

巨大ガス惑星の形成初期光度の推定

青山 雄彦 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

近年、赤外波長における直接撮像から長周期である系外惑星の発見が多く報告されている。これらの惑星の質量推定には惑星の光度進化と現在の年齢の関係をを用いる。系外惑星の直接撮像は主星との光度比が小さいほど発見されやすいため、直接撮像されるような巨大ガス惑星は比較的若い(数百万から数千万年)。そのような若い惑星では、理論的な光度進化は初期条件として与える光度(初期光度)に大きく依存する。つまり、初期光度を推定することは、長周期巨大ガス惑星の質量推定・進化を議論する上で重要である。

この初期光度を推定するために、本研究ではコア集積モデルにおけるガス獲得過程に注目する。巨大ガス惑星の初期光度は、その質量のほとんどがガスであることから惑星に降着するガスが待ち込むエントロピー量に依存する。惑星に降着するガスは超音速であり、惑星周りで衝撃波を形成して加熱され、放射冷却でエントロピーを失う。この衝撃波の効果を定量的に扱うために、本研究では放射の影響を加味した三次元流体シミュレーションを行った。

1 Introduction

近年、観測技術の発展に伴い系外惑星の赤外放射を直接観測した例がいくつか報告されており、これらはどれも長周期のガス惑星である。長周期の巨大ガス惑星の質量は、光度と年齢の関係から推定される。ガス惑星の光度進化は質量への依存性が大きいいため、初期光度・年齢・現在の光度がわかれば光度進化を追うことで、観測と矛盾しない質量の範囲を定めることができる。

従来ガス惑星の光度進化を追う場合には、初期光度として物理的に推定された値ではなく十分に高いと考えられる光度を用いて計算を行ってきた(hot-start モデル)。これは高い光度を持つ状態では光度の減少が早く、十分時間が経過後では初期光度の影響はほとんど無くなると考えられてきたからである。Marley et al.(2007)によると初期光度を最大限低く見積もって計算した場合、従来の hot-start モデルとの差が無視できるようになるまでには質量が木星質量程度の場合で 2 千万年、木星質量の 10 倍程度の場合で 10 億年が必要であり、例えば太陽系の木星のような年齢の惑星の進化を考える場合には初期光度は重要ではない。

しかし、系外惑星は光度が高いものほど直接撮像されやすいため、直接撮像されるような惑星に

は若いものが多い。例えば、直接撮像された系外惑星の一つである HR8799b は年齢が 6 千万年、従来の方法で算出された質量が 7 木星質量であり(Marois 2008)、正確な光度進化計算や質量算出のためには初期光度の影響は無視するべきではないと考えられる。

巨大ガス惑星はその質量のほとんどがガスであるため、その初期光度は獲得するガスの持ち込むエントロピー量から見積もれる。Tanigawa & Watanabe(2002)などによると、惑星に降着するガスは衝撃波を経験している。ガスは衝撃波面で高温になり放射によってエントロピーを捨てるので、初期光度は hot-start に比べて大きく下がると考えられるが、その定量的議論は行われていない。

そこで、本研究では数値シミュレーションによるガス惑星が獲得するエントロピー量について、衝撃波の効果を定量的に評価した。

2 Methods

2.1 Assumption

コア集積モデルに基づき、形成された木星コアが周囲の円盤ガスを獲得する過程を考えた。円盤モデ

ルとして林モデル (Hayashi et al. 1985) を採用した。惑星の初期位置を原点とし、その点でのケプラー速度で回転する回転座標系を取った。ガスは水素原子とヘリウム原子であるとし、比熱比は $5/3$ とした。

2.2 Basic Equations

基礎方程式として以下を用いた。質量保存の式：

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

オイラーの式：

$$\begin{aligned} \partial\vec{v}/\partial t + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \\ - Gm(\vec{r}_k/\bar{r}_k^3 + \vec{r}/r^3) + r\Omega_k^2 \\ - 2\Omega_k \times \vec{v} - 1/\rho \nabla P \end{aligned} \quad (2)$$

状態方程式：

$$P = N_a k / \bar{A} \rho T \quad (3)$$

放射輸送方程式：

$$1/c \partial I / \partial t + \hat{e} \cdot \nabla I + \rho \kappa I = \eta \quad (4)$$

エネルギー保存：

$$\begin{aligned} \partial\rho\vec{v}/\partial t + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \\ - \rho(\vec{r}_k 3/2\Omega_k^2 r_k + GM\vec{r}/r^2) \cdot \vec{v} \\ + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \tau + \sigma \nabla T) \end{aligned} \quad (5)$$

$\rho[g/cm^3]$ は密度、 $t[s]$ は時間、 $v[cm/s]$ 速度、 r は惑星からの距離、 $r_k[cm]$ は主星からの距離、 $\Omega[rad/s]$ は座標の回転角速度、 $G[cm/s^2]$ は万有引力定数、 $\bar{A}[g/mol]$ は平均分子量、 $N_a[1/mol]$ はアボガドロ数、 $k[cm^2 \cdot g/s^2 \cdot K]$ はボルツマン定数、 $I[erg/s \cdot sr \cdot cm^3]$ は放射強度、 \hat{e} は基底ベクトル、 $\kappa[1/cm]$ は吸収係数、 $\eta[erg/sr \cdot cm^3]$ は熱放射。

2.3 Numerical Procedure

流体シミュレーションのコードとして、FLASH code (FLASH CENTER, univercity Chicago) を用いた。グリッドのメッシュはメッシュサイズが可変である AMR4.0dev を用い、座標微分は座標軸毎に行なった。

境界条件について特に言及がない場合は境界で物理量の勾配が 0 とし、以下のテスト問題を行った。

2.3.1 衝撃波管

衝撃波管問題を計算した。衝撃波面の左右の密度・圧力を添字 L,R で表すと、

$$\begin{aligned} \rho_L = 1.0[g/cm^3] \quad \rho_R = 0.125[g/cm^3] \\ p_L = 1.0[g/s^2 \cdot cm] \quad p_R = 0.1[g/s^2 \cdot cm] \end{aligned} \quad (6)$$

を初期条件として

2.3.2 回転するガスの自己重力による収縮

自己重力で収縮する角速度を持ったガスのシミュレーションを行った。

初期の分子雲の密度を $3.82 \times 10^{-18}[g/cm^3]$ 、分子雲の半径を $5 \times 10^{16}[cm]$ 、音速を $1.66 \times 10^4[cm/s]$ 、角速度を $7.2 \times 10^{-13}[rad/s]$ として計算を行った。

ガスの密度が $4.33 \times 10^{-16}[g/cm^3]$ を超えるとその周囲 $2.73 \times 10^{15}[cm]$ の領域を 'Sink' とし、その内部に流入したガスは 'Sink' の質量に加算して計算から取り除いた。

2.3.3 原子惑星系円盤

主星周りを回転する原子惑星系円盤のシミュレーションを行った。

デカルト座標で回転座標系を取り、回転面に垂直な方向を z 、回転の動径方向を x とした。

計算領域は x,y 方向に $7 \times 10^{11}[cm]$ 、 z 方向に $5 \times 10^{11}[cm]$ とした。初期条件として温度・密度を太陽系の林モデルに従って、

$$\begin{aligned} T = 280(r/1AU)^{-1/2} \\ h = 0.0047(r/1AU)^{5/4} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\rho = 1.4 \times 10^{-9}(r/1AU)^{-3/2} \exp(-z^2/h^2)$$

とした。ただし、温度は鉛直方向に一様とした。また速度は、回転接線方向の速度を

$$v = GM/r + r\nabla p/\rho - r\Omega_k \quad (8)$$

とした。

y 軸方向の境界条件は、 y 下端の境界のうち、 $x < 0$ の領域と y 上端の $x > 0$ の領域から計算領域に初期条件の流れが流入するとした。

3 Results

テスト計算として行った衝撃波管の結果が図??左である。t=0 に $y=1-x$ を衝撃波面として初期条件を置き、t=2.0 の時の密度を図示しており、3つの密度不連続面が見える、図??と比較するとより一致を示した。

また、回転ガスの自己収縮や原子惑星系円盤に関しても比較を行う。

4 Future Work

図??に見えるように衝撃波が惑星近傍で発生している。この衝撃波でのエントロピー損失を考慮し、惑星に降着するガスの持つエントロピーを定量することで初期光度を推定できる。そのためにテスト計算として衝撃波管・Sink を用いた回転する分子雲の自己重力収縮・原子惑星系円盤でのガスの挙動をシミュレーションした。

この原子惑星系円盤に Sink としてガス惑星のコアを置き、放射の効果を加味すれば巨大ガス惑星の初期光度を推定することができるが、FLASH コードは回転座標系には対応しておらず、現在プログラムを作成中である。

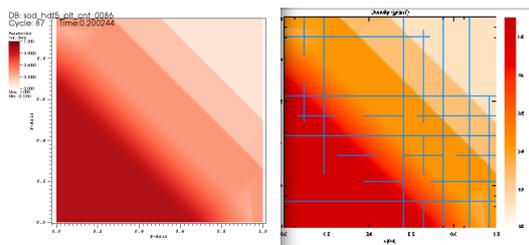


図 1: 2次元 shock tube 計算の結果。左がFLASHのマニュアル記載の実行結果で右が計算例。縦横軸は空間座標であり、色が濃いほど密度が高い。

Reference

Christian Marois, Bruce Macintosh, Travis Barman, B. Zuckerman, Inseok Song, Jennifer Patience, David Lafreniere, and Rene Doyon 2008. arXiv:0811.2606v1

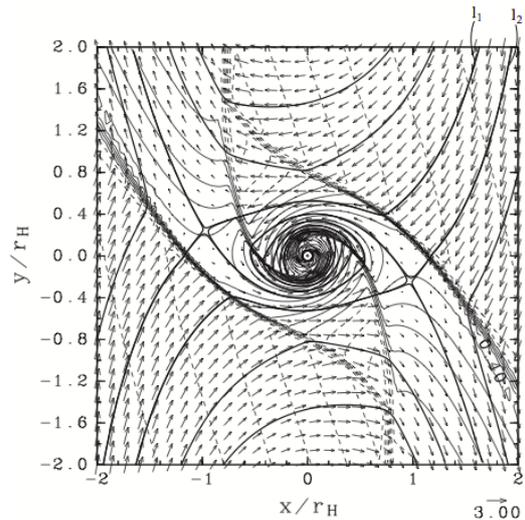


図 2: Tanigawa & Watanabe (2002) 二次元シミュレーションによるガスの集積。軸はヒル半径で規格化された長さ。x 軸が円盤動径方向。原点に 130 地球質量の Sink を置いている。矢印はガスの速度ベクトル。ダッシュの線が衝撃波面を表しており、二つの衝撃波 (bow shock, spiral shock) が見える。この衝撃波面でガスはエントロピーを失うと考えられる。

Mark S. Marley, Jonathan J. Fortney, Olenka Hubickyj, Peter Bodenheimer, and Jack J. Lissauer 2007. ApJ, 655, 541

Tanigawa and Watanabe 2002. ApJ, 580, 506