

星周円盤における分裂片の破壊

加藤 広樹 (大阪大学大学院 理学研究科)

Abstract

星間空間中にある分子雲が収縮して、原始星が形成されるという過程において、分子雲は角運動量を持っている為に、原始星の周りには円盤が形成される。形成された円盤の質量が原始星質量と比べてある程度重い場合、円盤内で重力的に不安定になり、円盤の分裂片が形成されると考えられている。形成された分裂片は、周りの円盤との相互作用により中心の原始星へと落下していき、円盤の寿命と比べて早く落下する場合は中心の原始星と衝突をする可能性がある。この時、分裂片は自己重力により形状を保っているが、中心にある原始星による重力の寄与も受けており、分裂片の中心から見て、分裂片の重力が支配的に作用する境界領域を表す Hill 半径と呼ばれる半径が存在する。Hill 半径の大きさは両者の質量比と中心星からの距離で決まる為、中心星へと分裂片が落下する事により変動し、分裂片の大きさが Hill 半径を上回ると、分裂片の一部が剥ぎ取られていき、結果として分裂片が破壊されることがあり得る。しかし、この破壊にかかる時間と落下の時間との詳しい関係は不明であり、中心にある原始星へと落下しきる前に全て壊されるのか、ある程度の形を保って落下するのか等はわかっていない。

今回、我々は原始星周りを回転する薄い円盤を考え、その中で形成された分裂片の二次元平面内の流体運動を SPH 法を用いて計算した。分裂片の面密度分布としてポリトロブ球による断熱状態のものを考え、これに中心星が及ぼす重力の影響を加えて、中心星周りをケプラー速度で周回させた時の分裂片の時間進化を追った。結果として、分裂片の大きさが Hill 半径と同程度になる位置に達すると、中心星へとガスが剥ぎ取られていき、その一部が分裂片の運動に寄与して、クランプの中心星への落下が早まるという結果が得られた。落下の加速によって、分裂片が Hill 半径に達する位置よりも、さらに中心星に近づいた位置に落ちて行きながら破壊されることがわかった。

1 導入

近年になり太陽系外の星の観測が進んでおり、多くの原始星の周りで円盤が観測されている。その中には重力不安定によって円盤の分裂片が生じているものもある。この分裂片は円盤との相互作用で中心星へと落下していく事があり、その運動の様子は一部の惑星形成モデルや FU Ori 変光星の増光モデル等の天体現象に大きく関与していると考えられる。しかし、それらの現象の研究では計算領域の問題として、中心星からある程度の距離より内では計算を行わずにある種の仮定を置いているものが多くある。しかし、中心星は分裂片より重い為、その近傍では潮汐力が大きく働くようになり、分裂片が破壊される場合がある。破壊されたガスがどう運動するか（中心星への落下の様子や周辺に円盤ができるかどうかといった事）はそもそも考えている惑星形成等の理論

に影響を与える可能性がある為、その振舞を調べる事は非常に意義のある事である。

そこで本研究では潮汐力で分裂片が破壊される場合にどのような運動をするのか、どれ程の時間で破壊されるのかを調べる事を目標とした。その為に 2 次元での SPH 計算を行い検証を行った。

2 モデル

まず分裂片が破壊される指標として以下の Hill 半径を考える。

$$R_{Hill} = R_p \left[\frac{m}{3M} \right]^{1/3} \quad (1)$$

Hill 半径は中心星と分裂片の重力が近似的に釣り合う場所であり、その為 Hill 半径より内では分裂片の重力が支配的に働いている事を表している。分裂

片の大きさが Hill 半径を上回るような時は中心星の力が支配的になった部分から破壊されていくと考えられる。

今回はこの Hill 半径と分裂片の大きさが等しくなる場所を基準として計算を行う。2次元 SPH によって計算を行い、中心星に落下した粒子は取り除いて計算する。流体の基礎方程式は以下のようになる。

質量保存則

$$\Sigma \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \right\} + c_s^2 \nabla \Sigma + \Sigma \nabla \Phi \quad (2)$$

運動方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma v) = 0 \quad (3)$$

面密度 Σ 、速度ベクトル v 、音速 c_s 、外力のポテンシャル Φ

中心星へと落ちた粒子は取り除く為、質量保存則は粒子が中心星へと落下する前にのみ成り立つものである。外力 Φ は中心星による重力と、注目している領域外のガス重力である。ガス圧はガスがポリトロップ $\gamma = 5/3$ の場合として与えた。初期に分裂片を置いた場所以外は真空として計算を行い、その他の条件は次のようにおいて、ケプラー速度を与えて計算を行った。

中心星質量 $M = 1 M_{\odot}$

クラump質量 $m = 0.1 M_{\odot}$

クラump半径 $r = 10 \text{ AU}$

3 結果

計算の結果、分裂片の中心が破壊される時に落下する事がわかった。図 1、2 は計算の初期の状態と 1/2 周期後の様子である。黒線は初期速度における軌道である。

図 3 は Hill 半径内に納まっている分裂片質量の時間変化である。

図よりある程度時間がたった所 (T=0.8 周辺) で破壊の速度が上がっているのがわかる。

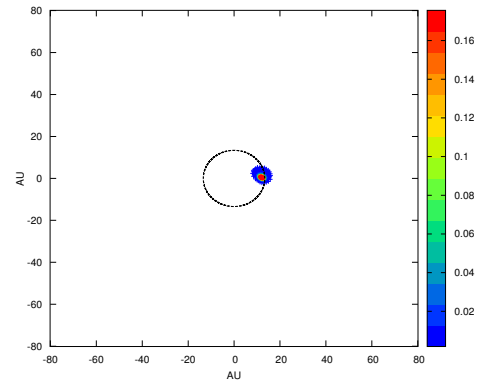


図 1: 初期の様子

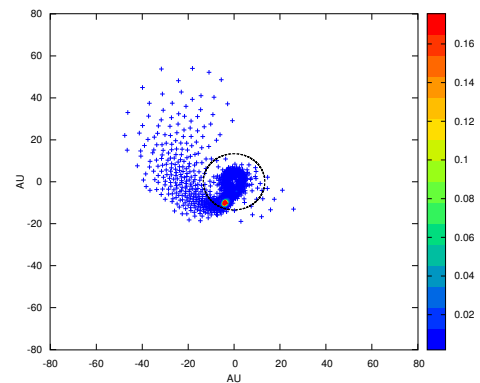


図 2: 1/2 周期後の様子

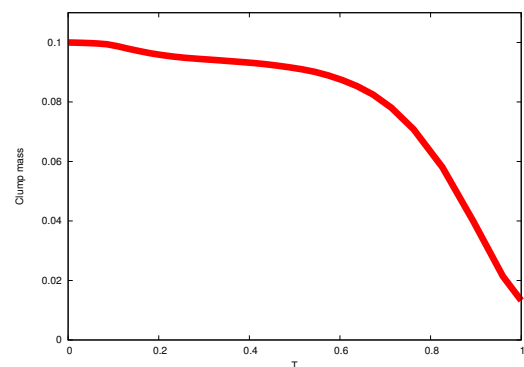


図 3: 分裂片の質量変化

4 考察

今回の計算結果から、分裂片が潮汐力で破壊される場合分裂片自体も破壊されたガスと共に中心星へと落下するのではないかと考えられる。分裂片が落下した場合中心星重力の影響が強まるため、破壊は早く進行すると考えられる。実際に破壊の速度は加速しているのが見て取れる。本体が落下する理由は未だ調べていないが、角運動量の輸送により生じていると考えられるので、今後はこれを調べる事を考えている。

Reference

Nayakshin S.2010,MNRAS.408.36

Vorobyov E.I.,&Basu S.,2005,ApJ,633,137

Toomre A.,1964,ApJ,139,1217