

# 天文・惑星科学の世界

田中今日子

教育学修支援センター（CTL）、情報数理科学科、東京女子大学

# 本日の内容

## ➤天文・惑星科学の紹介

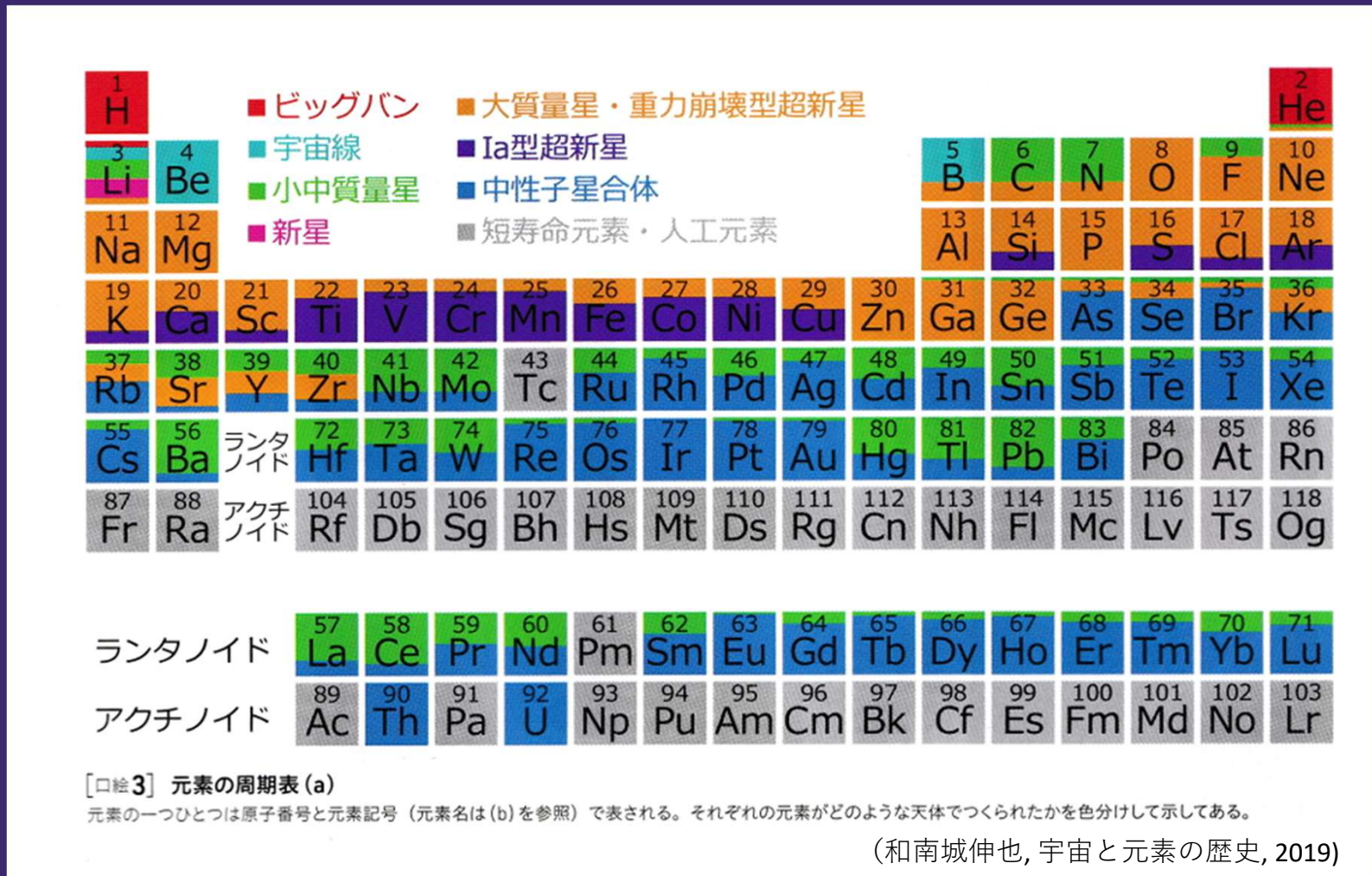
- 系外惑星の発見
- 惑星形成理論
- はやぶさ&はやぶさ2

## ➤宇宙ダスト起源

- 分子動力学シミュレーションによるダスト生成の解明

# 宇宙の物質

- H, Heがほとんど(99%),それ以外は**重元素**

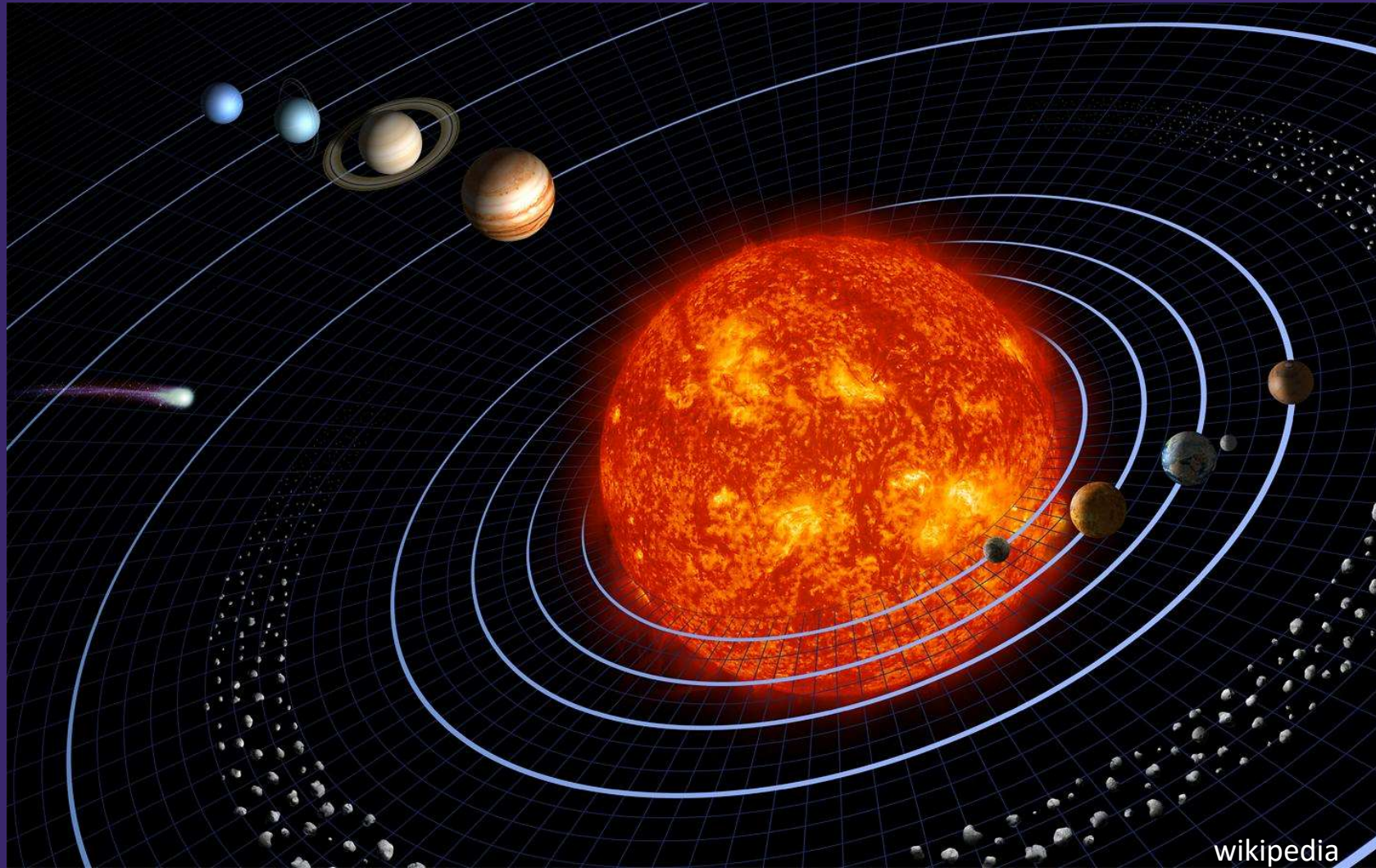


(ダークマター、ダークエネルギーも考慮すると目に見える物質は5%のみ)

# 宇宙の物質循環



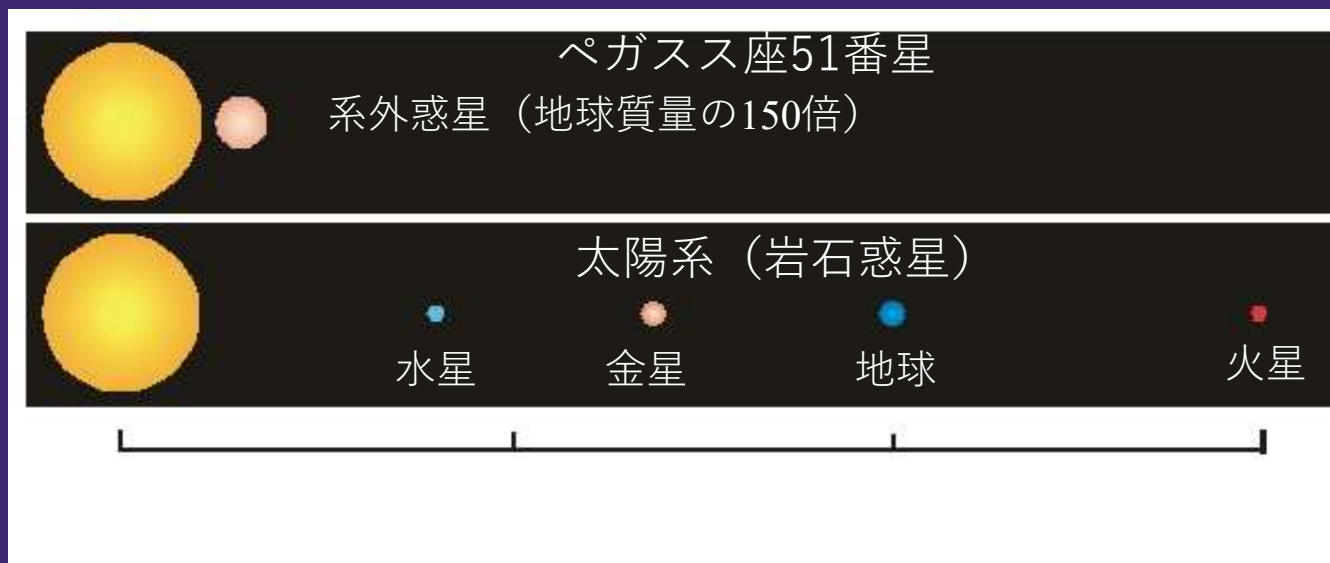
# 太陽系



地球型(岩石)惑星と木星型(ガス)惑星

# 系外惑星の発見

- 1995年に最初の太陽系外惑星が発見
- 2019年 Didier Queloz氏, Michel Mayor氏, James Peebles氏  
ノーベル物理学賞
- 現在(2025. 7)では5千900個以上確認



# 系外惑星の観測方法

- トランジット法

- 惑星による「食」を観測
- 宇宙望遠鏡 Kepler, TESS

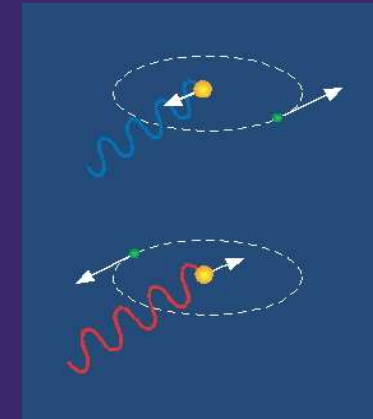
- ドップラー効果法

- 恒星は惑星とともに運動
- 光の波長が1千万分の1程度変化

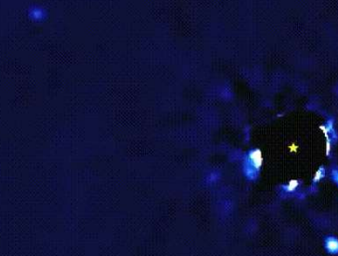
- 重力レンズ法

- 惑星重力で光が曲がり増光

- 直接撮像



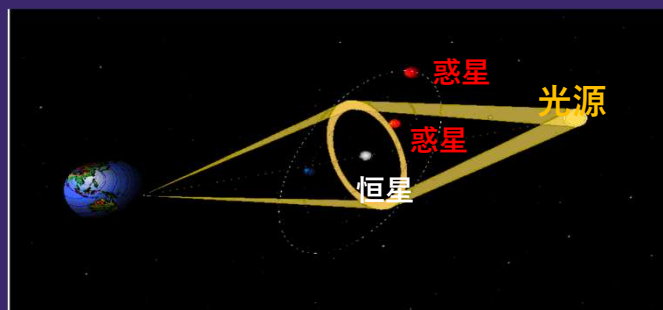
HR8799の4つの惑星を  
直接撮像！



Jason Wang/  
Christian Marois

2009-07-31

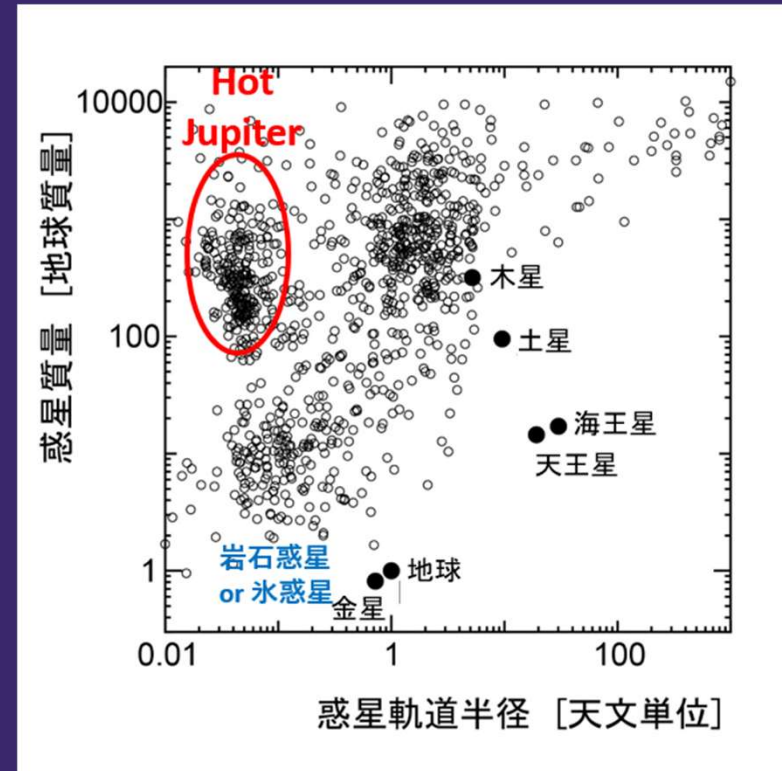
20 au



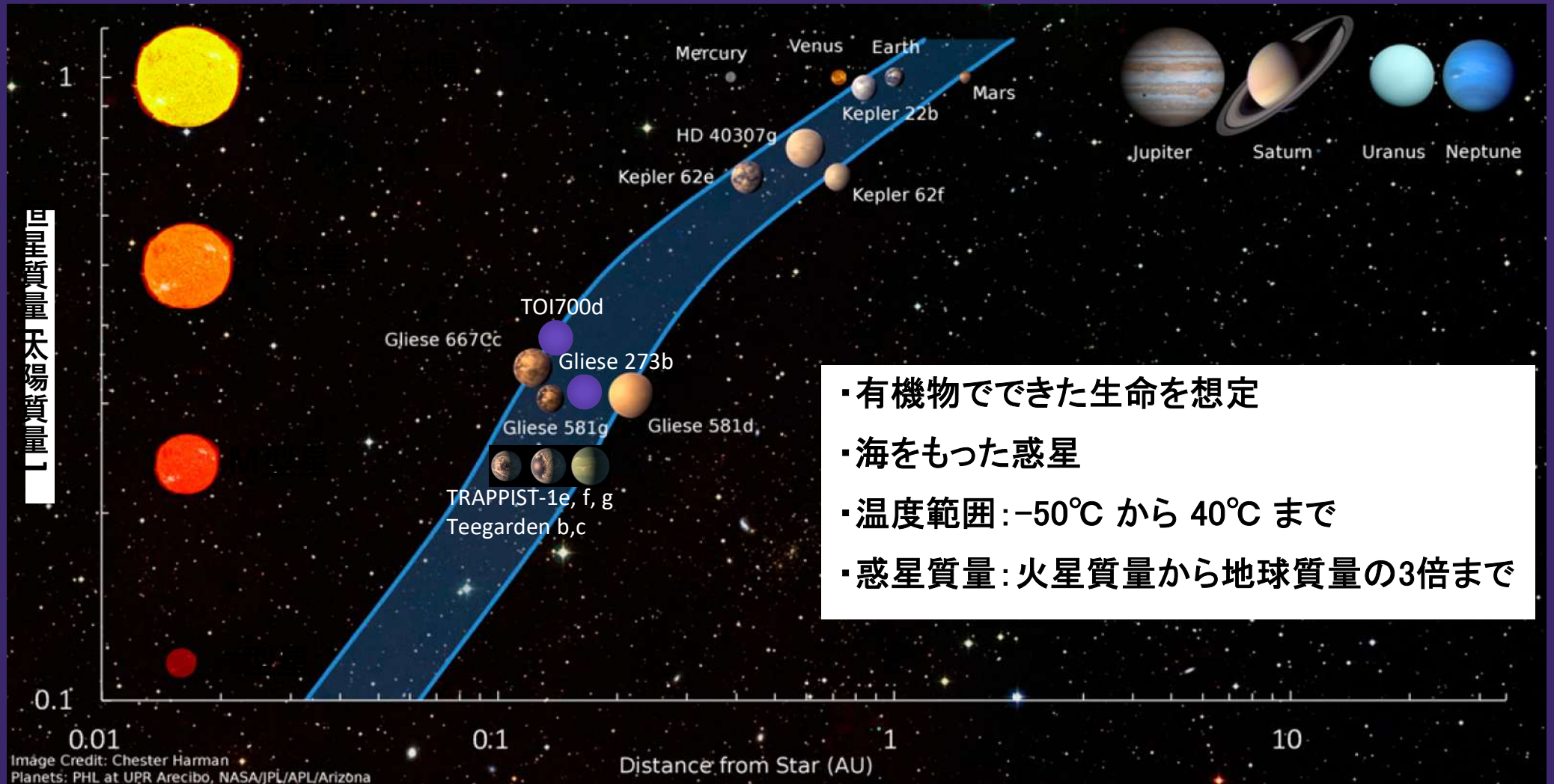
# 系外惑星の特徴

- 惑星質量と軌道半径の分布
  - 質量：地球程度から木星の20倍まで
  - 軌道半径：0.01-1000AU
- 離心率の大きな惑星が多数
- 太陽質量程度の恒星の約■■■%は惑星をもつ

- ① 約10%
- ② 約50%
- ③ 約70%



# ハビタブル・ゾーン (生命居住可能領域)



星からの距離 [AU]

Kasting et al. 2014, PNAS, 111, 12641

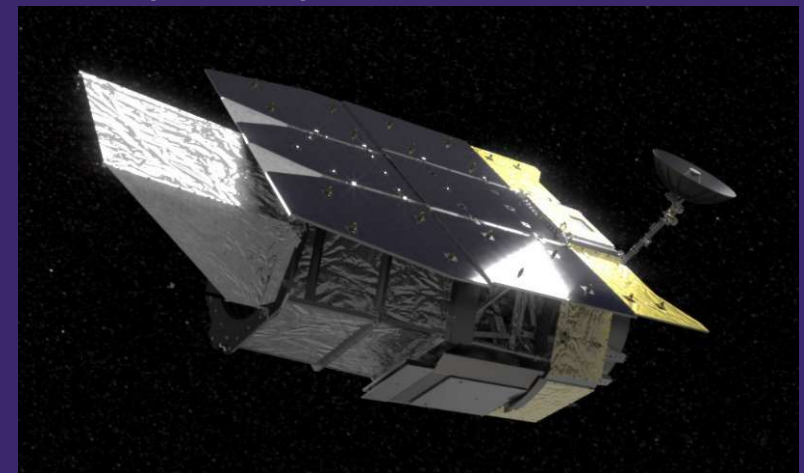
# 宇宙望遠鏡

- ・ ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (NASA / ESA)  
JWST 打上げ (2021/12/25)

赤外線望遠鏡  
岩石惑星の大気を観測  
(二酸化炭素、オゾン、水蒸気)



- ・ ナンシー・グレース・ローマン宇宙望遠鏡 (NASA)  
2027年までに打ち上げの予定  
口径2.4m、可視光と近赤外線観測  
系外惑星の直接観測、重力レンズ観測

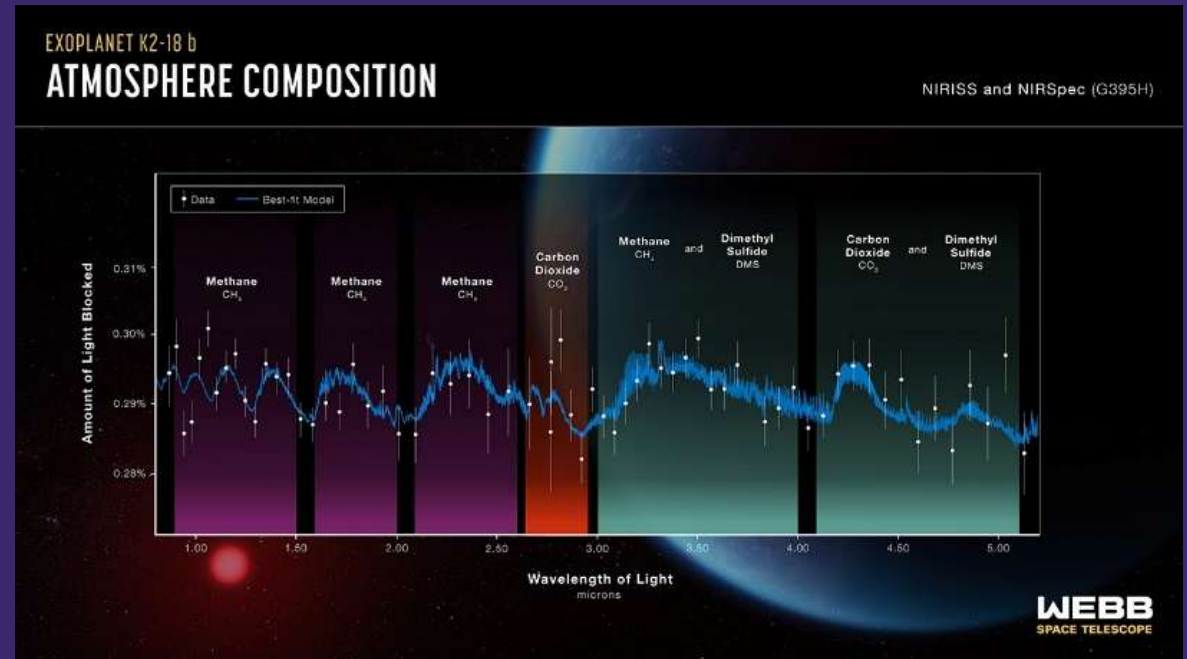


# 生命の兆候？

系外惑星 K 2 - 1 8 b

二つの分子の発見

- 地球上では生物によってしか生成されないバイオシグネチャー
- 生物学的な活動に関連する生命の痕跡として、有望な証拠？
- 水素を豊富に含む大気を持ち、液体の水で完全に覆われていることから、生物の活動を探すのに適した場所

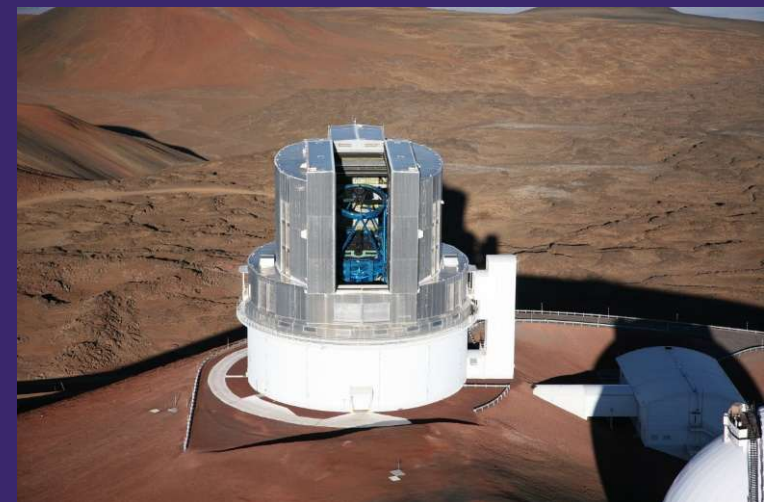
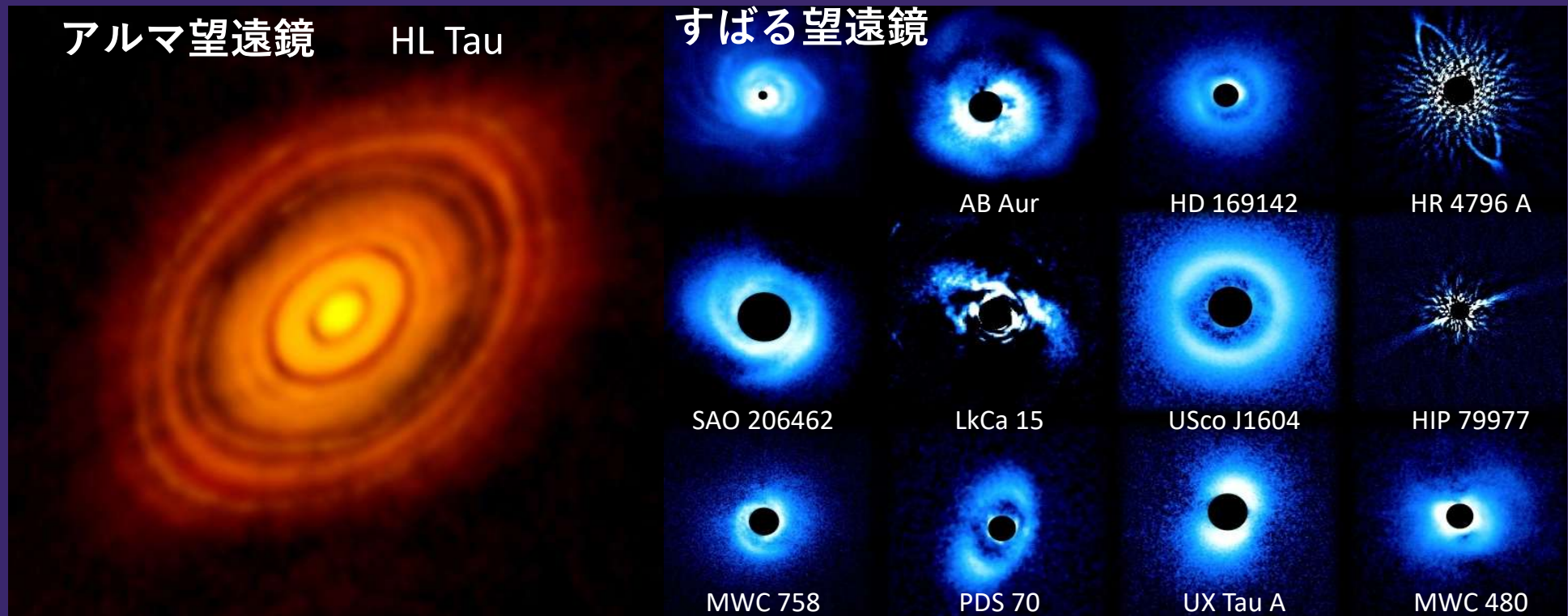


ジメチルスルフィド (DMS)  
ジメチルジスルフィド (DMDS)  
有機硫黄化合物  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{SSCH}_3$

*New Constraints on DMS and DMDS in the Atmosphere of K2-18 b from JWST MIRI*  
Nikku Madhusudhan et al. APJL, 2025

Mid-Infrared Instrument

# 惑星形成の現場の観測



すばる望遠鏡

# 惑星形成のシナリオ (1)

## • 星の誕生と星周円盤の形成

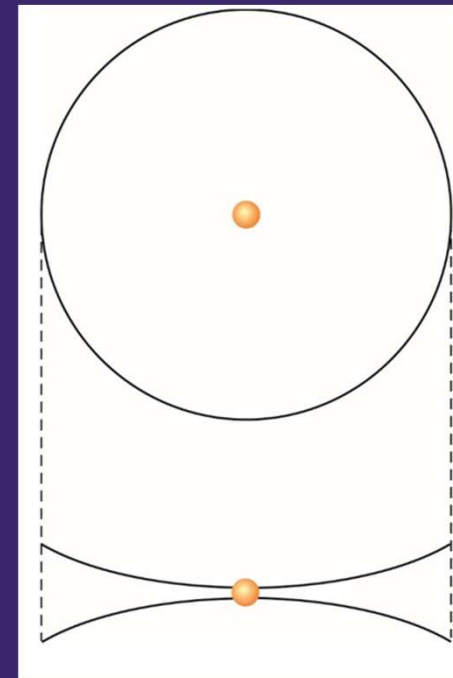
分子雲 … 100光年程度の大きさ、太陽質量の10万倍、極低温(10K)



原始星 … 比較的低温で赤外で光る星

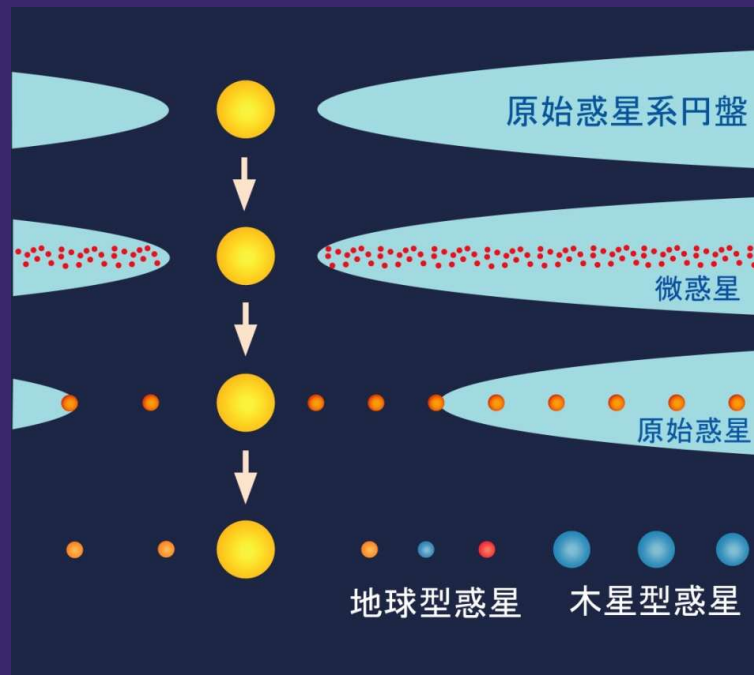


Tタウリ星 … 恒星+星周円盤  
(原始惑星系円盤)  
寿命は1000万年程度



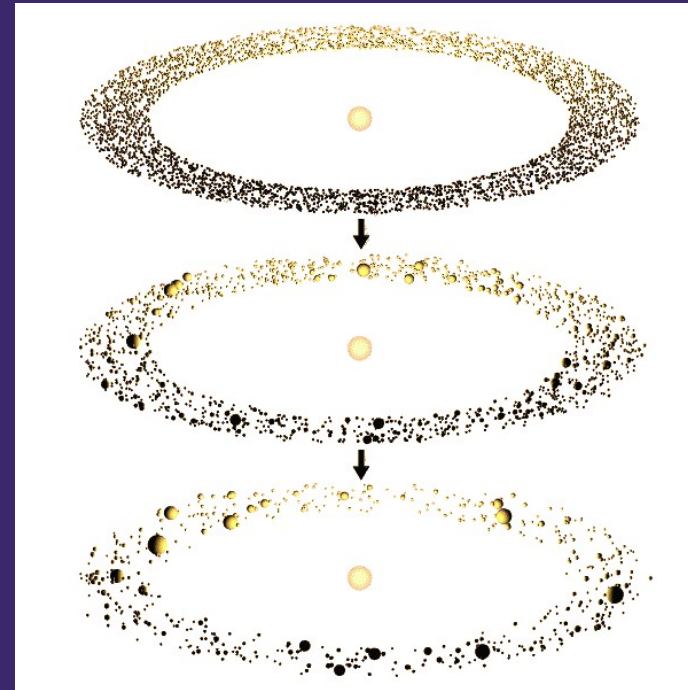
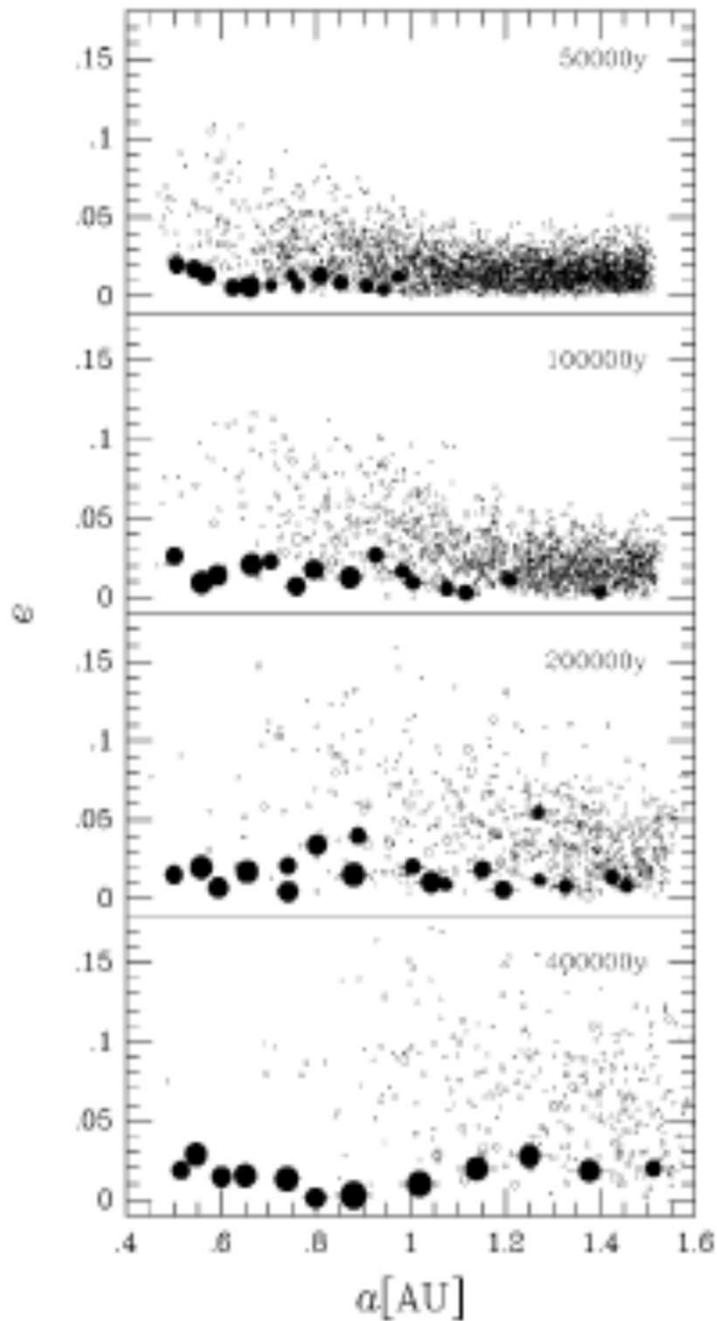
# 惑星形成のシナリオ (2)

- 円盤の中での惑星形成



1. 微惑星形成 (小惑星サイズの天体)  
ダストの成長・沈殿 ⇒ 微惑星  
(小惑星の起源)
2. 微惑星集積過程  
原始惑星の形成
3. 巨大衝突 & 円盤ガス捕獲  
(⇒地球型惑星) (⇒木星型惑星)

# 惑星形成シミュレーション



惑星成長の数値計算 (国立天文台小久保教授)

原始惑星の暴走成長

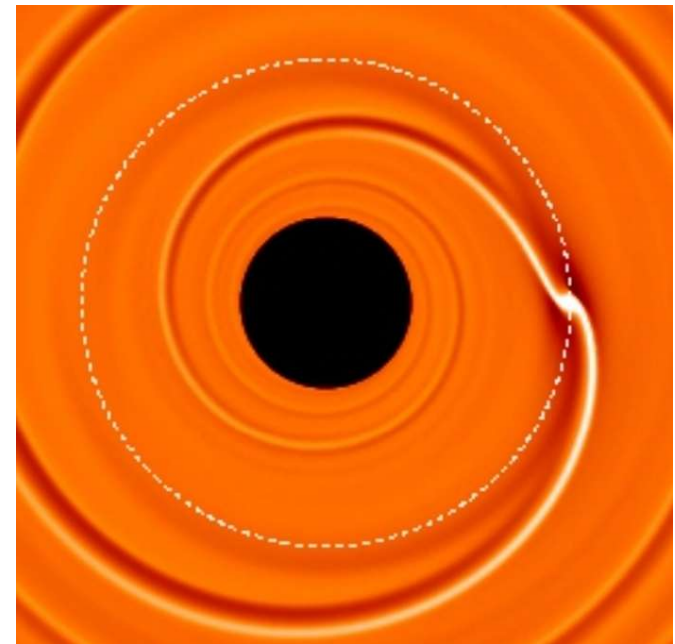
⇒ 原始惑星同士の衝突合体

⇒ 岩石惑星

⇒ ガスの集積による巨大惑星

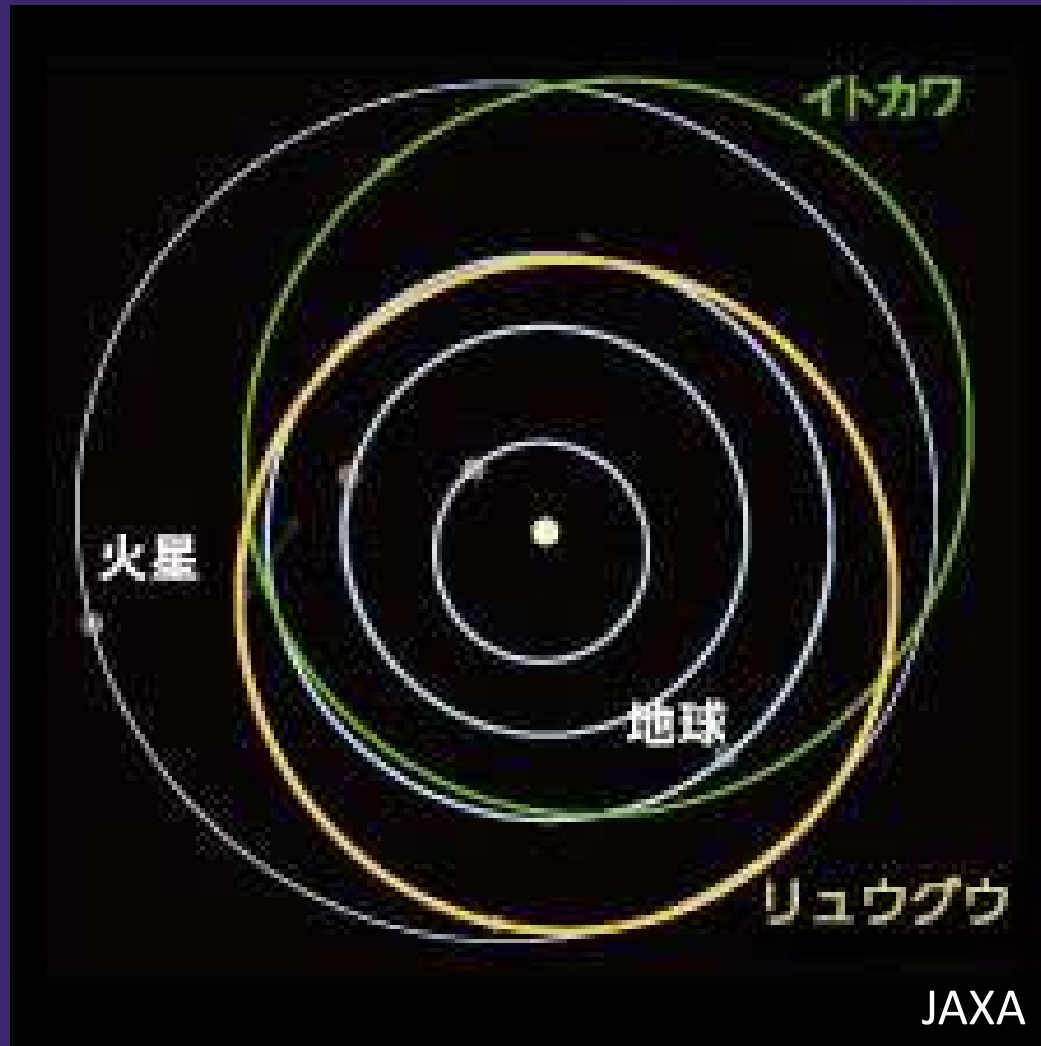
# 惑星形成理論の課題

- どのように多様な惑星ができたのか？
- 惑星形成時間の制約
  - ガス円盤寿命( $10^7$ 年)
- 微惑星形成問題
- 惑星落下問題
  - ガス円盤と相互作用し落下
  - ホットジュピター形成には良い



円盤と原始惑星の相互作用  
(流体シミュレーション)

# 「はやぶさ」から「はやぶさ2」へ



宇宙航空研究開発機構  
で開発された小惑星探査機

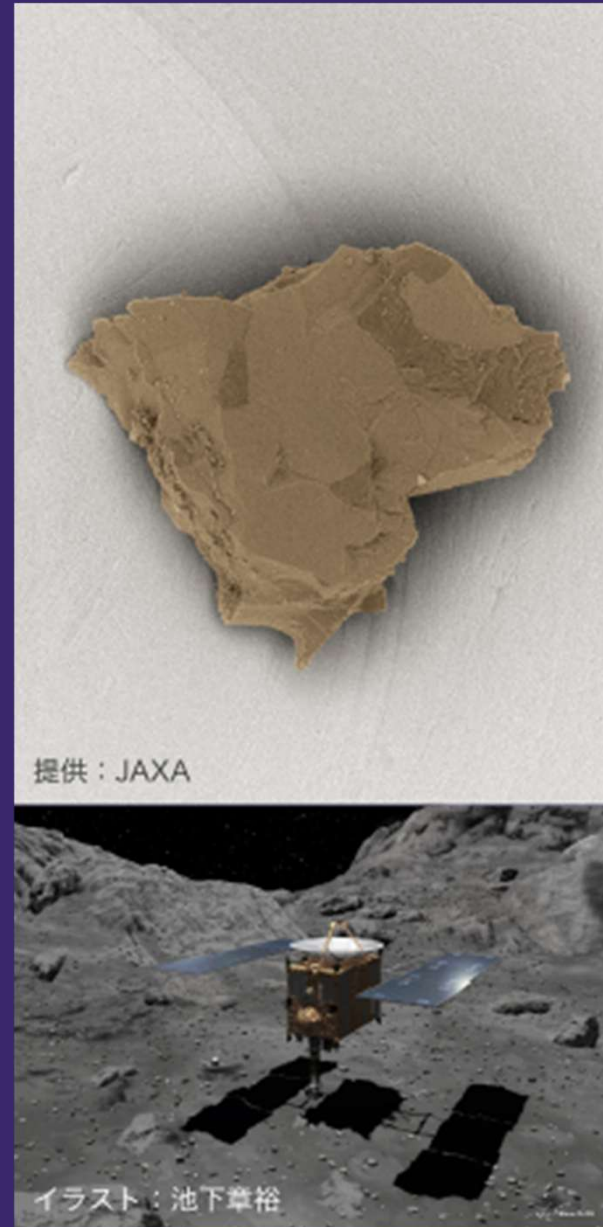
はやぶさ：  
2003年打ち上げ2010年  
6月地球に帰還

はやぶさ2：  
地球近傍小惑星  
「リュウグウ」への着陸  
およびサンプルリターン

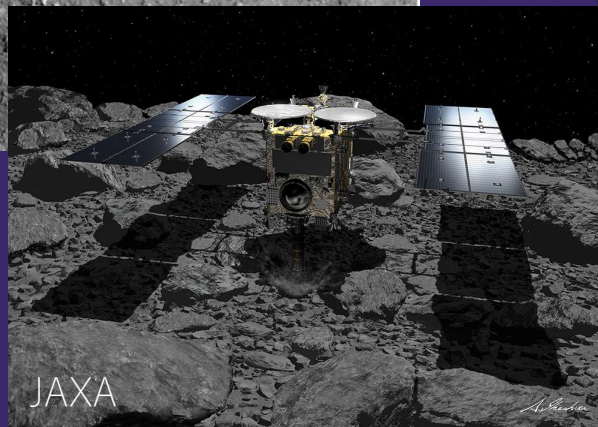
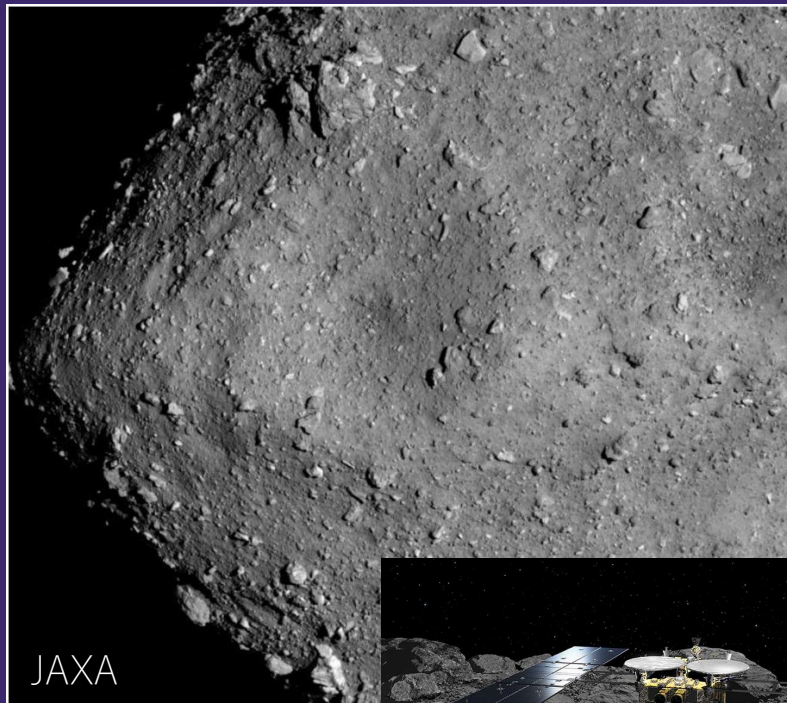
2014年12月3日 打ち上げ  
2018年から約18ヶ月間滞在  
2020年末に地球へ帰還



- 小惑星探査機はやぶさが回収した小惑星イトカワの表層物質粒子。表層物質の大きさは、 $100\ \mu\text{m}$ 程度



# 小惑星探査機はやぶさ2



りゅうぐうの直径は？

- ① 約 1 km
- ② 約 10 km
- ③ 約 100 m

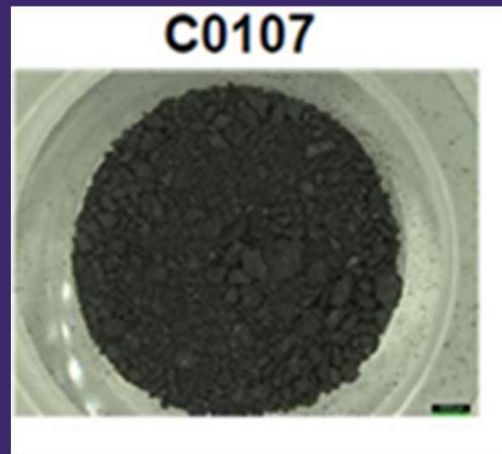
2019年  
2月22日

タッチダウン

4月

衝突実験  
クレーター形成と観測

# 小惑星粒子の分析

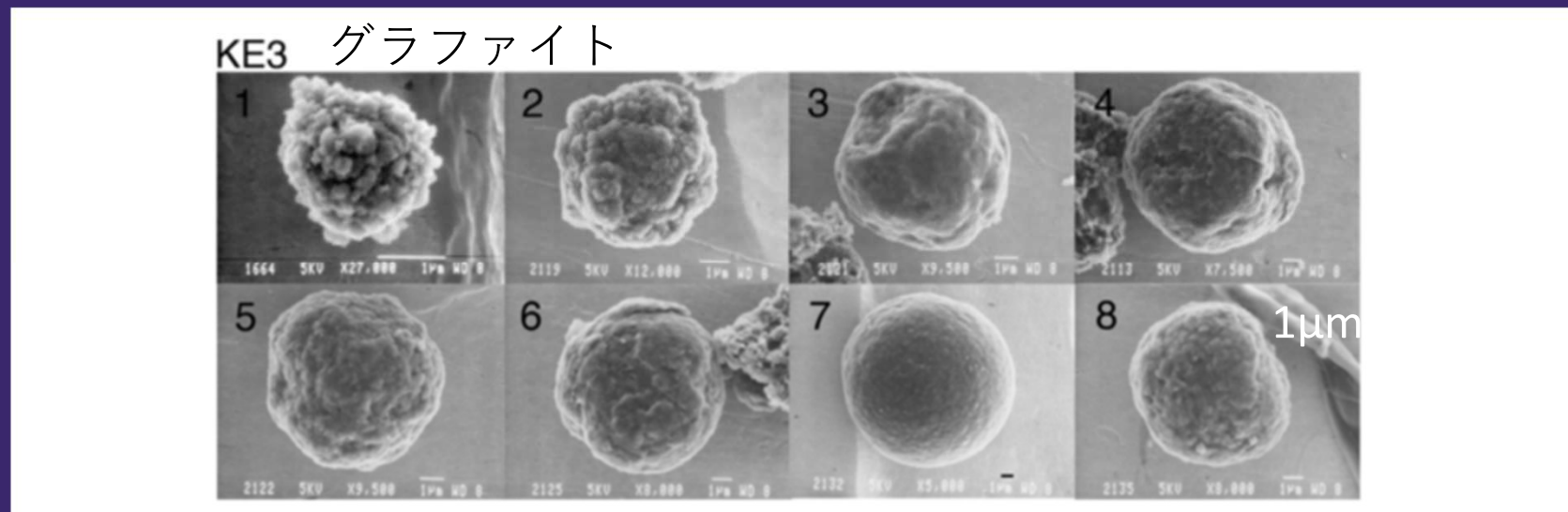


(奈良岡浩氏、遊星人、2024)

- 炭素質小惑星の表面に多くの有機分子が検出
  - アミノ酸やアミン, カルボン酸, 核酸塩基を含む化合物
- 太陽紫外線や高エネルギー宇宙線が照射する環境下で安定
- 前生命有機分子は衝突などによって惑星空間を旅する→地球にも

(パンスペルミア説)

# プレソーラー粒子： 太陽系以前の情報を持つ



(Amari + 2014)

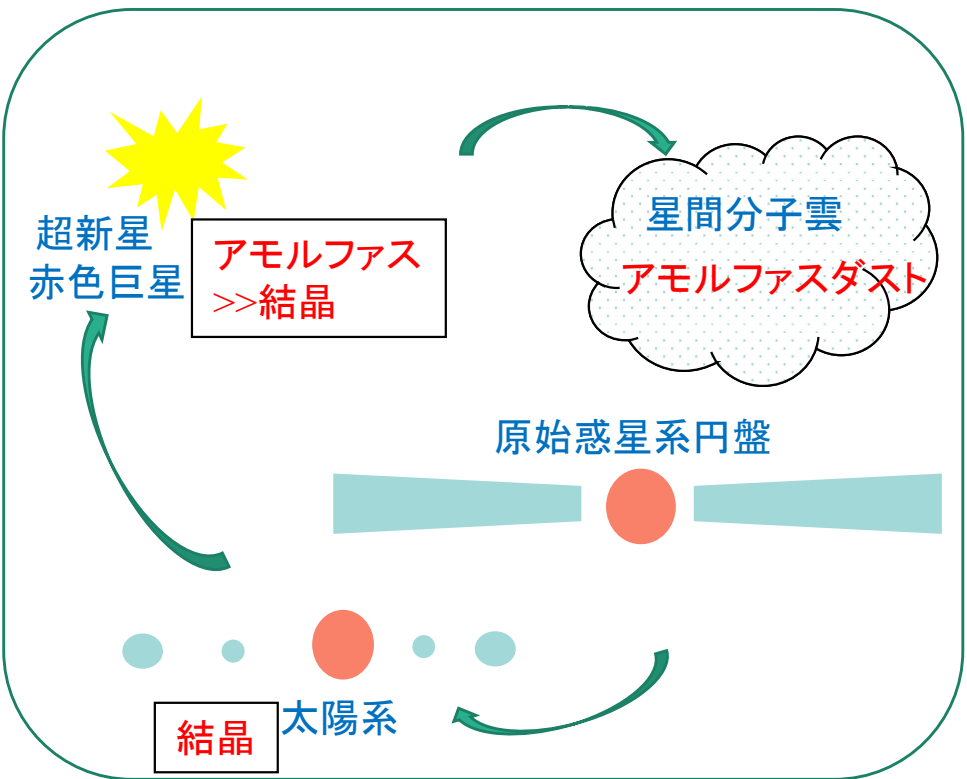
プレソーラー粒子：赤色巨星や超新星で形成された宇宙ダスト  
太陽系物質とは著しく異なる同位体組成

SuperNova, 褐色矮星、星  
分子雲のダストプロセス

Tanaka+1999  
(SNでのダスト形成)  
Tanaka+2010  
(ダストの低温結晶化モデル)  
Sorahana+2021(褐色矮星観測の  
ダストサイズ依存性)

宇宙塵の生成プロセス：  
核生成過程の解明  
(MD計算)

Tanaka+2005 (LJ), 2011  
(LJ), 2014ab(scaling,  
H2O), 2015(bubble), 2016(comment)  
Diemand+2013 (LJ), 2014 (bubble)  
Angelil+2014(LJ), 2014(bubble), 2015



原始惑星系円盤中  
の加熱プロセス

Tanaka+1998  
(原始惑星系円盤中の衝撃波)  
Tanaka+2002  
(円盤中の金属の非平衡凝縮)  
Miura+2010, 2017  
(微惑星衝撃波)  
Tanaka+2013  
(微惑星衝撃波による微惑星蒸発)  
Nagasawa+2014 (木星摂動によるコ  
ンドリュール形成)

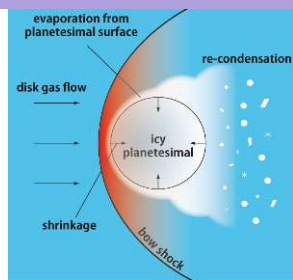
核生成実験との連携

Tanaka+2008  
(界面張力と拡散係数を導出する方法の提案)  
Kimura+2012(Mn), 2017(Fe), 2022(Si), 2023(C)  
宇宙ロケット実験による物性値の導出  
Lippe+2018(H2O)  
ダイマー生成の困難

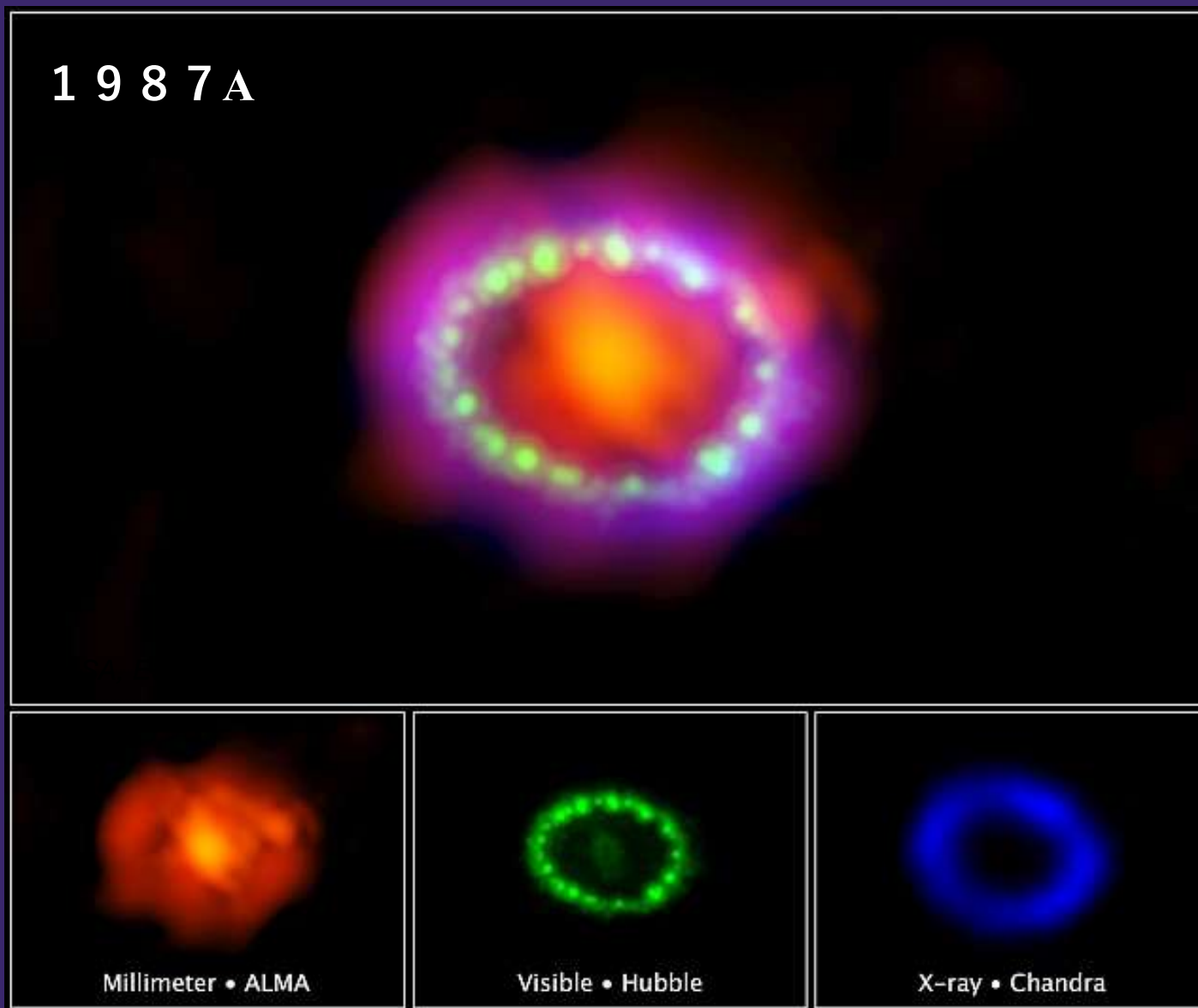


水蒸気の凝結  
地球大気、火星大気の雲

Tanaka+2008  
(巻雲生成モデル)  
Tanaka & Kimura 2019  
Tanaka + 2022  
(夜光雲生成について)



# 超新星爆発⇒ダスト生成



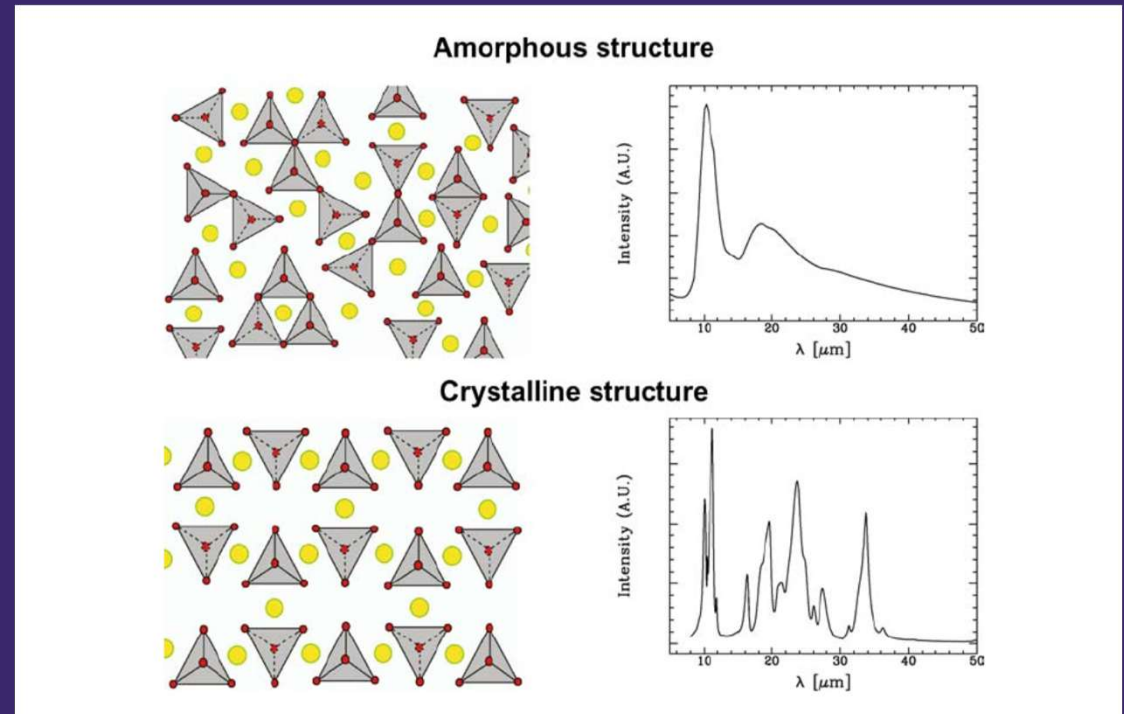
特徴：**非平衡**

- 非平衡凝縮：  
平衡状態より  
低い凝縮温度  
(地球はほぼ平衡)
- 結晶構造 <<  
アモルファスな  
非晶質構造  
(地球はほぼ結晶)

多波長で見るSN 1987A。(赤) アルマ望遠鏡によるサブミリ波観測。新たに作られた塵の存在を示す。(緑) HSTによる可視光線観測。爆発した星からの衝撃波が超新星の周囲に広がる物質のリングに衝突していることを示す。(青) チャンドラによるX線観測。高温のガスを示す。(NASA, ESA, and A. Angelich (NRAO/AUI/NSF)/HST: NASA, ESA, and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics and Gordon and Betty Moore Foundation)/Chandra: NASA/CXC/Penn State/K. Frank et al./ALMA: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) and R. Indebetouw (NRAO/AUI/NSF))

# アモルファス相, 結晶相

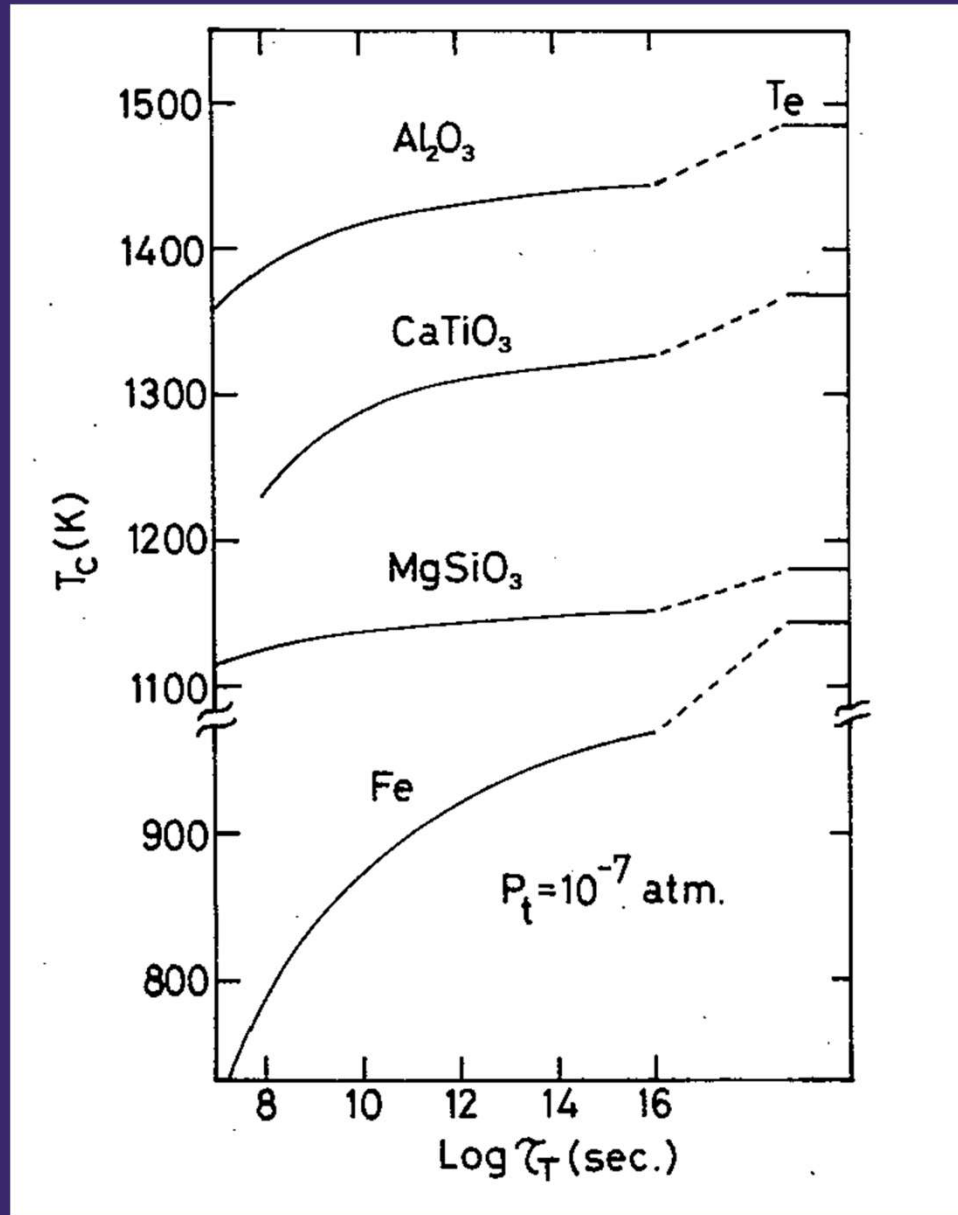
- 結晶相  
周期構造、秩序性
- アモルファス (非晶質)  
周期構造持たず  
非平衡状態：  
結晶の安定状態に  
達する前に凍結



(Molster & Kemper 2005)

宇宙のダストはほとんどがアモルファス相  
ガスからどのようにして生成するか？

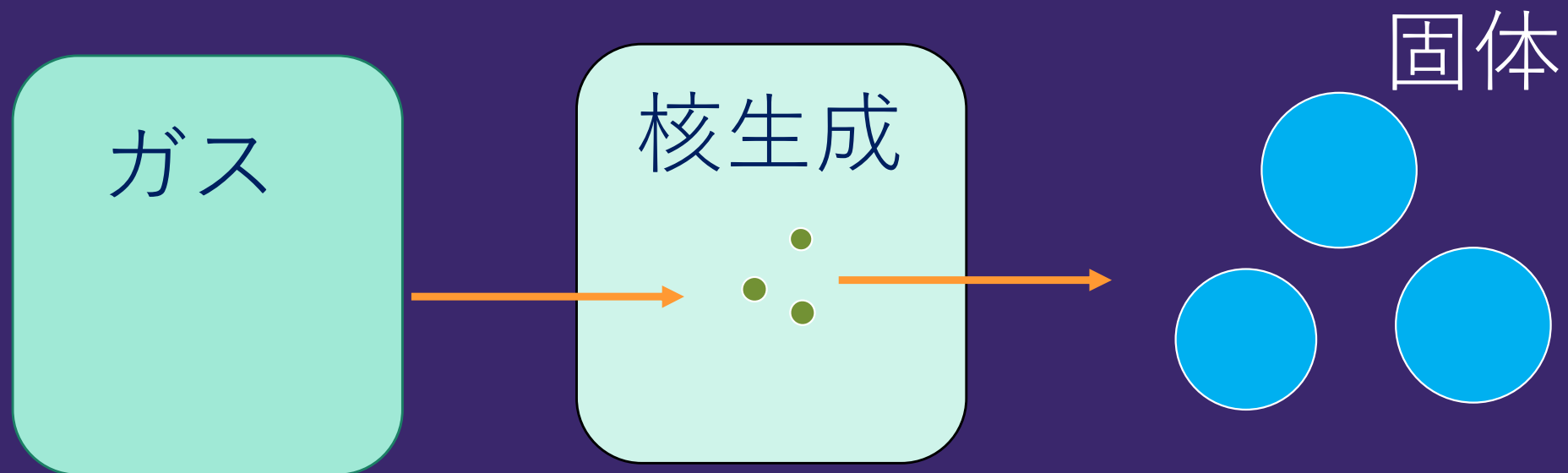
# 宇宙でのさまざまな物質の凝縮温度 < 平衡温度 $T_e$



凝縮温度は  
核生成率 (後述)  
により決定

(Kozasa & Hasegawa, Prog. Theor., Phys. 1987)

ガスからどのように固体が出来るか？  
(相変化は核生成過程から)



まず新たな相の  
小さな核が生成

まだよく分かっていない未解決なプロセス

# Nucleation process

---



宇宙ダスト生成

- 核 相変化の開始点となるもの
- 核生成 相変化の初期に起きる現象  
局所的に異なる熱力学相が出現



エアロゾル  
雲の生成



気相-液相転移 (凝縮)

液相-固相転移 (結晶化)

液相-気相転移 (気泡生成、沸騰)



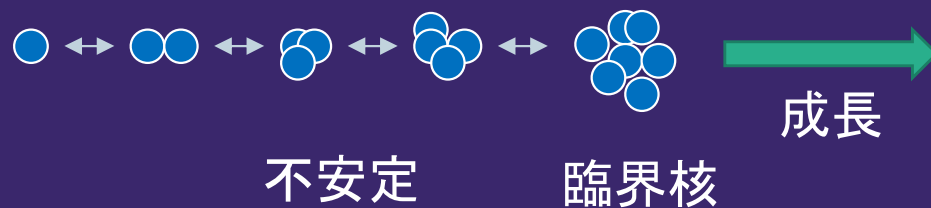
火山の発砲現象

# 核生成過程の問題点

古典的な核生成理論から得られる核生成率 $J$ の不定性  
実験値と比較すると桁で合わない

水 ( $\text{H}_2\text{O}$ )      $J_{\text{実験}}/J_{\text{理論}} \sim 10^{-(2-3)}$

希ガス (Ar)      $J_{\text{実験}}/J_{\text{理論}} \sim 10^{(10-20)}$



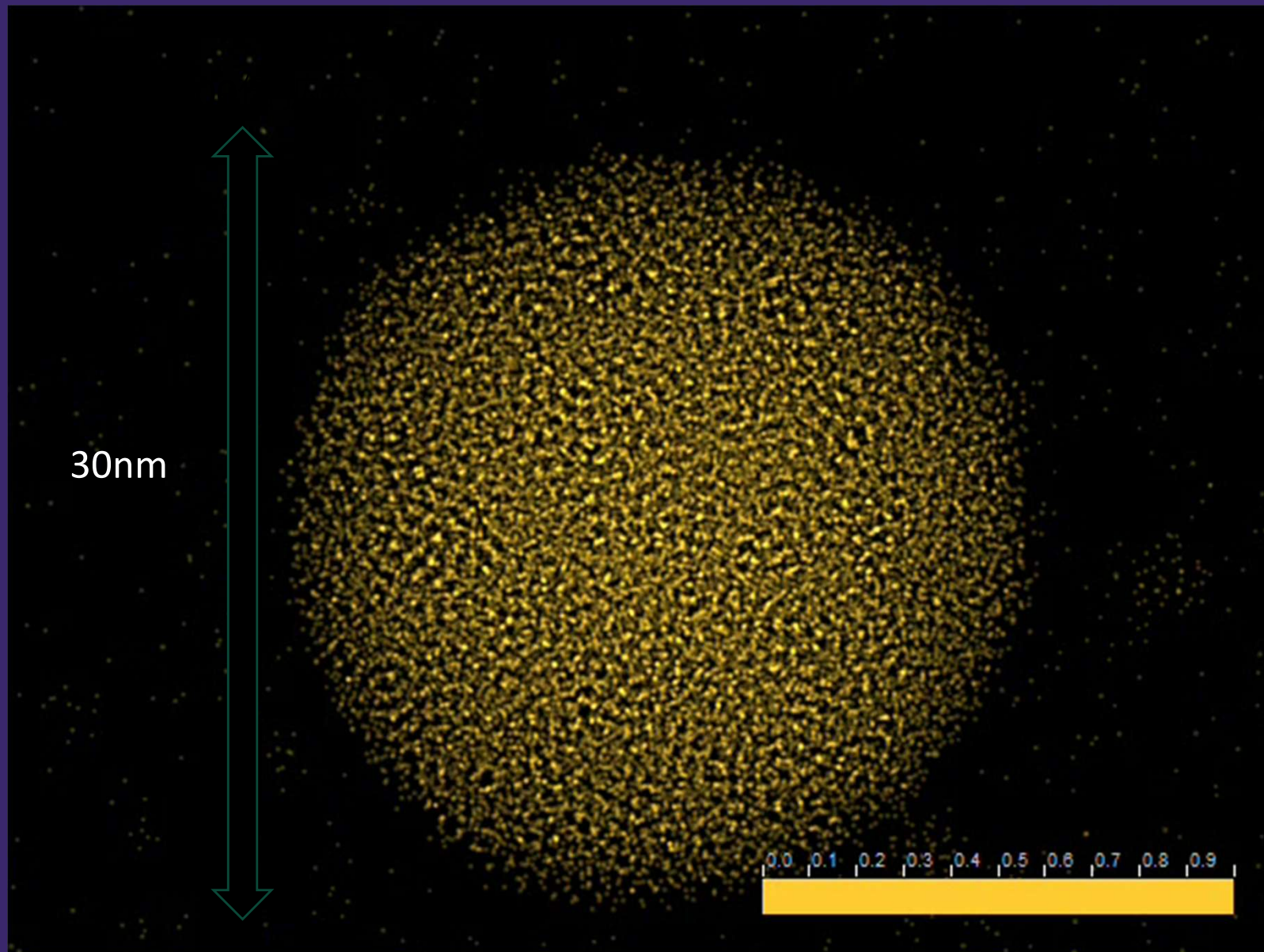
臨界核がナノサイズ以下  
であり原子レベルの  
取り扱いが重要

# 分子動力学 (MD)計算

---

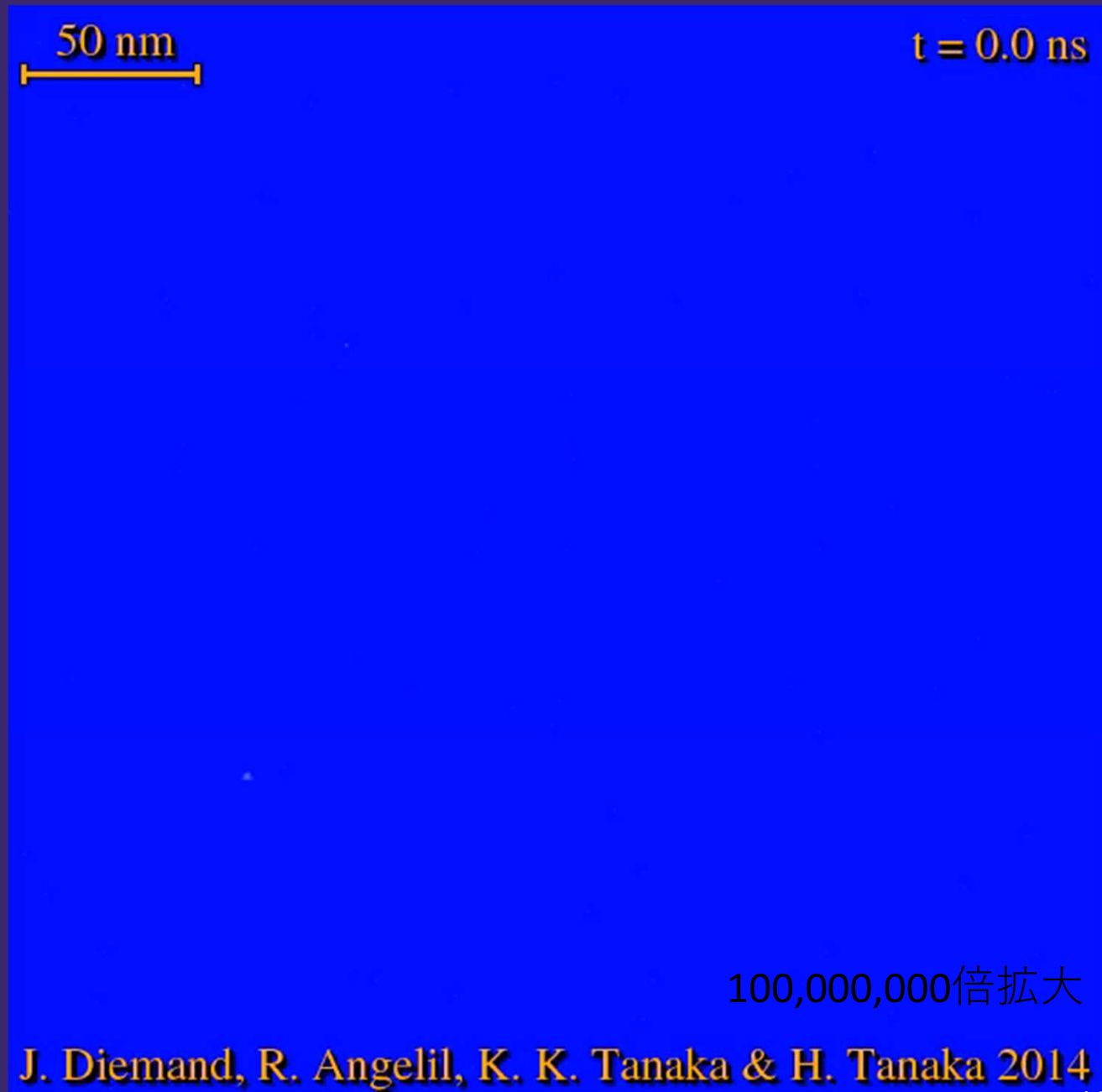
- 多数の分子や原子の集合系において、ある条件で各原子/分子に対して運動方程式を数値的に解き、集合体の統計的振る舞いや構造・性質を研究する手法
- 超高分解能顕微鏡で超ハイスピードカメラで観察していることと同じ

# 結晶化のMD計算



1000,000,000倍遅い再生  
(数十ノ秒を数秒で)

# 気泡生成のMD計算

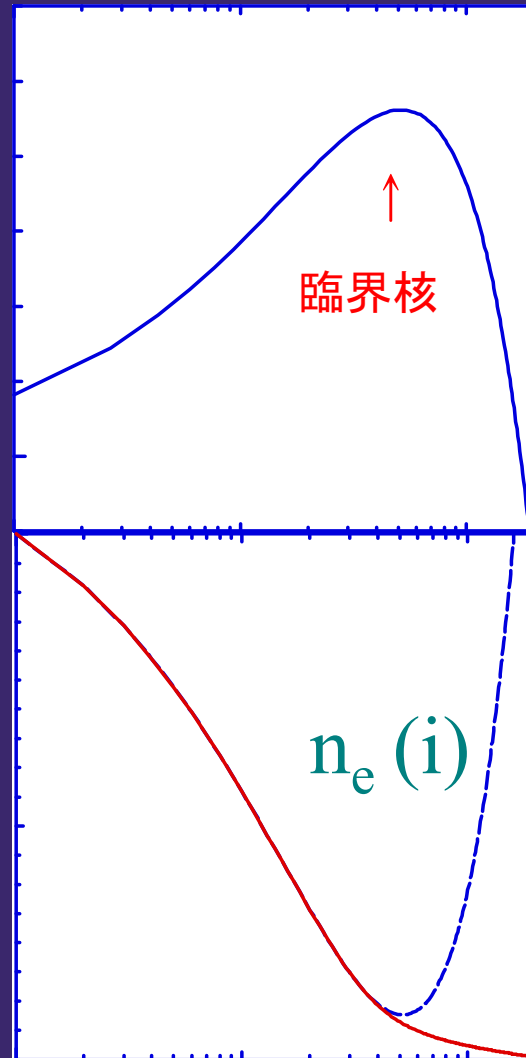


1000,000,000倍遅い再生

# 核生成

$i$ 個のvapor分子からimerを作るための  
化学ポテンシャル

$\Delta G_i$



分子クラスター  
(imer) の数密度

$n(i)/n_1$

$n_e(i)$

$i$

クラスターに含まれる分子数

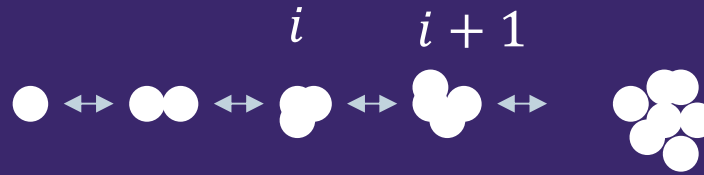


過飽和状態

→ クラスター生成  
の自由エネルギー変化  
が臨界核でピーク

→ 臨界核より大きくなると成長

# 核生成率



$$J(i) = R^+(i)n(i) - R^-(i+1)n(i+1)$$

平衡の場合:

$$R^+(i)n_e(i) = R^-(i+1)n_e(i+1)$$

上より以下の漸化式が得られる

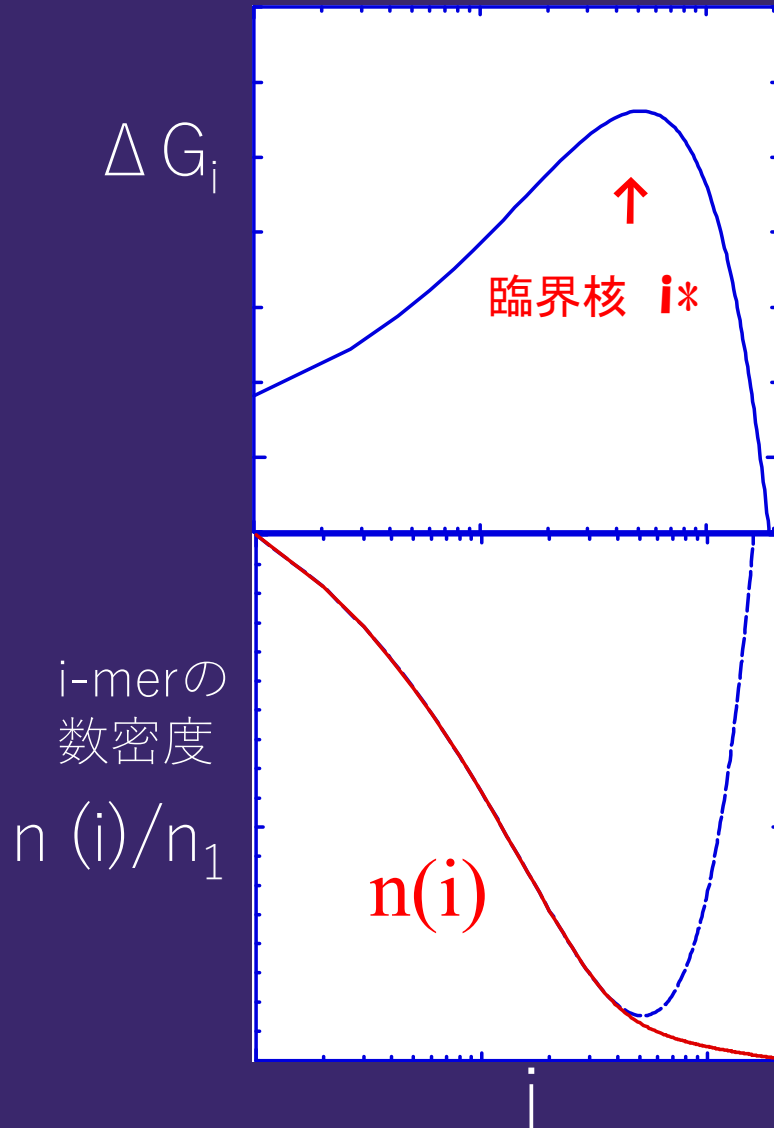
$$\frac{J(i)}{R^+(i)n_e(i)} = \frac{n(i)}{n_e(i)} - \frac{n(i+1)}{n_e(i+1)} \quad i \geq 1$$

$i=1 \sim \infty$ まで足し合わせる

定常状態を仮定すると

$$J = \frac{1}{\sum \frac{1}{R^+(i)n_e(i)}} \cong R_{(i^*)} n_e(i^*) z$$

# 核生成理論



核生成率

(単位時間、体積当たりに生成される核の個数)

$$J \cong R_{i^*} n_e(i^*) Z$$

$R_i$  :  $i$ -merから $i+1$ -merへの遷移確率

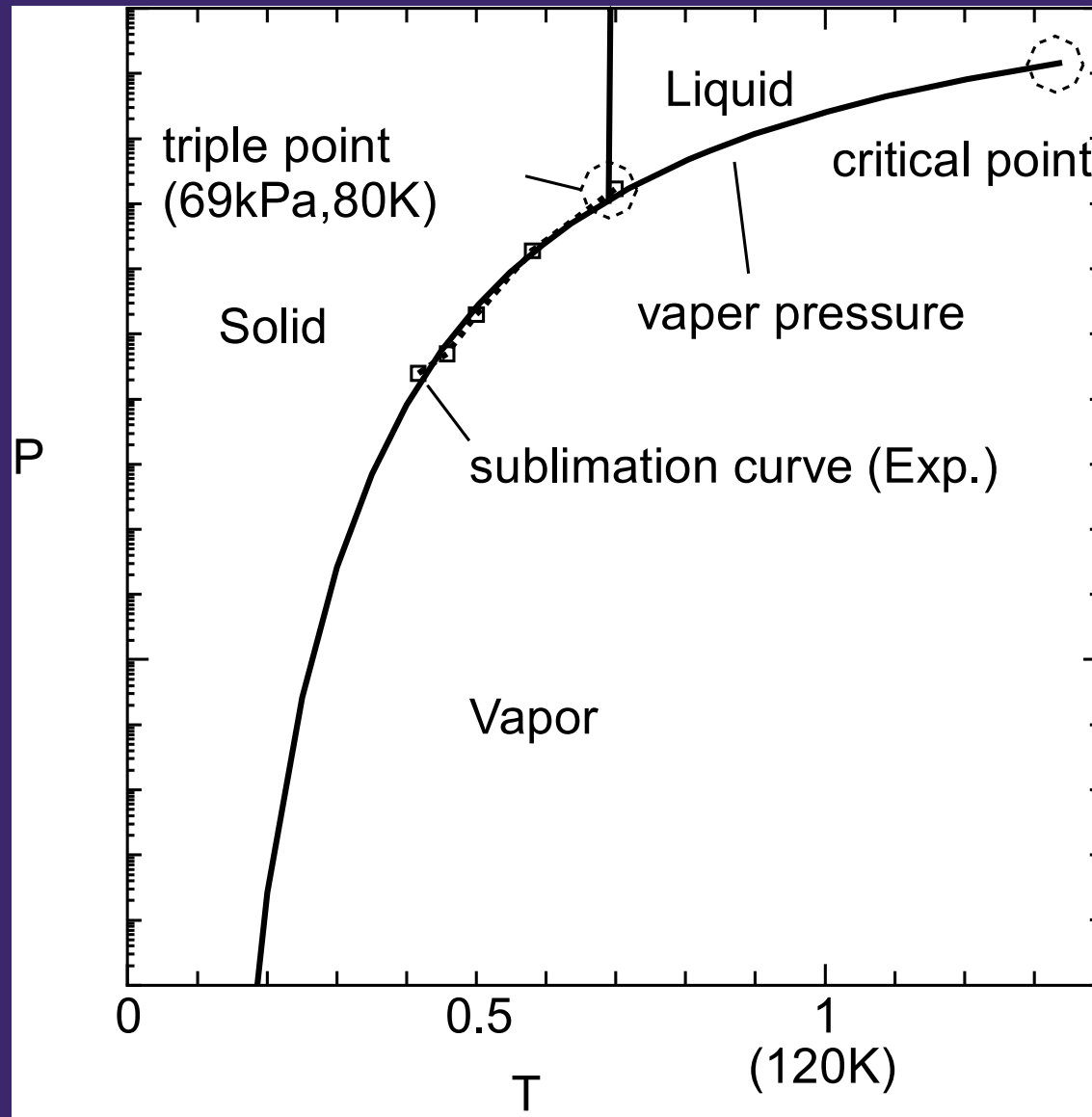
$n_e(\mathbf{i})$  :  $i$ -merの平衡数密度

$$n_e(i) = n(1) \exp\left(-\frac{\Delta G_i}{kT}\right)$$

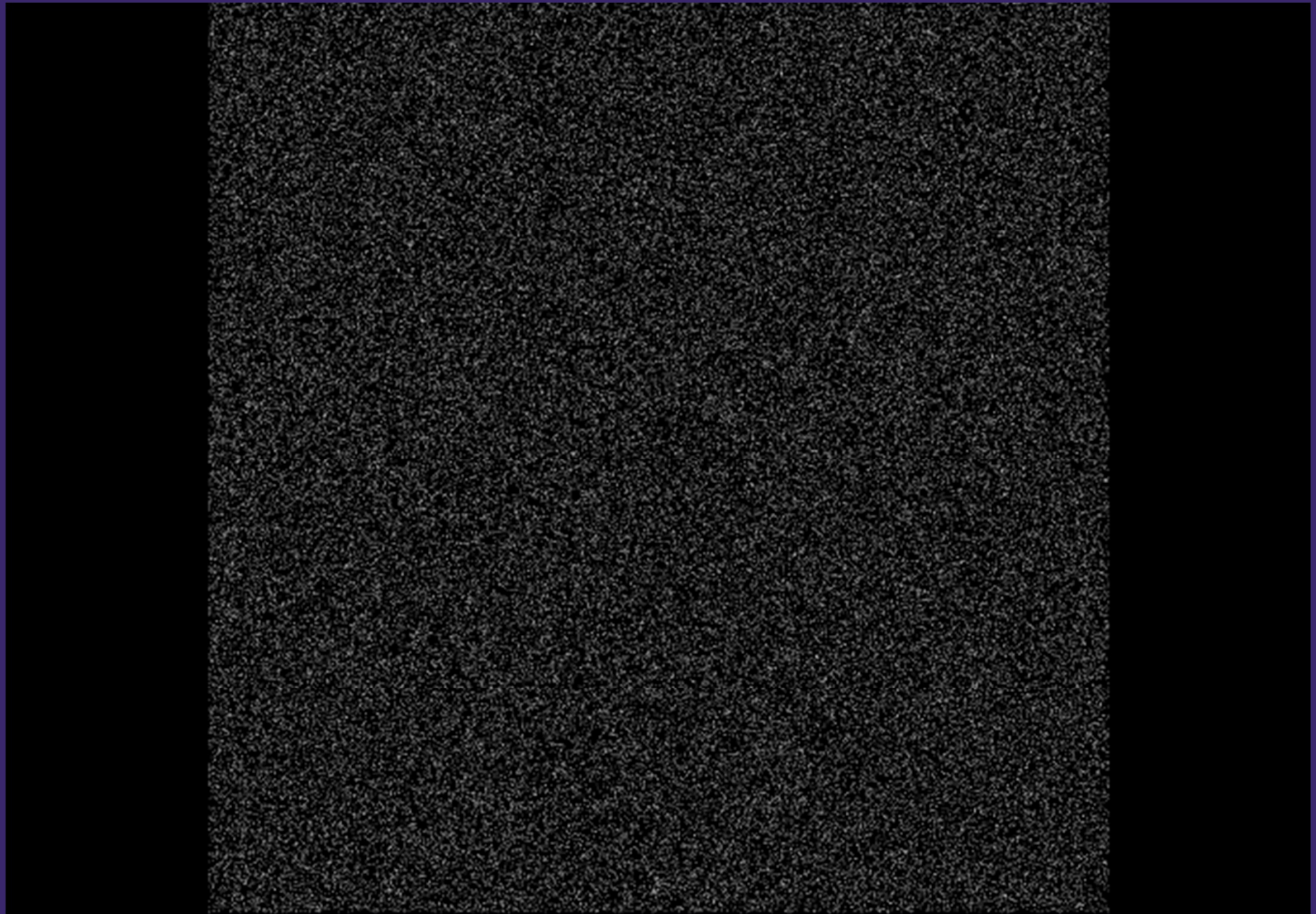
$\Delta G_i$  : クラスタ生成の自由エネルギー

クラスタに含まれる分子数

# 希ガスの相図

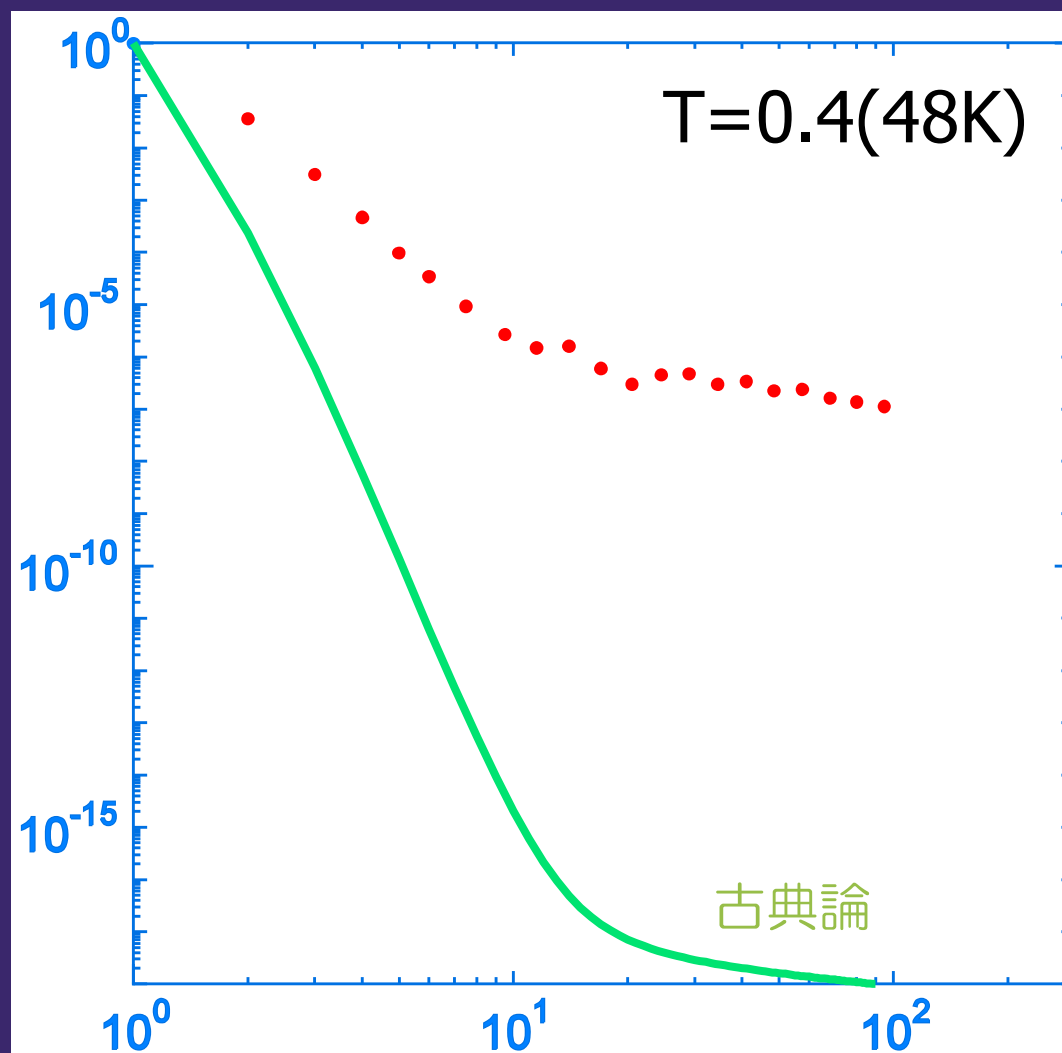


# 気相からの核生成 (希ガス)



# 分子クラスターの分布

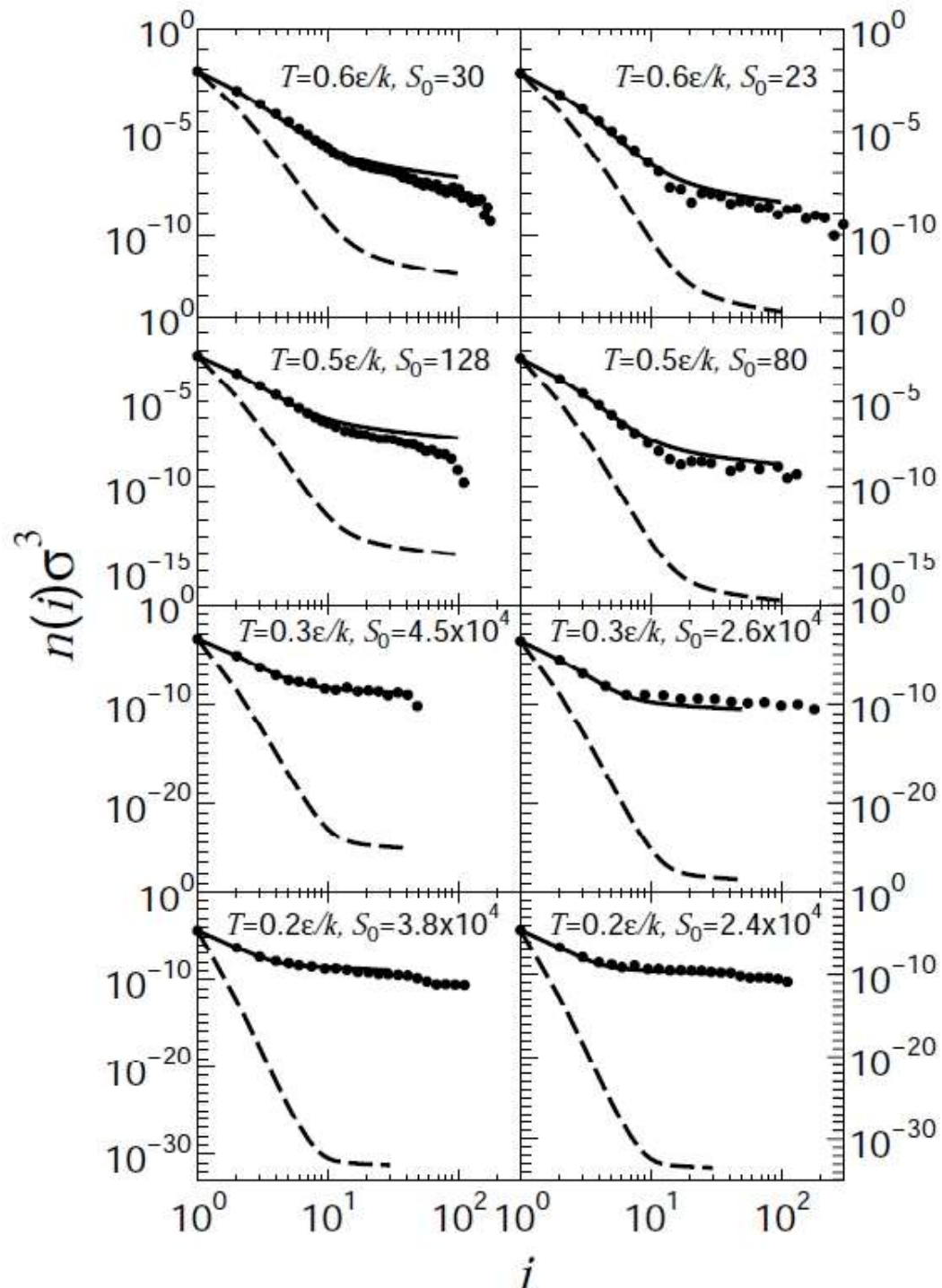
$n(i)/n(1)$



i: クラスター内の分子数

古典論はMD計算と  
10桁以上の差

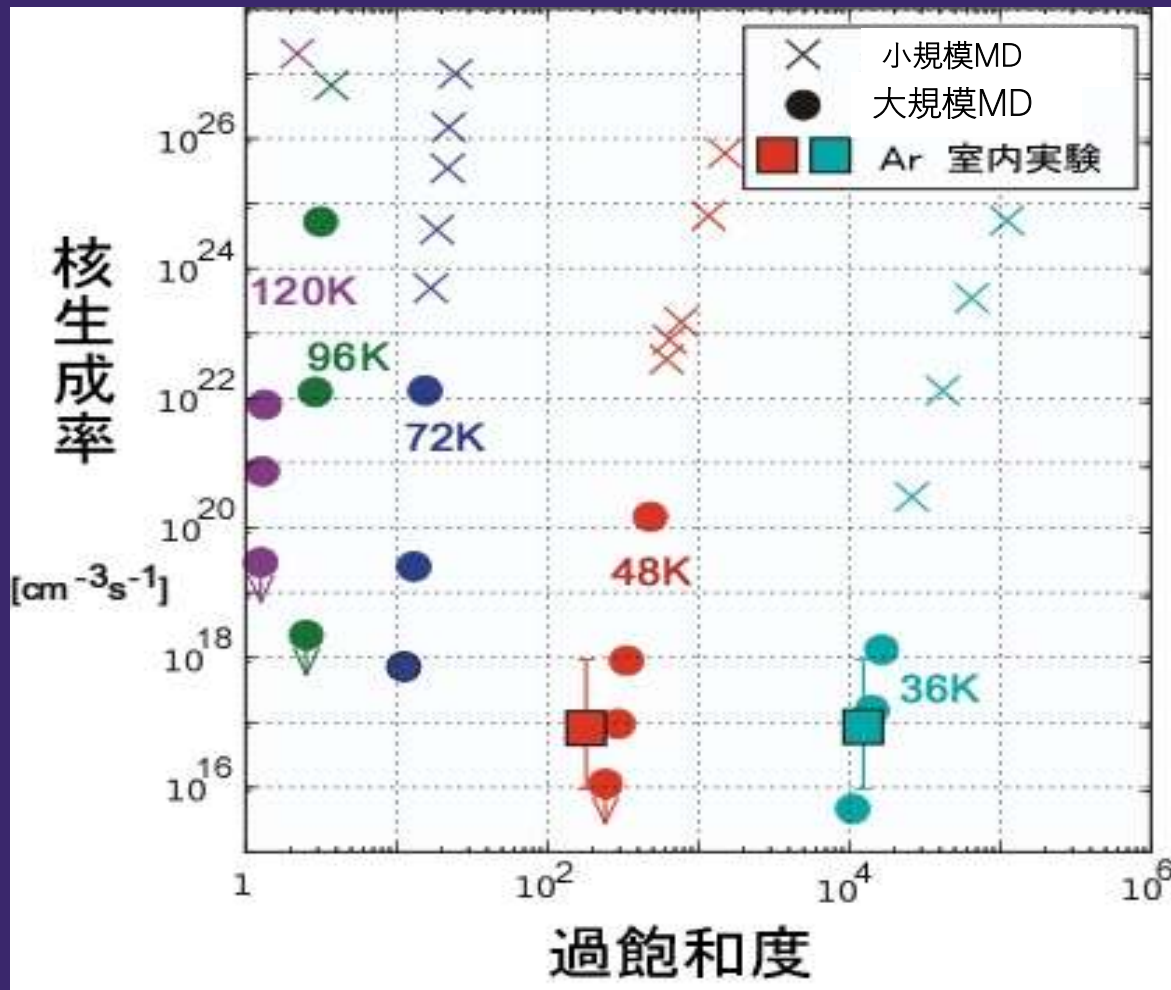
$$J \sim 10^{10} J_{\text{古典}}$$



(Tanaka et al. J. Chem. Phys. 2011)

固体・液体の広い温度領域  
で古典的理論からずれる

# 核生成率



(Diemand, Angelil, Tanaka, Tanaka, J. Chem. Phy. 2013)

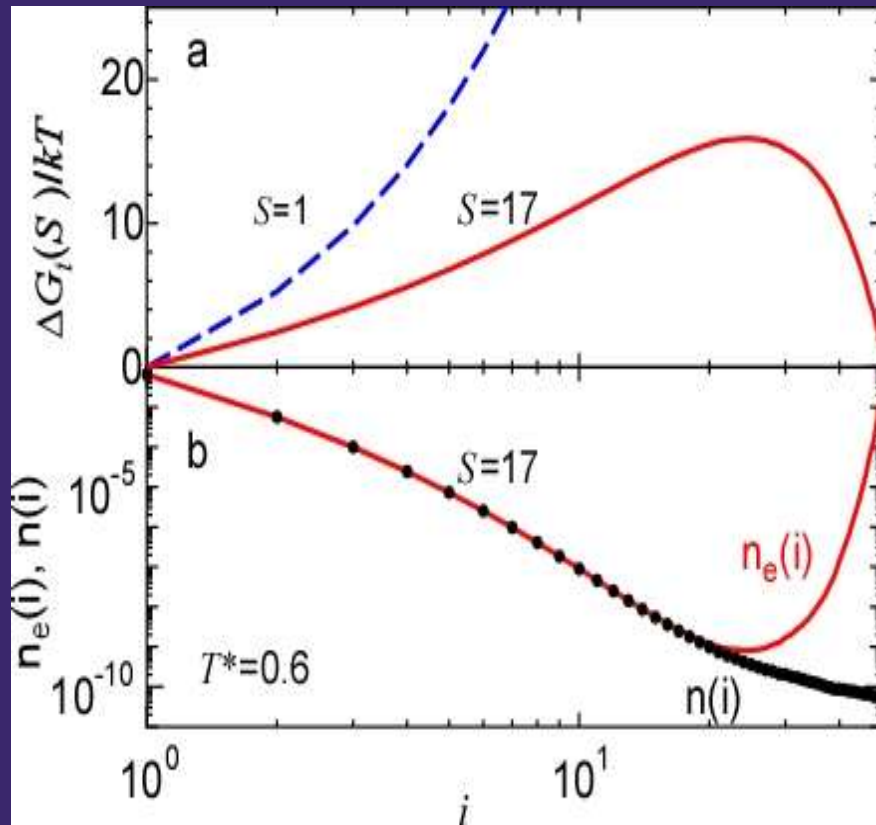
Review論文(Li & Signorell, J Aerosol Sci.2021)

typically up to microseconds. Experimentally accessible nucleation rates of up to  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  (Wyslouzil & Wölk, 2016), once converted to the units more relevant for MD simulations, i.e.  $\text{nm}^{-3} \mu\text{s}^{-1}$ , are only  $10^{-10}$  in value. This implies that nucleation is a truly 'rare' event from an MD perspective: to capture these events large simulation domains and long simulation times are needed. Limited by computational cost, most MD simulations use high supersaturation ratios to produce nucleation rates much higher than the experimentally accessible rates. Exceptions are the large-scale MD simulations performed by Tanaka and co-workers. For Lenard-Jones (LJ) systems,  $10^8$ - $10^9$  atoms have been simulated for a time duration of up to  $1.2 \mu\text{s}$  (Diemand, Angelil, Tanaka, & Tanaka, 2013). The scale of their simulation allows a nucleation rate as low as  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  to be achieved, overlapping with nucleation rates obtained from supersonic nozzles experiments (Sinha et al., 2010). For water nucleation, Angelil et al. (2015) performed the largest MD simulation so far: They simulated water nucleation containing  $4 \times 10^6$  molecules, achieving a nucleation rate as low as  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$

➤ 核生成実験 (Sinha et al. 2010) と初めて一致！

# 自由エネルギーの導出

(Tanaka+14, J. Chem. Phys.)



自由エネルギーはクラスター分布から導出できる

$$\frac{\Delta G_i}{kT} = \ln \left( \frac{n(1)}{n_e(i)} \right)$$

$$J = R^+(i)n(i) - R^-(i+1)n(i+1),$$

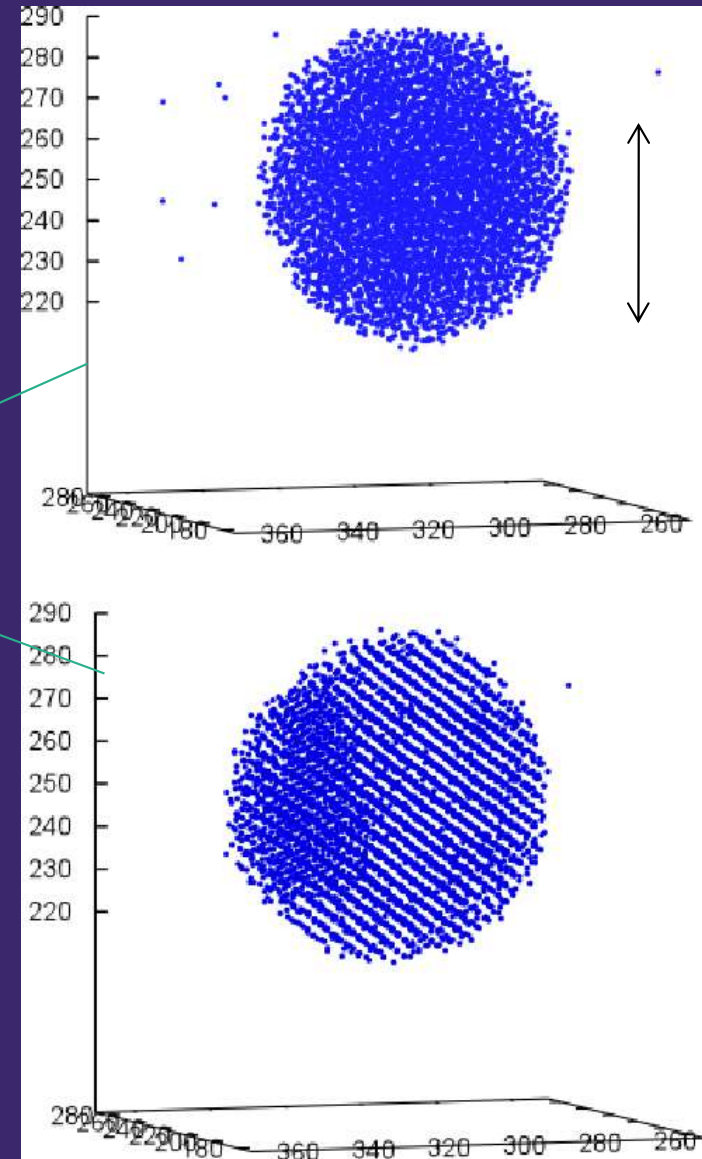
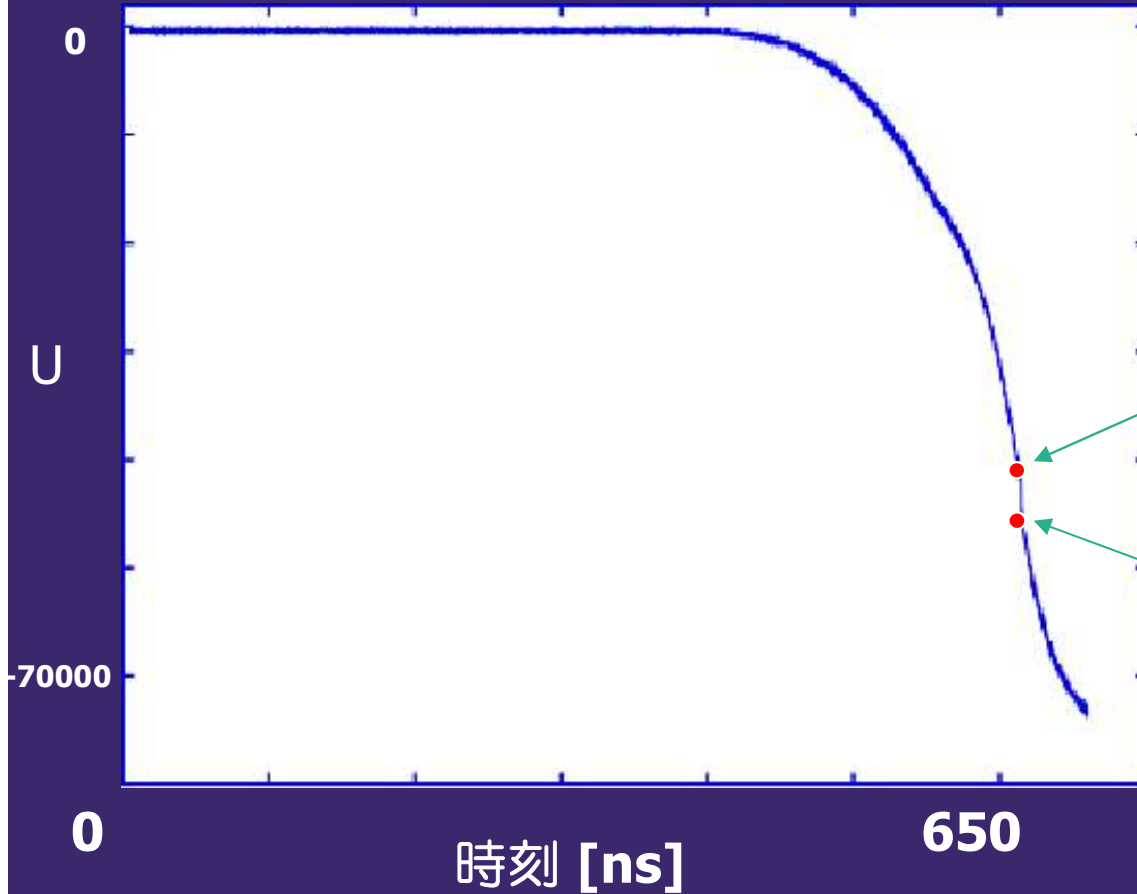
$$R^+(i)n_e(i) = R^-(i+1)n_e(i+1)$$

$$\frac{n_e(i)}{n(i)} = \frac{n_e(i-1)}{n(i-1)} \left( 1 - \frac{J}{R^+(i-1)n(i-1)} \right)^{-1}$$

分子クラスター分布 (定常分布)  
 $\Rightarrow$  平衡分布  $\Rightarrow$  自由エネルギー

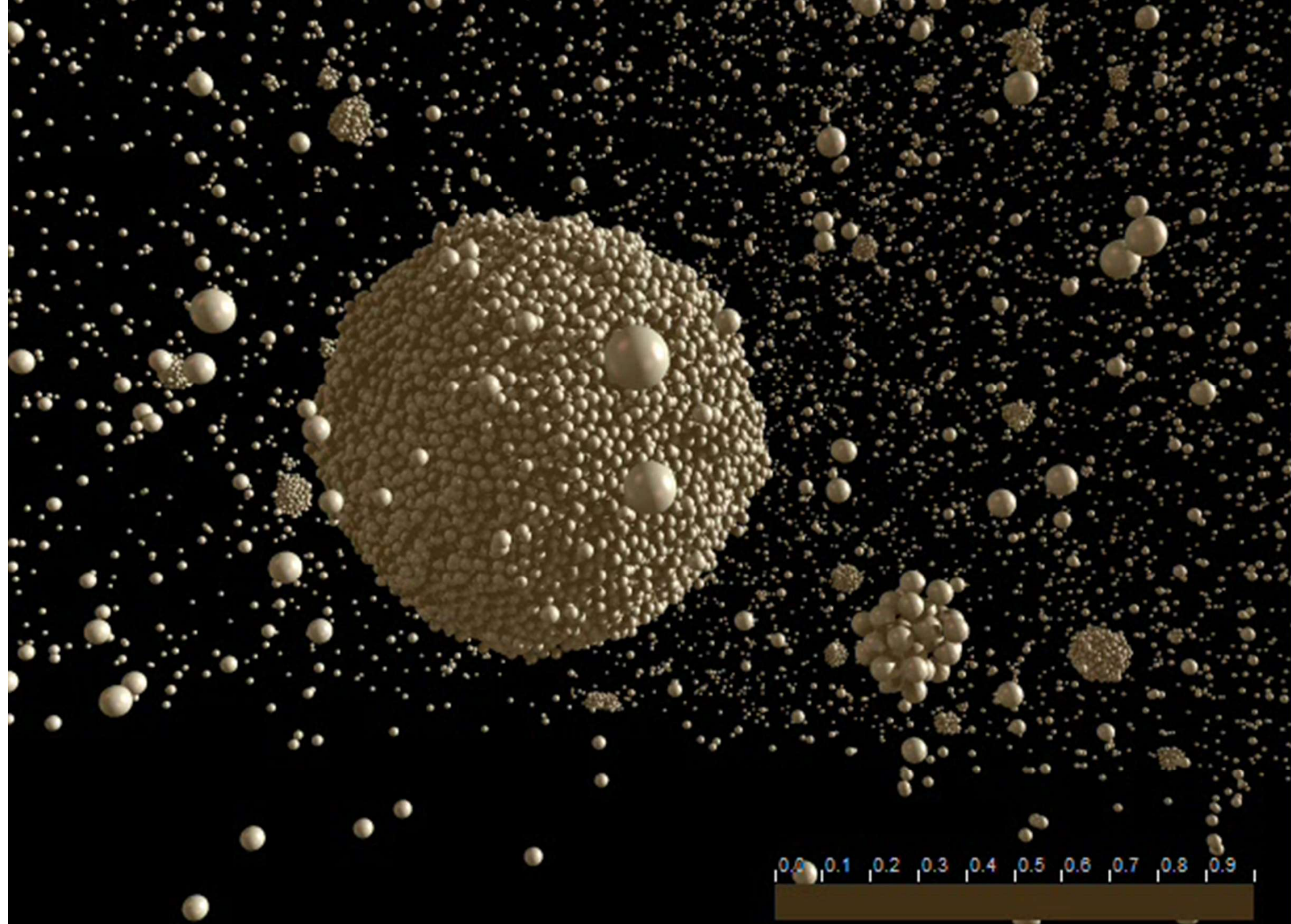
# 結晶化は起きにくい

ポテンシャルエネルギー  $T=0.4, N=10000$

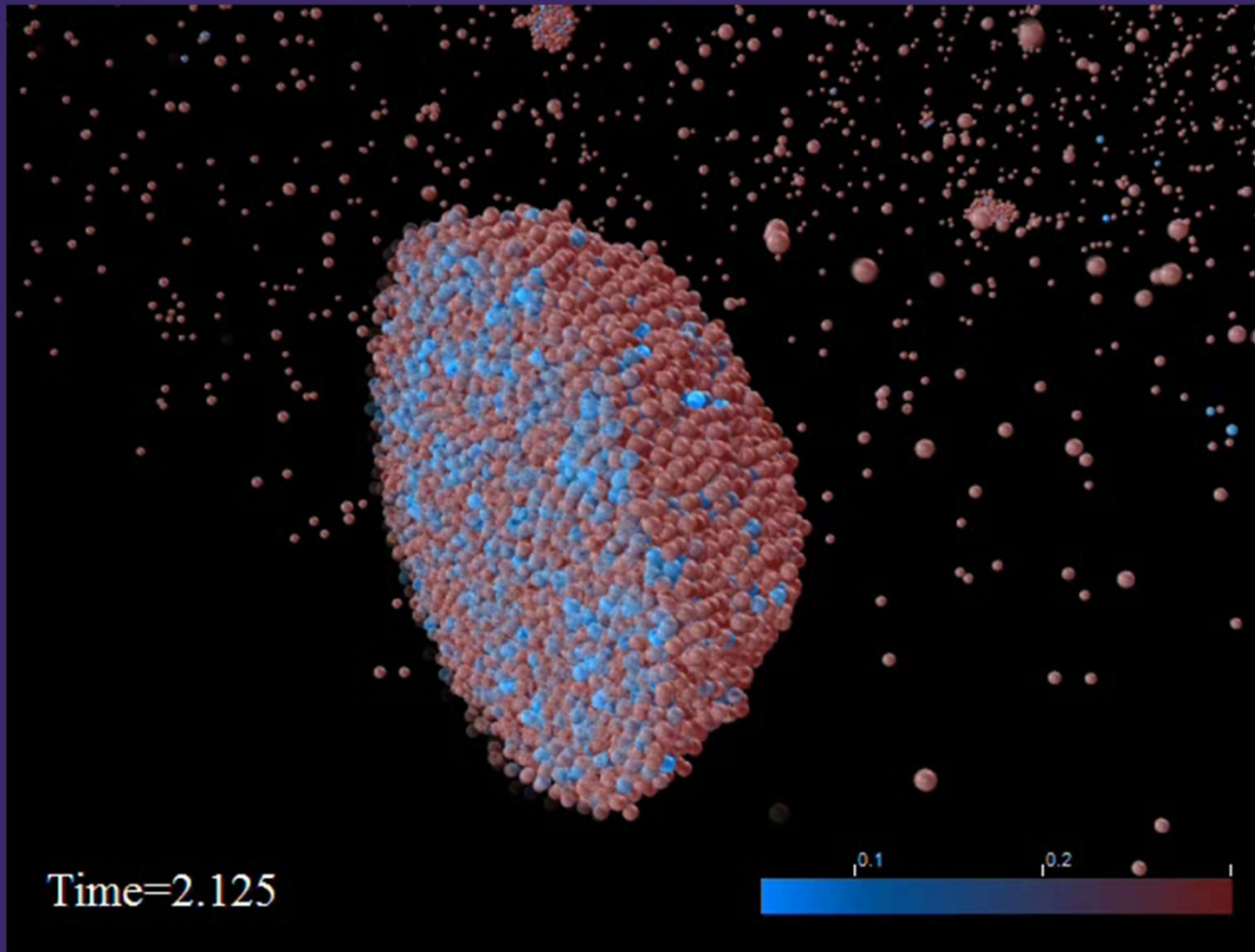


どんなに低温でもまず液体が凝縮

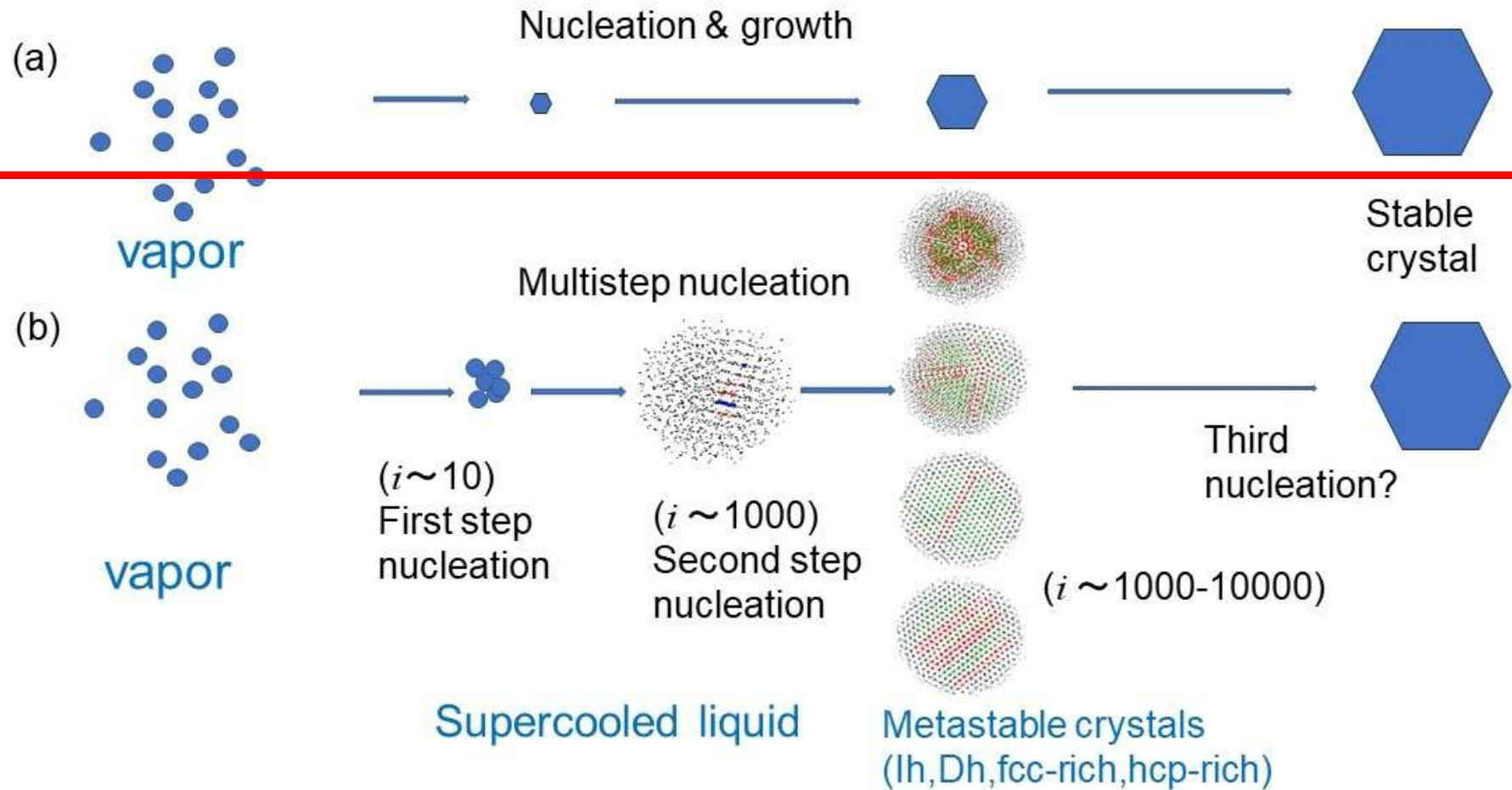
クラスター構造が途中で変化  
1 ns以下で結晶化



# 結晶化の様子(青はエネルギーが低い分子)



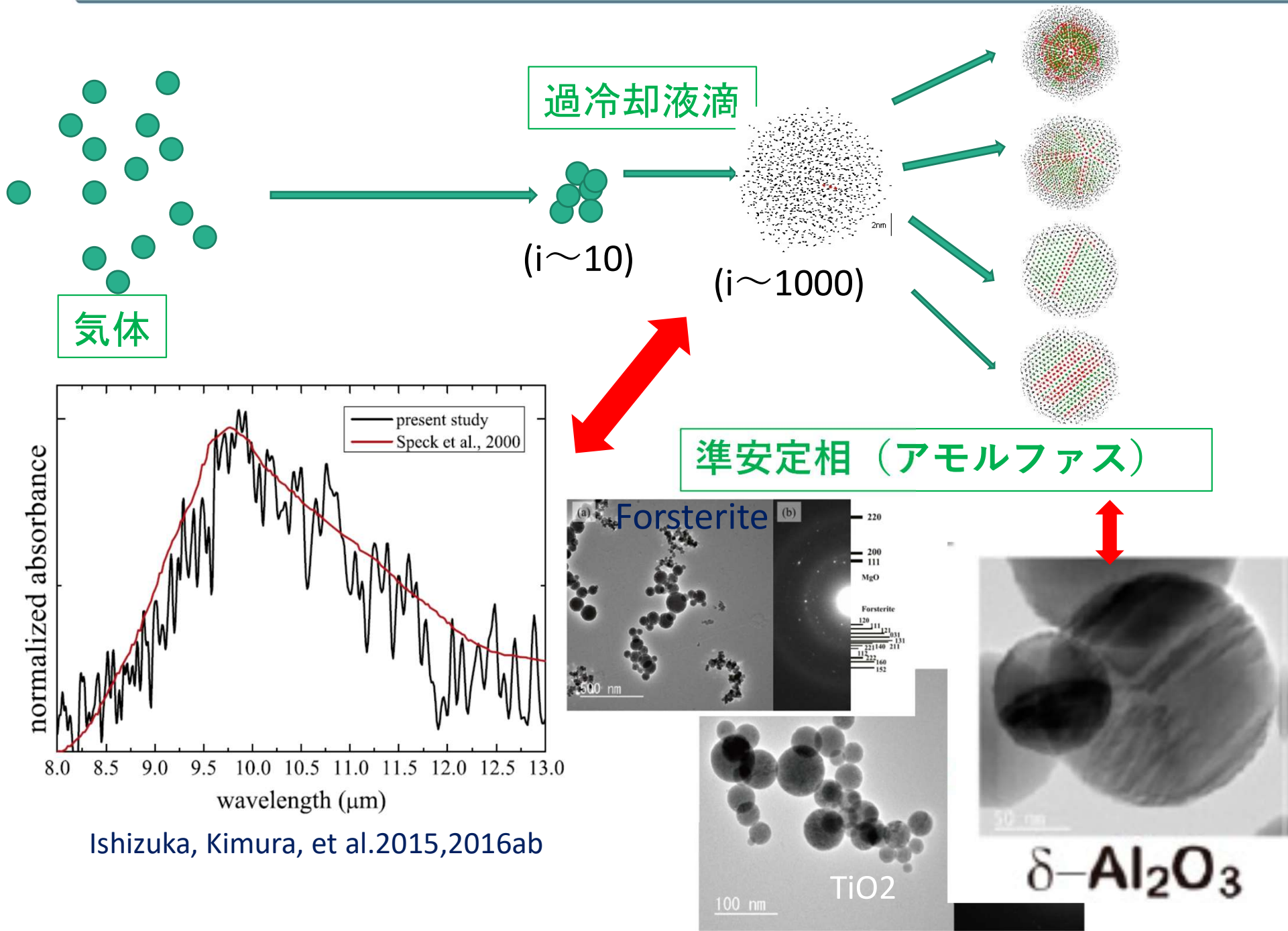
# 気体から固体への変化



(Tanaka et al. 2017 Phy. Rev. E)

気相から固相への相変化 → (b) 多段階核生成になる

# 宇宙での気相からの相変化



# まとめ

- 天文・惑星科学の紹介

  - 系外惑星の発見、惑星形成理論

  - はやぶさ&はやぶさ2

- 宇宙ダストの生成

  - 凝縮温度、構造、サイズ、量を知るには

  - プロセスの理解が重要(始まりは核生成)

  - ⇒ ミクロからマクロへ

- ◆ 惑星科学は多領域(天文・物理・地質・化学etc.)をつなぐ面白い分野

- ◆ 今後の発展にも注目してください