

ガスバスターズ：原始惑星系円盤の中の惑星

竹内 拓

〈東京工業大学理学部地球惑星科学科 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

email: taku@geo.titech.ac.jp

惑星形成とは原始惑星系円盤の中から岩石や鉄といった重元素が凝縮する過程である。したがって、惑星ができるときには水素やヘリウムガスが余ってしまう。できあがった惑星は余った原始惑星系円盤のガスの中を漂うことになる。しかし木星のような巨大惑星の重力は、原始惑星系円盤のガスのうち自分より太陽に近いものを太陽に落とす。このようにしてできた原始惑星系円盤の穴は、将来のLMSAなどで検出可能である。

1. 太陽系のゴミ問題

私たちの足もとの大地は、珪素や酸素、鉄といった重い元素からできている。一方、宇宙の大部分は水素やヘリウムからできており、リチウムより重い重元素は2%弱しかない。つまり、地球は宇宙の中ではまれな元素が寄り集まってできたのである。そうすると、地球をふくむ太陽系の惑星が誕生したときには、大量のゴミがでたはずである。宇宙の大部分を構成している水素とヘリウムである。金鉱から金を採掘すると大量の岩石がゴミとしてでると同じである。本稿ではこのゴミの話をしたと思う。太陽系はどうやってゴミの処理をおこなったのであろうか。ゴミの処理はいつも重要な問題になる。工場を建てる時にも都市計画のうえでも、太陽系の形成でも私たちの頭をいつも悩ませる。

2. 太陽系の形成過程¹⁾

星は、分子雲のガスが自分の重力で収縮していくことによって生まれる。このガスは大部分が中心に集まって光り輝く恒星になるが、一部分は取り残されて中心星のまわりを円盤状にとりかこむ。この円盤状のガスから惑星が形成されると考えられており、原始惑星系円盤とよばれる。原始惑星系円盤はそのほとんどが水素とヘリウムからなっ

おり、酸素や珪素といった重元素はほんのわずかしかなかった。このわずかな重元素から地球のような惑星が誕生する。

将来は地球のような大きな岩石の固まりになるはずの重元素も、最初は原始惑星系円盤の中ではばらばらであった。細かい土埃のようになって原始惑星系円盤内を漂っていた。激しい風に巻き上げられた砂漠の土埃も風がやめば地面に再び降り積もる。原始惑星系円盤は太陽のまわりを回転しており、その遠心力は太陽の重力をほとんど消す。しかし、円盤面に垂直な重力の成分は残る。この重力によって土埃は原始惑星系円盤の中心面に降り積もる。(原始惑星系円盤はホットケーキのように少し厚みがある。土埃はその中心面に向かって落ちていく。)水素やヘリウムはガスの圧力があるので中心面に降り積もることはない。風がやんだからといって砂漠で空気が地面に降り積もらないのと同じである。

土埃はどんどん中心面に降り積もっていく。そうして原始惑星系円盤の中で重元素が濃縮されていく。そして降り積もった土埃の層の密度がロッシュ密度という限界密度を超えると、土埃はおたがいの重力で引きあって大きな塊をつくる。そのようにして直径10 km くらいの無数の微惑星が形成される。(微惑星の形成にはもう1つの説がある。

それは、土埃がおたがいにおつかつて分子間力でくっついていき、雪だるまが成長するようにだんだんと大きくなっていく、というものである。(どちらの説が正しいのかはまだよくわかっていない。)

微惑星はさらにぶつかりあい、おたがいの重力でくっつきあう。そして、だいたい1千万年程度で地球くらいの大きさまで成長すると考えられている。

惑星ができた後は大量のゴミがでる。水素とヘリウムのガスである。その一部は木星のようなガス惑星をつくるのに使われたのだろう。それでもまだ大量のガスが余ってしまう。一方、現在の太陽系にはこのガスは見あたらない。いったい誰がどうやってゴミの処理をしたのだろうか。

3. 惑星がつくる密度波

惑星形成の物語にでてくる登場人物は太陽とその子供たち、9個の惑星である。ゴミの処理をしたのは彼らのうちの誰かであろう。私は子供たちを疑うことにした。中でも一番大きな木星が怪しい。誕生したばかりの木星が初仕事としてゴミの処理をかってでたのではないか。

木星が生まれたときには原始惑星系円盤のガスはほとんど残っていたと思われる。なぜなら木星は原始惑星系円盤のガスを吸い込んで巨大な大気をまとったはずであるから、その誕生はまだゴミの処理がおこなわれる前でなければならないのである。

原始惑星系円盤のガスの中に木星ができるとどのようになるだろうか。木星の質量は太陽の約1000分の1でかなり強い重力を持っている。この重力によ

って原始惑星系円盤のガスの運動はかき乱される。図1にかき乱されたガスの様子をしめす。これは、ガスの柱密度を等高線で描いてある。惑星を中心として渦巻き状の波が立っていることがわかる。この波を密度波とよぶ。回転しているガスの円盤の中でこのような非軸対称の波が立つと、波によって円盤の中で角運動量が輸送されることが知られている²⁾。つまり、波が伝わった箇所のうちある部分は角運動量を失う。失った角運動量は波によって遠くに運ばれて別の部分に与えられる。このような角運動量の輸送がおこる。さて、図1のような波が立つとどのように角運動量が輸送されるのであろうか。解析してみると、角運動量は原始惑星系円盤の内側(太陽に近いほう)から、木星を通じて外側(太陽から遠いほう)に流れることがわかる。つまり、太陽に近いガスは角運動量を

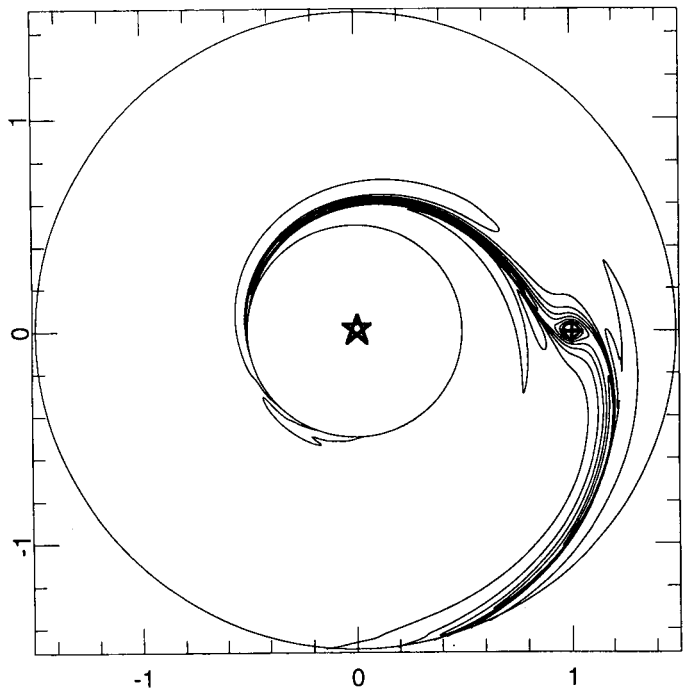


図1. 木星が原始惑星系円盤内につくった密度波。図の中心に太陽があり、原始惑星系円盤を上から見ている。等高線はガスの柱密度を表している。木星は図の右の十字のところにある。計算の都合上、木星軌道を中心としたドーナツ状の領域のみ示してある。

失って、太陽からより遠いガスがその角運動量を受け取るのである。

原始惑星系円盤のうち木星より太陽に近い部分を考えよう。太陽に一番近いところにあるガスは角運動量を失ってすぐ外側のガスに角運動量をわたす。わたされた角運動量はまたすぐ外側のガスに手わたされる。このようにして角運動量が順次外側に手わたされていき、ついに木星のすぐそばのガスが角運動量を受け取る。しかしそのガスは受け取った角運動量を木星にわたしてしまうのである。結局、原始惑星系円盤の一番太陽に近いガスが角運動量を失い、その角運動量は木星が受け取ることになる。

角運動量を失ったガスは回転速度が遅くなり、遠心力では太陽の重力に逆らうことができず、太陽に落ちこちてしまう。このようにして原始惑星系円盤のガスは内側から徐々に太陽に落ち込んでいく。

一方、木星より遠いところにあるガスはどうか。木星は内側のガスから受け取った角運動量をすぐ外側のガスにやはり手放してしまう。そのガスは受け取った角運動量をさらに外側にわたす。そうして、一番外側にあるガスは角運動量ももらって、少し回転が速くなる。すると、遠心力が太陽の重力より強くなるから太陽系から飛び出していく。

これはうまくいきそうである。木星の重力によって原始惑星系円盤内に密度波が立つ。この波によって角運動量が輸送され、太陽に近いガスは落ちこちていき、遠いガスは太陽系を飛び出していく。

しかし、このシナリオがうまくいくには1つ条件がある。波が伝わることによって角運動量が伝えられるのであるから、波が伝わらないところではなにも起きないということである。木星によってうまくゴミ処理をさせるには、木星が作りだした密度波が原始惑星系円盤全体をくまなくいきわたることが必要である。

波は原始惑星系円盤全体に伝わるだろうか。私は原始惑星系円盤内を伝播する波の減衰を調べることによって、この問いに答えた³⁾。

密度波の減衰の原因として、次の2つが考えられる。ひとつは波が急峻化して衝撃波を発生することである。しかし木星以下の質量の惑星では、惑星の近傍を除いて波の非線形性が弱いいため衝撃波も弱く、それによる減衰は小さいと考えられる。もうひとつは原始惑星系円盤のガスがもっている粘性のために、波が徐々に減衰してしまうことである。これが波の減衰の主たる原因になると思われる。

原始惑星系円盤の粘性はガスの乱流によるものと思われているが、乱流のメカニズムがわかっていないため粘性の値もわからない。そこで便宜的に、粘性によるストレスをガスの圧力の α 倍とするいわゆる α 粘性モデルがよく使われる。 α は1よりも小さいパラメータである。様々な α の値をもつ原始惑星系円盤について、波の減衰の度合いを線形の密度波理論を使って求めてみると、 α が 10^{-3} 以下となるくらい粘性が小さければ、波は原始惑星系円盤のほぼ全域に伝わるのがわかった。

原始惑星系円盤の粘性は、波が全域を伝わるほど小さかったのだろうか。私はその可能性は高いと考える。原始惑星系円盤の粘性の原因として、ガスの温度勾配が大きくなりすぎることによる対流不安定性や、ガスが差動回転していることによる不安定性で乱流が励起され、粘性としてはたらくことが検討されてきた。しかし、惑星形成が進行しているときの原始惑星系円盤の質量は比較的小さいと考えられており(太陽の100分の1程度)、対流不安定性は起こりにくいとされている⁴⁾。一方、差動回転の不安定性は磁場があるときに顕著となるが⁵⁾、原始惑星系円盤のガスは電離度が低く磁場による不安定性の増幅はあまり期待できない⁶⁾。そこで、原始惑星系円盤では乱流は強くなく、粘性も小さかったであろうと期待される。

4. 木星によるゴミ処理

密度波の伝播による角運動量輸送の結果、木星によるゴミ処理はどのように進行するのだろうか。図2にその様子を示す。木星の影響で原始惑星系

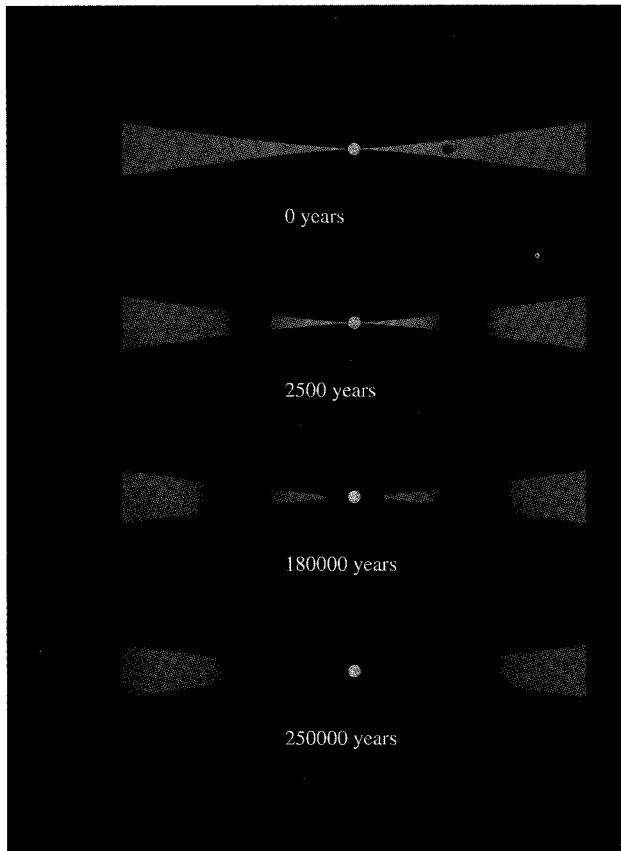


図2. 木星の重力によって原始惑星系円盤のガスが消失していく様子。図は横からの断面図。中心の丸が太陽。右側の丸が木星。

円盤の構造が進化していく様子を横から見た断面図で描いてある。まず木星のまわりに空隙が形成される。この空隙は、木星のごく近傍の、波長が短い粘性による減衰を受けやすく伝播距離の短い密度波によって形成される。つづいて、原始惑星系円盤が内側から消失していくのがわかる。25万年後には木星より太陽に近い原始惑星系円盤のガスはすべて太陽に落ち込んでしまう。一方、この時点で木星より遠いガスはまだ太陽系内に残り残されている。内側のガスが失った角運動量はすべて外側のガスにわたされたのであるが、外側のガスをすべて太陽系から飛び出させるには角運動

量が足らなかったのである。つまり、木星の重力は木星軌道より内側の円盤ガスを太陽に落ち込ませるが、外側の円盤ガスを散逸させることはできない。

内側にガスがあったあいだは、木星は内側の円盤ガスから受け取った角運動量をほとんどそのまま外側のガスにわたしていた。そして木星自身の角運動量の変化はほとんどなく、軌道も安定であった。しかし、内側のガスがなくなると、木星は外側のガスに角運動量をわたすのみである。木星はどんどん角運動量を失っていき、太陽に近づいていく。木星の軌道変化の時間スケールは、粘性による原始惑星系円盤の進化の時間スケールと同じくらいである。 α が 10^{-3} であれば100万年程度で太陽に落ちこちる。木星が太陽に落ちこちる前に、外側のガスが木星以外の原因でなくなってしまわなければ、現在のような太陽系はできない。外側のガスがなくなった原因についてはこの節の最後にふれる。

最近、ペガサス座51番星のまわりに質量が木星程度の惑星が発見された⁷⁾。この惑星は驚くべきことに主星からの距離が0.05 AU (太陽、地球間の距離の0.05倍)しかない。このような主星にきわめて近い位置にど

うやって木星型惑星ができたのかは今のところ謎である。ひとつの可能性は、この惑星はもっと主星から離れたところで誕生したのだが、その後外側の円盤ガスに角運動量をわたして主星に近づき0.05 AUまで移動したということが考えられる。

以上をまとめると、木星がうまくゴミ処理をおこなうためには、原始惑星系円盤の粘性が小さく、密度波が原始惑星系円盤内にくまなくいきわたることが必要である。そうすれば木星軌道の内側にある円盤ガスは太陽に落ちこちってしまうだろう。しかし、外側の円盤ガスはそのままである。外側の円盤ガスはどう処理したらよいのだろうか。

太陽系の子供たちがうまく解決できなかった問題は親の太陽の助けを借りることにしよう。古典的Tタウリ型星とよばれる種類の星がある。これは生まれたばかりの星で、原始惑星系円盤をまわっており、また強い紫外線を出している。太陽も赤ん坊のときはこのような姿をしていただろう。原始惑星系円盤の外側の部分のガスは太陽からの強い紫外線によって太陽系の外に蒸発してしまったという説がある。Shu たちの計算によると、現在の太陽より紫外線が100倍強い時期が1000万年続けば、土星軌道より遠いところにあるガスはすべて蒸発させることが可能である⁸⁾。しかし、昔の太陽の紫外線の強さなど、わからないことも多い。今後の研究が待たれるところである。

5. ゴミから惑星を探す

惑星にとっては原始惑星系円盤のガスはゴミとして捨てられてしまうものかもしれない。しかしこのゴミは、私たち人類にとっては惑星の形成過程を理解するための大きな手がかりを与えてくれるだろう。ちょうど貝塚から縄文人の暮らしがわかるように。

おうし座分子雲領域などにある若い星のまわりでは、今も惑星の形成が進行中であると期待されている。だが惑星そのものは暗すぎて望遠鏡でつかまえるのは難しいだろう。惑星を直接つかまえるのは無理でも、何とか惑星形成の現場を押さえられないものか。原始惑星系円盤のガスは100AUくらいの大きな広がりをもっており、これならば

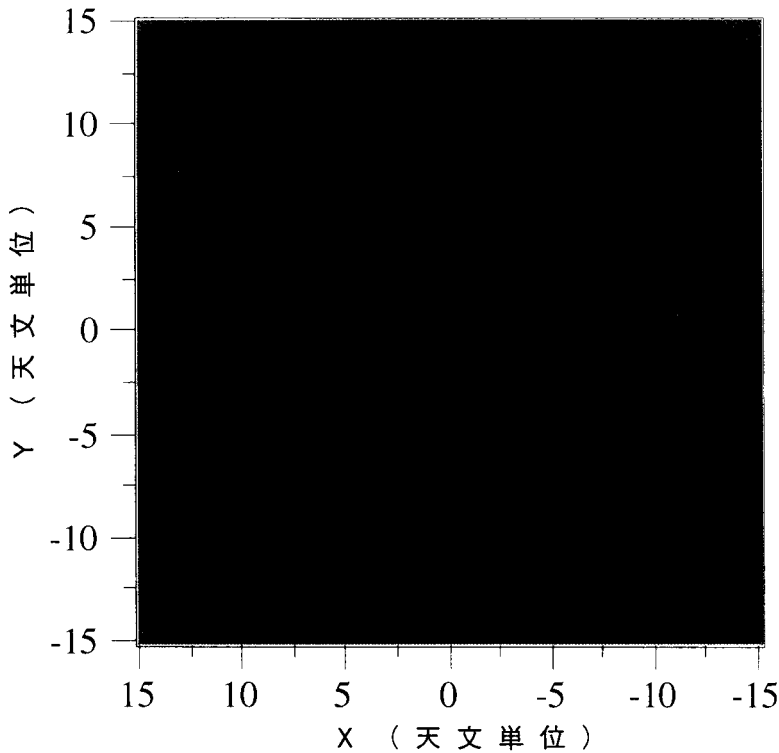


図3. 木星によって直径約5AUの穴のあいた原始惑星系円盤をLMSAで上から見たときの予想図。原始惑星系円盤はおうし座分子雲領域(距離140パーセク)にあり、二酸化炭素の輝線で全くノイズがない状態で観測するとした。望遠鏡の分解能は0.05秒。

私たちの望遠鏡でとらえることができる。実際、原始惑星系円盤のガスは野辺山の電波望遠鏡などですでに発見されており⁹⁾、この中には惑星形成が進行中のものもあるだろう。現在のところまだ望遠鏡の分解能が十分ではなく、100 AU スケールの構造がようやく見えてきたところである。これは太陽系の大きさ (40 AU) よりも粗く、まだまだ惑星形成の現場を解き明かすにはいたっていない。しかし、日本が計画中のミリ波・サブミリ波の大型干渉計 (LMSA) が完成すれば 1AU スケールの構造がわかるようになるだろう。そうすれば、惑星形成の様子を目の当たりにすることができるようになる。LMSA で原始惑星系円盤を眺めれば図 3 のように真ん中に穴のあいた構造が見つかるかもしれない。このような構造は、ゴミ処理に忙しい惑星が穴の中に存在することを指し示すものである。このようにして生まれたばかりの惑星をゴミを使って間接的に発見することができる。このような観測は、惑星がいつどのようにしてできるのかについて大きな手がかりを与える。このような観測によって惑星形成の理解は大きく前進するだろう。

参考文献

- 1) 渡邊誠一郎, 井田茂, 1997, 比較惑星学, 松井孝典編 (岩波書店), 第 3 章
- 2) Shu F.H., 1992, The Physics of Astrophysics. Gas Dynamics (University Science Books), Chap.12
- 3) Takeuchi T., Miyama S.M., Lin D.N.C., 1996, ApJ 460, 832
- 4) Ruden S.P., Pollack J.B., 1991, ApJ 375, 740
- 5) Balbus S.A., Hawley J.F., 1991, ApJ 376, 214
- 6) Jin L., 1996, ApJ 457 798
- 7) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355
- 8) Shu F.H., Johnstone D., Hollenbach D., 1993, Icarus 106, 92
- 9) Kawabe R., et al., 1993, ApJ 404, L63

Gas-Busters: Planets in Protoplanetary Disks Taku TAKEUCHI

Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro, Tokyo 152

Abstract: Planet formation is the process in which heavy elements such as rocks or iron coagulate in the protoplanetary disks. After the planet formation, there remains much hydrogen and helium gas around the planets. Gravity of giant planets like Jupiter drops the gas inside their orbit onto the Sun and makes an inner hole in the protoplanetary disks. The holes would be detected by LMSA in the future.