

## 原始惑星のガス捕獲による軌道進化

菊地 章宏 (東京工業大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

近年、直接撮像によりほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が発見されている。惑星形成の標準理論であるコア集積モデルでは、コアの形成時間を考えると、巨大ガス惑星が中心星から遠い場所で形成されたとは考えにくい。そこで本研究では、大きな離心率の楕円軌道にある原始惑星のガス捕獲による軌道進化を考え、ほぼ円軌道の長周期惑星の形成が可能かどうかを調べた。質量増加率が1公転周期の間で一定である場合について、軌道進化の式を解析的に導出し、それを数値的に解くことで、軌道要素と質量の関係を求めた。ガスを捕獲することで、離心率は効率的に減少する一方、軌道長半径はあまり減少せず、初期の半分が限度であることがわかった。また円盤の大きさが有限の場合の数値計算を行い、円軌道化したときの軌道長半径と円盤の大きさに関係があることを示した。

### 1 Introduction

2013年6月現在32個の系外惑星が直接撮像によって発見されている。離心率の決定は、時間間隔において直接撮像をして位置の変化を見ることで行うが、長周期のため位置の変化が小さく離心率の決定は難しい。そのため未だ求まっていないものも多くあるが、求まっているものの中に離心率が小さいものがある。このような離心率が小さく長周期の巨大ガス惑星の形成を考える。惑星形成の標準モデルであるコア集積モデルでは、巨大ガス惑星が形成されるためには、十分大きな質量を持つコアが原始惑星系円盤ガスが存在する間に集積しなければならない。しかしコアの形成時間は軌道長半径の約3乗に比例して長くなるので、中心星から遠い場所で形成したとは考えにくい。自己重力不安定モデルによる形成の議論がある一方で、コア集積モデルでコアの形成時間の問題を回避するモデルがいくつか考えられている。本研究ではその中の一つのモデルによる形成を考える。円盤の内側で巨大ガス惑星のコアとなる原始惑星が形成され、巨大ガス惑星になる段階で軌道進化するというモデルである。具体的な形成プロセスは以下の通りである。まずコアが巨大ガス惑星に散乱されて楕円軌道になったとする。楕円軌道のコアと捕獲するガスの物理量は異なるため、コアがガスを捕獲することによって軌道は変化する。ガスを捕獲することによって離心率は下がる一方、1周期

平均では角運動量をもらうことになる。ガスを捕獲することによって失われるエネルギーが小さければ、軌道長半径はそれほど下がらずに離心率が下がることになり、円軌道長周期巨大ガス惑星が形成される。この形成プロセスによる軌道進化については、十分な研究がなされていない。そこで本研究では、ガス捕獲によるコアの軌道進化の物理について詳しく調べる。

### 2 Methods

コア集積モデルによると、コアがガスを捕獲することで巨大ガス惑星が形成される。固体コアのまわりの大気構造を計算すると、コア質量がある程度大きくなると平衡大気が存在できなくなり大気がコアに落ち込むことがわかる。大気がコアに落ち込む速度すなわちコアの質量増加率は、原始惑星系円盤の密度によって2つの場合に分けられる。円盤ガスが十分ある場合は、ガスエンベロープの収縮が質量増加率を律速する。極端に中心星に近くない限り、コアの質量  $M$  だけの関数になり中心星からの距離  $r$  にはほとんど依存しないということが大気の進化計算から分かっている (Ikoma et al. 2000)。円盤ガスが極めて希薄な場合は、円盤からの供給が質量増加率を律速する。

コアは楕円軌道である一方でガスは円軌道なので、

相対速度は超音速になる。そこで、コアがガスを捕獲することを剛体の合体というモデルで考える。コアがガスを捕獲するたびに、ガスから角運動量とエネルギーを受け取り、衝突エネルギーが抜けていく。

ここではガスが常に十分存在していて収縮律速になっている場合を考える。軌道面と円盤面は一致していて、1周期の間で質量増加率は一定であるとす。コアの角運動量とエネルギーの変化を求める。1周期での軌道変化が微小であるという仮定を置いて軌道平均を用いると、コアの1周期後の角運動量  $L_z$  とエネルギー  $E$  は、1周期前の角運動量  $L_{z,0}$  とエネルギー  $E_0$  を用いて、

$$L_z = L_{z,0} + \Delta M \frac{1}{T_K} \int_{T_K} \sqrt{GM_* r} dt \quad (1)$$

$$= L_{z,0} \left[ 1 + \frac{\Delta M}{M} G(e) \right] \quad (2)$$

$$E = E_0 + \Delta M \frac{1}{T_K} \int_{T_K} \left( -\frac{GM_*}{2r} \right) dt \quad (3)$$

$$- \Delta M \frac{1}{T_K} \int_{T_K} \frac{v_{\text{rel}}^2}{2} dt \quad (4)$$

$$= E_0 \left[ 1 + \frac{\Delta M}{M} H(e) \right] \quad (5)$$

と表せる。ここで、 $M$  はコアの質量、 $\Delta M$  は1周期で増加するコアの質量、 $T_K$  は1公転周期、 $r$  は中心星からの距離、 $M_*$  は中心星質量、 $G$  は万有引力定数、 $v_{\text{rel}}$  は位置  $r$  でのコアとガスの相対速度である。また、

$$\frac{1}{2} v_{\text{rel}}^2 = \frac{GM_*}{2r} \left[ 3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{a}{r}(1-e^2)} \right] \quad (6)$$

$$G(e) \equiv \frac{2}{3\pi} \left[ \frac{4E(k)}{\sqrt{1-e}} - \sqrt{1-e} K(k) \right] - 1 \quad (7)$$

$$H(e) \equiv 2 - \frac{4}{\pi} \sqrt{1-e} K(k) \quad (8)$$

$$k \equiv \sqrt{\frac{2e}{1+e}} \quad (9)$$

であり、 $K(k)$  は第1種完全楕円積分、 $E(k)$  は第2種完全楕円積分、 $a$  はコアの軌道長半径、 $e$  はコアの離心率である。これらの角運動量とエネルギーを軌道要素に変換すると、1周期での軌道長半径と離心

率の変化は、

$$-\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta M}{M} H(e) \quad (10)$$

$$-\Delta e = \frac{\Delta M}{M} I(e) \quad (11)$$

$$I(e) \equiv \left[ G(e) + \frac{1}{2} H(e) \right] \frac{1-e^2}{e} \quad (12)$$

$$= \frac{8}{3\pi} \left[ \frac{E(k)}{\sqrt{1-e}} - \sqrt{1-e} K(k) \right] \frac{1-e^2}{e} \quad (13)$$

である。

### 3 Results

1周期での軌道長半径と離心率の変化の式を数値積分した結果をグラフにしたのが図1 図2である。 $a_{\text{ini}}$  は初期の軌道長半径、 $e_{\text{ini}}$  は初期の離心率、 $M_{\text{ini}}$  は初期の質量である。ガス捕獲そのものではエネルギーすなわち  $a$  の変化はないが、 $e > 0$  では collision damping によって  $a$  は減少する。 $e$  が大きいほど衝突エネルギーは大きく、 $a$  の減少は大きい。ただ図1より、 $a_{\text{ini}}$  からの減少は1/2程度が限界であることがわかる。図2より、 $M_{\text{ini}} \sim 10M_{\oplus}$  ( $\sim$ 限界コア質量) とすると、 $M \geq M_J$  ( $\sim 300M_{\oplus}$ ) で  $e$  は初期条件によらずに0.05以下となり、非常に効率的に  $e$  は減衰している。このような  $a$  と  $e$  の変化の結果として、近日点距離  $q$  は増大していく。初期の近日点距離  $q_{\text{ini}}$  を  $q_{\text{ini}} \sim 10\text{AU}$  とすると、 $\sim 10\text{-}10^3\text{AU}$  のほぼ円軌道のガス惑星が形成されることがわかる。また  $q$  は  $e_{\text{ini}}$  に強く依存しており、広い範囲の  $q$  をこのモデルで再現できる。

### 4 Discussion

ここでは軌道上のすべての点でガスが十分にある場合を考えたと、円盤の大きさによっては、コアの軌道が円盤から外に出る場合も考えられる。円盤が途中で途切れていると、遠点側の大きな角運動量・エネルギーをもらえなくなり、円盤が無限にある場合に比べて軌道長半径の減少は大きくなる。本研究では、円盤密度が円盤半径  $r_{\text{disk}}$  で急にゼロになる場合につ

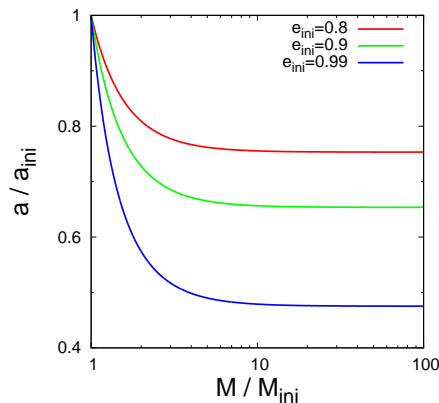


図 1: 軌道長半径の変化

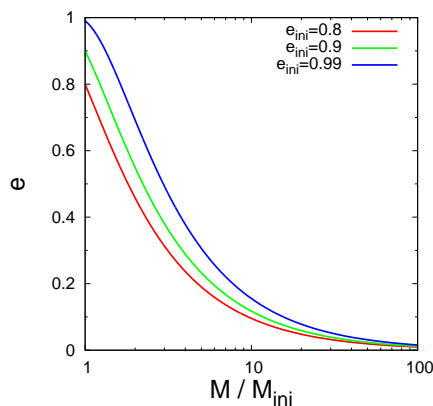


図 2: 離心率の変化

いて数値計算を行った。すなわち  $r_{\text{disk}}$  の内側では収縮律速でガスを捕獲できる一方、 $r_{\text{disk}}$  の外側では供給律速でガスを捕獲できない。ガスの捕獲は先ほどと同じく、剛体の合体だと考え、微小時間ごとにガスを合体させて軌道を求めた。コアはガスを捕獲することで円軌道化する。 $r_{\text{disk}} = 50, 100, 200\text{AU}$  のときの、円軌道化したときの軌道長半径  $a_{\text{fin}}$  を図 3 に示す。 $q_{\text{ini}} = 10\text{AU}$ 、質量増加率を一定とした。 $a_{\text{fin}}$  の値は、 $a_{\text{ini}}$  と  $(dM/dt)/M_{\text{ini}}$  の値にはあまりよらずに一定となっている。 $a_{\text{fin}}$  の値は  $q_{\text{ini}}$  と  $r_{\text{disk}}$  に依存するが、 $q_{\text{ini}}$  の依存性はあまり大きくないので、観測が進んで統計的な議論ができるようになれば、円盤サイズに制約を与えることができるかもしれない。円盤が途切れている場合の軌道進化を解析的に解いて  $a_{\text{fin}}$  と  $r_{\text{disk}}$  の関係を明らかにすることは、今後の課題である。また今回は軌道面と円盤面が一致してい

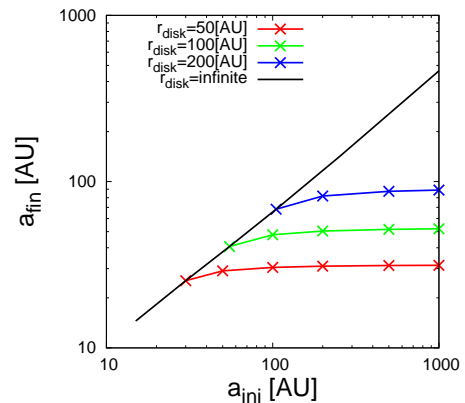


図 3: 円盤が有限の場合の円軌道化したときの軌道長半径

る場合を考えたが、一致しない一般の場合について考えることも今後の課題である。

本研究では、コアがガスを捕獲することを剛体の合体というモデルで考えた。この妥当性については、流体計算をして確かめる必要がある。コアとガスが超音速の相対速度をもつとき、コアが捕獲できるガスの量や、輸送される角運動量やエネルギーを計算して求めることは今後の課題である。

## 5 Conclusion

コアがガスを捕獲することによってどのように軌道進化をするかを調べた。軌道面と円盤面は一致していて、1 周期の間で質量増加率は一定、収縮律速である場合を考え、軌道進化を解いた。計算結果として、ガスを捕獲することで、離心率は効率的に減少する一方、軌道長半径はあまり減少せず、初期の半分が限度であることがわかった。円盤が途切れている場合や、軌道面と円盤面が一致していない場合について調べることは今後の課題である。またコアがガスを捕獲することを剛体の合体としたことの妥当性については、今後流体計算をして調べる必要がある。

## Acknowledgement

本研究を行うにあたり、多くの方にお世話になりました。指導教員である井田茂教授と樋口さんには、多くの議論やご指導をしていただきました。感謝しています。

## Reference

Ikoma, M. and Nakazawa, K. and Emori, H. 2000.  
ApJ, 537, 1013