

# 微惑星の形成

## ・惑星形成の過程

- ①微惑星形成 …原始惑星系円盤の進化
- ②微惑星から惑星に …(微)惑星の合体成長

### ①微惑星形成

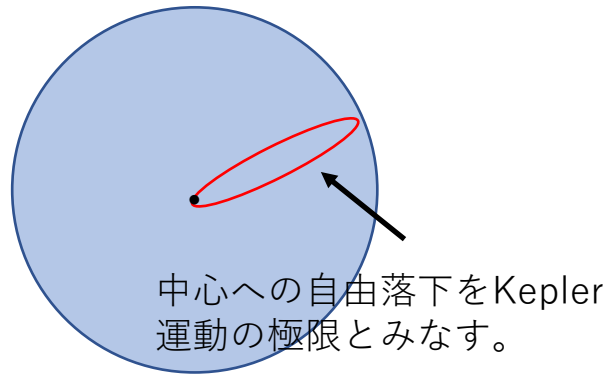
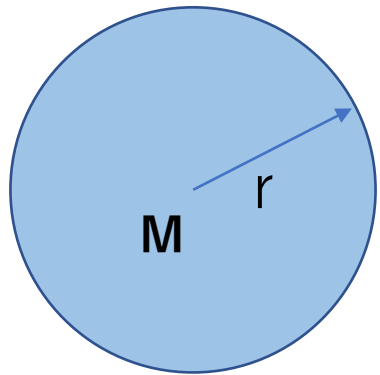
分子雲において、圧力、磁場の力 < 自己重力となると動的収縮（重力収縮）が始まる。重力収縮によってコア中心に原始星が形成される。要する時間は自由落下時間 $t_{ff}$ 。

# 式(3.6)の導出過程

$$\text{自由落下時間} : t_{ff} = \left( \frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{1/2}$$

$G$ : 万有引力定数  
 $\rho$ : 質量密度

「自由落下時間の簡単な導出 (松岡 亮)」  
が分かりやすかったのでここではこれに従う。  
球対称な質量分布 (分子雲コア) の中心から  
半径  $r$  の位置にある質点がコア中心に落ちる  
運動を考える。



Kepler運動の離心率:  $e \rightarrow 1 - 0$  (左側極限)

軌道長半径  $a = r/2$

近日点: 0

遠日点:  $2a = r$

(遠日点速度 = 0)

よって、落下時間  $t$  は Kepler 周期  $T (= 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}})$  の  $1/2$  より

$$t = \pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}}$$

$M$  は密度  $\rho$  を使って  $M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$  と表せ、また  $a = r/2$   
から最終的に  $t$  は

$$t = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} = t_{ff}$$

# $t_{ff}$ の具体的な値

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

に具体的な値

$$\left\{ \begin{array}{l} G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \\ \rho = n \cdot 2.34 / N_A \text{ g m}^{-3} \\ \cdots n \text{ は分子数密度、} N_A = 6.0 \times 10^{23} \text{ はアボガドロ} \\ \text{数、また平均分子量を教科書では} 2.34 \text{ g mol}^{-1} \text{ と} \\ \text{している。} \end{array} \right.$$

これらの値を代入すると、

$$\sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} = \sqrt{\frac{3\pi * 6.0 * 10^{23}}{32 * 6.67 * 10^{-11} * n * 2.34 * 10^3}}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{3\pi * 6.0 * 10^{23}}{32 * 6.67 * 10^{-11} * n * 2.34 * 10^3}} \\ &\approx \sqrt{\frac{1.0 * 10^{30}}{n}} \text{ (s)} \\ &= \sqrt{\frac{1.0 * 10^{30}}{n * (3.154 * 10^7)^2}} \text{ (yr)} \\ &\approx \sqrt{\frac{1.0 * 10^{15}}{n}} \text{ (式3.6)} \end{aligned}$$

$$1 \text{ yr} = 3.15 * 10^7$$

教科書によれば、 $n \sim 10^5$  (個/ $\text{cm}^{-3}$ )なので、自由落下時間はおおよそ $10^5$ 年。

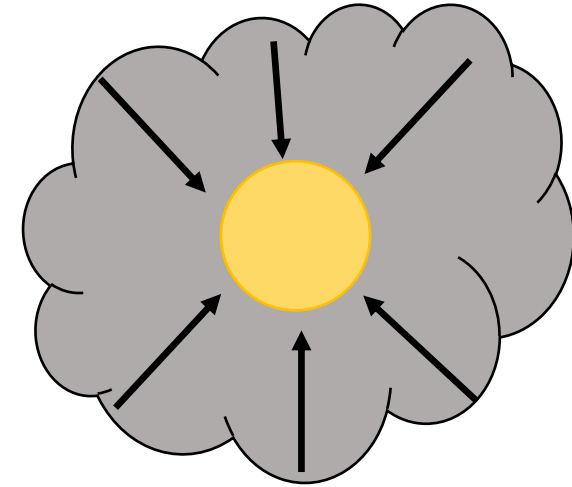
# 収縮過程

収縮過程は主に下の2つに分けられる。

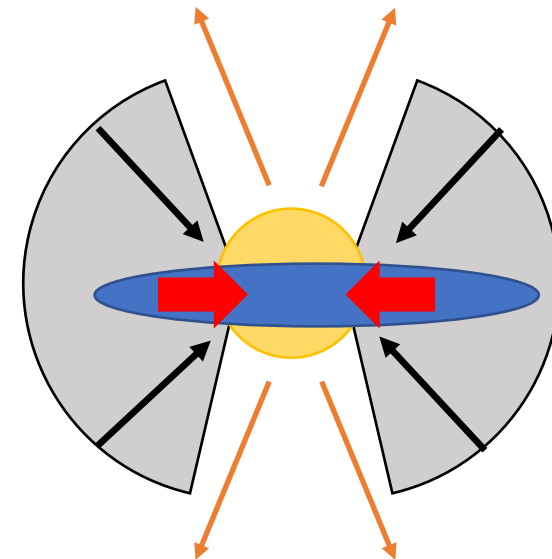
- ①収縮前期
- ②収縮後期…CTTS（古典的Tタウリ星）

①では、落下したガスが中心で急激に止められることにより衝撃波が生まれ、その際に解放されるエネルギーで原始星が輝き始める。しかし、原始星からの放射はエンベロープ中に含まれるダストによって吸収・赤外放射されるため、連続スペクトルは遠赤外域にピークを持つ。

②角運動量の大きなガスが落下してくる。角運動量が大きいため、遠心力と重力が釣り合う半径でケプラー運動をする。そのため、原始星の周りに原始惑星円盤が形成される。直接落下してくるガスが少ないため、ディスクに垂直な方向からは原始性が観測できる。古典的Tタウリ星（classical T-Tauri star : CTTS）であると考えられている。



①Class I



②Class II

# 原始惑星円盤

- CTTSのガス円盤は100AUほどの広さ、 $1/1000 \sim 1/2$ 太陽質量をもっていると考えられている。
- ディスクと垂直方向には光ジェットが吹き出しており、双極分子流を駆動している。
- 双極分子流は中心星に落ちるガスの角運動量を外に放出する役割があると考えられている。
- この光ジェットの成因として、太陽磁場のアナロジーの延長で磁気遠心力説が考えられている。

～磁気遠心力説～

磁気の再結合により発生したジェットが、更に原始星と共に回転している磁場によって加速されるという考え。  
(詳細は Yokoyama & Shibata 1995,1996)

- 角運動量が外へ、質量が原始星側へ輸送されていることから、この段階のディスクは降着円盤とも呼ばれる。

# 太陽系の角運動量

・ 太陽系全体の角運動量 = 太陽の自転角運動量 + 惑星の公転角運動量

惑星の公転角運動量Lは

$$L = m\sqrt{GM}\sqrt{D}$$

{ m : 惑星の質量  
G : 万有引力定数  
M : 太陽質量  
D : 太陽からの距離

太陽の自転角運動量Sは

$$S = I\omega$$

{ I : 太陽の慣性モーメント (~4.0\*10<sup>42</sup> kg m<sup>2</sup>)  
ω : 太陽の自転角速度

…およそ地球の公転角運動量の38倍

計算すると、太陽の（自転）角運動量は太陽系全体の角運動量の約0.5%（~2, 3%）ほどしかない。90%近くが木星と土星によって占められる。

cf) 太陽の質量は太陽系の質量の99.9%を占める。

→角運動量が外側に輸送されている。

# 参考文献

- ・「自由落下時間の簡単な導出」 松岡 亮/2020/12/19  
(<https://www.cosmo.sci.hokudai.ac.jp/~matryo/rigaku/uncat/freefall.pdf> 2023/5/31観覧)
- ・スペクトル用語集◆星の進化 裳華房 ([https://www.shokabo.co.jp/sp\\_Xray/glossary/g-evolve.htm](https://www.shokabo.co.jp/sp_Xray/glossary/g-evolve.htm) 2023/5/31観覧)
- ・太陽系の角運動量Uz-FC2 Yuji.W ([URL](#) 2023/5/31観覧)
- ・岩波講座地球惑星科学12 比較惑星学/岩波書店/松井孝典ほか