塵にガス抵抗と放射圧が働いた場合に、どのような運動をするのかを次の節で考えよう。

### 3. ガス円盤内での塵の運動

図2を見よう。塵は星のまわりを回っているが、星からの放射圧によって少し重力が相殺されているので、ケプラー速度よりは少し遅くなっている。ミクロンサイズの小さな塵は放射圧の影響が大きく、ケプラーよりはるかに遅く回っている。しかし、1mmより大きいような塵はほとんどケプラー速度で回っている。一方、ガスもまたケプラー速度よりは遅く回っている。ガス自

身の圧力勾配が星の重力を少し打ち消すからである。1mmくらいの大きい塵を考えよう。ほとんどケプラー速度で回っているこの塵は、ガスよりも速い。そして、つねにガスの向かい風を受けていることになる。すると、ガス抵抗によって塵は少しずつ角運動量を失っていき、星に向かって落ちていく。一方、ミクロンサイズの小さい塵はガスよりも遅く回っているため、今度は逆に追い風を受けている。ガス抵抗によって、塵はガスから角運動量をもらい、星からどんどん遠ざかっていく。だが、この遠ざかる運動は長くは続かない。もし円盤の大きさが有限で、あるところで円盤ガスが途切れてしまえば、塵はもはやガスから角運動量を得ることはできない。塵の遠ざかる運動はガス円盤の端で終結し、塵はそこにたまっていく。このようにして、ガス円盤の外端部に塵がたまっていき、リング状の構造ができる。ガス抵抗と放射圧があれば、リングを作るのに惑星はいらないのである。

もう少し詳しく考えてみよう。ガスの速度は圧力勾配のため、ケプラー速度より遅くなっているが、星の近くでは圧力勾配は重力に比べて小さく、速度はほぼケ

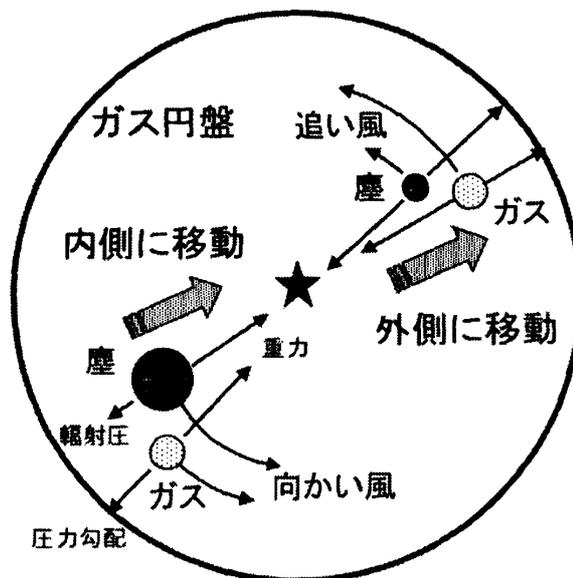


図2：ガス円盤内部での塵の運動。塵は星の重力と放射圧を受ける。ガスは星の重力と圧力勾配を受ける。大きな塵はガスより速く回っているために、向かい風を受ける。そして、星に向かって移動する(図左下)。小さな塵はガスより遅く、追い風を受けて星から遠ざかっていく(図右上)。

プラー速度である。星から遠ざかるにつれて、圧力勾配が大きくなっていき、ケプラー速度からのずれも大きくなっていく。円盤の外端部では、ガス密度が急激に減少するため、大きな外向きの圧力勾配があり、ガスの速度はケプラー速度よりかなり遅い。ガスの速度とケプラー速度の比を $X$ とすると、 $X$ は星の近傍で1であり、星から遠ざかるにつれて減少し、円盤外端部でさらに急激に減少する。この様子を図3に示す。いま考えているガス円盤は、80AUくらいからガスの密度が急激に減少するように仮定してある。一方、輻射圧の影響は塵が小さいほど大きいため、塵は小さいほどゆっくりと回っている。 $Y$ を塵の速度とケプラー速度の比とすれば、大きい塵では $Y$ は1に近いが、塵が小さくなるにつれ $Y$ の値は減少する。また、 $Y$ の値は星からの距離にはよらない。なぜなら、重力も輻射圧も星からの距離の2乗に反比例するからである。

円盤内にある塵を考えよう。この塵が、たとえば図3の円盤の60AUのところにある $100\mu\text{m}$ の塵だったとしよう。この塵はガスよりもゆっくり回っているので( $Y < X$ )、星から遠ざかるように移動していく。しかし塵が外側に移動するにつれ、そこでのガスのケプラー速度との比( $X$ )はだんだんと減少していき、ついには塵とガスの速度が同じになってしまう( $Y = X$ )。その場所で塵の

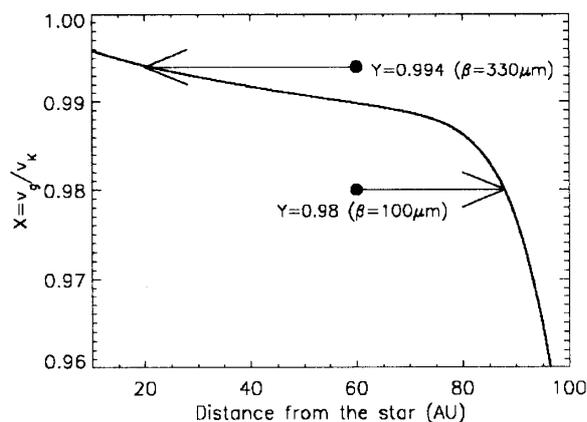


図3：ガス円盤の回転速度とケプラー速度との比。星から遠ざかるにつれてケプラー運動からのずれが大きくなり、ガスの密度が急激に下がる80AU付近で、ケプラーからのずれはさらに大きくなる。60AUのところにある $100\mu\text{m}$ と $330\mu\text{m}$ の塵が移動していく方向を矢印で示してある。

移動は止まる。つぎに、この塵よりずっと大きい塵、たとえば $330\mu\text{m}$ の塵を考える。この塵は、60AUではガスよりも速く回っている( $Y > X$ )。そして、星に向かって移動していくが、より内側のガスの速度はケプラー速度に近づいていくので、あるところでガスと同じ速度になり( $Y = X$ )、やはりそこで移動が止まる。このようにして、塵はちょうどガスと同じ速度で回るところまで移動し、そこにたまっていく。そして星からの距離によって、たまっていく塵の大きさは異なっている。塵とガスが同じ速度になる条件( $Y = X$ )を描いたのが、図4である。図4の曲線より大きい塵は、ガスよりも速く回っているために星に向かって移動する。逆に小さい塵はガスよりもゆっくり回っており、星から遠ざかるように移動する。そして、この曲線まで達すると移動は止まる。

この過程によって、ガス円盤内で塵は大きさにより分別され、違う場所にたまっていく。大きい塵は星の近くに、小さい塵は遠いところにより分けられる。そしてガス円盤の外端部(図4では100AU付近)では、ガスの速度の変化が大きいため、さまざまな大きさ(図4では $10\text{--}100\mu\text{m}$ )の塵がたまっていく。外端部の狭い領域に、いろいろな大きさの塵がたまるため、その部分は塵の個数密度が大きく、リング状の構造が形成される。

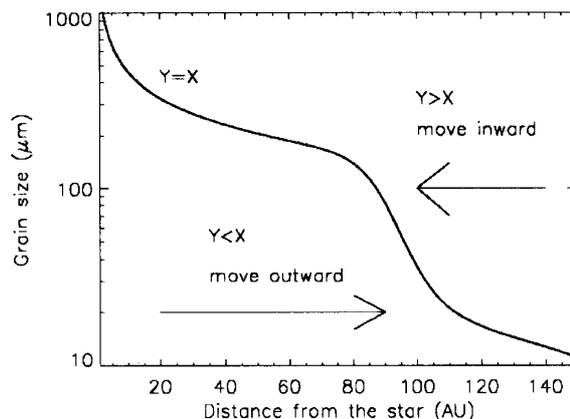


図4：ガス円盤の中での移動が止まり、たまっていく塵の半径を、星からの距離に対して描いたもの。この曲線より大きい塵は内側に移動し、小さい塵は外側に移動する。ガス円盤の大きさは100AU程度で、80AUくらいからガスの密度は急激に減少している。

## 4. リング状の赤外放射

これまでの議論で、ガス円盤内での塵の移動による分別が起こり、特に円盤外端部に10-100 $\mu\text{m}$ の塵がたまっていくことがわかった。こうしてたまっていった塵の密度がどのくらいになるか考えよう。

若い遷移的円盤においても、塵は小惑星などの小天体の衝突によって作られたと考えられる(この節で議論される衝突破壊の時間が星の年齢より小さいため)。惑星の形成は比較的星に近いところ(たとえば10AU)で行なわれ、小天体の衝突による塵の生成も星の近傍で起こったとしよう。これらの塵のうち1mm程度より小さいものは外側に移動し、あるところで移動が止まる。たまった塵の軌道は、ガス抵抗のため円軌道になり、また、同じ大きさの塵が同じところにたまるので回転速度も等しく、おたがいが衝突することはない。しかし、この塵の軌道を横切って外側に動いていくより小さな塵と衝突すると、壊されて、小さな破片ができる。この破片は外側に動いていき、またあるところで移動が止まるが、しばらくすると、さらに小さな塵と衝突して破壊され、小さくなる。そして外側に動いていく。このようにして、小天体の衝突によって星の近傍で作られた塵は、少しずつ小さくなりながら、外側に動いていく。そして、最後の衝突で、塵が小さくなりすぎ、星からの輻射圧が重力より強くなると、塵はもはや星からは束縛されず、星間空間に飛び散っていく。

この過程を調べることにより、塵の密度分布を計算することができる。そして、ダスト円盤が赤外線で見えるかを示す計算したものが図5である。グレイスケールで波長1.1 $\mu\text{m}$ の近赤外線の放射が示してある。この近赤外線は星からの光が塵によって散乱されたもので、塵の密度分布をよく現している。一方、等高線は波長18.2 $\mu\text{m}$ の中間赤外線の強さを示したもので、塵の熱放射である。星の近傍では、近赤外線放射に示されたように塵の密度は低くなっている。しかしそこでの塵の温度は高いため、ほとんどの熱放射は星近

傍からきている。

さて、理論的に得られた赤外放射の像を観測と比べてみよう。図5は、近赤外・中間赤外線両方でHD141569Aで観測されたものとよく似ている[10]。HD141569Aでは、観測されたリング状構造を説明するのに惑星を持ち出す必要はなく、これまでの観測からでは惑星の存在を結論づけることはできない。

HR4796Aについても、図1の近赤外線による散乱光の像は、塵の移動によってうまく説明される。近赤外線でのリングは、惑星によってできたものとは言えないだろう。しかし観測は、熱放射も主にリングの部分から発せられており、図5と違い、星の近傍からの熱放射はほとんどないことを示している[11]。塵の移動によって作られるダスト円盤では、星の近傍にも密度は低いものの、1mm程度の大きい塵があって熱放射をしている。HR4796Aで星の近傍からの熱放射が観測されないことは、そこでは塵の密度がきわめて薄くなっていることを示している。これは塵の移動だけでは説明がしにくい。リングの内側には惑星があって、そのために星近傍の塵の密度が低くなっているのかもしれない。観測された熱放射の像を説明するために、惑星が星の近傍の塵を除去したと考え、惑星は30AUくらいのところにあることになる。この惑星は、近赤外線撮像されたリングの形成にはほとんど寄与していない。リング自体は塵の移動によって作られたと考え

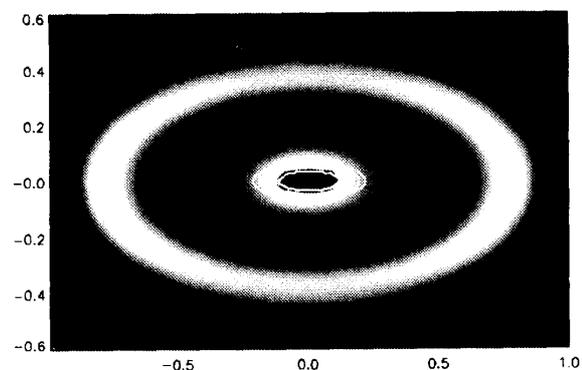


図5: 塵の放射する赤外線の像。グレイスケールは波長1.1 $\mu\text{m}$ での星からの散乱光を表す。等高線は波長18.2 $\mu\text{m}$ での熱放射。計算は、13AUより外側の部分(中心部の小さな穴の外側)について行った。

ると、惑星はこれまで言われていたほど星から遠くにある(60AU程度)必要はない。

## 5. ベガ型星のまわりの惑星探し

図5に示されたように、ガス円盤内での塵の移動によっても、リング状の構造は形づくられる。特に、塵の密度に敏感な近赤外線の観測では、惑星の重力によって形成されたリングと区別をつけることは難しい。このような近赤外線の観測で惑星を見つけるためには、1節で触れた小さな穴のあいたリングのような、非軸対象の構造を見つけることが必要である。塵の移動のモデルでは、非軸対象の構造を作るのは難しいからである。塵の熱放射を観測する中間赤外線でのリング構造の検出は、惑星探し的手段としてはかなり有望である。中間赤外線でのリング構造は、リングの内側での塵の密度が非常に薄いことを示し、塵の移動のモデルでの説明を難しくする。すばる望遠鏡のCIAO(Coronagraphic Imager with Adaptive Optics)やCOMICS(Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer)をもちいた近赤外、中間赤外観測を行えば、さまざまなベガ型星のまわりの惑星を探索することができる。

これらの観測結果がすべて塵の移動で説明され、惑星を見つけることができなかったということもありうる。とくに図4にあるような、ダストのサイズ分別が起こっていることが発見されれば、惑星を探す人にとっては大きな痛手だろう。しかし、がっかりすることはない。観測された塵の密度分布などを塵の移動モデルと突き合わせることによって、ガス円盤の性質を推定することができるからである。塵に比べるとはるかに難しいガスの観測が直接できなかったとしても、私たちはガス円盤の性質を知ることができる。さまざまな波長でダスト円盤を撮像すれば、ダストの密度分布、温度分布、サイズ分布などが求められる。そして塵の移動のモデルとの比較によって、たとえばガスの密度分布をダストの密度分布から求めることができる。このよう

にしてHD141569Aのガス円盤は質量が50地球質量くらい(約10-4太陽質量)と推定される。HD141569Aのような若い遷移的円盤では、ガスは散逸の過程にあるのだろう。こういった、ガスが散逸しつつあるさまざまな星について、ガス円盤の質量や分布などを求めていくことができる。それは、ガス円盤がどのように進化し、いつ、どのように散逸していくのかを私たちに知らせてくれる。そのとき私たちは、円盤ガスのなくなっていく様子を知り、木星のようなガス惑星がいつまでにできたのかを知る。

## 参考文献

- [1] Dermott, S. F. et al., 1994, *Nature*, 369, 719
- [2] Greaves, J. S. et al., 1998, *Astrophys. J. Letter*, 506, L133
- [3] Weinberger, A. J. et al., 1998, *Astrophys. J. Letter*, 525, L53
- [4] Schneider, G. et al., 1999, *Astrophys. J. Letter*, 513, L127
- [5] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, eds. D. C. Black & M. S. Matthews (Tucson:Univ. of Arizona Press), 1100
- [6] Takeuchi, T. & Artymowicz, P., 2001, *Astrophys. J.*, 557, in press
- [7] Backman, D. E. & Paresce, F., 1993, in *Protostars and Planets III* eds. E.H. Levy & J.I. Lunine (Tucson: Univ. of Arizona press), 1253
- [8] Smith, B. A. & Terrile, R. J., 1984, *Science*, 226, 1421
- [9] Thi, W. F. et al., 2001, *Nature*, 409, 60
- [10] Fisher, R. S. et al., 2000, *Astrophys. J. Letter*, 532, L141
- [11] Telesco, C. M., et al., 2000, *Astrophys. J.*, 530, 329