

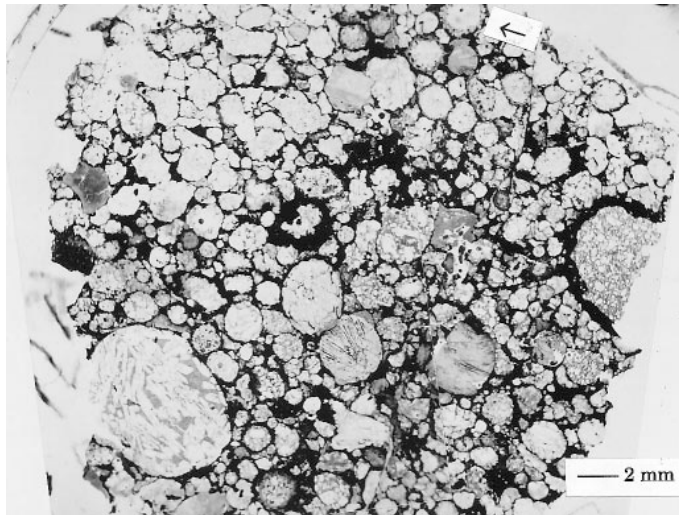
原始太陽系星雲内部における mmサイズの流体力学的研究

三浦 均 (京都大学)

中本 泰史 (東京工業大学), 土居 政雄 (筑波大学)

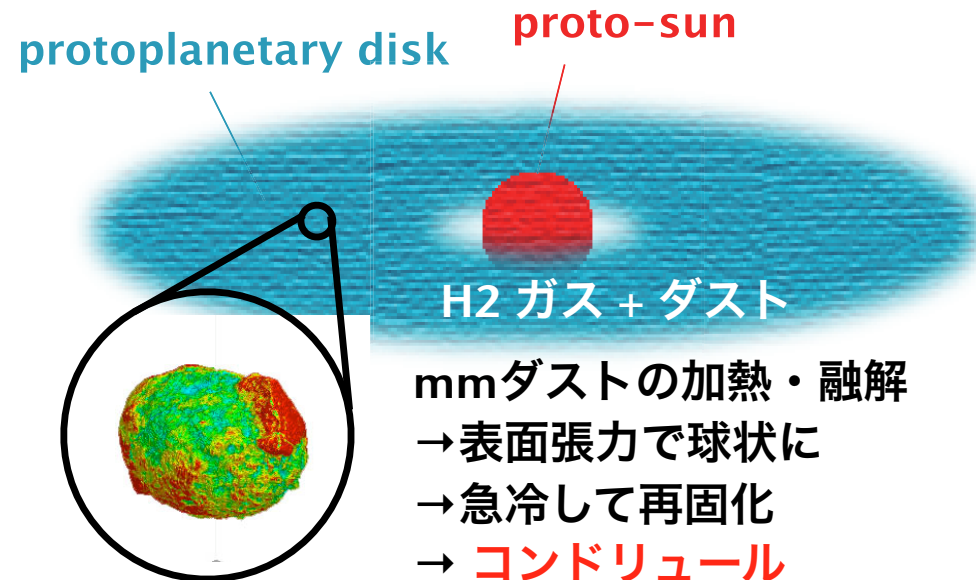
第19回理論懇シンポジウム @ 立教大, 25-27 Dec. 2006

コンドリュール (始源的隕石の断面図)



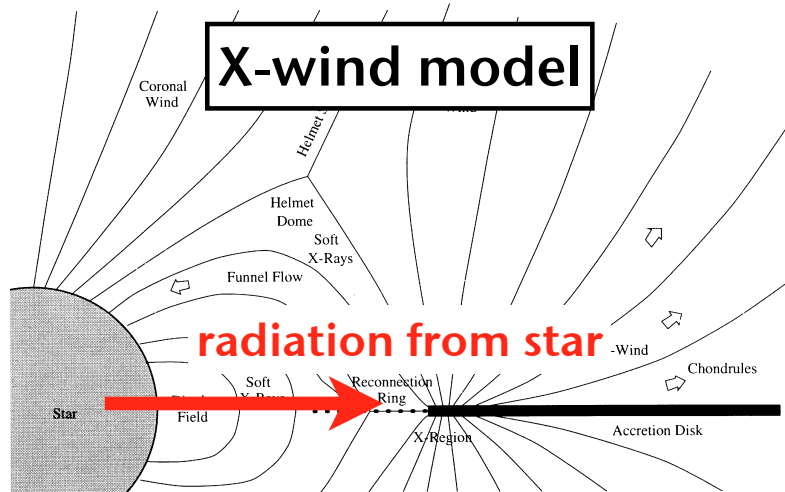
Connolly & Love (1998), Science 280, 62

原始太陽系の珪酸塩ダスト融解現象

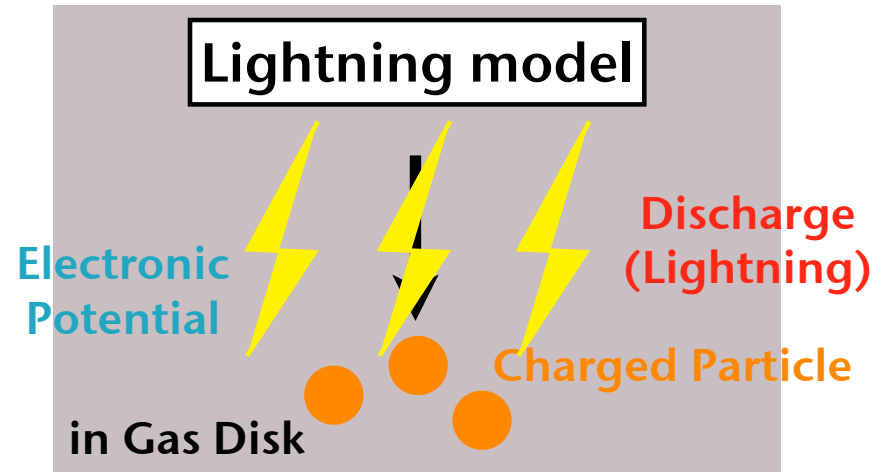


どんなメカニズムがダストを融解し得たのか?
(Sorby 1877, Nature 15, 495)

コンドリュール形成モデル

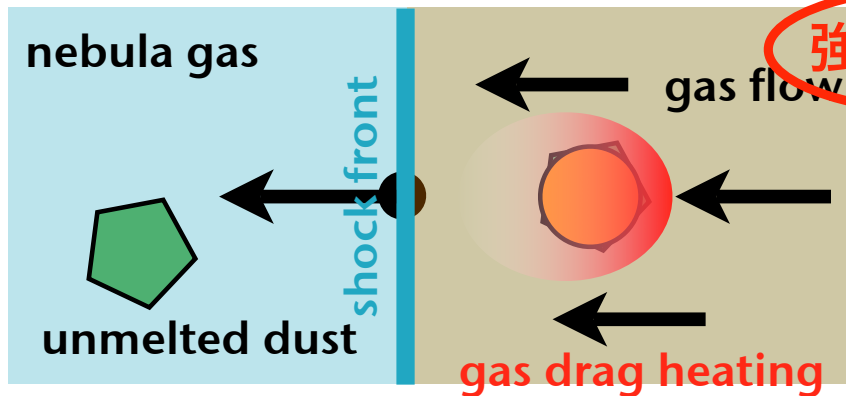


e.g., Shu et al. (2001), ApJ 548, 1029



e.g., Pilipp et al. (1992), ApJ 387, 364

Shock-wave heating model



強いガス動圧

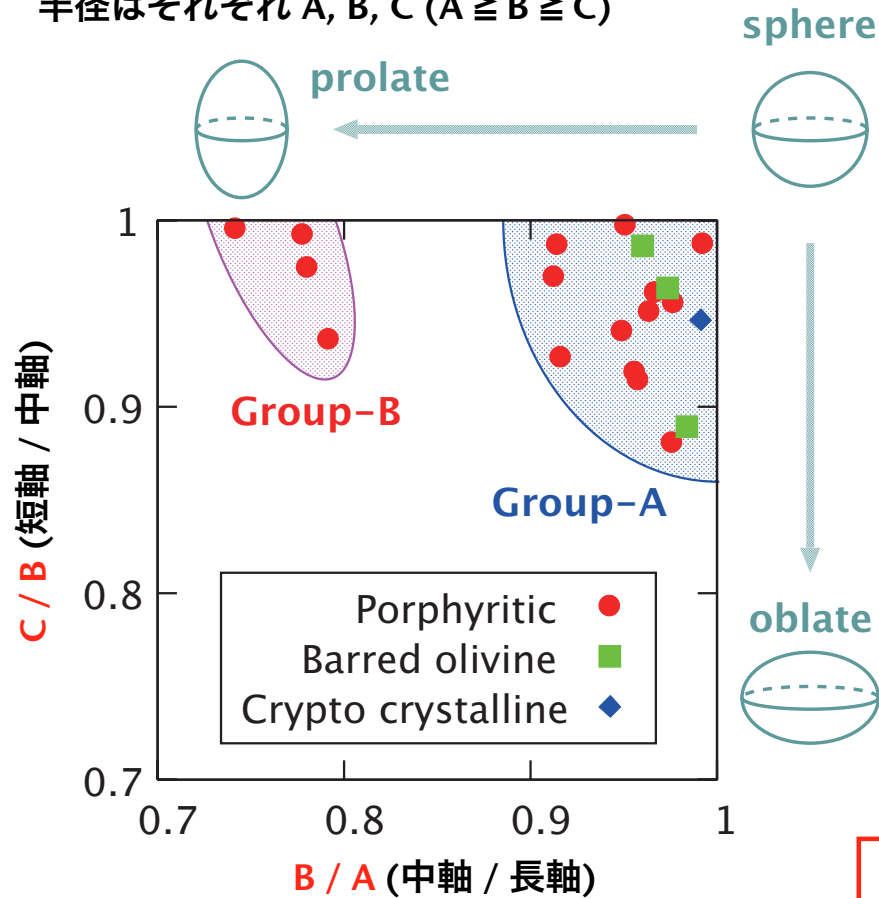
融解ダストの変形
→変形コンドリュール?

Hood & Horanyi (1991, 1993), Ruzmaikina & Ip (1994), Iida et al. (2001), Desch & Connolly (2002), Ciesla & Hood (2002), HM et al. (2002), HM & TN (2005, 2006a)

変形コンドリュール

コンドリュール3次元形状

3軸楕円体で近似
半径はそれぞれ A, B, C ($A \geq B \geq C$)



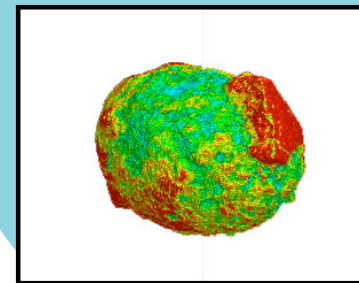
Group-A : 多様な形状

真球に近い

Group-B : プロレート

変形度は大きい

プロレートコンドリュール
(Group-B)



Tsuchiyama, priv. comm.

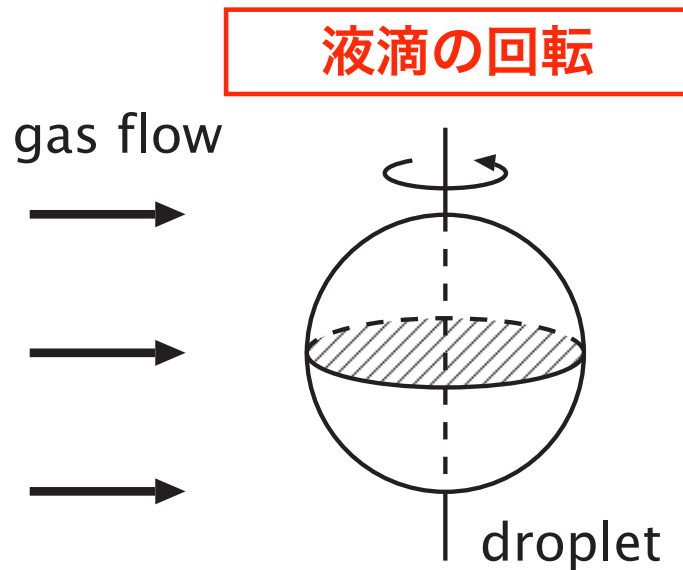
再固化したときの形状を反映？

Tsuchiyama et al. (2003), LPSC, abst#1271

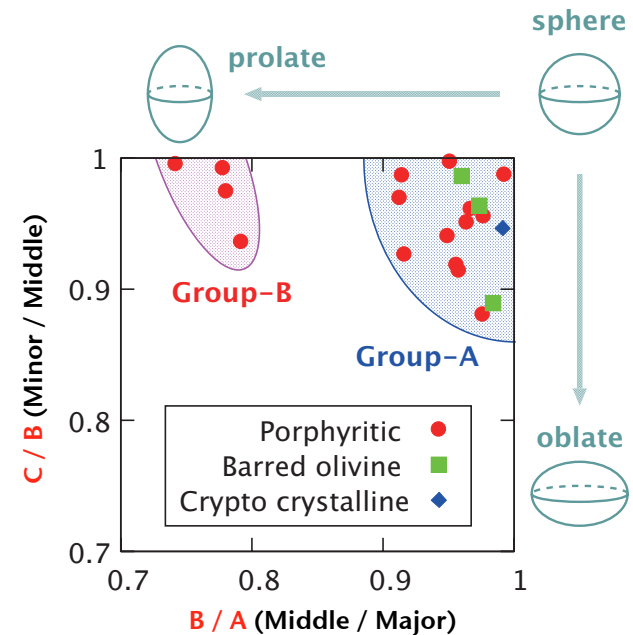
本研究の目的

ガス流中における
融解ダストの変形

コンドリュール形状の
多様性



仮定：回転軸 \perp ガス流の向き



Tsuchiyama et al. (2003), LPSC, abst#1271

衝撃波加熱でコンドリュール形状を
説明できるか？

手法

CIP法 (Yabe et al. 2001, J.Comp.Phys. 169, 556) による3次元数値流体シミュレーション
(HM & TN 2006b, Icarus, in press, astro-ph/0611289)

Eq. of cont. $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$

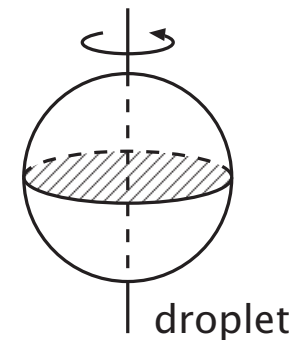
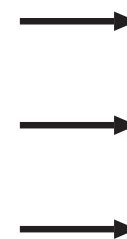
Eq. of motion $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_g}{\rho}$
 $+ \mathbf{g} + \frac{1}{2} \nabla |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}|^2 + 2\mathbf{u} \times \boldsymbol{\Omega}$

Eq. of state $\frac{\partial p}{\partial \rho} = c_s^2$

初期条件 : ガス流中に置かれた真球

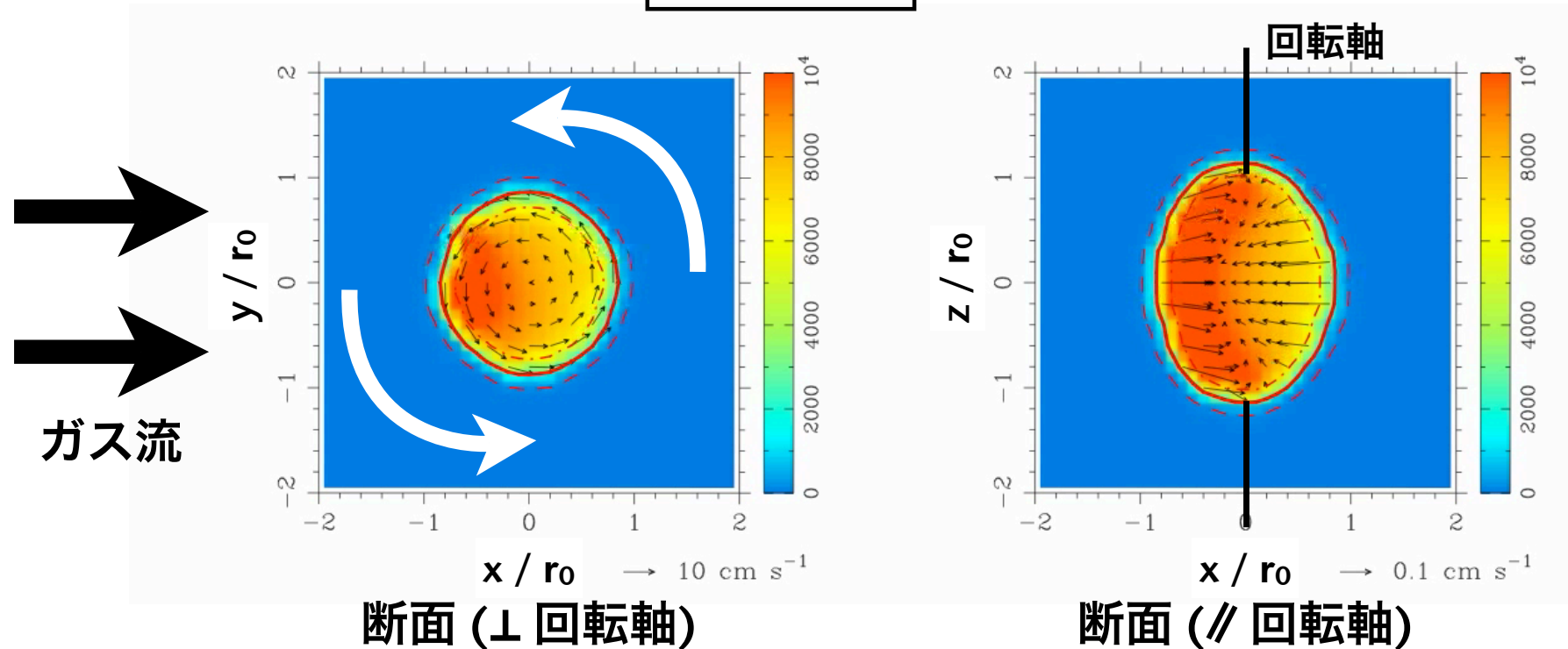
- ガス動圧 : $p_{\text{fm}} = 10^4 \text{ dyne cm}^{-2}$
- 初期の液滴半径 : $r_0 = 1 \text{ mm}$
- 表面張力 : $\gamma_s = 400 \text{ dyne cm}^{-1}$
- 粘性係数 : $\mu = 10^3 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- 角速度 : $\boldsymbol{\omega} = \text{parameter}$

gas flow



計算結果

$$\omega = 100 \text{ s}^{-1}$$

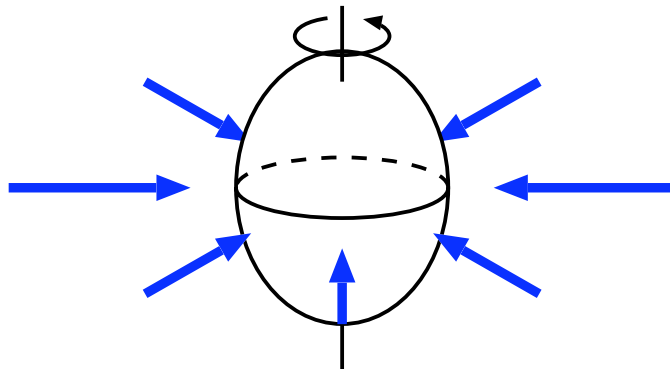


- 回転軸に対して垂直方向に縮む
- 回転軸方向に伸びる(体積保存)
- プロレート形状になる！

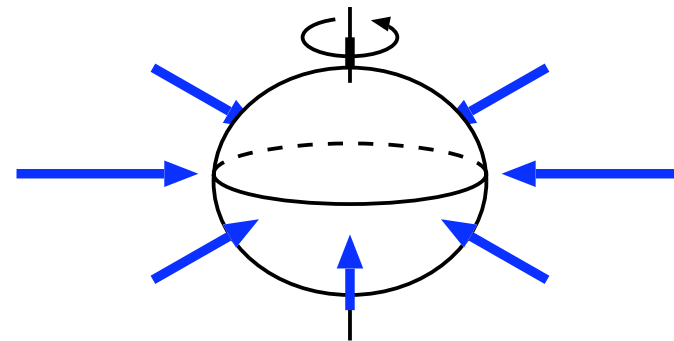
なぜプロレートになるのか？

再固化直前は粘性が高い
変形が回転に比べて十分遅い
→軸対称的なガス流 (ガス動圧)

プロレートに変形



さらに高速回転だとオブレート？



プロレート

オブレート

角速度 ω

R_{cr}

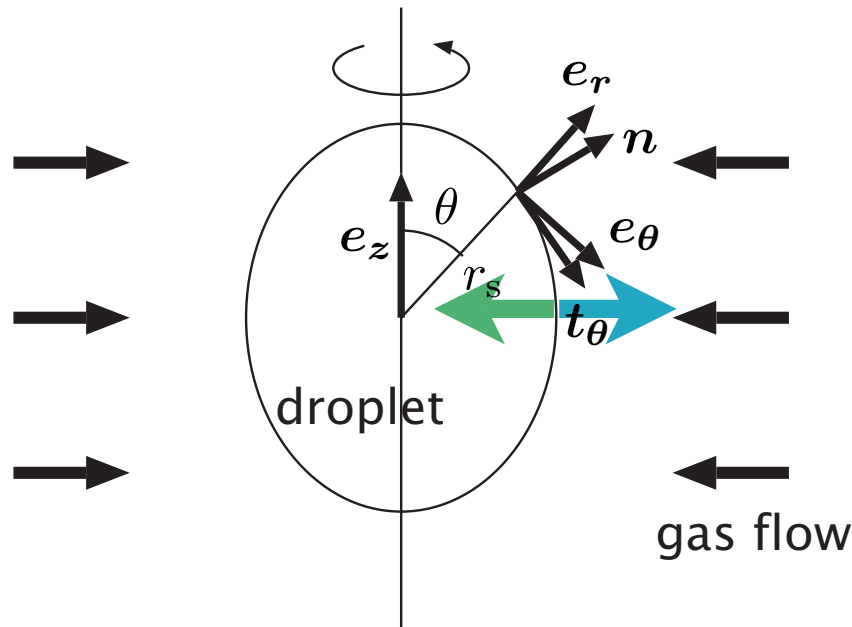
軸対称ガス動圧を仮定し
解析的に液滴形状を導出した

(回転がない場合 : Sekiya et al. 2003, PThPh. 109, 717)

液滴形状の解析的表式

$$r_s = r_0 \left[1 + \frac{W_e}{48} (R_{cr} - R) P_2(\cos \theta) \right]$$

z-axis (rotation axis)



$W_e \equiv \rho_{fm} r_0 / \gamma_s$: Weber 数

$R \equiv \rho r_0^2 \omega^2 / \langle \rho_{fm} \rangle$:
無次元化された遠心力

$$R = \frac{\text{遠心力}}{\text{平均化されたガス動圧}}$$

$R < R_{cr}$: プロレート

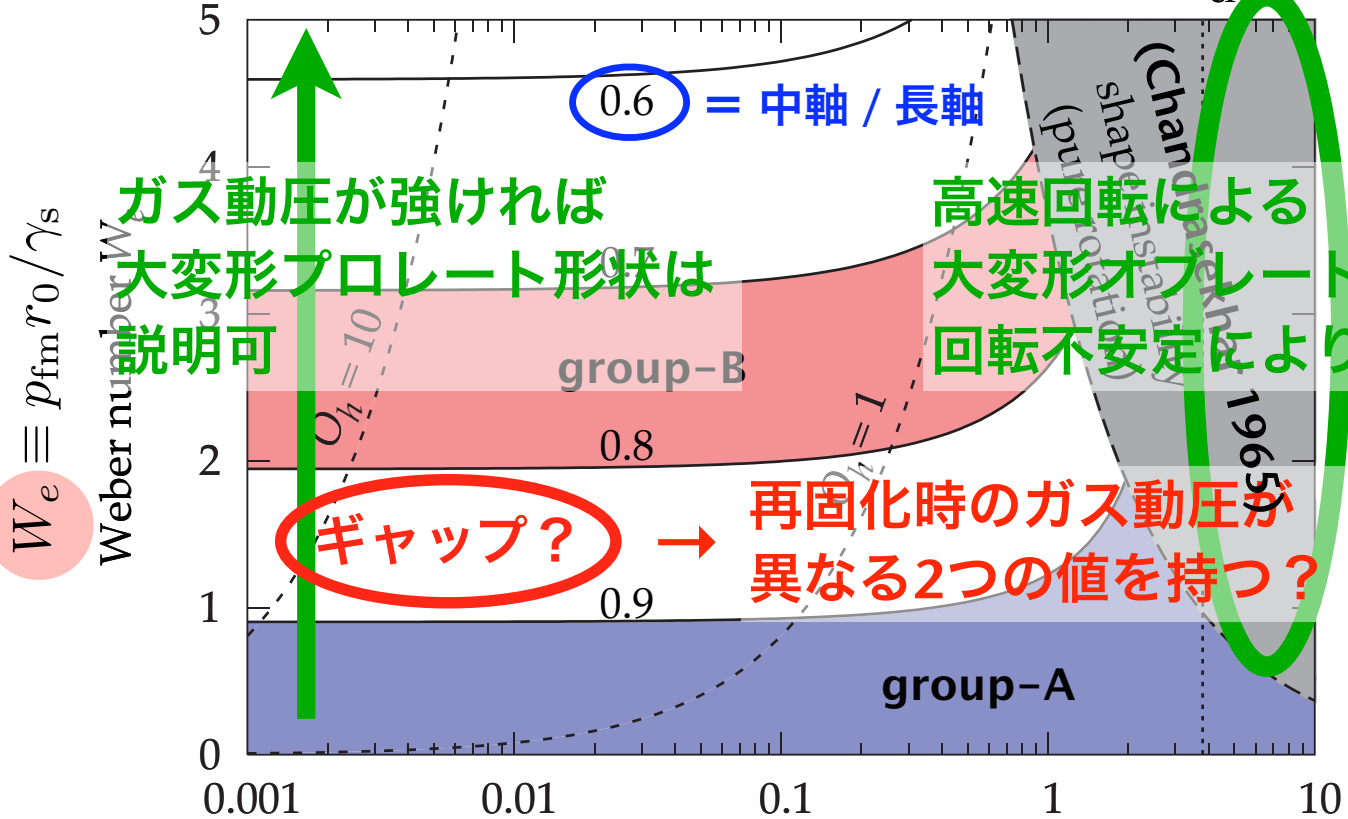
$R > R_{cr}$: オブレート

$$R_{cr} = 19/5$$

コンドリュール形状再現の条件

ガス動圧が大きい (表面張力に対して) ↑

プロレート R_{cr} オブレート



ガス動圧が強ければ
大変形プロレート形状は
説明可

高速回転による
大変形オブレート形状は
回転不安定により不可

ギャップ? → 再固化時のガス動圧が異なる2つの値を持つ?

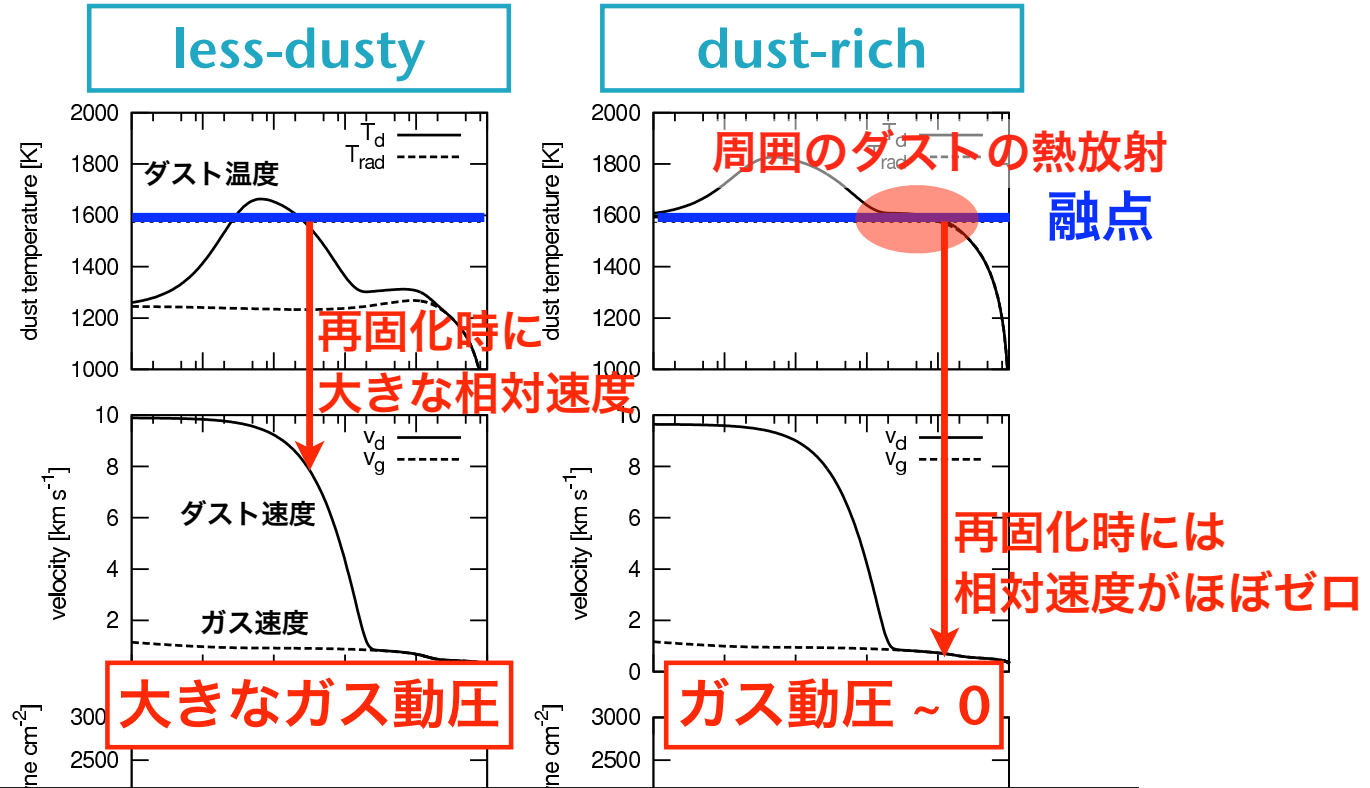
$O_h \equiv \mu / \sqrt{\rho r_0 \gamma_s}$
: Ohnesorge 数

normalized centrifugal force R

$R \equiv \rho r_0^2 \omega^2 / \langle p_{fm} \rangle$

遠心力が大きい (ガス動圧に対して) →

議論：異なる2つのガス動圧



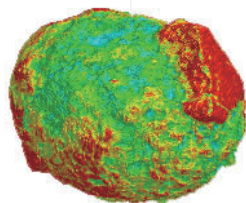
コンドリュール形成領域の光学的厚さ $\tau < 1$ or > 1
 →異なる2つのガス動圧が選択的に多くなる？

衝撃波面からの距離 [cm]

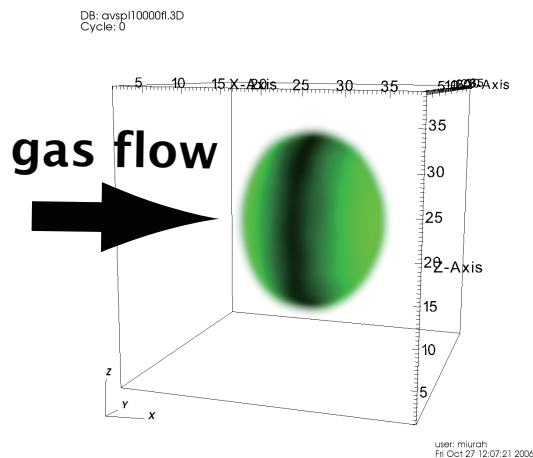
HM & TN (2006a), ApJ 651, 1272

まとめ

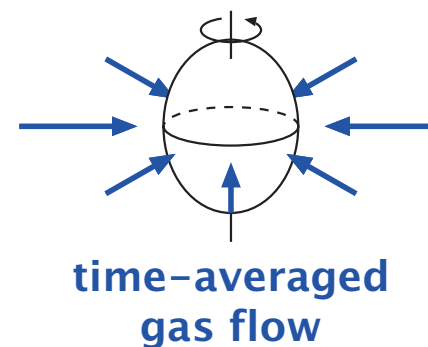
(a) chondrule



(b) simulation



(c) reason for prolate



- 高速ガス流中で融解したmmサイズの珪酸塩ダストの変形
- 適切な回転速度のもとプロレートになる (回転軸 \perp ガス流)
- 衝撃波加熱モデルを強く示唆

**mmサイズの流体力学的研究
→ 原始太陽系星雲内部の物理的環境の推測**