

# 原始惑星系円盤内の雷による コンドリュール形成: 輸送計算

中本泰史, 佐藤拳斗, 池田千尋 (東京工業大学)

天体形成研究会(筑波大学) 2019年10月19日 9:55-10:25

## 1. 惑星形成シナリオ

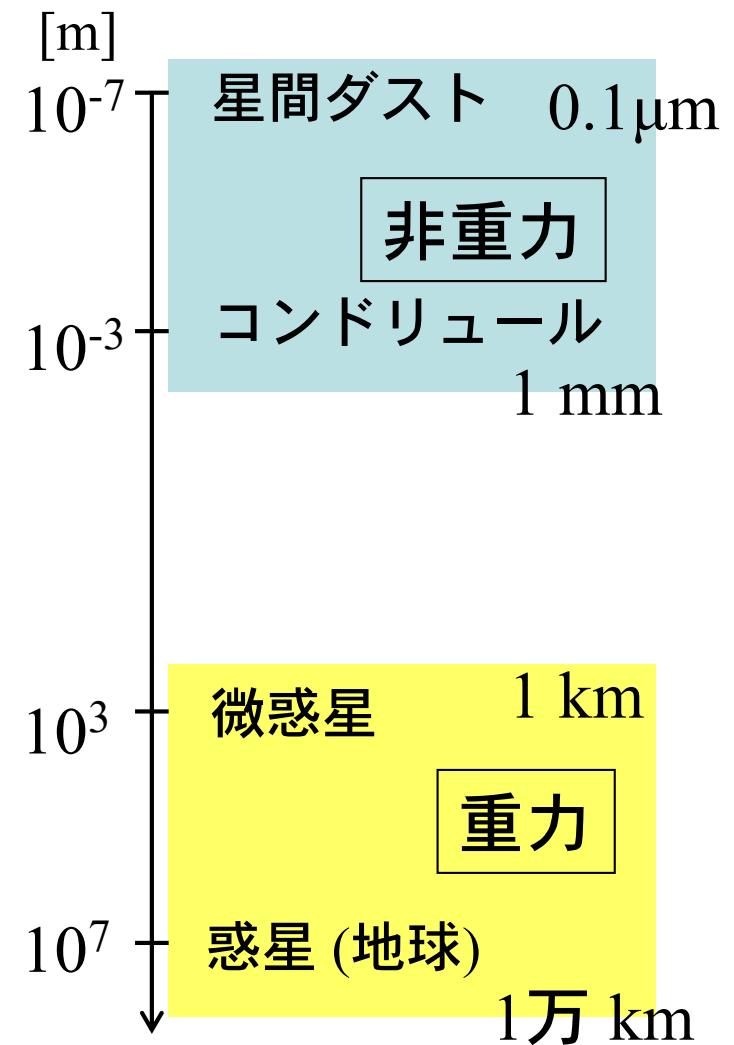
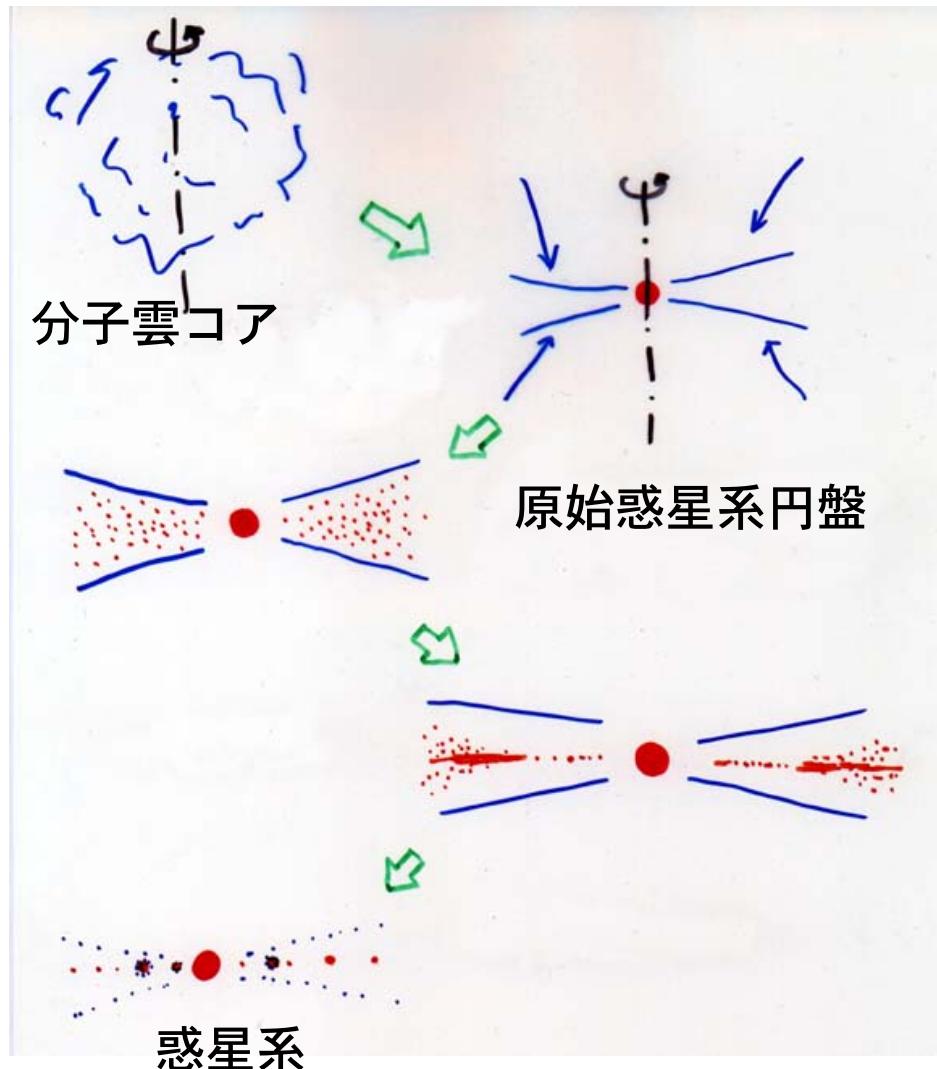
ダスト, 微惑星形成, ...

## 2. コンドリュールとは

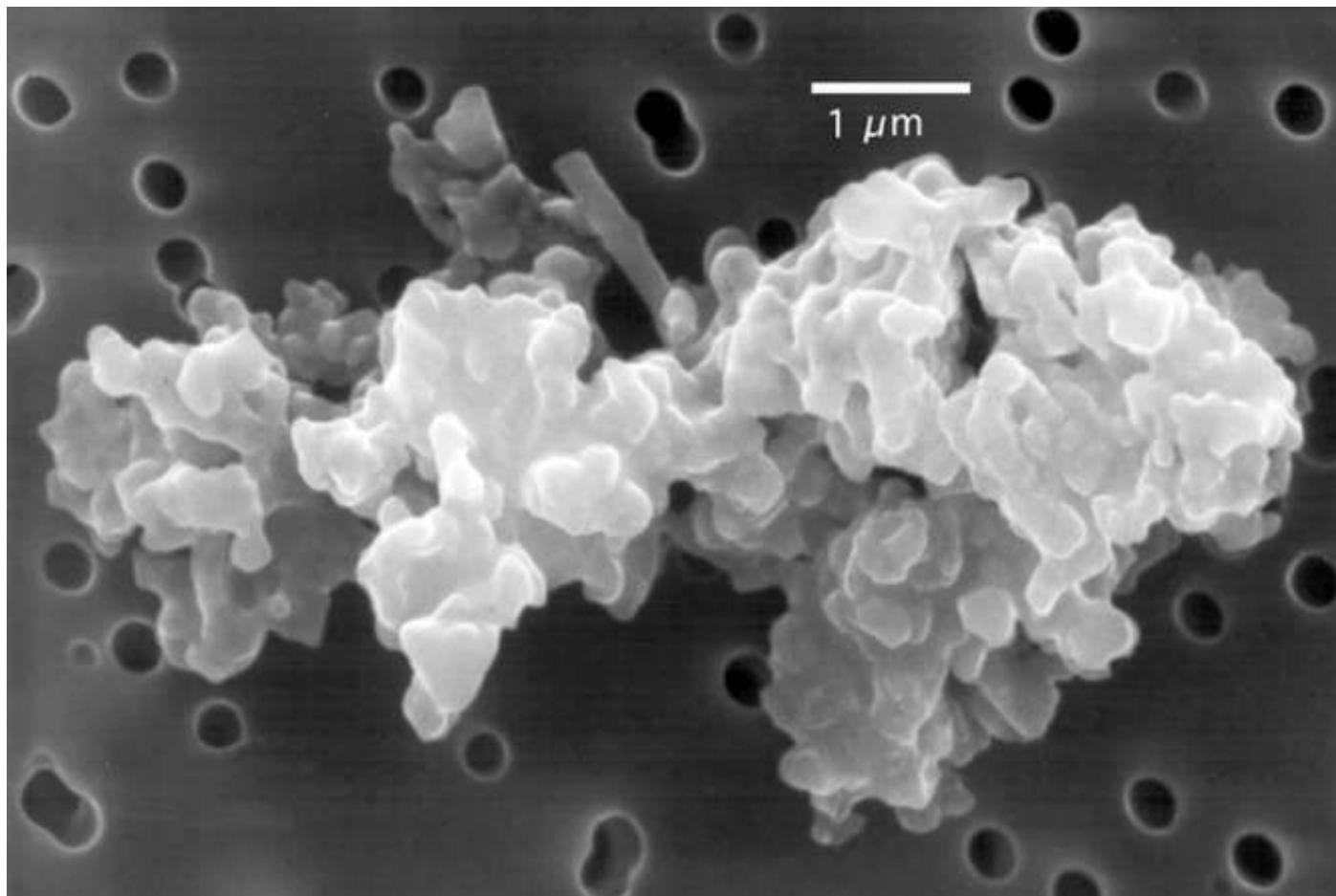
## 3. 円盤内の雷

## 4. 雷によりコンドリュールは形成可能か?

# 1. 惑星系形成シナリオ

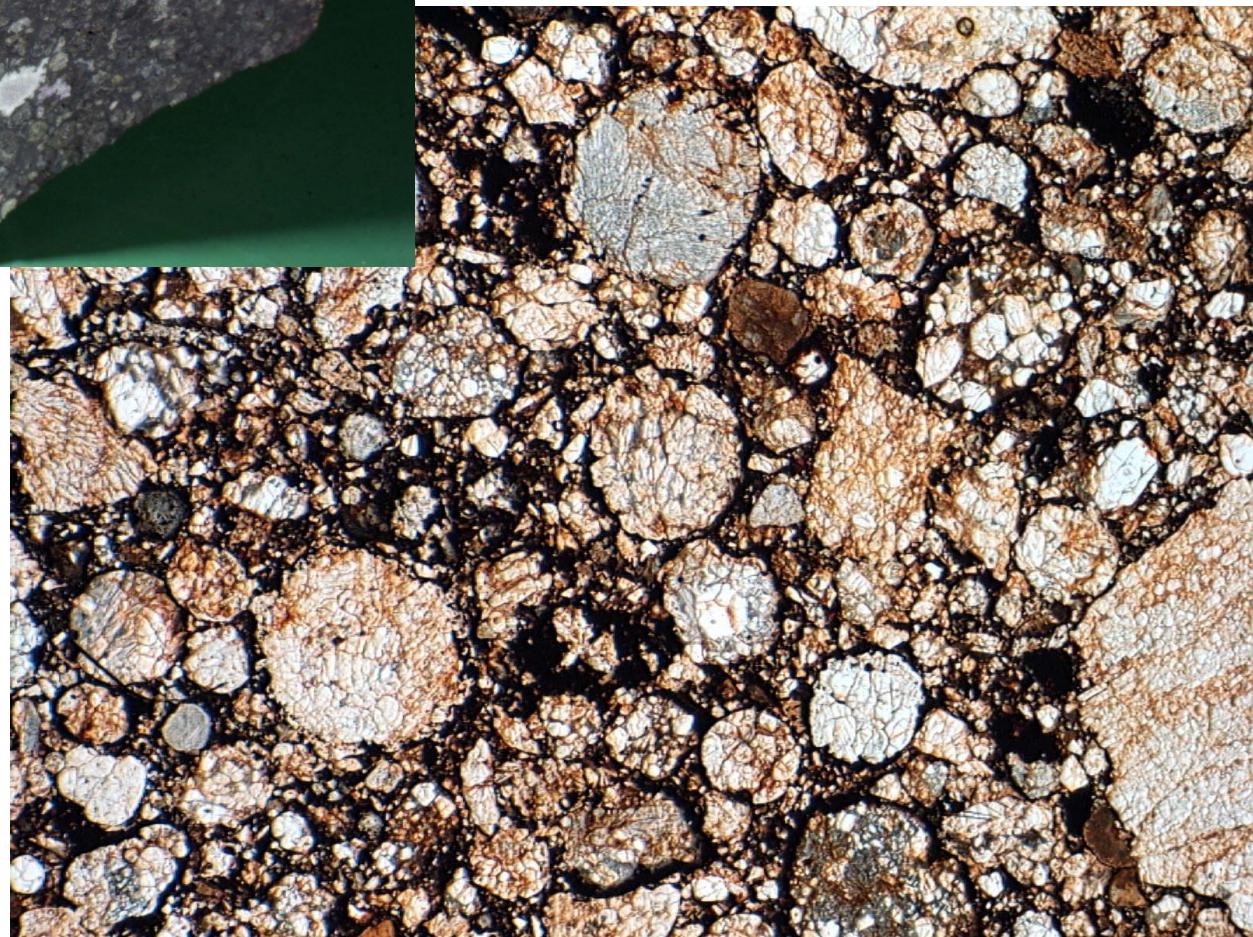


# 惑星間塵





隕石  
Meteorites

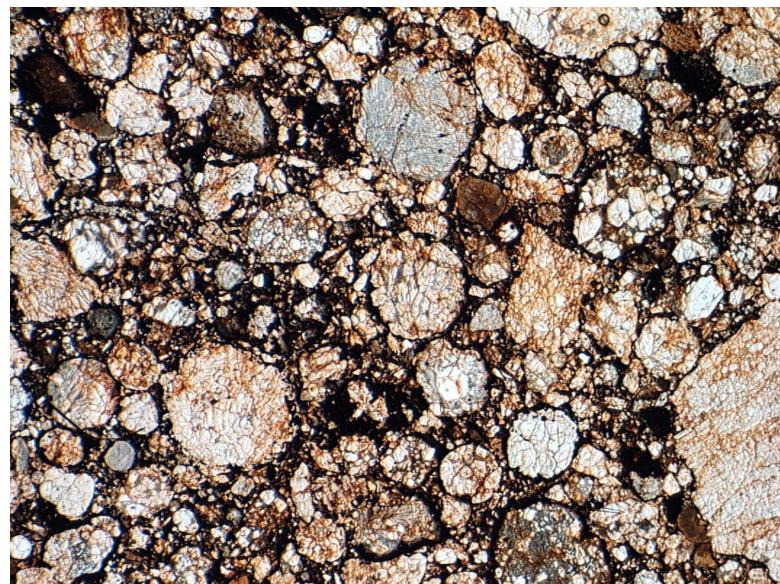


Chondrules

Courtesy of Prof. Yurimoto

## 2. コンドリュールとは

# コンドリュールの性質



↔  
1mm

“Flash Heating”による形成

条件のまとめ・モデルとの比較

Desch *et al.* 2012

- 大量に存在 (up to 80%)

- サイズ 0.1 – 1 mm

- 複数回加熱を受けている

- T タウリ型星期

時期 ~ 1 - 4 Myr after CAI

期間 ~ 3 Myr

- 溶融 & 固化

前駆体 < 650 K

温度上昇 >  $10^4$  K/hr

最高温度 ~ 1600 – 2000 K

液体状態

継続時間 ~ 数分

冷却 ~ 1 - 1000 K/hr

## - 元素・同位体

揮発性元素(S, Na, K, ...)の保持  
同位体分別無し

Alexander *et al.* (2008)

Semarkona中の  
26個の  
コンドリュールを  
分析

ダスト密度  
[ $10^{-6}$  g cm $^{-3}$ ]

Chondrule	Type	Liquidus*	Core† Mg no.	Rim† Mg no.	Core§ $K_D$	Rim   $K_D$	Density¶
C1	IIA	1680	0.898	0.699	0.0077(11)	0.0068(13)	17 to 311
C2	IIA	1652	0.888	0.796	0.0028(07)	0.0028(06)	12 to 194
C3	IIA	1658	0.898	0.716	0.0095(13)	0.0063(02)	14 to 251
C4	IIA	1702	0.905	0.771	0.0074(15)	0.0061(07)	33 to 476
C5	IIA	1646	0.792	0.722	0.015(02)	0.0053(09)	14 to 229
C6	IA‡#	1706	0.994	0.995	0.019(05)	0.0055(45)	91 to 2510
C7	IA	1716	0.996	0.994	0.0011(14)	0.0023(12)	51 to 1610
C8	IAB‡	1752	0.994	0.994	0.0066(44)	0.0025(12)	118 to 3090
C9	IAB‡	1770	0.993	0.993	0.025(13)	0.0081(40)	198 to 5750
C10	IIA	1642		0.791		0.0061(08)	11 to 194
C11	IA‡	1778	0.993	0.992	0.069(18)	0.0063(42)	388 to 9080
C13	IIAB	1582	0.846	0.647	0.0028(05)	0.0046(03)	3 to 60
C14	IIA	1672	0.909	0.675	0.0032(07)	0.0041(05)	16 to 260
C18	IIAB	1646	0.840	0.766	0.0031(06)	0.0020(02)	10 to 165
C19	IIAB	1630	0.936	0.888	0.0009(06)	0.0009(01)	6 to 117
C20	IIA	1718	0.923	0.795	0.0040(09)	0.0030(05)	32 to 526
C22	IIA	1678	0.910	0.688	0.0057(09)	0.0054(05)	15 to 273
C23	IIAB	1634	0.875	0.690	0.0014(06)	0.0031(04)	10 to 158
C27	IIAB	1674	0.875	0.780	0.0060(11)	0.0014(02)	14 to 259
C29	IIAB	1612	0.871	0.840	0.0009(05)	0.0003(01)	6 to 99
C31	IIAB	1630	0.849	0.696	0.0059(10)	0.0020(01)	7 to 128
C33	IIA#	1632	0.854	0.806	0.0024(06)	0.0027(01)	9 to 167
C34	IIAB	1554		0.738		0.0033(08)	2 to 43
C35	IIA	1580	0.835	0.745	0.0057(07)	0.0047(02)	4 to 72
C38	IIA	1704	0.866	0.813	0.0034(10)	0.0027(02)	30 to 534
C40	IIB	1622	0.858		0.0056(20)		6 to 139

$10^{-5}\text{--}10^{-2}$  g cm $^{-3}$

cf. MMSNでは,  
1 au で,  
 $10^{-11}$  g cm $^{-3}$

## 問題

次の2つの条件は両立するか？

コンドリュールが形成される状況は、

- (1) 高いダスト密度の領域で発生する
- (2) 冷却率は  $1 - 1000 \text{ K/hour}$

である。

加熱機構はなにか？

# 3. 円盤内の雷



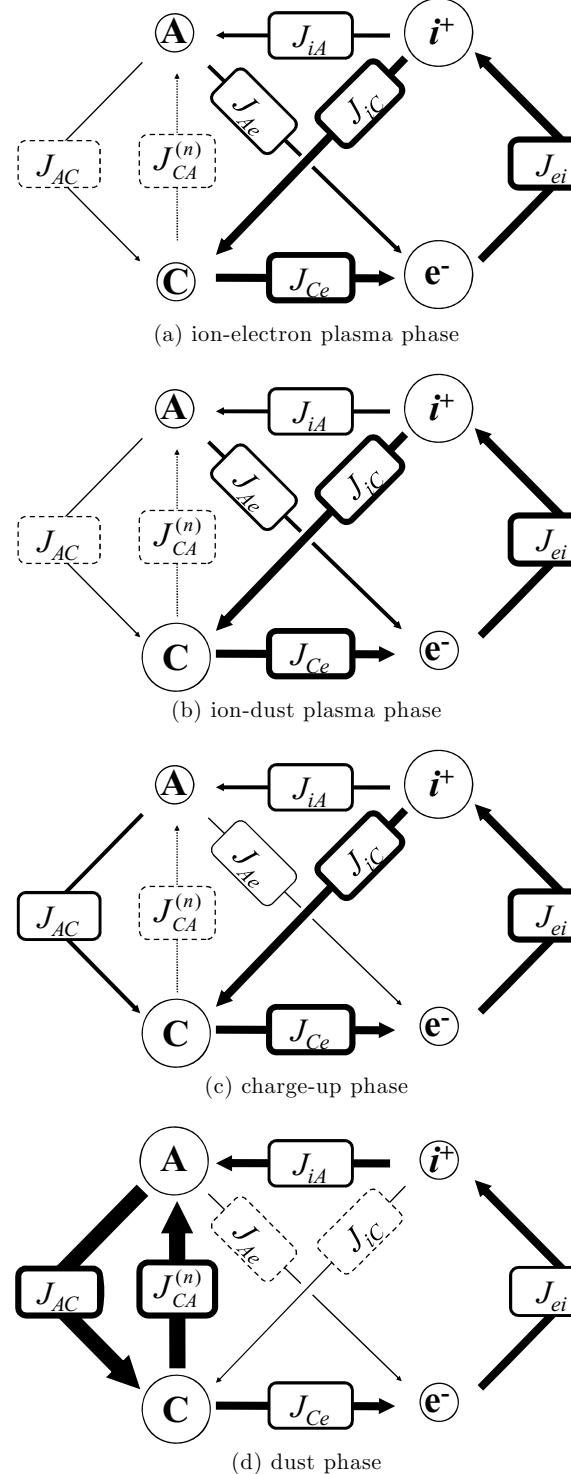
Muranushi 2010

## 氷ダストによる雷発生の可能性

1. 衝突・帯電
2. 電荷分離
3. 絶縁破壊(雷)

周囲のガス:  
低い電離度が必要

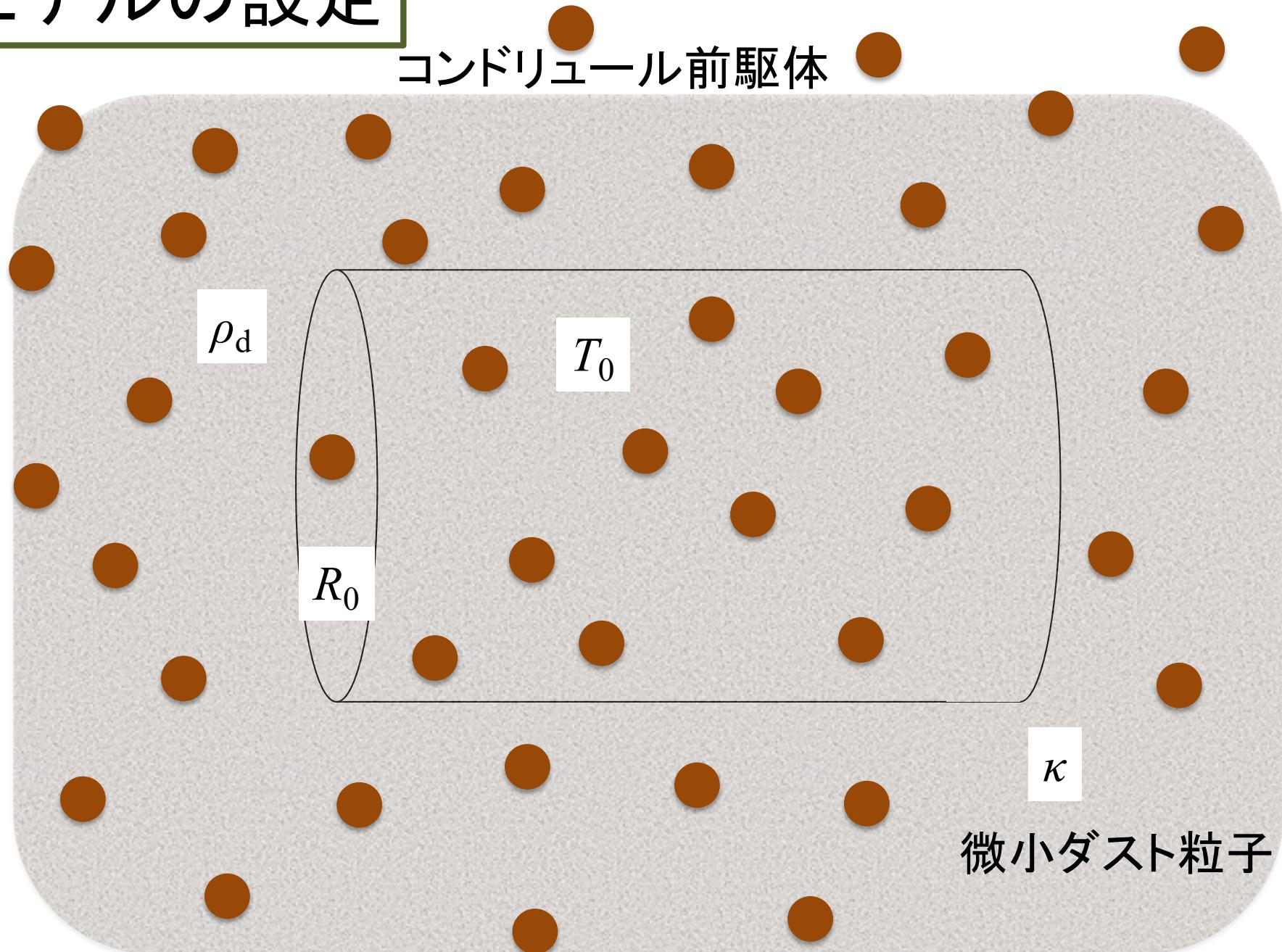
高いダスト密度の領域が有利



4. (本研究):

雷により  
コンドリュールは  
形成可能か？

# モデルの設定



## モデルパラメータ

初期温度	$T_0$	}	加熱機構は問わない
領域サイズ（半径）	$R_0$		
ダストの空間密度	$\rho_d$		
吸収係数	$\kappa$		微小ダストのサイズに依存

## 温度の時間変化

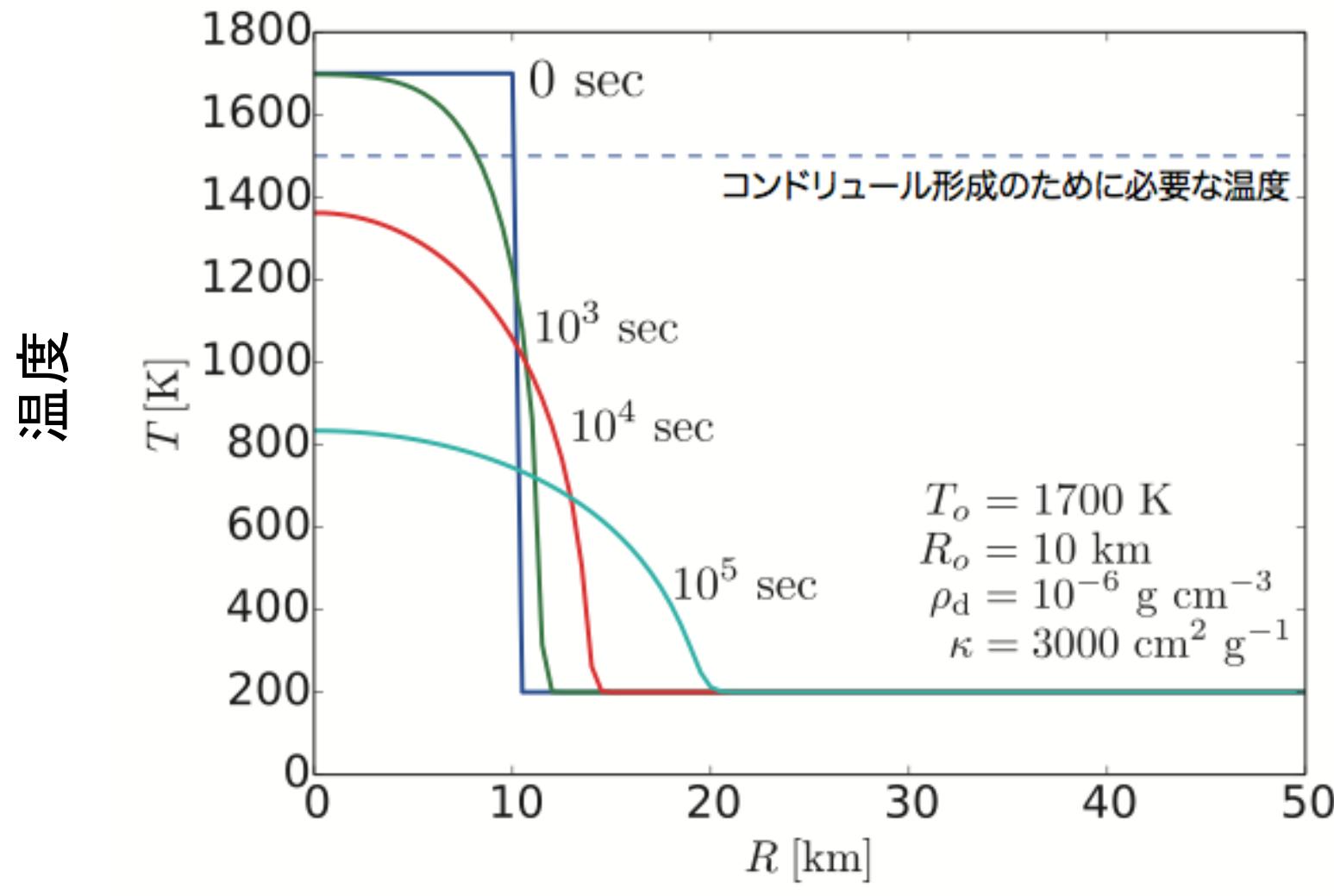
$$\rho_d C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{16\sigma T^3}{3\rho_d \kappa} \frac{\partial T}{\partial R} \right)$$

輻射がエネルギー輸送を担う熱伝導方程式

# 計算結果

## 温度分布進化の1例

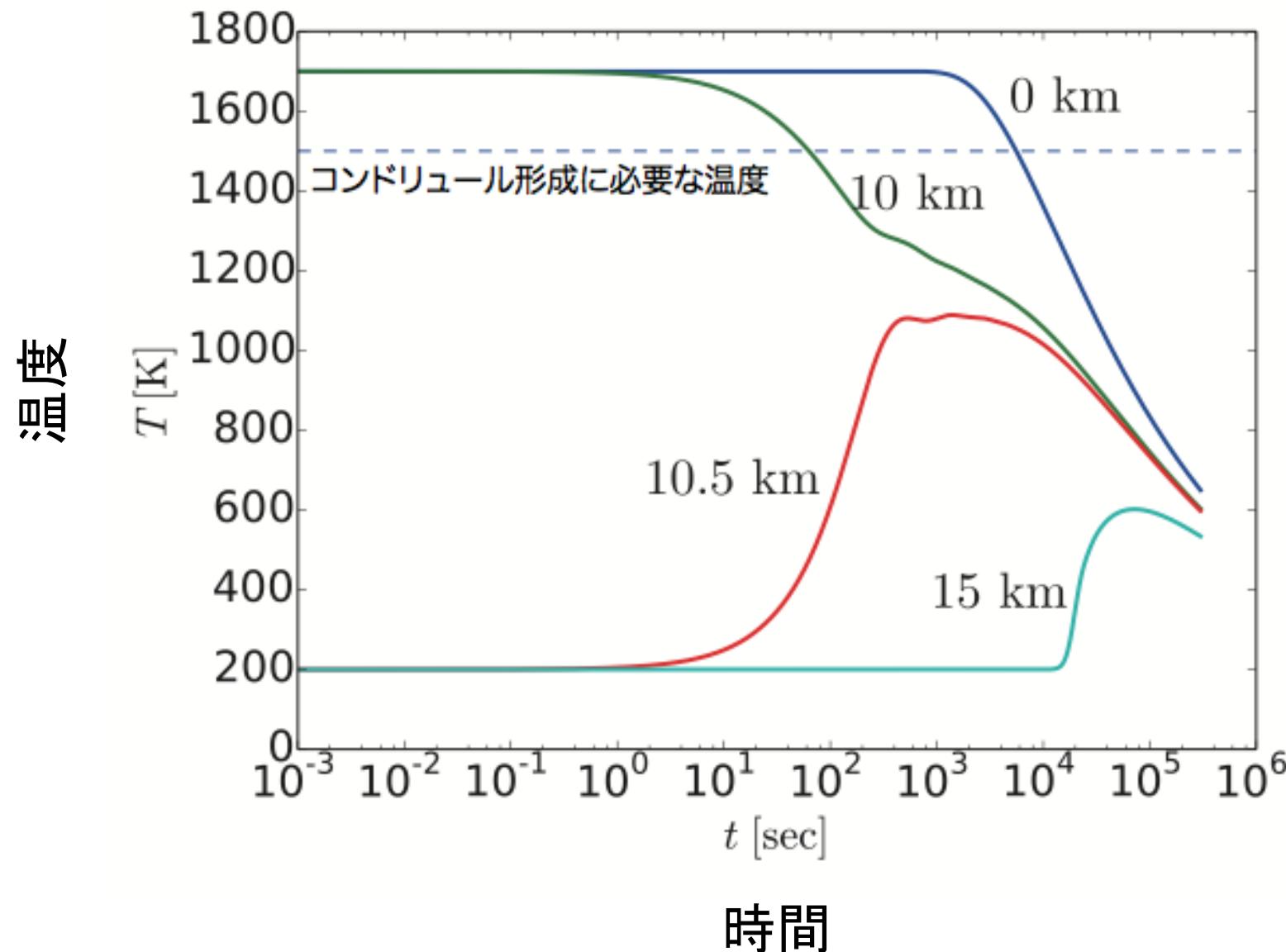
(佐藤修論)



距離

# 各位置での温度の時間変化

(佐藤修論)



# 冷却率の解析的評価

(佐藤修論)

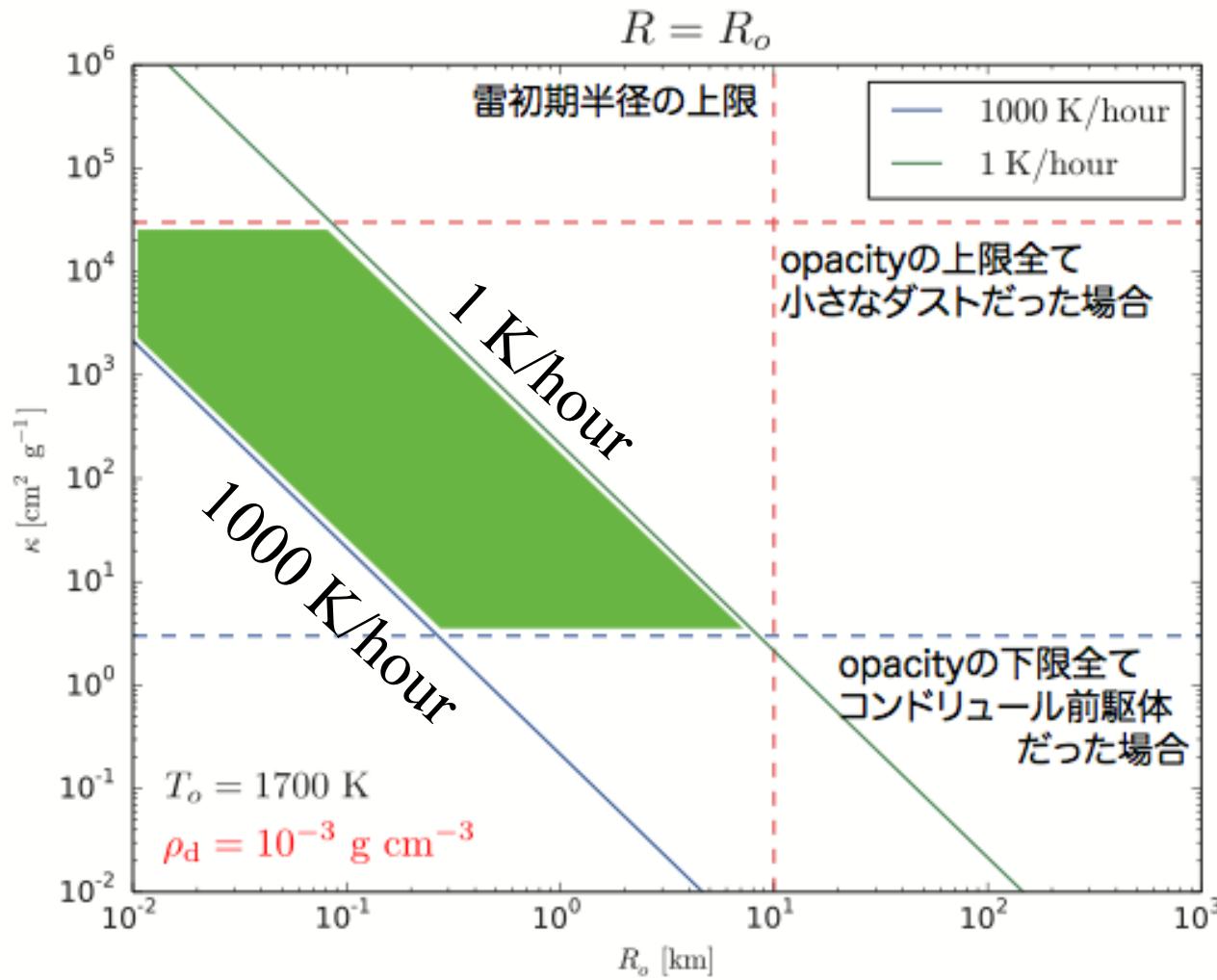
冷却のタイムスケール(熱エネルギーの拡散時間) :

$$t_{\text{cool}} = \frac{R_0^2}{D} = \frac{3CR_0^2\rho_d^2\kappa}{16\sigma T^3}$$

冷却率 :

$$\begin{aligned}\frac{\Delta T}{t_{\text{cool}}} &= \frac{R_0^2}{D} = \frac{16\sigma T^3 \Delta T}{3CR_0^2\rho_d^2\kappa} \\ &= 2700 \text{ K/hour} \left( \frac{R_0}{10 \text{ km}} \right)^{-2} \\ &\quad \times \left( \frac{\rho_d}{10^{-6} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-2} \left( \frac{\kappa}{3000 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}} \right)^{-2}\end{aligned}$$

## ダスト媒質の吸収係数



初期円柱の半径

「高いダスト密度」と「冷却率」は両立し得る！

高温領域のサイズは 100 km 程度以下

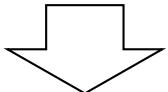
## 議論

# コンドリュール形成はどこで起こったか？

ロッシュ密度 @  $1 \text{ au} = 1.4 \times 10^{-7} \text{ g cm}^{-3}$

^

$10^{-5}\text{-}10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$  ← 挿発性元素などから  
推定されているダスト密度



コンドリュール形成領域は自己重力的！

- ・形成中の微惑星内部
- ・衝突した微惑星からの放出物中
- ・衝突した微惑星の内部
- ・円盤中の渦で一時的に密度が高くなった領域
- ・Streaming Instability で密度が高くなった領域

## まとめ

- \* コンドリュール形成条件を考察
- \* 次の2つの条件は両立する：
  - (1) 高いダスト密度の領域で形成する
  - (2) 冷却率は  $1 - 1000 \text{ K/hour}$
- \* コンドリュール形成領域は自己重力的
- \* 適切な形成環境の探索が必要