

天文学概論

第5回 星と惑星の形成

担当：黒川 宏之



スケジュール 1

- 9/20 ガイダンス (大宮)
- 9/27 太陽系 (1) (押野)
- 10/4 太陽系 (2) (大宮)
- 10/11 恒星 (大宮)
- 10/18 星惑星形成 (黒川)
- 10/25 系外惑星 (1) (押野)
- 11/1 系外惑星 (2) (大宮)
- 11/8 銀河系・近傍銀河 (1) (新納)
- 11/15 銀河系・近傍銀河 (2) (新納)

担当教員紹介

名前：黒川 宏之

所属：東京工業大学 地球生命研究所

連絡先：hiro.kurokawa@elsi.jp

専門：惑星の形成と進化の理論的研究

担当：星惑星形成(第5回), 超新星・宇宙論(第11・12回)

レポート課題 (黒川担当分)

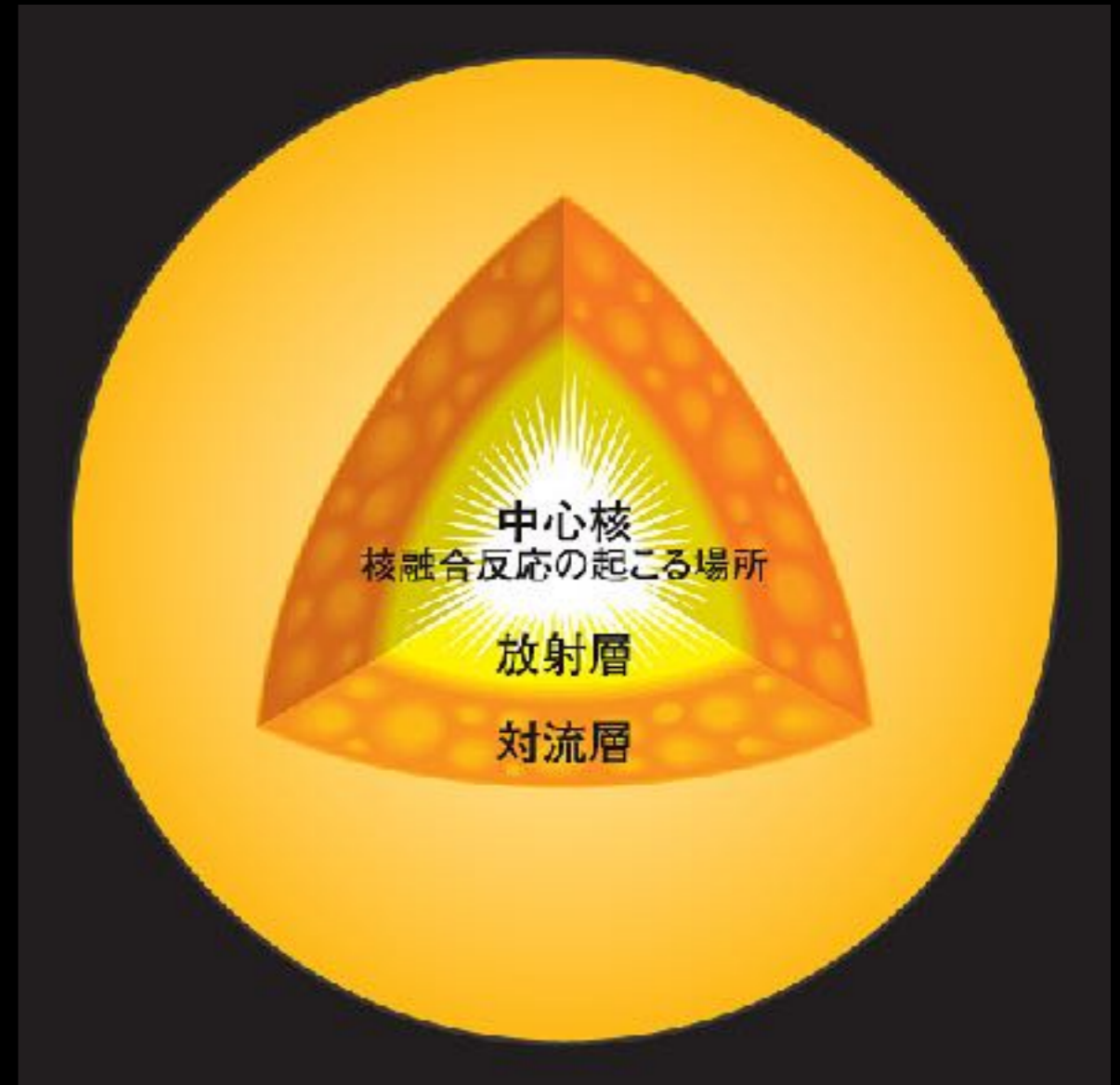
「星と惑星の形成」(今日の講義) または
「宇宙誕生から現在までの歴史」(第11回)
のどちらかについて
他人が読んでもわかりやすいように要点をまとめよ。
文章の他に、イラスト・図などを用いてもよい。
(A4レポート用紙1枚以内)

提出先：レポートボックス

提出期限：12/13(水) 17時

星(恒星)とは？

- ・ ガス(H, He)の巨大な塊
- ・ 内部で核融合反応
- ・ 自ら光り輝く
- ・ 重力とガス圧・放射圧の釣り合い
- ・ 等級：見かけの明るさ
⇔ 絶対等級：本来の明るさ
- ・ 星の色：表面温度



太陽の内部構造(理科年表サイトより)

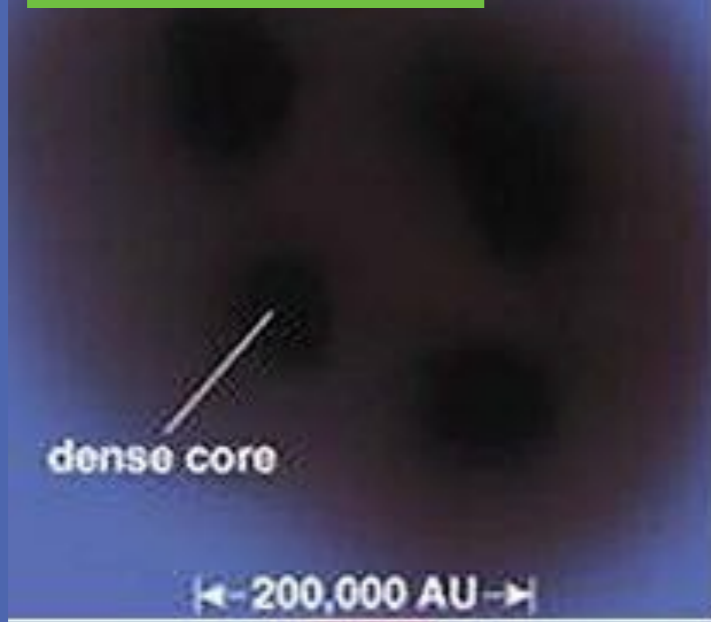
惑星とは？

Our Solar System

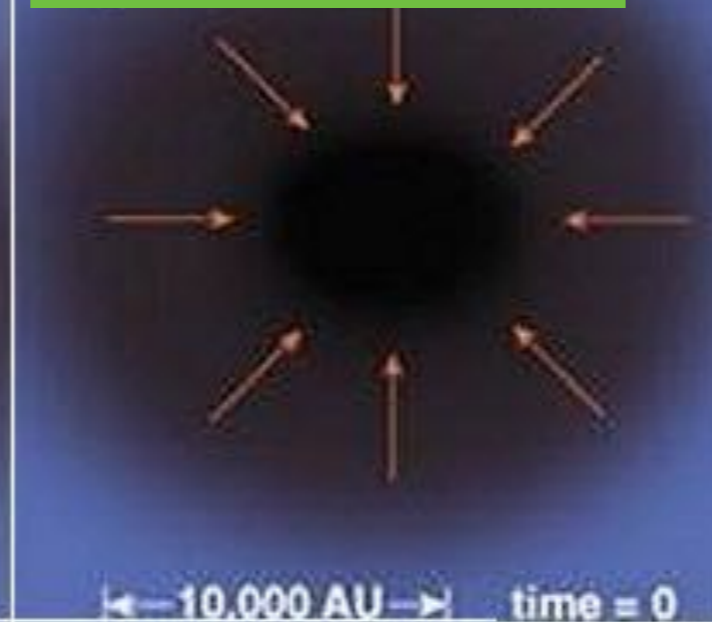
- ・ 恒星の周りを回る
- ・ 球状をなす程度に重い
- ・ その軌道近くに他の天体がない
(衛星を除く)
- ・ 太陽系には8個の惑星

星形成の流れ

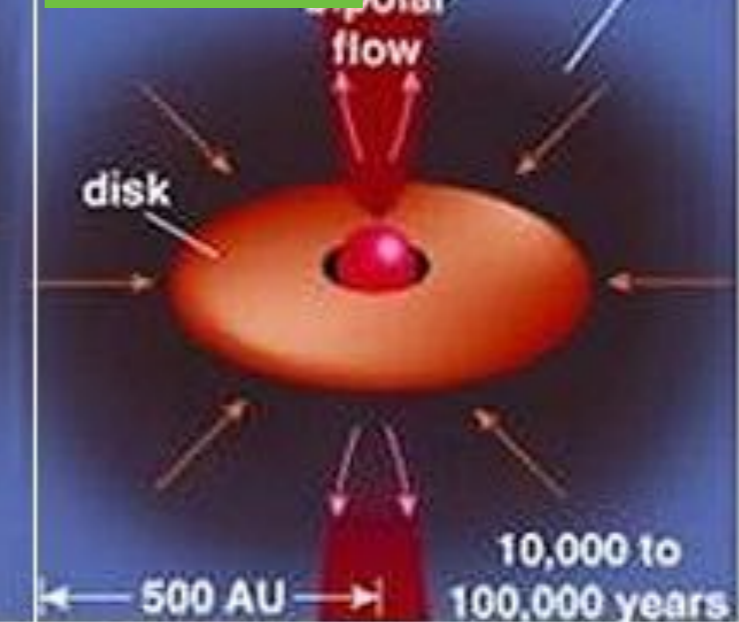
1. 星間分子雲



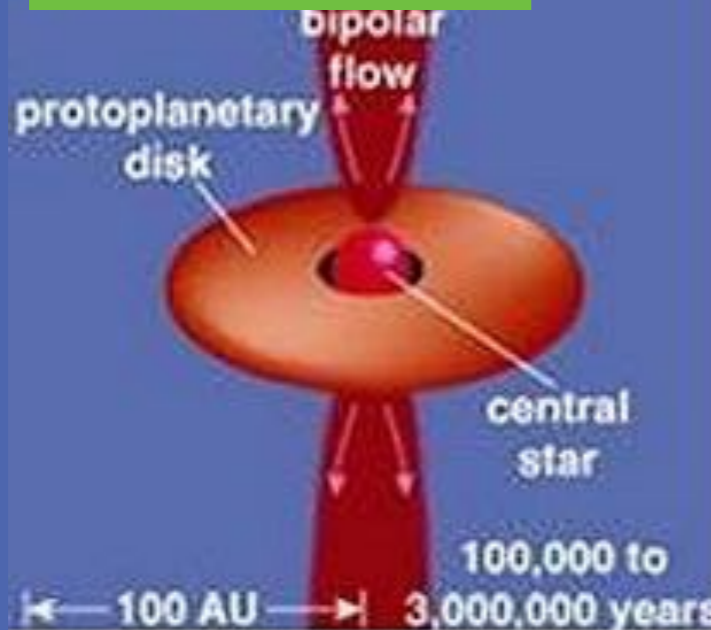
2. 分子雲コア形成



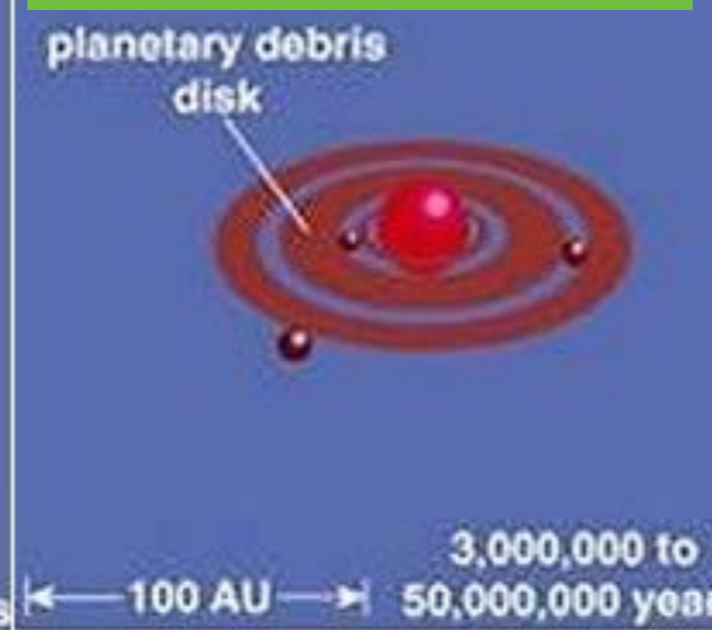
3. 原始星



4. Tタウリ型星



5. 主系列星への進化



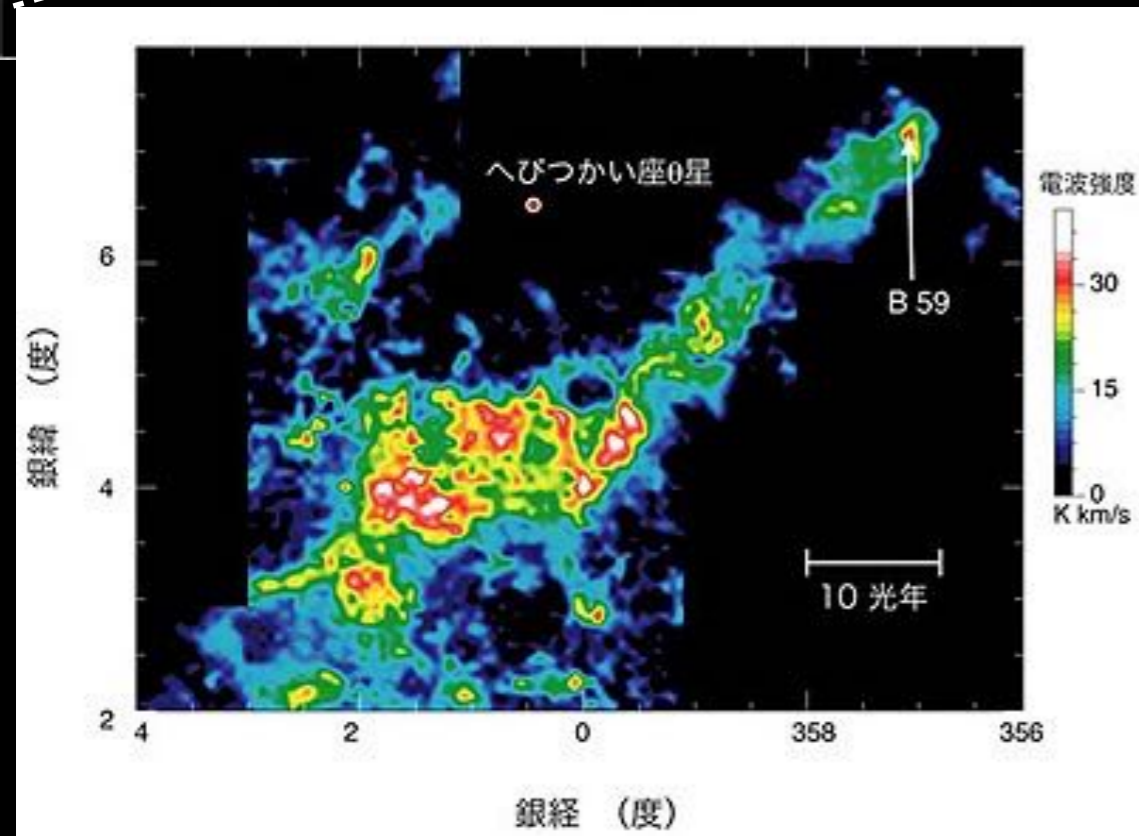
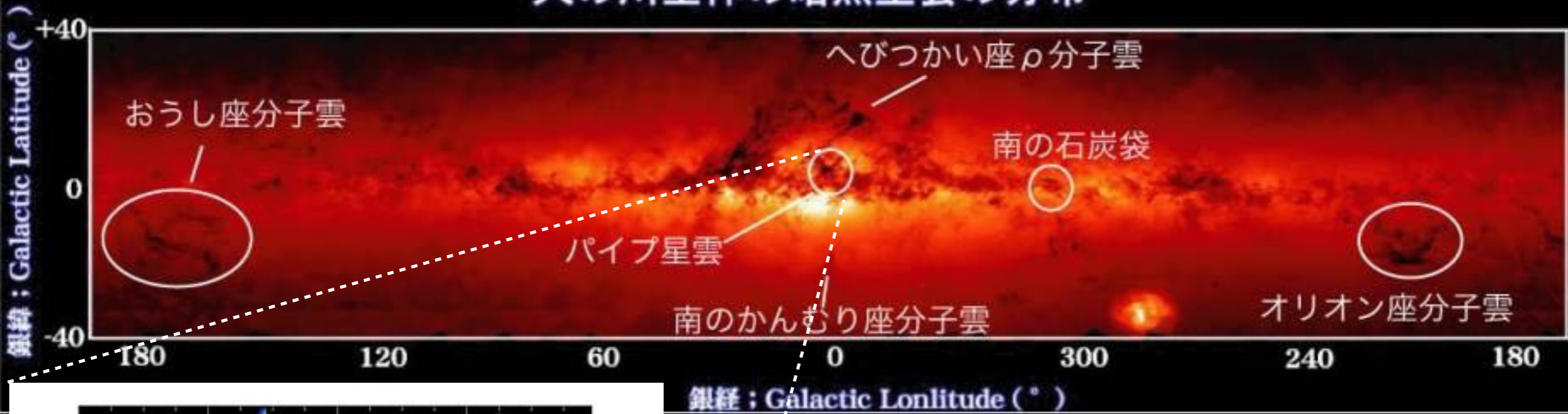
6. 主系列星 (+惑星)



http://www.physicsoftheuniverse.com/topics_blackholes_stars.html

星間分子雲(暗黒星雲)

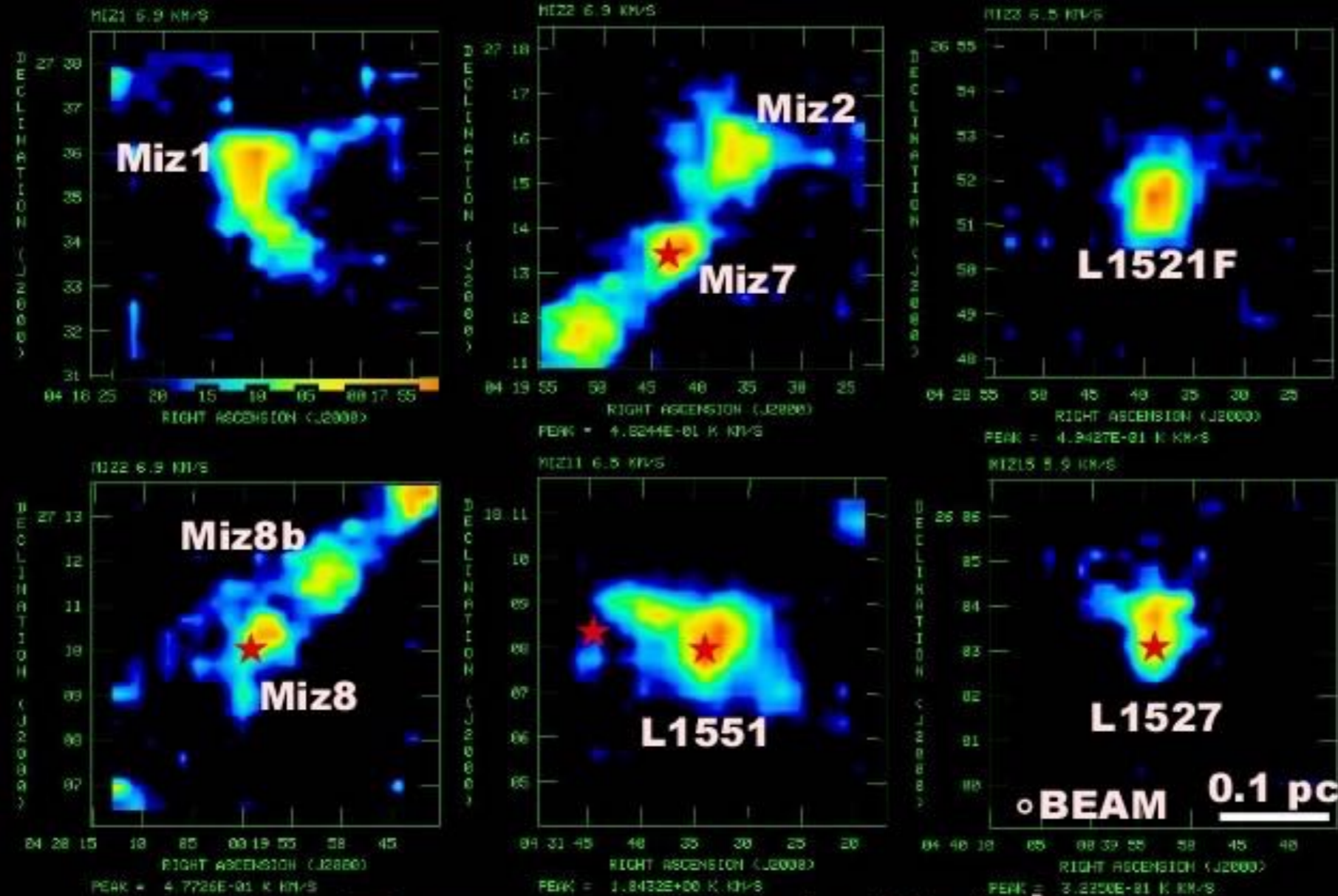
天の川全体の暗黒星雲の分布



- ・ 星間物質の中でも、密度が高く (10^{2-3} 個/cm³), 低温(10 K)
- ・ ガスは分子として存在
- ・ 背景の光を吸収し、暗く見える

分子雲コアの形成

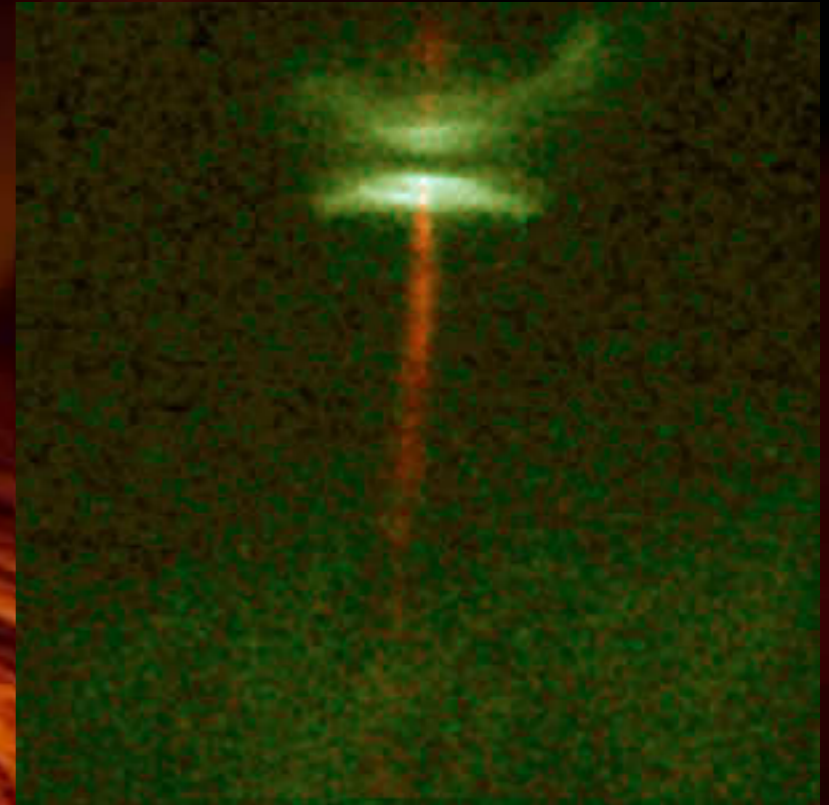
おうし座分子雲の分子雲コア N_2H^+ 輝線 (Tatematsu et al. 2004)



Taurus cores in N_2H^+

- ・ 星間分子雲の一部が自身の重力で収縮し、分子雲コアを形成
- ・ 密度 $10^4\text{-}5$ 個/cm³
- ・ 重力と圧力の釣り合い

原始星の形成



c) C. Burrows (STScI & ESA), the WFPC 2 Investigation Definition Team, and NASA

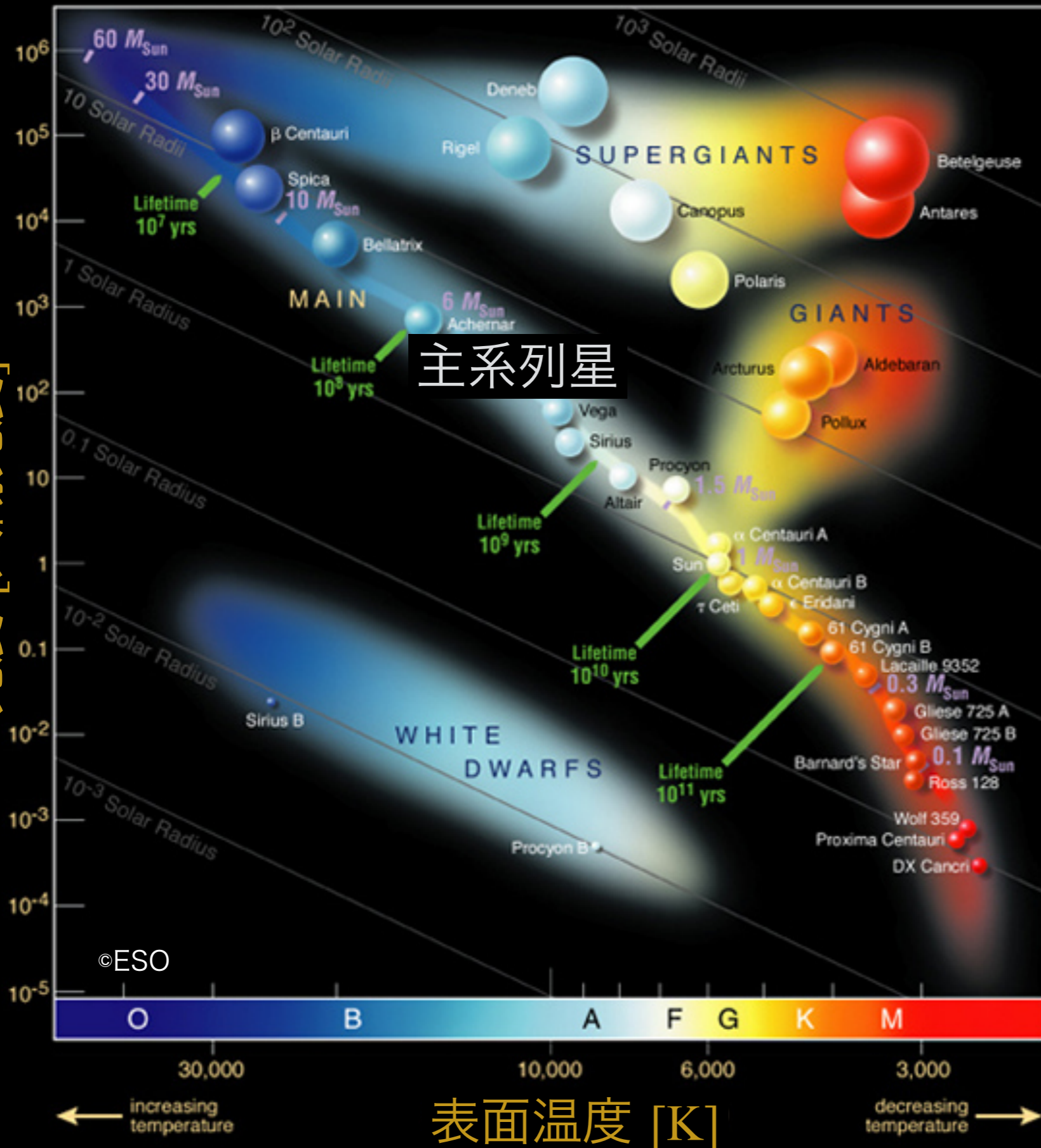
- ・ 中心部の密度 10^{11} 個/cm³
- ・ 双極分子流が吹き出す
- ・ 原始星の周囲に原始星円盤が形成
- ・ 約 10^6 年ガス降着が続き、質量が決まる

Tタウリ型星

- ・ 質量降着を終えた後、約 10^7 年かけてゆっくりと収縮
- ・ 周囲に星間ガスの名残

Hertzsprung-Russell Diagram (HR図)

光度 [太陽光度]



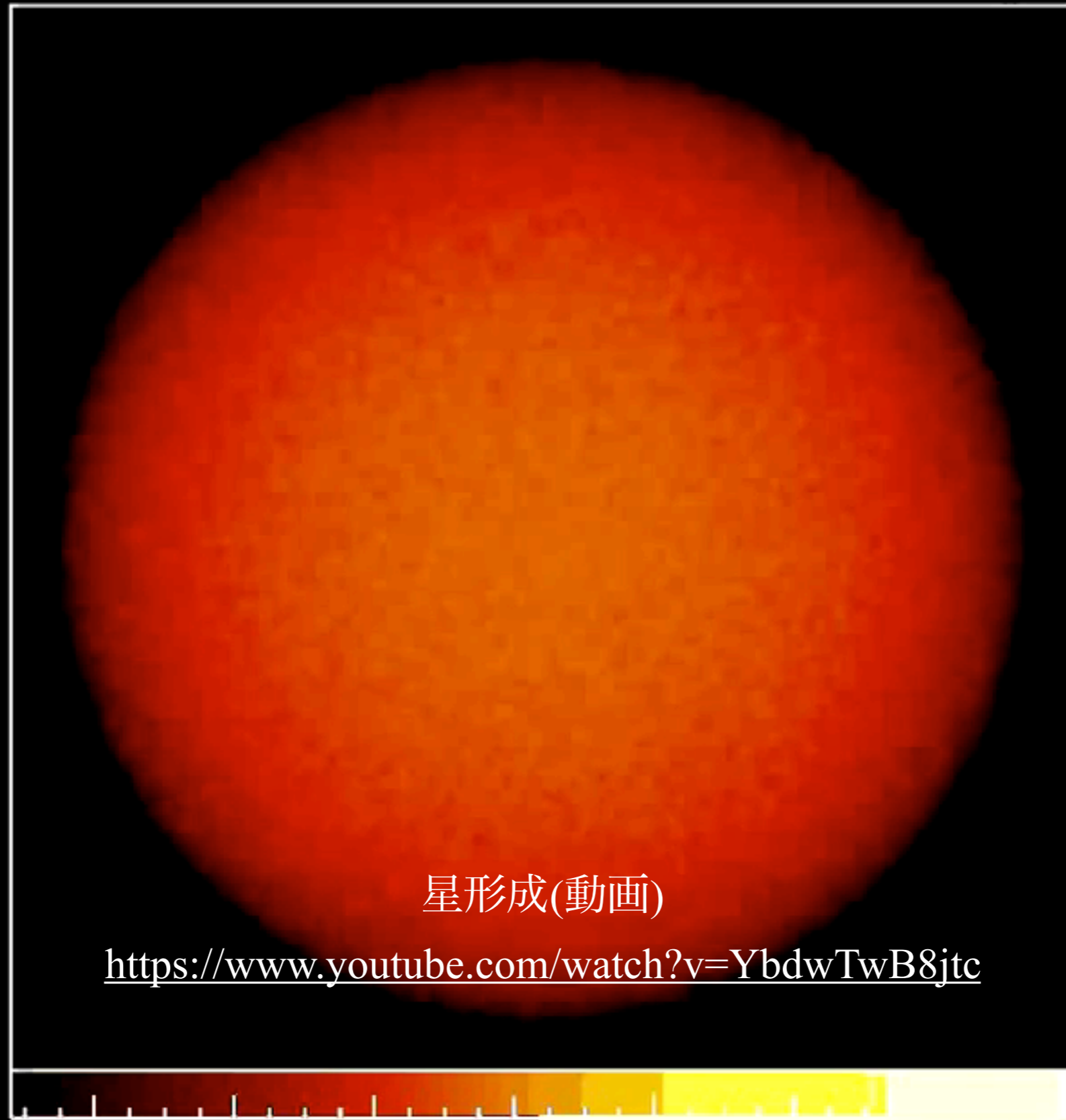
主系列星

- 原始星の収縮に伴い内部温度上昇
- 中心温度 1.5×10^7 K に達し、水素燃焼を起こす主系列星に
- 太陽質量の恒星では約100億年続く

表面温度 [K]

Dimensions: 82500. AU

Time: 0. yr



星形成(動画)

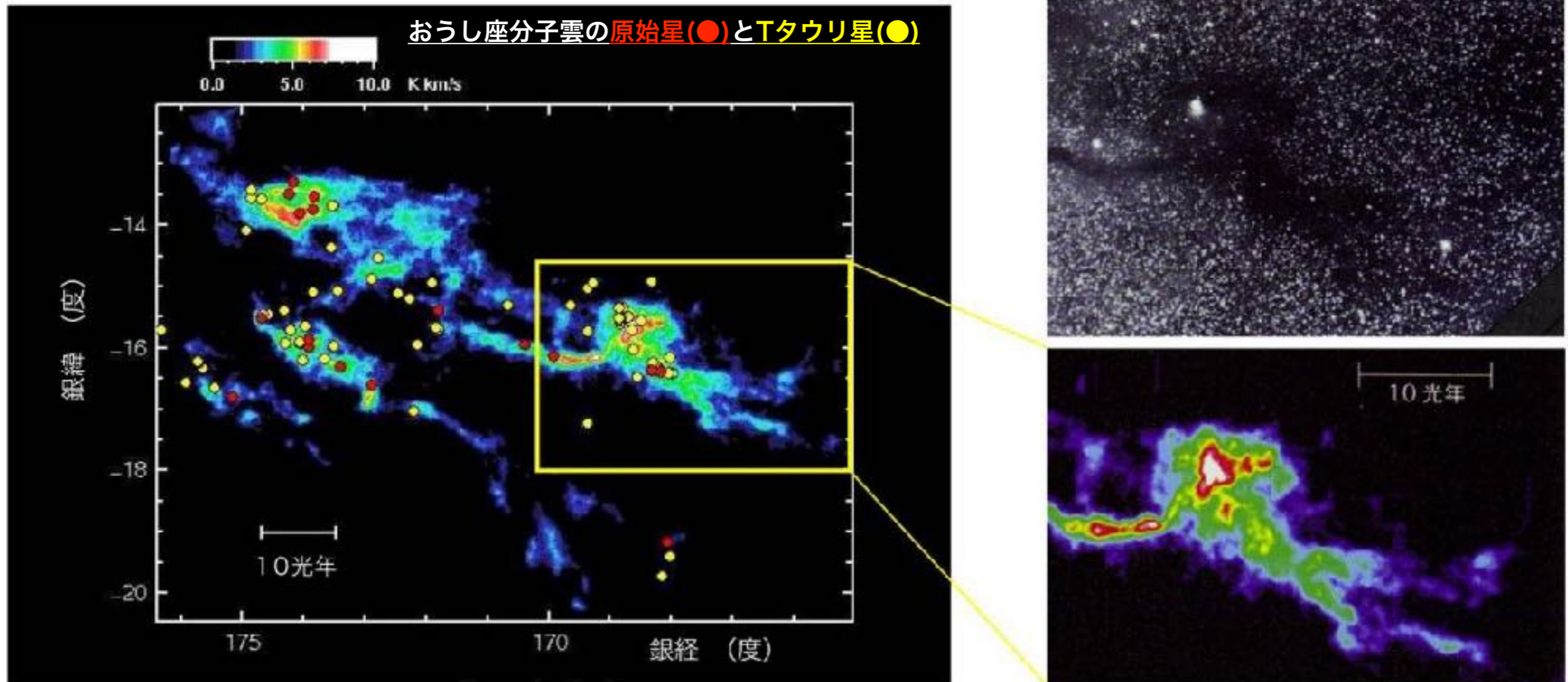
<https://www.youtube.com/watch?v=YbdwTwB8jtc>

-1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0.0

Log Column Density [g/cm^2]

Matthew Bate

星形成領域

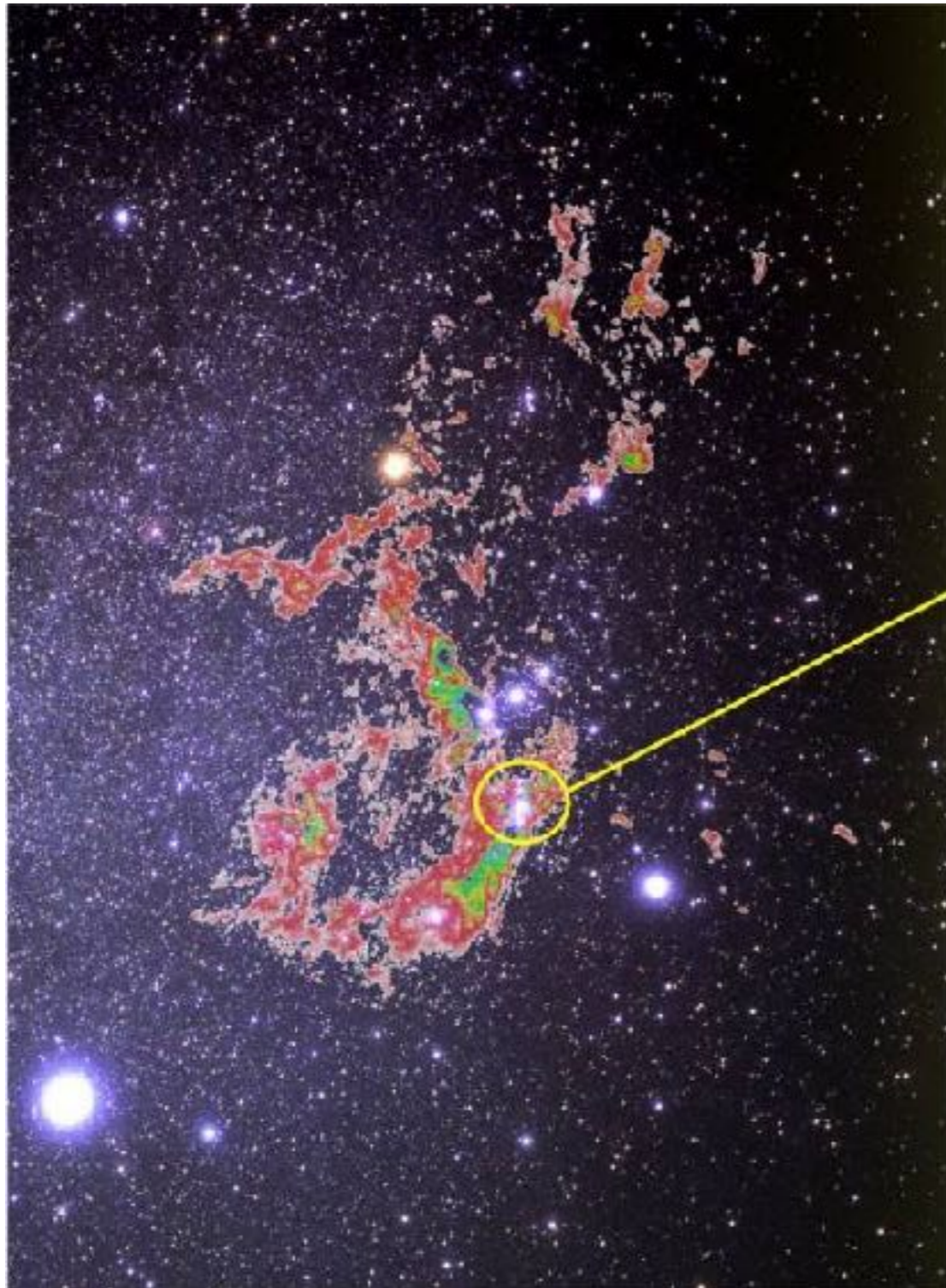


https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_009_2.html

- ・ 太陽程度の重さの星(小質量星)が100個程度形成

大質量星形成領域

オリオン座分子雲の電波強度マップ

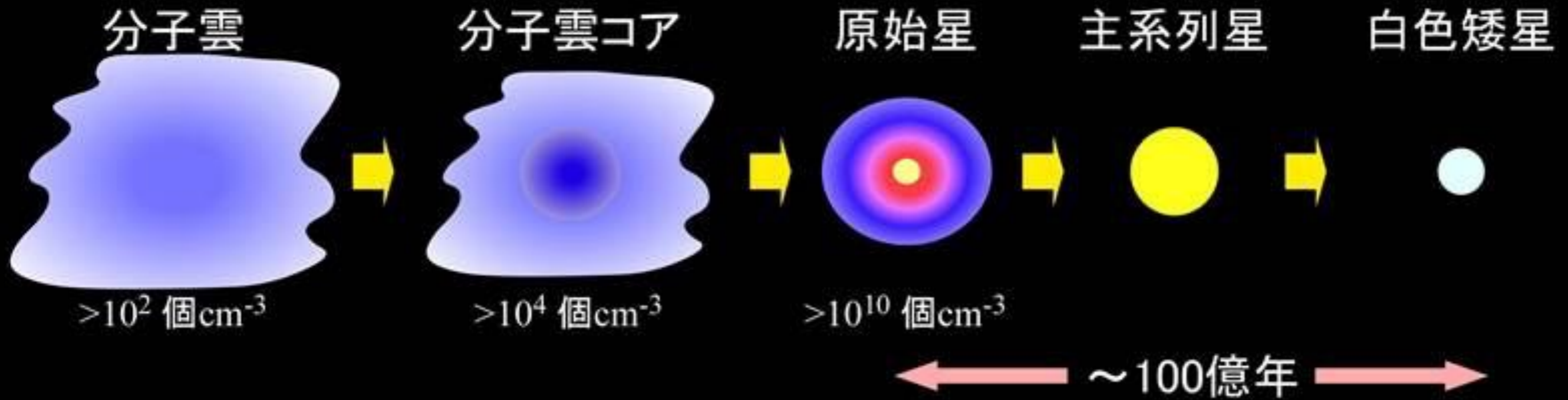


- ・ 星からの紫外線で水素ガス電離 (HII領域)
- ・ ガスの膨張によって星形成を誘発

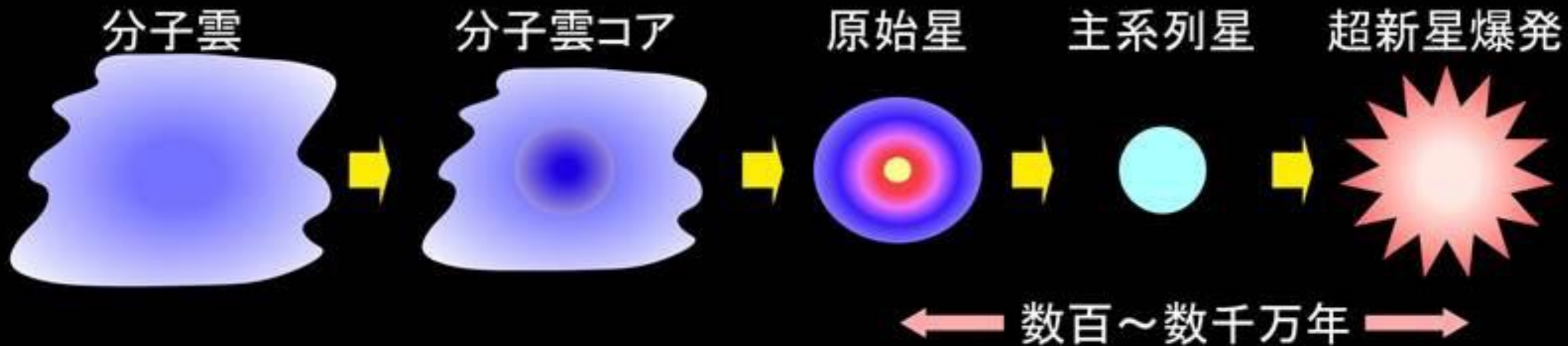


https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_009_2.html

小質量星の進化

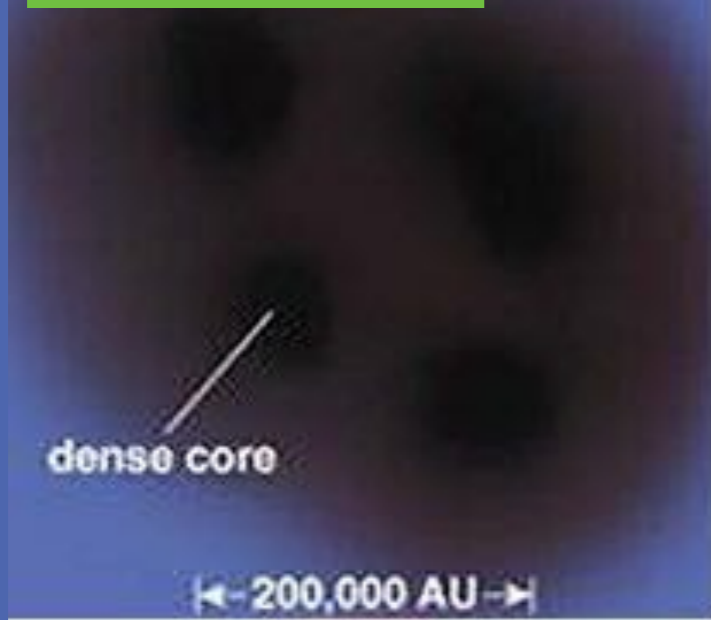


大質量星の進化

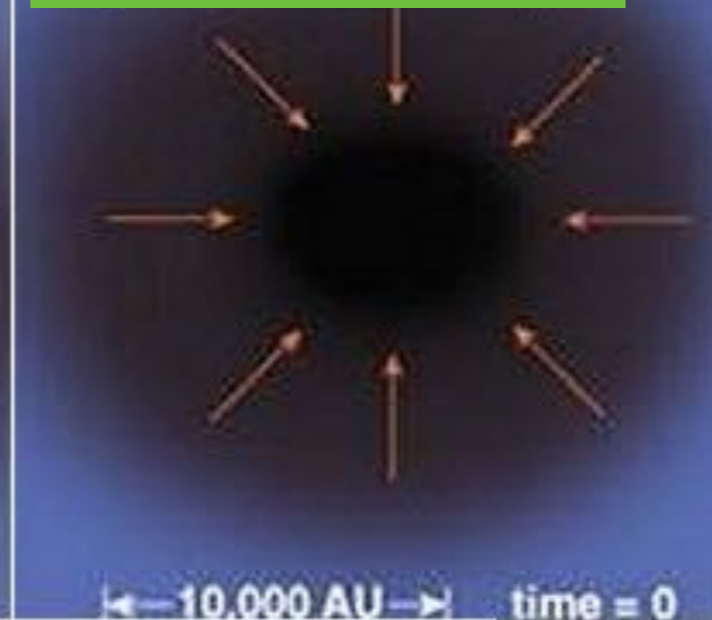


星形成の流れ

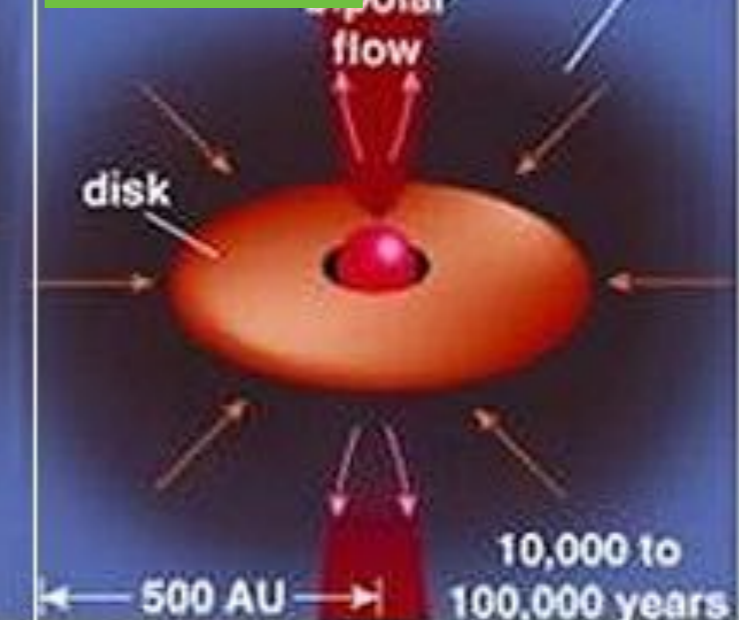
1. 星間分子雲



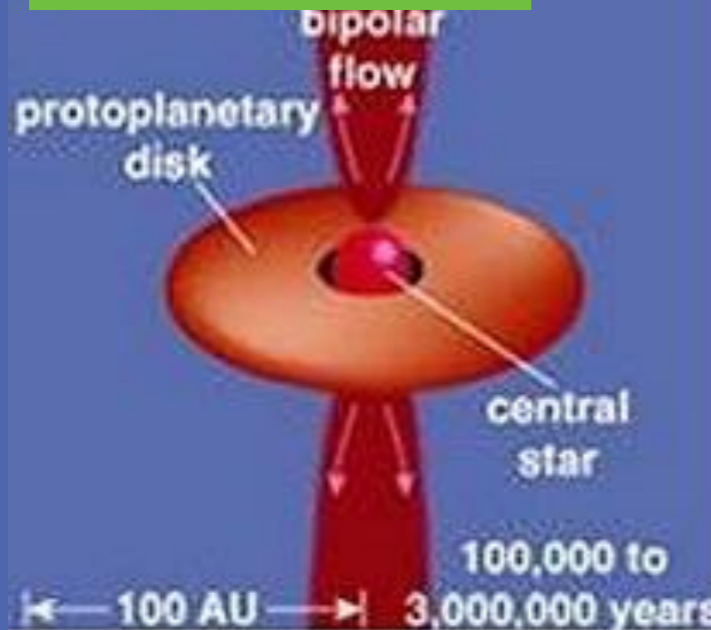
2. 分子雲コア形成



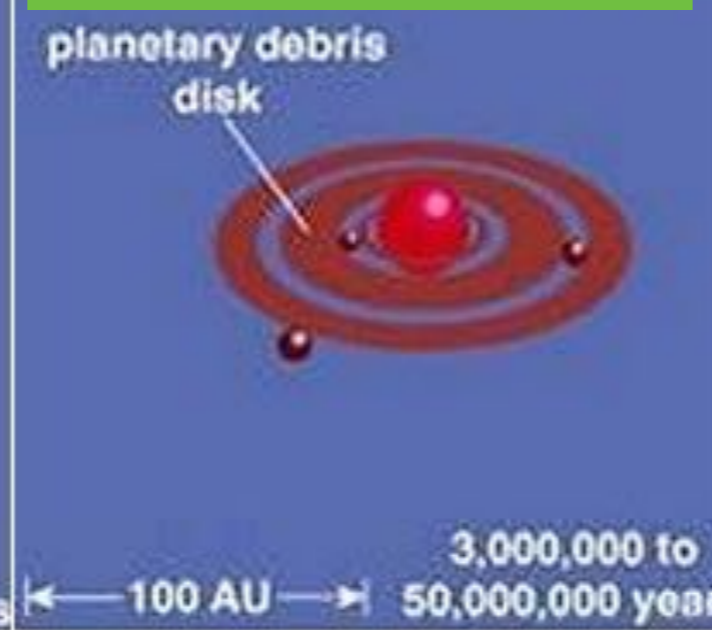
3. 原始星



4. Tタウリ型星



5. 主系列星への進化



6. 主系列星 (+惑星)



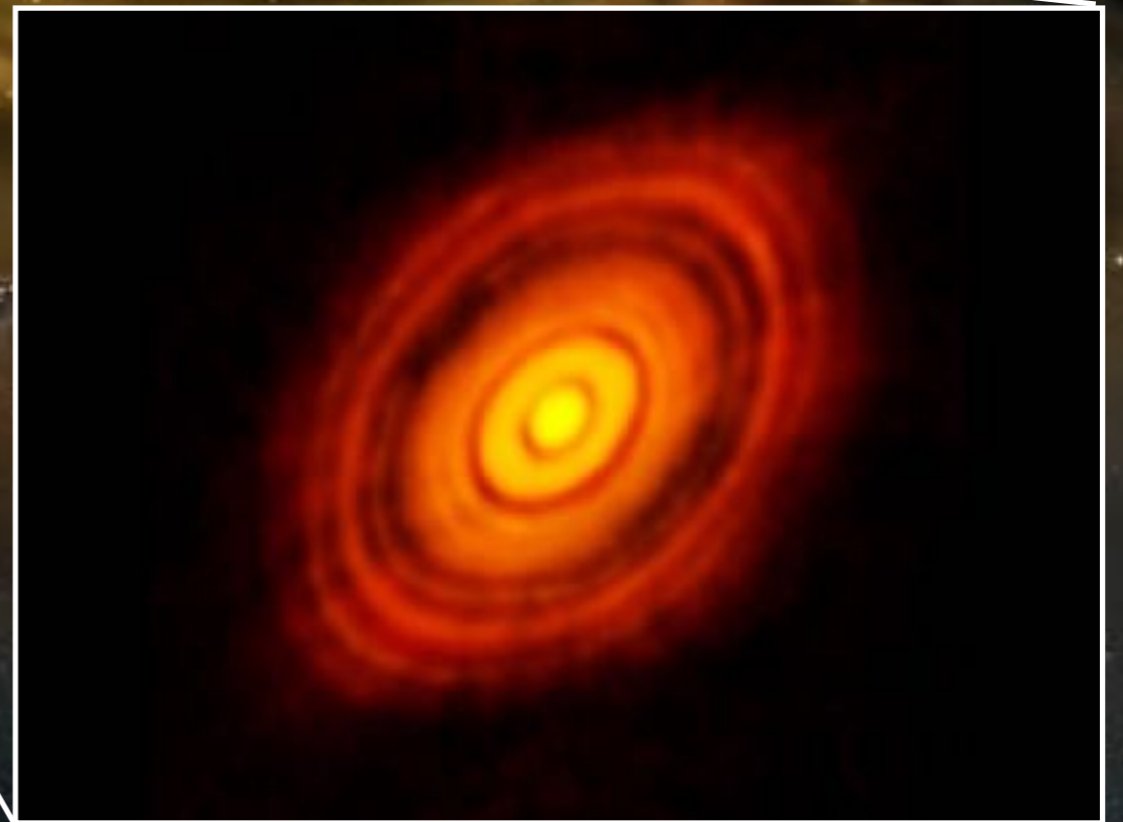
http://www.physicsoftheuniverse.com/topics_blackholes_stars.html

惑星形成の場：原始惑星系円盤



分子ガス雲(馬頭星雲)
ESO-VLTプレスリリース記事より

原始星とともに誕生した星を取り巻く円盤が
惑星形成の舞台 → **原始惑星系円盤**と呼ぶ
(太陽系の場合：原始太陽系円盤)

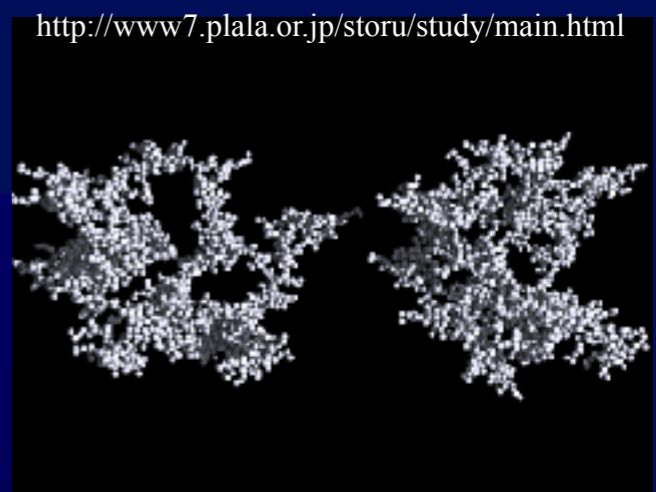


アルマ望遠鏡によるHL tauのミリ波観測
(アルマ望遠鏡プレスリリース記事より)
※実際には別の領域の天体

原始惑星系円盤の形成



惑星形成の流れ



原始惑星系円盤

ダスト(塵) $\sim \mu\text{m}$

微惑星の形成

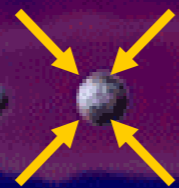
微惑星 $\sim \text{km}$

原始惑星の形成

原始惑星 $\sim 10^3 \text{ km}$

木星型惑星形成

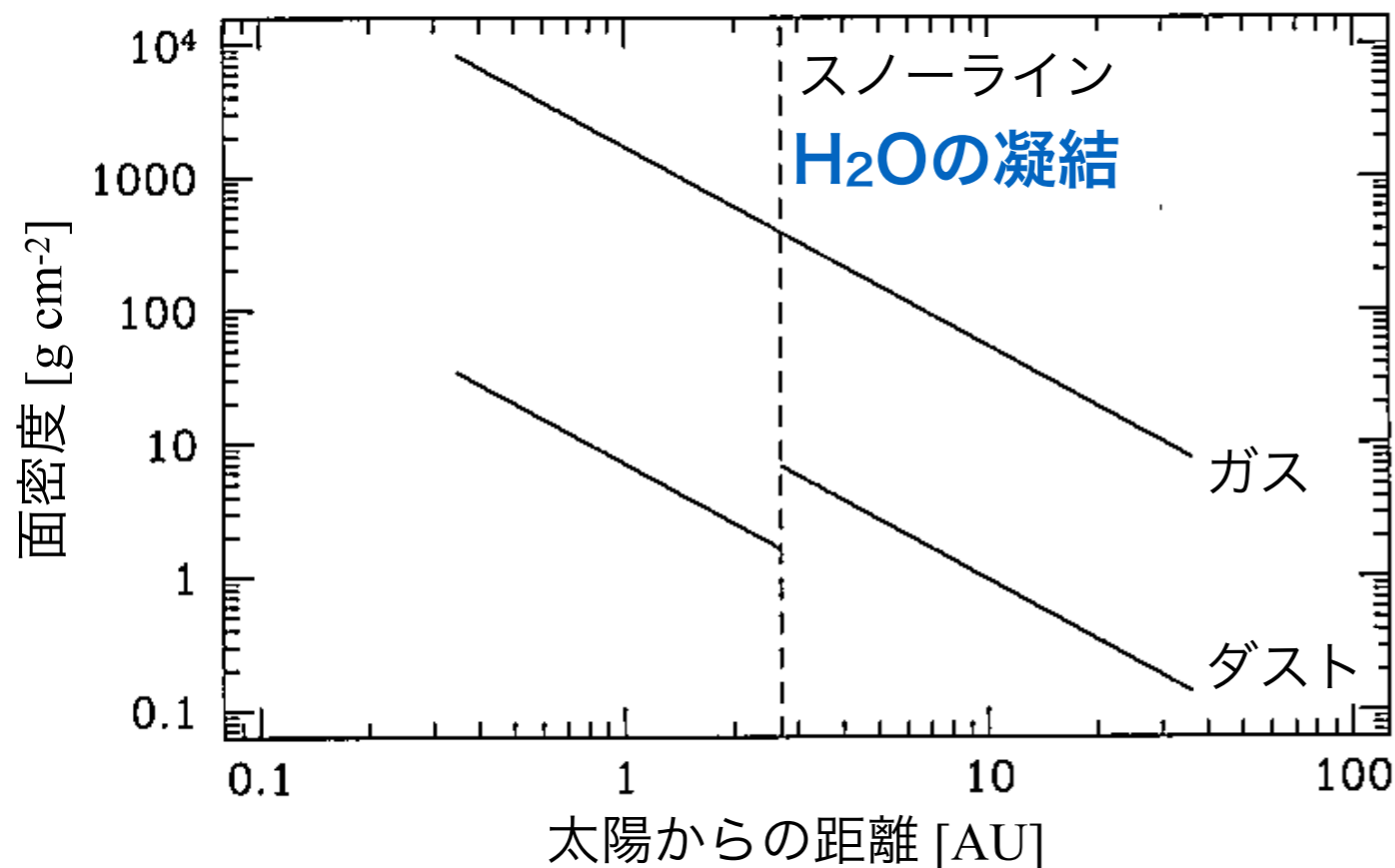
地球型惑星形成



原始惑星系円盤の組成・構造

組成：恒星と同じ。H, Heガスが主成分)、質量比1%程度のダスト(塵)

構造：太陽系の場合、惑星の質量と分布から推定



最小質量円盤モデル (Hayashi, 1981)

- ・ 現在の太陽系の固体物質をダストとしてばらまく
- ・ 太陽元素組成に基づきガスを加える

スノーライン

2.7AU以遠では水蒸気が氷になる

⇒ ダスト面密度の上昇

最小質量円盤モデルの円盤面密度構造

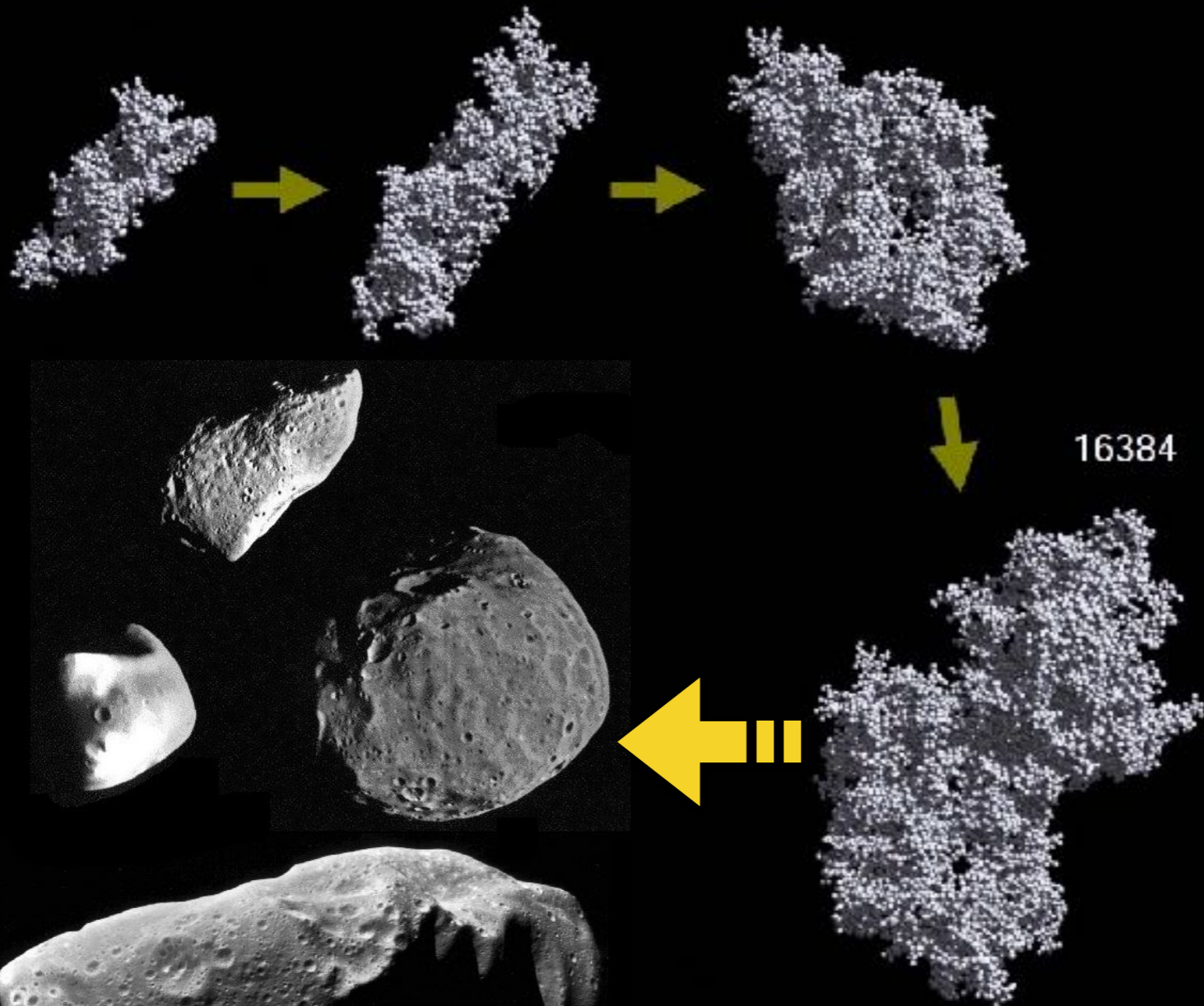
P. Armitage 『Astrophysics of Planet Formation』 より

ダストの合体成長

構成粒子数: 2048

4096

8192



ダスト($\sim 0.1\mu\text{m}$)が多数合体
微惑星(\sim 数km)が形成

ただし、不明点が多い

- ・ 衝突による破壊？
- ・ ガス抵抗で恒星へと落下？

<http://taurus.astr.tohoku.ac.jp/~hidekazu/naiyou.html>

微惑星の合体成長

微惑星(~数km)が多数合体して
より大きな天体を形成していく

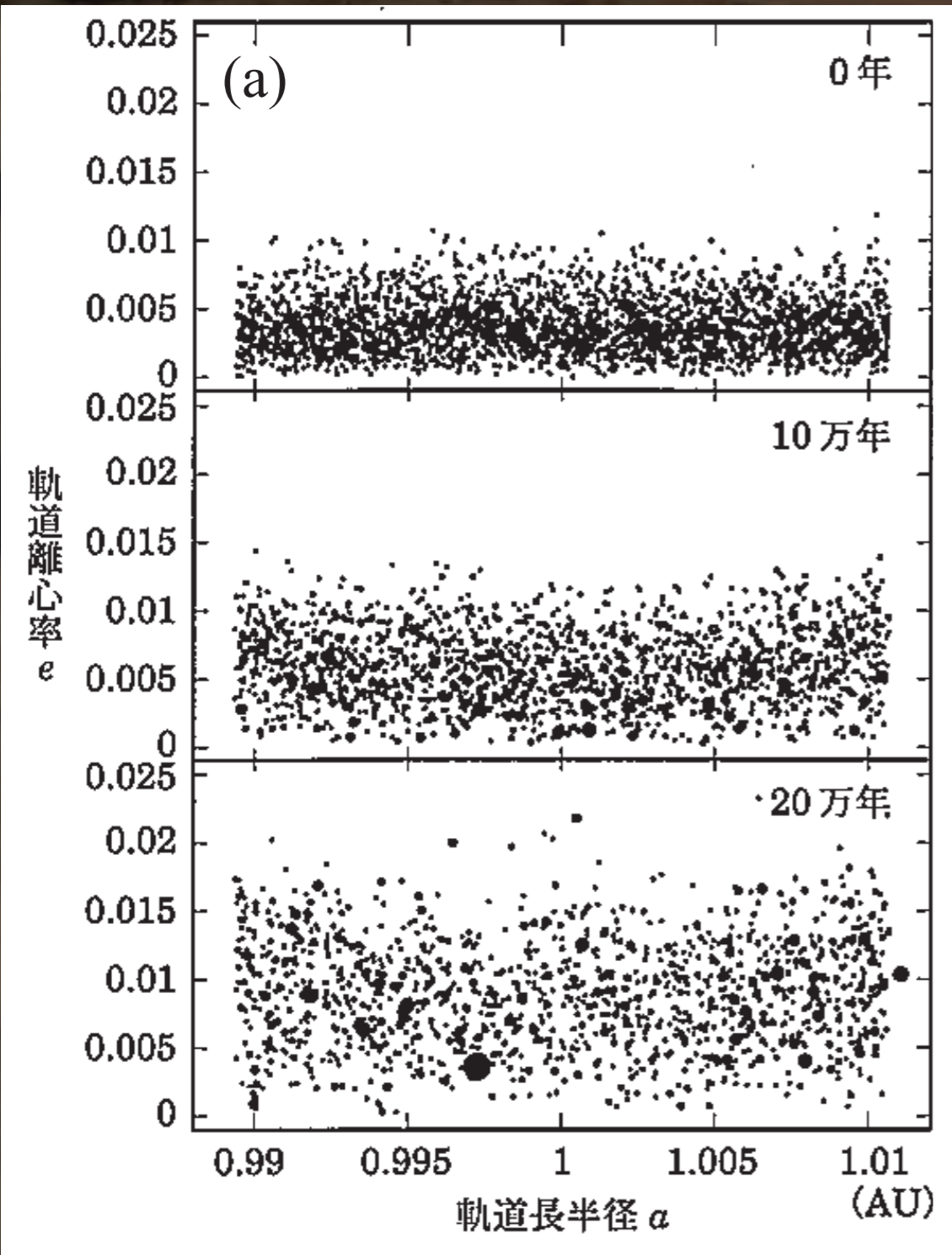
秩序的成長



暴走的成長

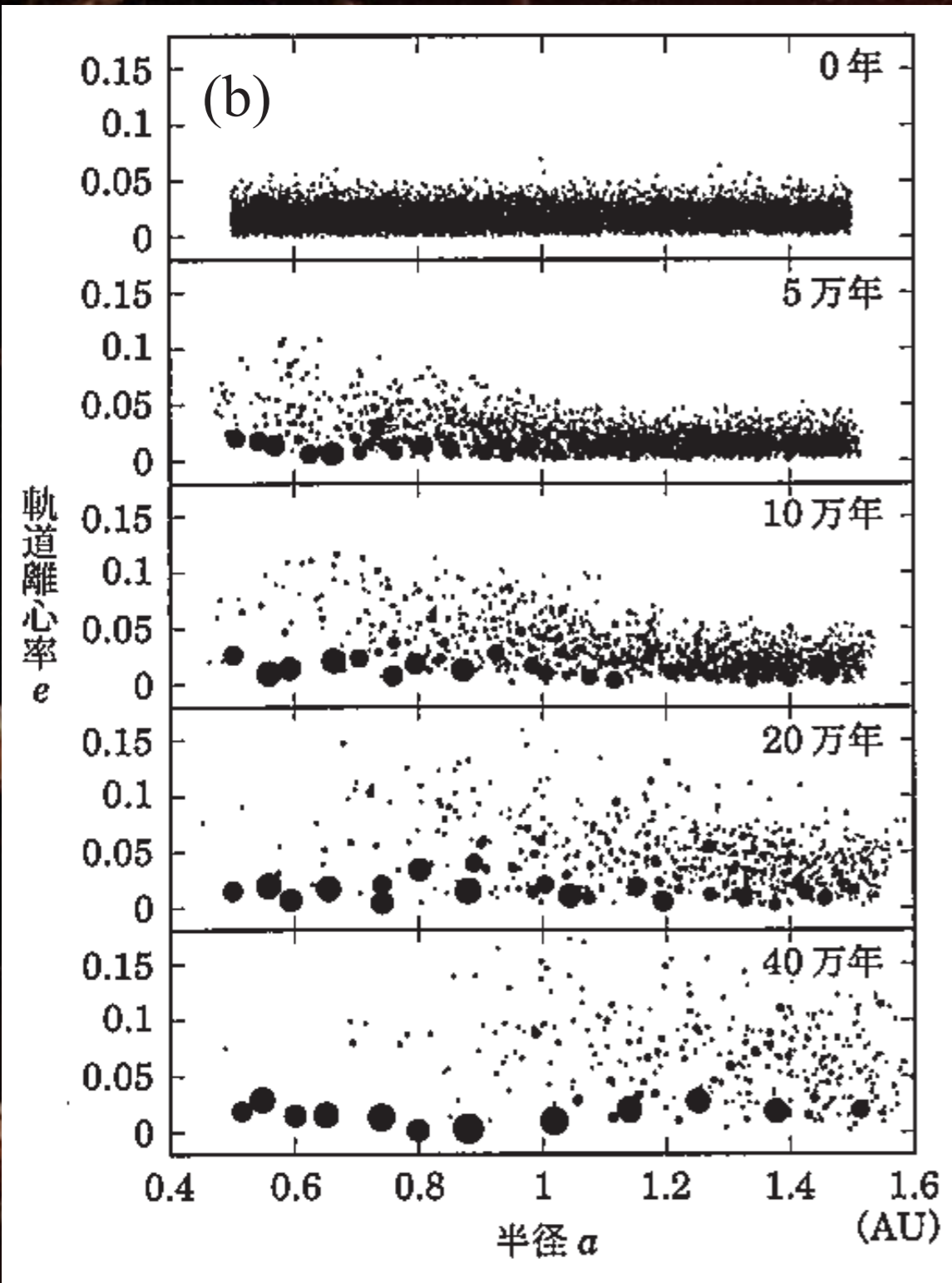


他の微惑星より大きい微惑星は
より早く成長(合体)していく



微惑星の暴走成長の数値シミュレーション
日本評論社『太陽系と惑星』より

原始惑星の形成



寡占的成長

暴走的成長が進行すると、惑星は自分の縄張り(ヒル半径の約10倍)の中の微惑星を食い尽くして成長が止まる

恒星からの距離

孤立質量 [地球質量]

地球 (1AU)

0.09

木星 (5AU)

1.7

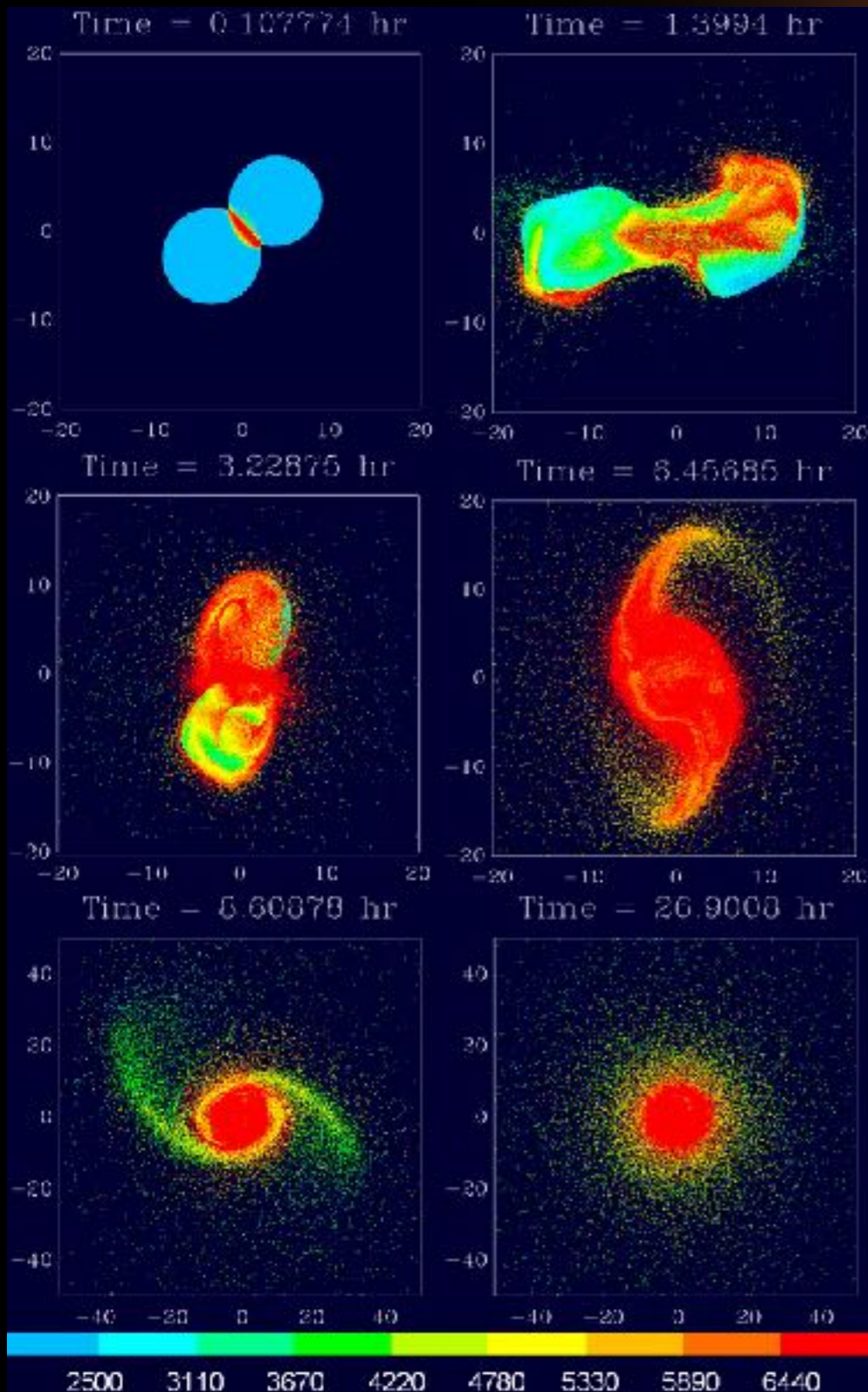
海王星 (30AU)

6.5

原始惑星の寡占的成長の数値シミュレーション
日本評論社『太陽系と惑星』より

巨大衝突

巨大衝突の数値シミュレーション



- ・ 孤立質量に達した原始惑星どうしが長い時間($\sim 10^7$ 年)をかけて軌道交差
- ・ 火星質量の天体が複数衝突合体し、地球や金星を形成
- ・ 地球の月の起源
- ・ 火星や水星は原始惑星の生き残り？

月の形成(動画)

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/Moon.html>

巨大ガス惑星の形成

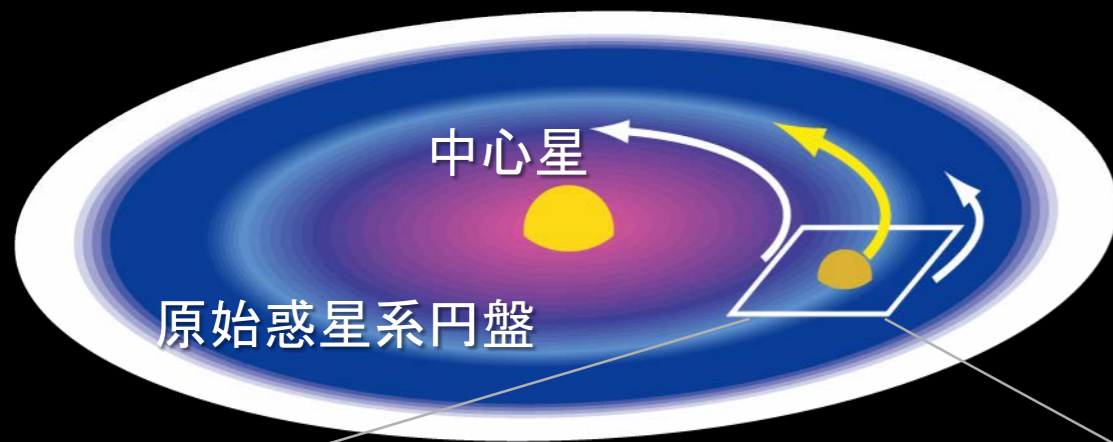
円盤ガスの捕獲

- ・ 惑星が十分に成長すると、重力によって円盤ガスを捕獲した大気をまとい始める
- ・ 木星軌道だと、地球質量の0.01倍

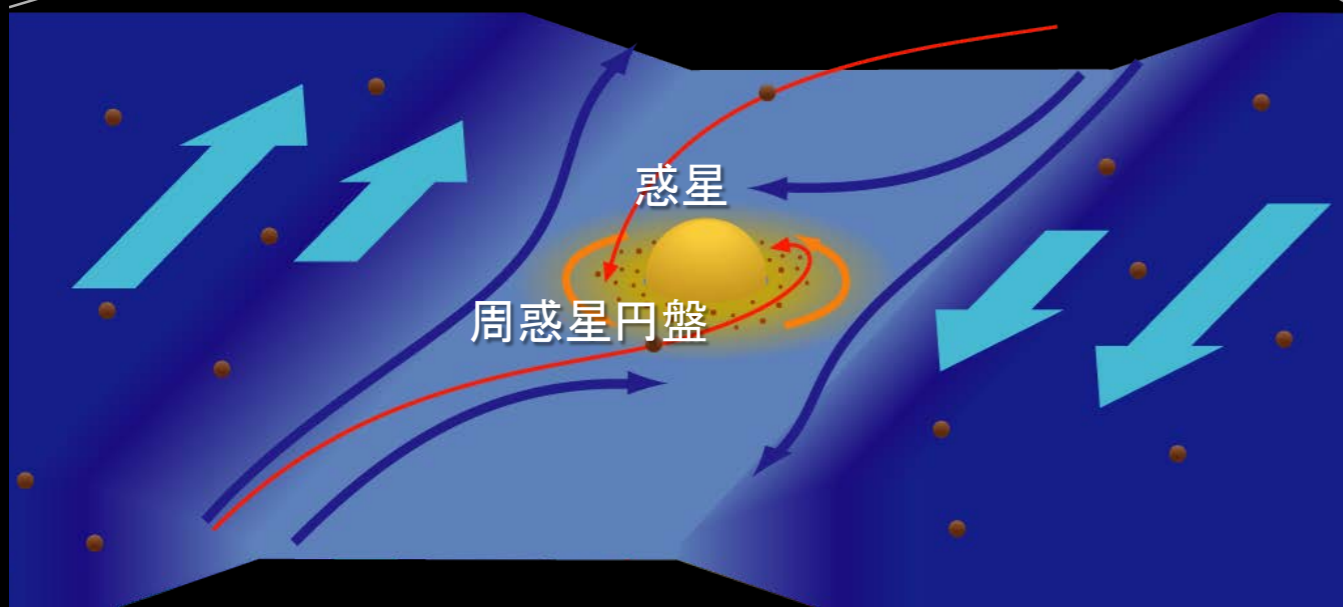
暴走的円盤ガス捕獲

原始惑星が10地球質量を超えると捕獲した円盤ガスの自己重力によって暴走的なガス捕獲が起こる

周惑星円盤での衛星形成



- ・ 巨大ガス惑星の周りに周惑星円盤が形成
- ・ 規則衛星の形成



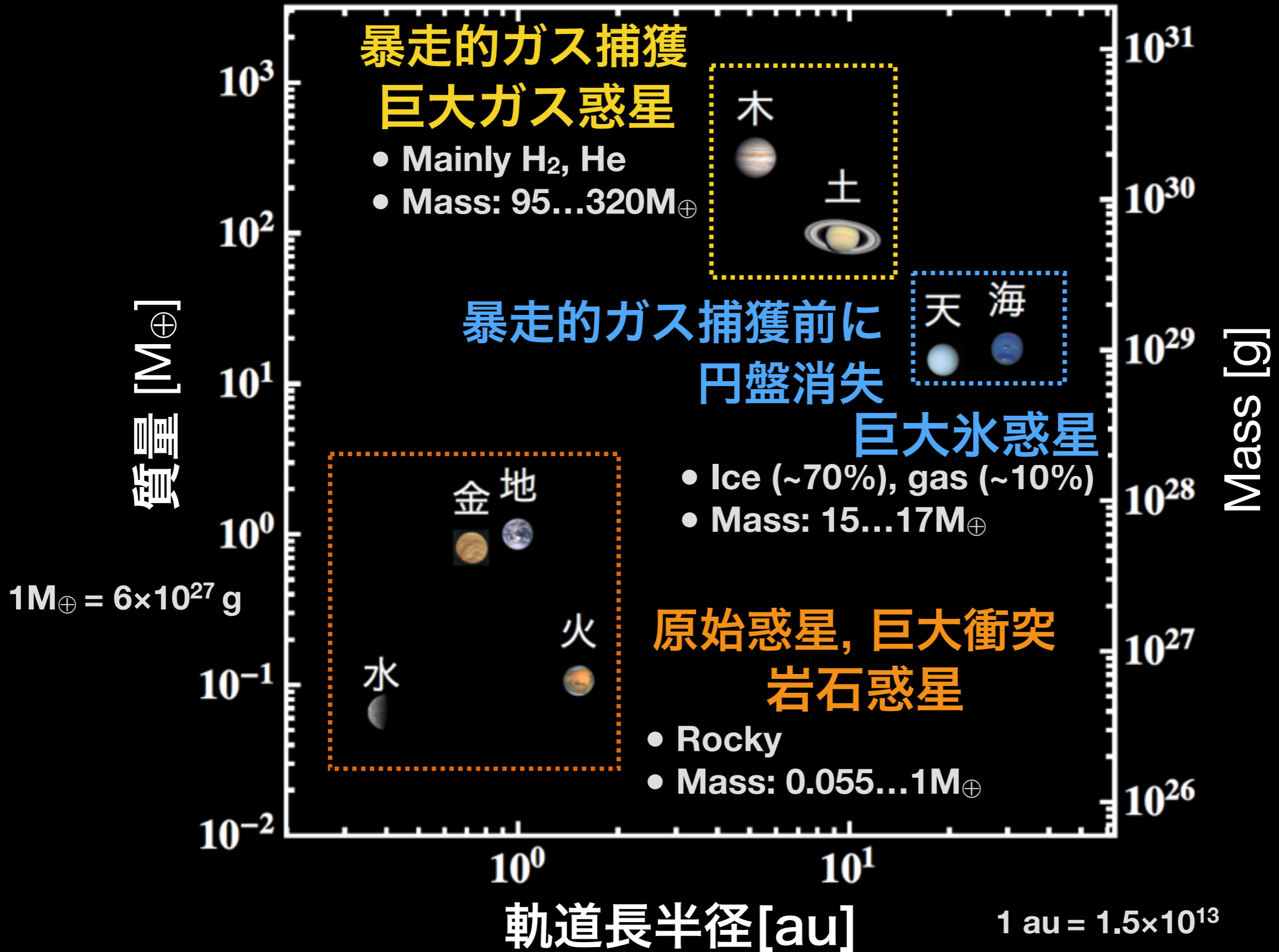
木星と4個のガリレオ衛星



Tanigawa et al. (2012)

https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/2012/2012-08-22/01_tanigawa/pub-web/01_tanigawa.pdf

Solar System Planets



惑星形成の流れ

原始惑星系円盤

ダスト(塵) $\sim \mu\text{m}$

微惑星の形成

微惑星 $\sim \text{km}$

原始惑星の形成

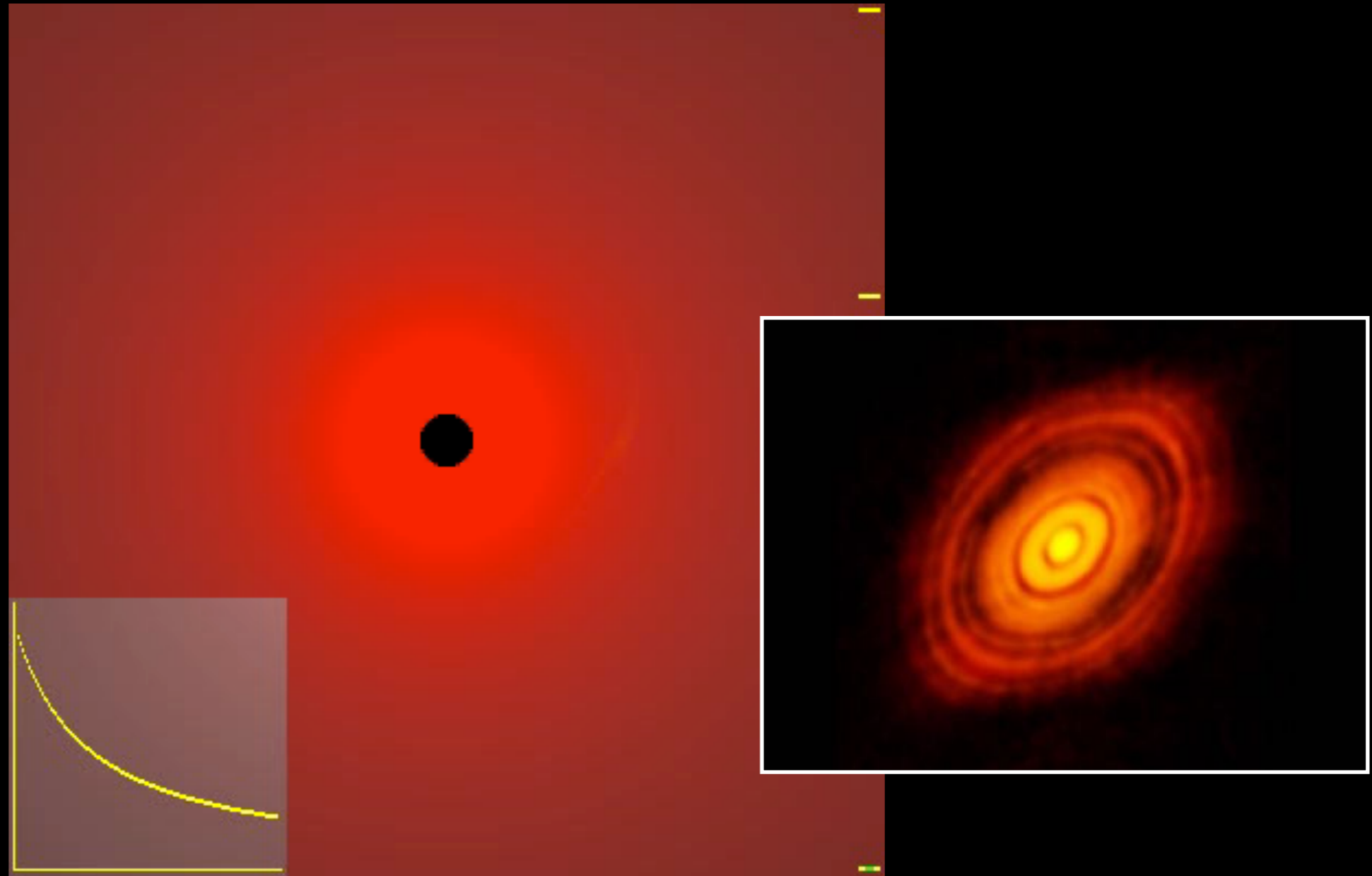
原始惑星 $\sim 10^3 \text{ km}$

木星型惑星形成

地球型惑星形成

惑星移動

巨大ガス惑星が原始惑星系円盤密度分布に及ぼす影響

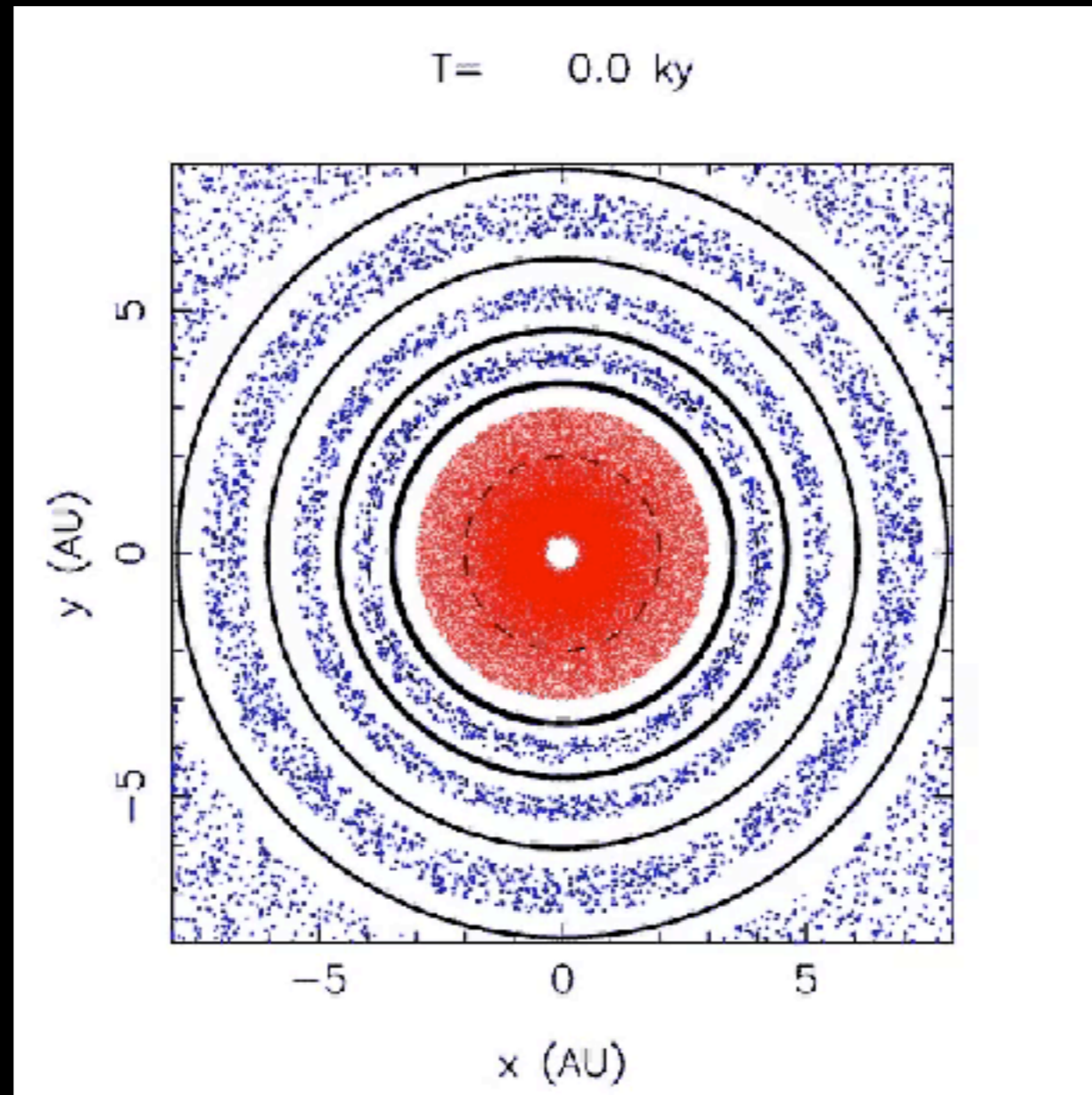


http://jilawwww.colorado.edu/~pja/planet_migration.html

- ・ ある程度成長した惑星は、円盤ガスとの重力相互作用によって内側へ移動
- ・ 恒星のごく近傍をまわる系外惑星の形成過程

惑星移動

太陽系巨大ガス惑星の惑星移動(Grand Tack モデル)



<http://www.boulder.swri.edu/~kwalsh/GrandTack.html>

- ・ 太陽系においても惑星移動が起きた可能性が提案されている

まとめ

星形成

質量降着：星間分子雲 → 分子雲コア → 原始星 (10^6 年)

重力収縮：Tタウリ星 (10^7 年)

核融合：主系列星 (100億年)

惑星形成

原始惑星系円盤：原始星の形成に伴って形成

ダストから微惑星：付着合体成長？

微惑星から原始惑星：暴走的成長、寡占的成長

原始惑星から惑星：巨大衝突、巨大ガス惑星の暴走的円盤ガス捕獲

参考文献

シリーズ現代の天文学9 『太陽系と惑星』 日本評論社

スケジュール 1

- 9/20 ガイダンス (大宮)
- 9/27 太陽系 (1) (押野)
- 10/4 太陽系 (2) (大宮)
- 10/11 恒星 (大宮)
- 10/18 星惑星形成 (黒川)
- 10/25 系外惑星 (1) (押野)
- 11/1 系外惑星 (2) (大宮)
- 11/8 銀河系・近傍銀河 (1) (新納)
- 11/15 銀河系・近傍銀河 (2) (新納)

スケジュール 2

- 11/22 天体観測 (大宮)
- 11/29 超新星・宇宙論 (1) (黒川)
- 12/6 超新星・宇宙論 (2) (黒川)
- 12/13 初期宇宙と構造形成 (1) (林)
- 12/20 初期宇宙と構造形成 (2) (林)
- 1/10 全体のまとめ (大宮)