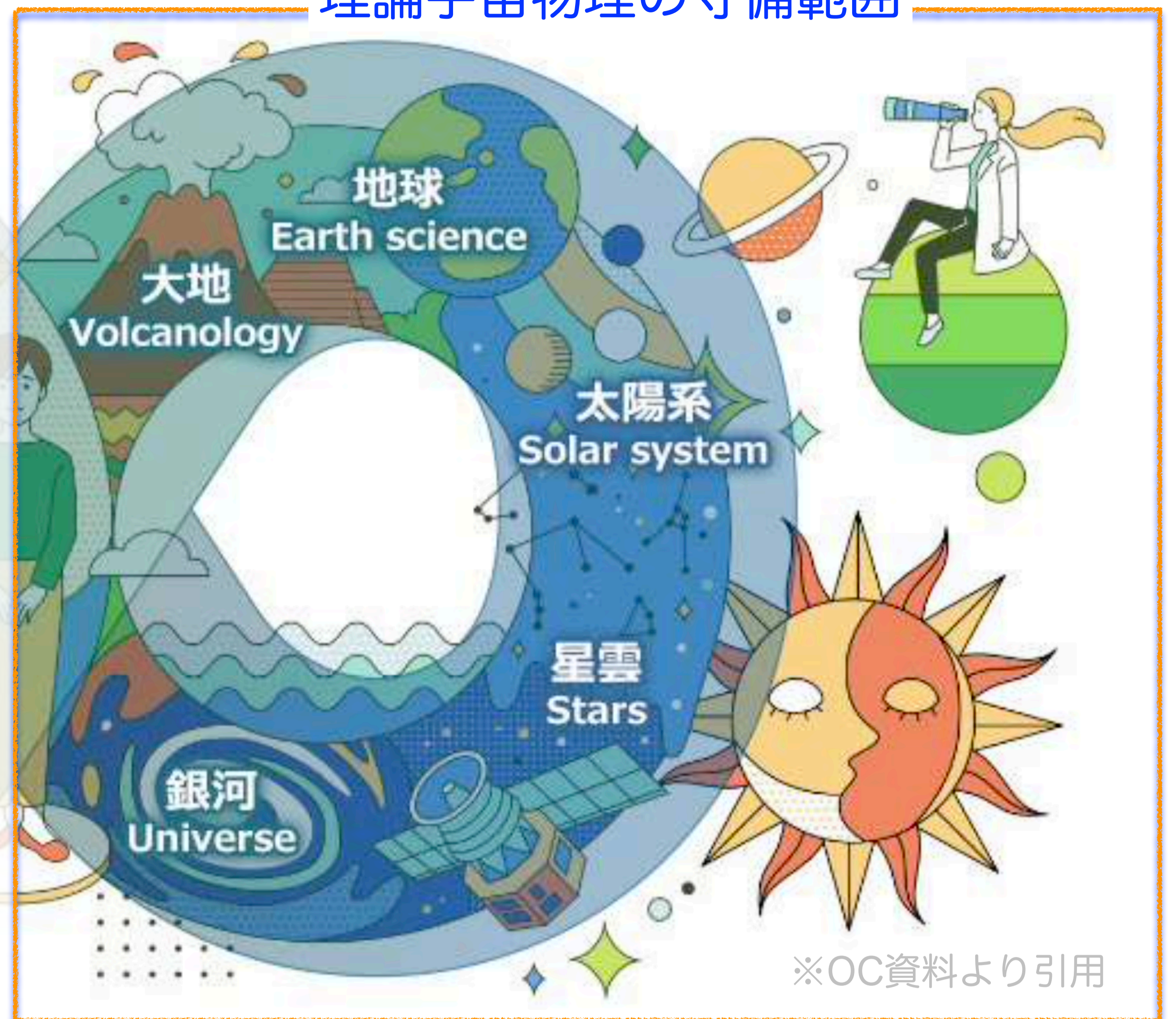


理論宇宙物理学研究室 (Ta研)

宇宙物理学研究の面白さ

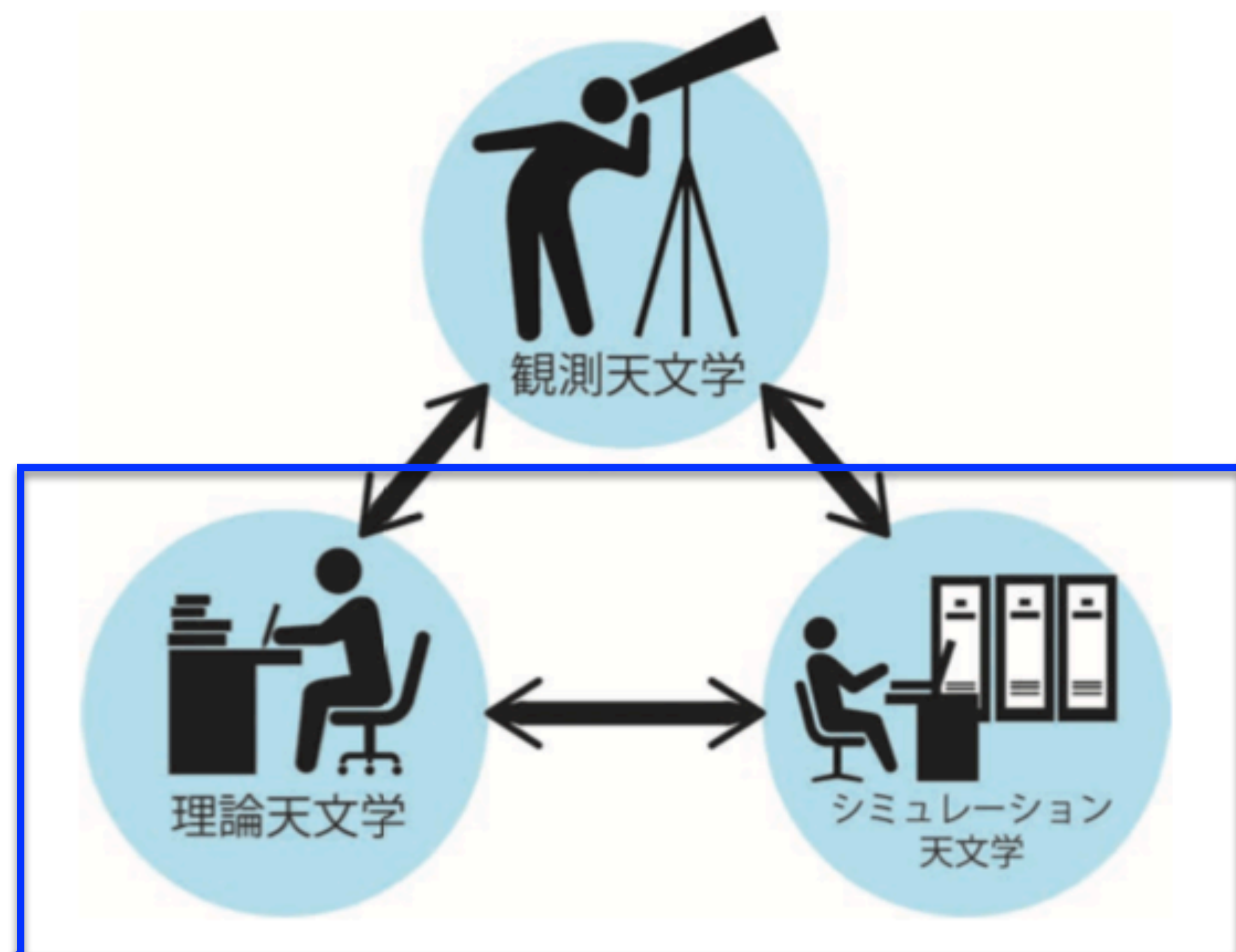
- 小さいものから大きいものまで
“宇宙にあるもの全て”が研究対象
 ex.) 星間ダスト, 惑星, 恒星, 銀河 etc.
- **“全ての物理学”**を駆使する
 ex.) 力学, 電磁気学, 熱力学, 量子力学 etc.
- 宇宙には**“未解決問題”**がたくさん
 ex.) ブラックホール? 超新星爆発?
 宇宙における生命??

理論宇宙物理の守備範囲



Ta研が用いる手法

宇宙における物理現象はそのスケールの大きさゆえに実験的な再現が難しいものばかりです。そのため私たちTa研では理論解析やシミュレーションなどの理論的なアプローチを用いて現在の宇宙に残されている様々な謎に迫ろうとしています。



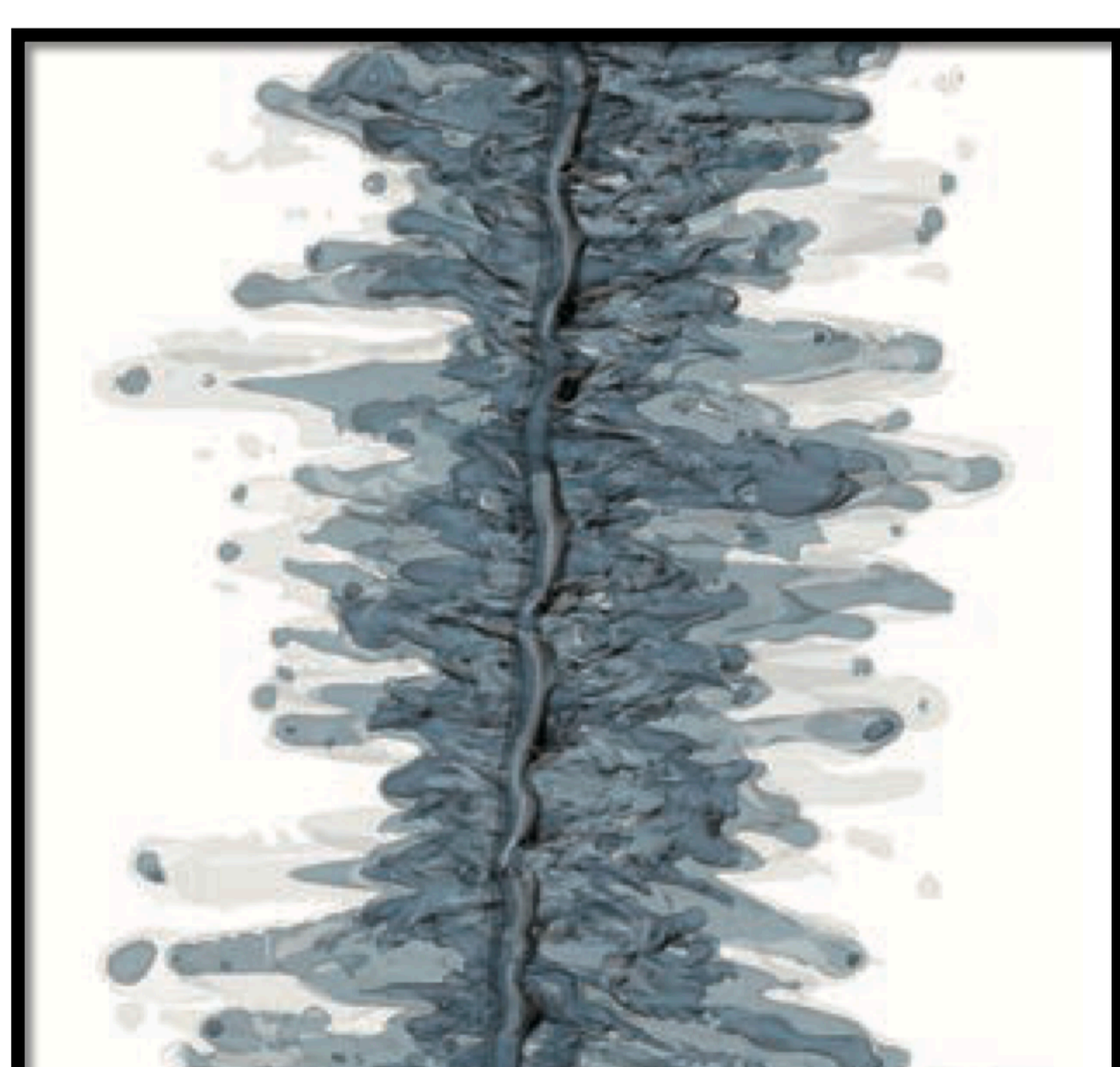
スーパーコンピュータ等を用いたシミュレーション



名古屋大学“不老”

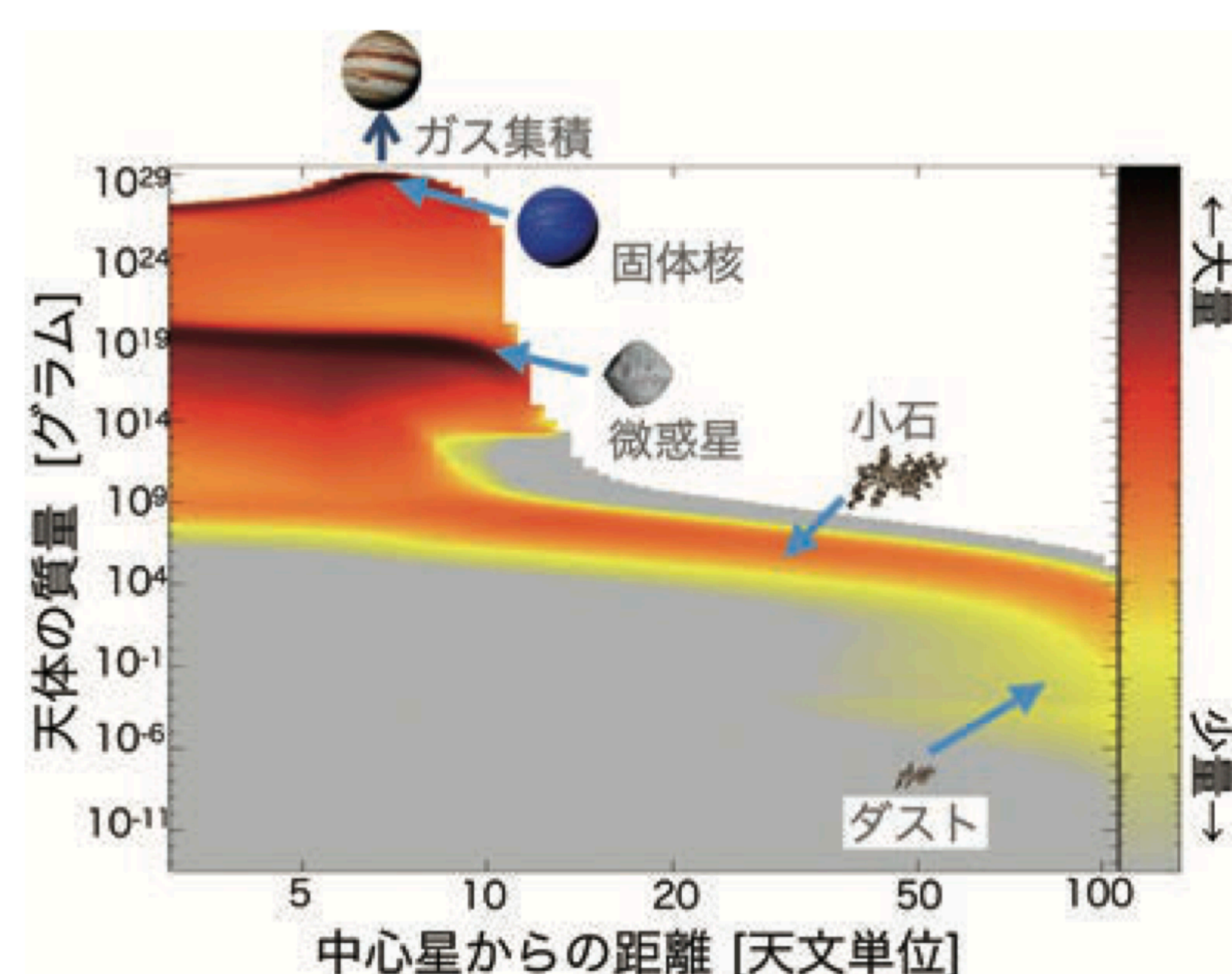


国立天文台“Cray XC50”



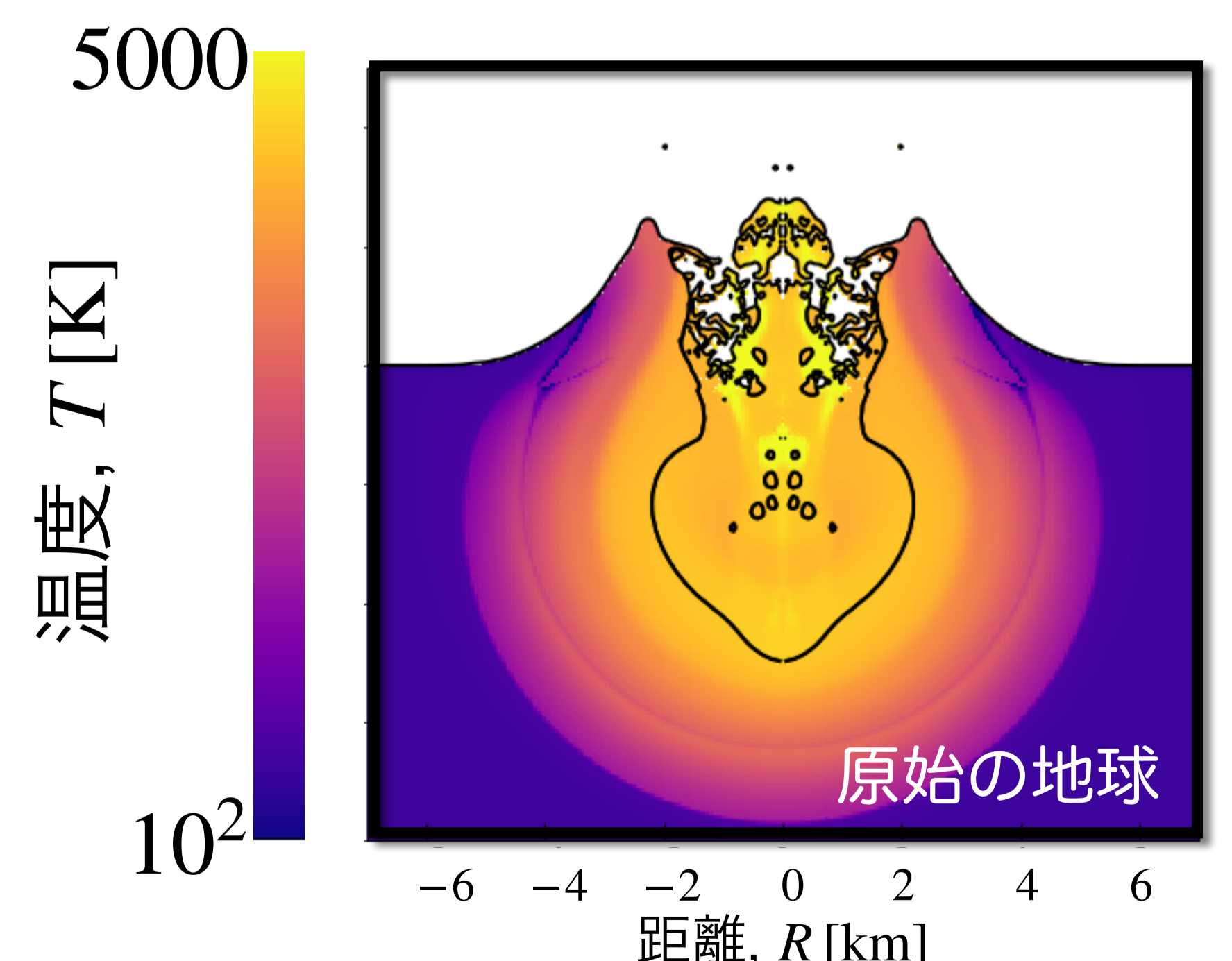
研究例1: 恒星形成の物理機構解明

恒星形成の現場となる棒状構造形成の機構を解明するシミュレーション



研究例2: ダストから惑星への成長過程の解明

小さいもの(ダスト)から大きなもの(惑星)までの質量40桁以上にもなる進化を扱うシミュレーション

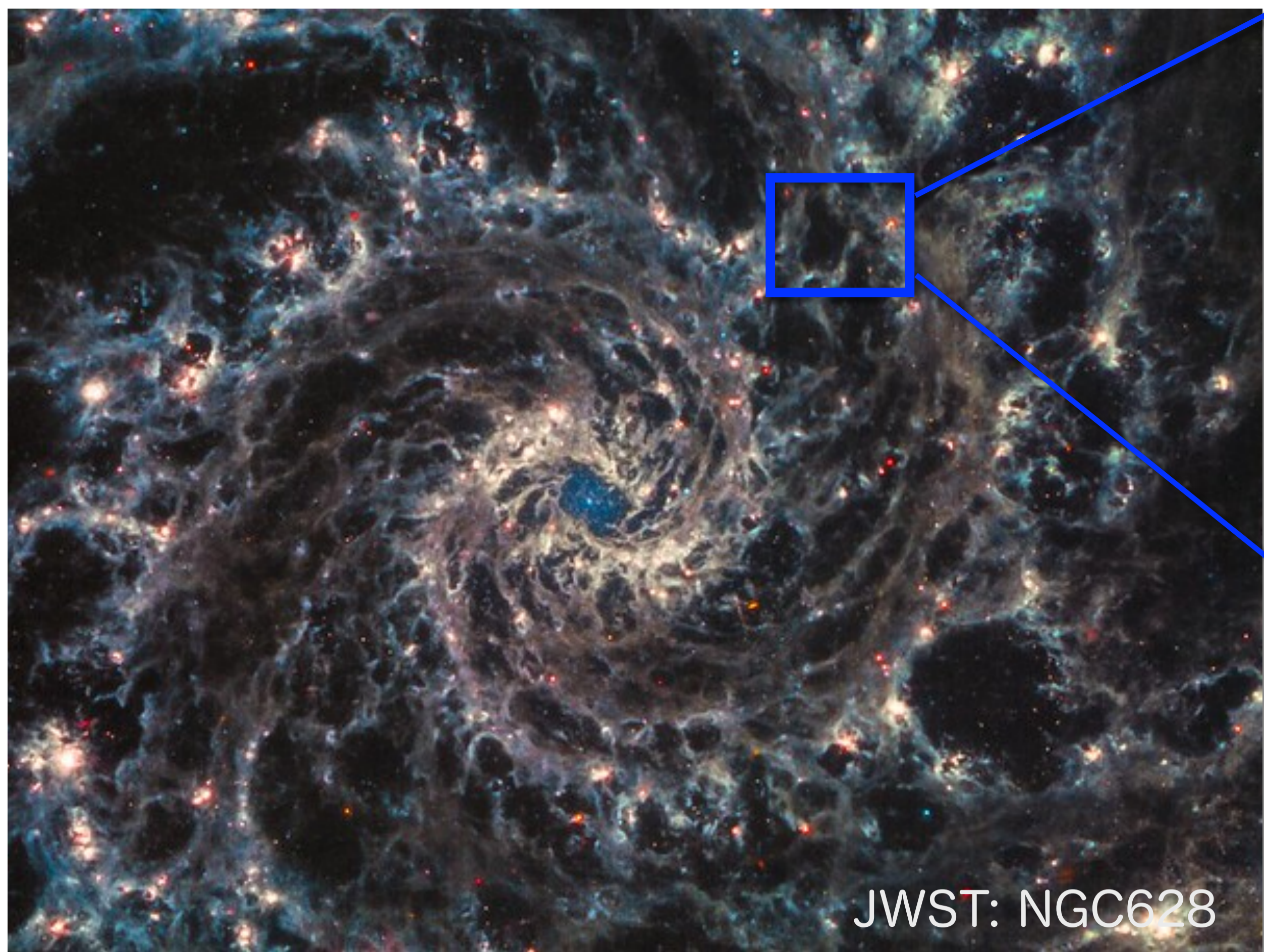


研究例3: 原始地球への隕石衝突

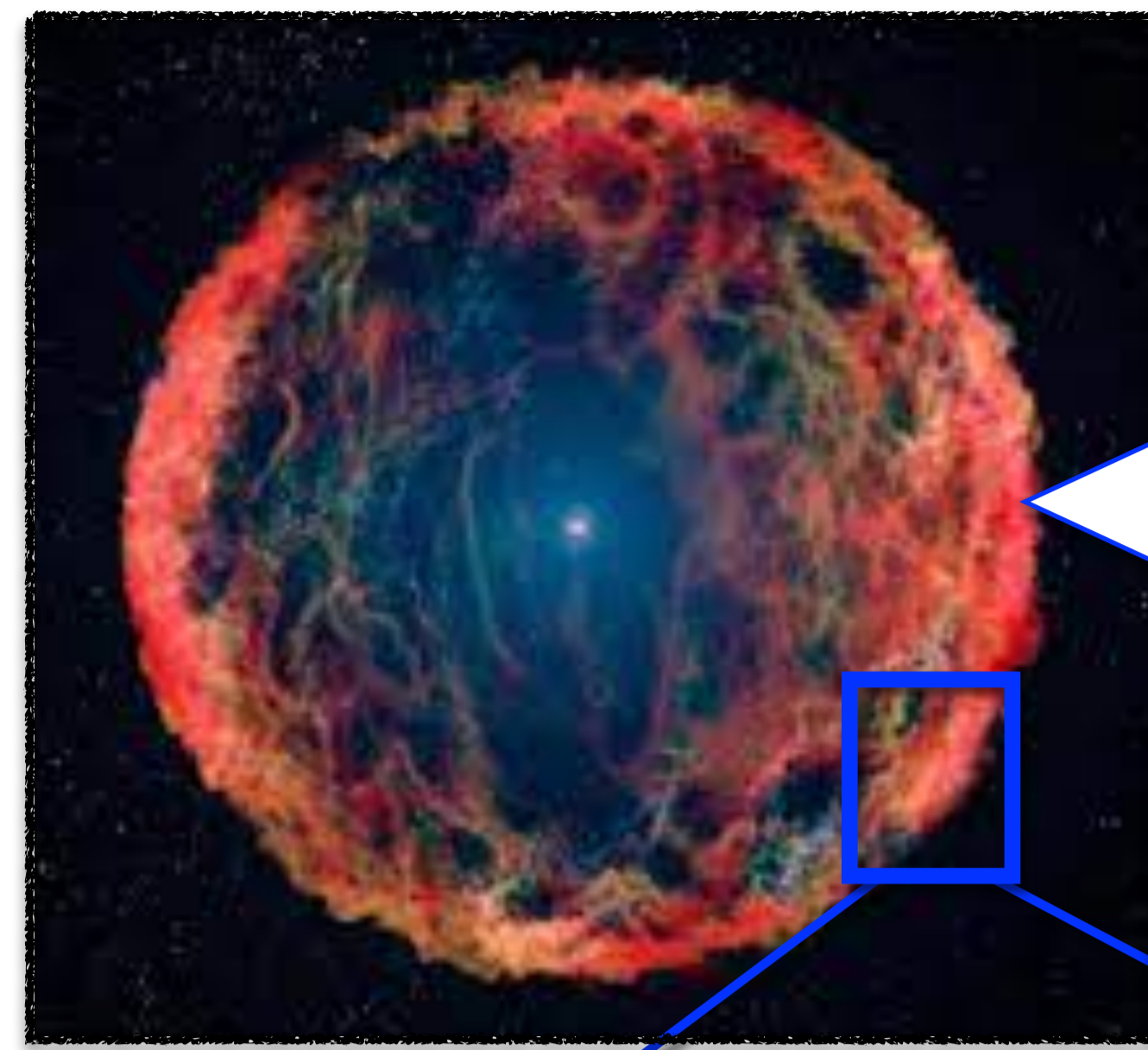
超高速で飛来する隕石が作る超高温環境の物理を解明するシミュレーション

宇宙における種々の天体の構造形成

最先端の高解像度撮像が捉えた渦巻銀河



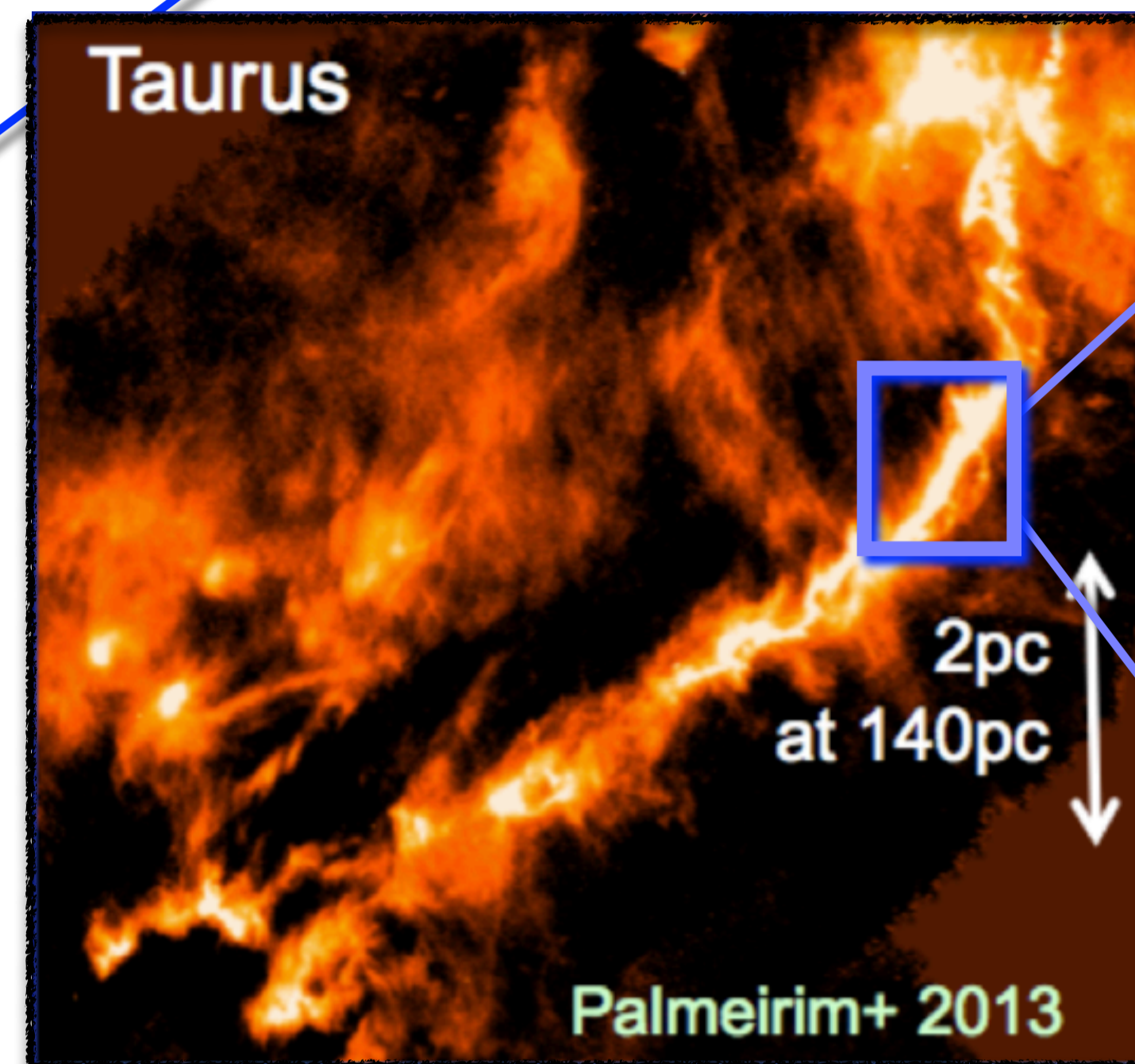
Super Nova(超新星爆発)によって泡状構造(バブル構造)が形成されている？



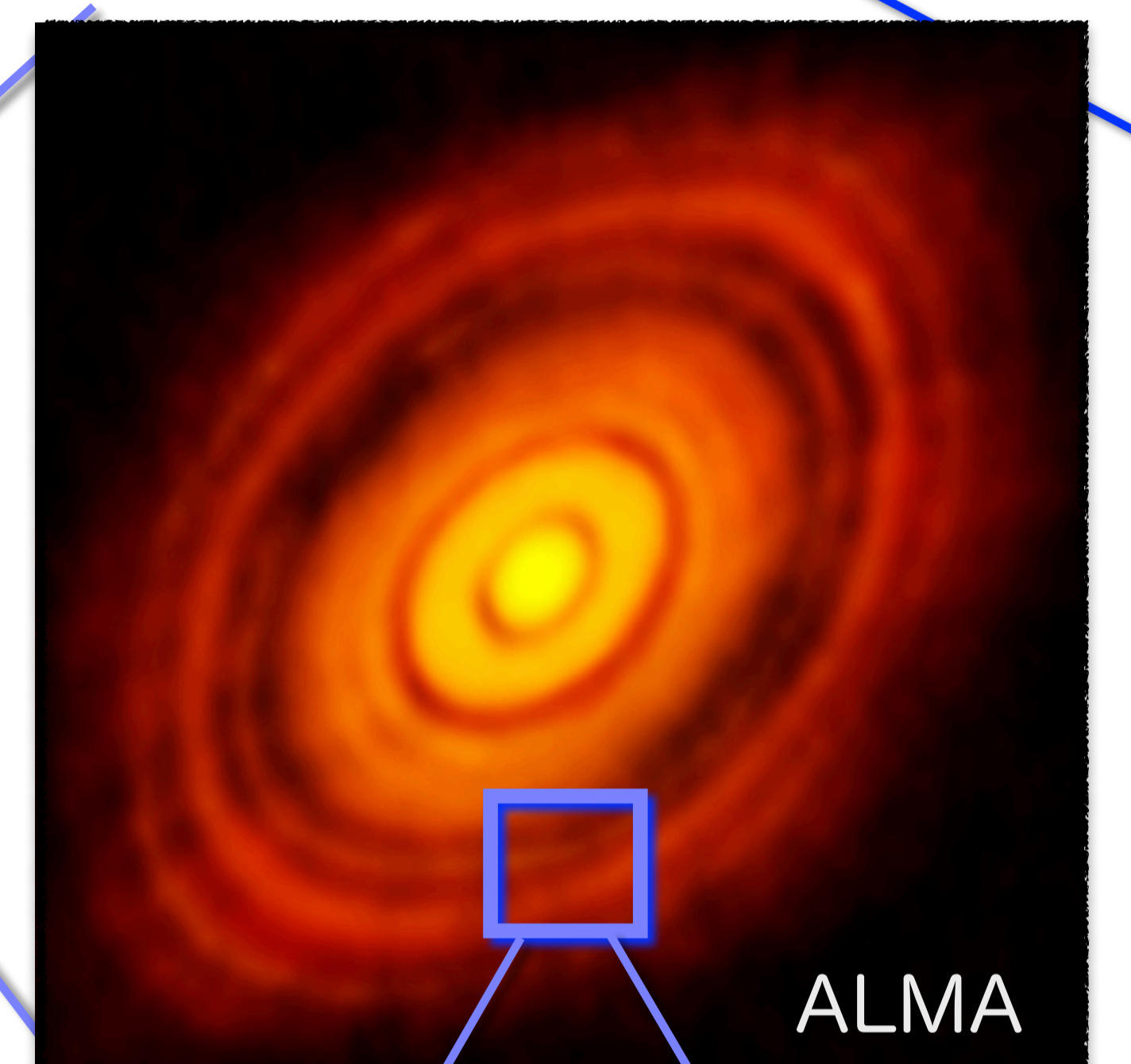
Tips: 宇宙を考えるときに使う単位
 1 pc \approx 30兆km = 3×10^{13} km
 * 地球の半径 \approx 6000 km
 * 1光年 \approx 9×10^{12} km

宇宙には、見つかっただけでも今現在理論で説明できていないような特徴を持つ“謎”の天体がたくさん発見されています。逆に理論上は存在が予言されていますが、未だ発見されていない天体も数多くあります。このような謎に迫るためには“理論”と“観測”の両方のアプローチが重要になります。私たちTa研では理論的なアプローチを用いて、このような謎に挑戦しています。(研究例1)

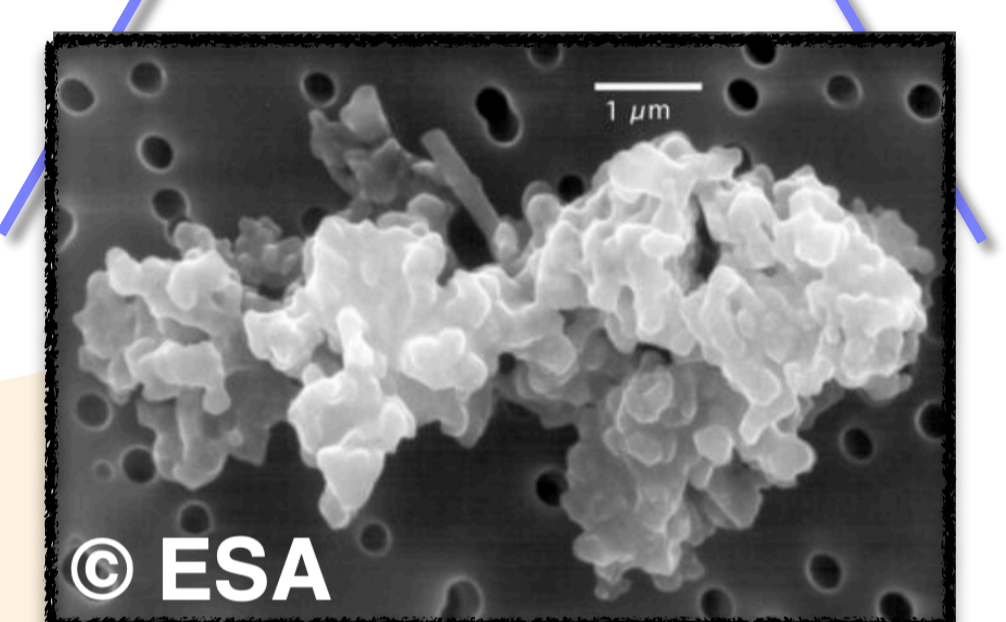
恒星誕生の現場となる棒状構造天体



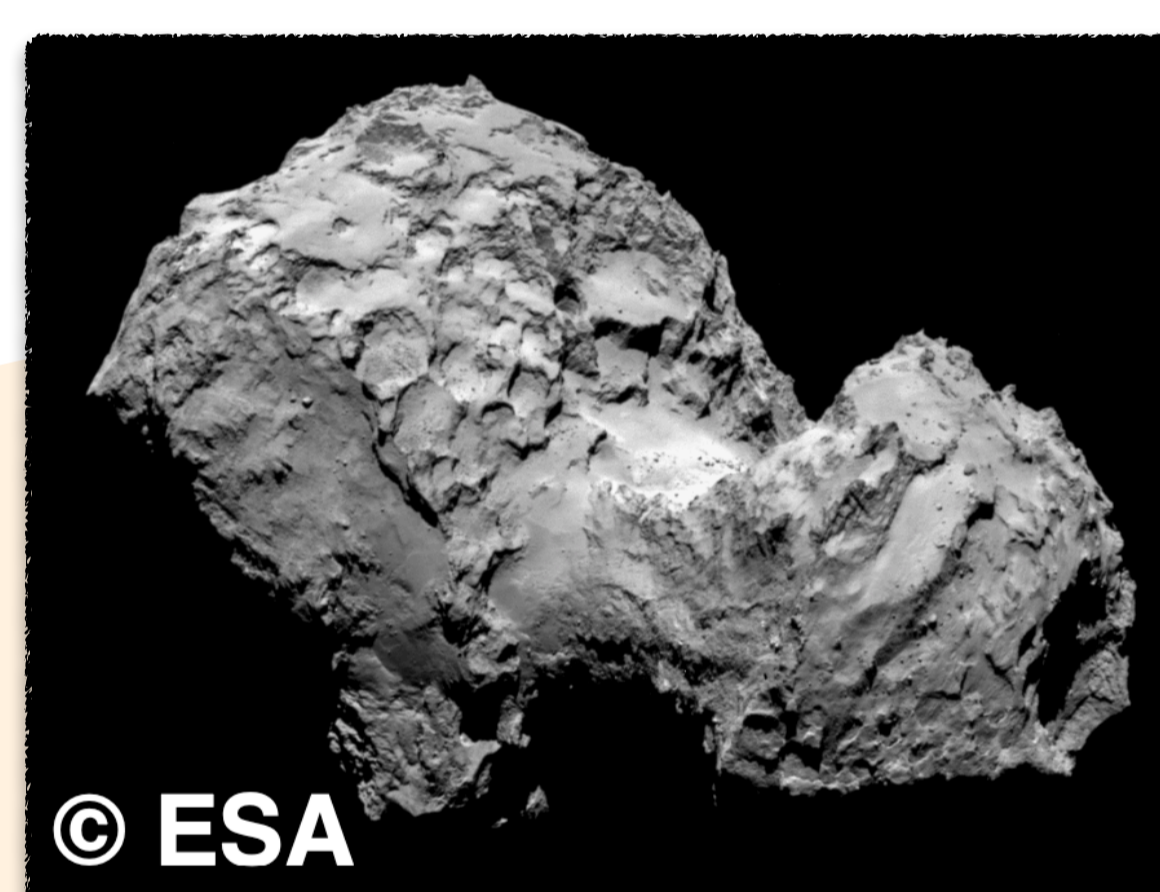
恒星の誕生と原始惑星系円盤の形成



星間ダスト



ダスト: $\sim \mu\text{m} = 10^{-6}$ km

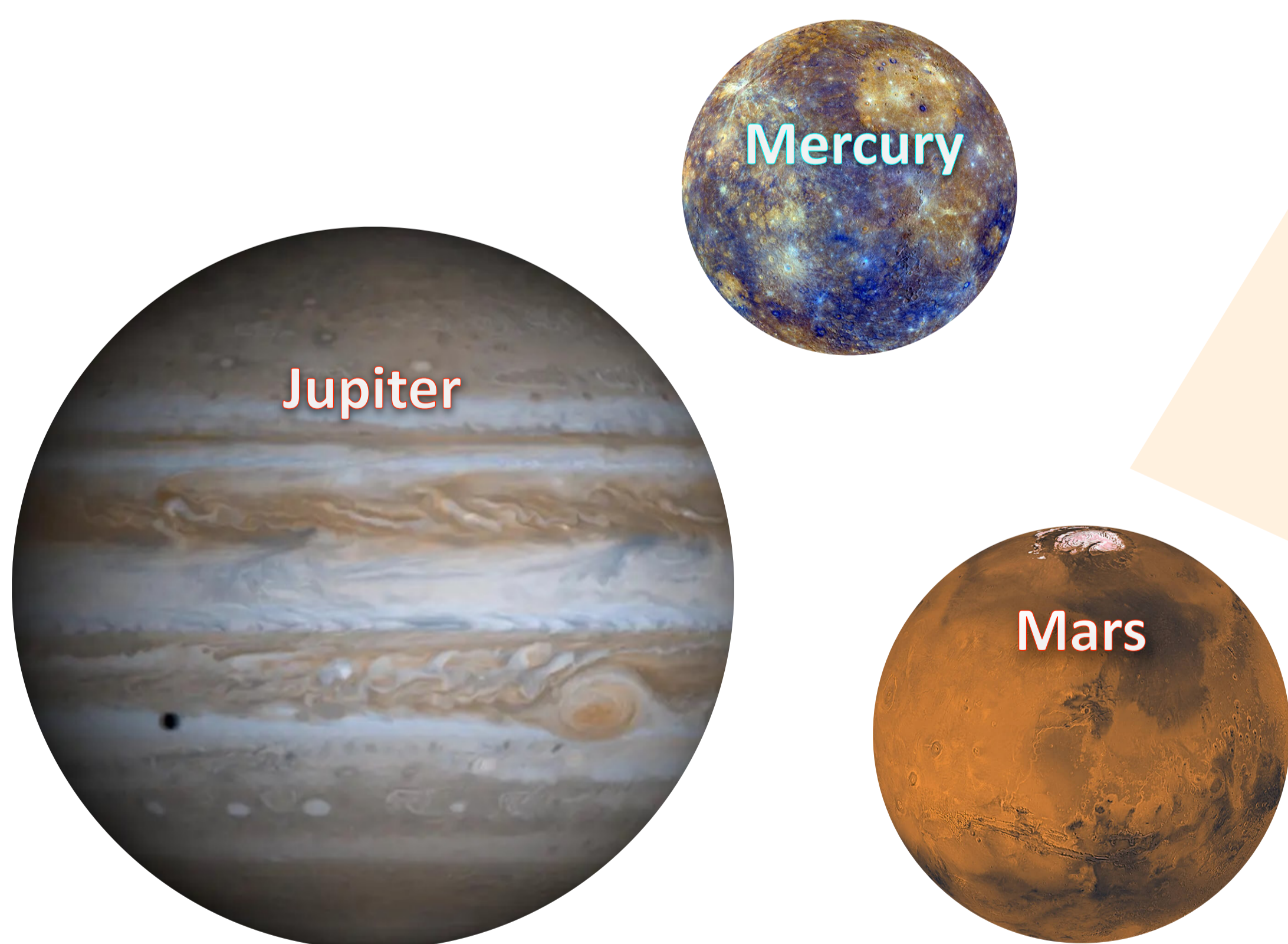


微惑星: $1 - 10^2$ km

多様な惑星の形成と宇宙における生命

多種多様な特徴を持つ惑星が存在

5322個の惑星が太陽系外で発見されています(2023年4月現在)



惑星: $10^4 - 10^5$ km

惑星形成理論 (研究例2)

恒星の周りに形成される“円盤”のなかで惑星は誕生します。“ダスト”と呼ばれる非常に小さなものが衝突による合体を繰り返すことで、惑星のように大きなものに成長していきます。しかしその過程は未だ多くの困難があり、現在でも様々な理論モデルが提唱されています。

生命誕生期の地球はどのような姿？

天体衝突と生命誕生期の地球 (研究例3)

地球生命誕生の謎は人類永遠のテーマです。その謎に迫るためには生命が初めて誕生した38億年前の地球がどのような環境であったかを知らなければいけません。実は月のクレータの大部分は38億年前の激しい天体衝突によって作られたことがわかっています。そのため当時の地球にも激しい天体の衝突があり、生命誕生期の地球を形作ったと考えられます。実際に衝突による超高温によって生命に不可欠なアミノ酸が生成されることも知られており、昔の地球に起きた激しい天体衝突が生命誕生の鍵を握っているかもしれません。

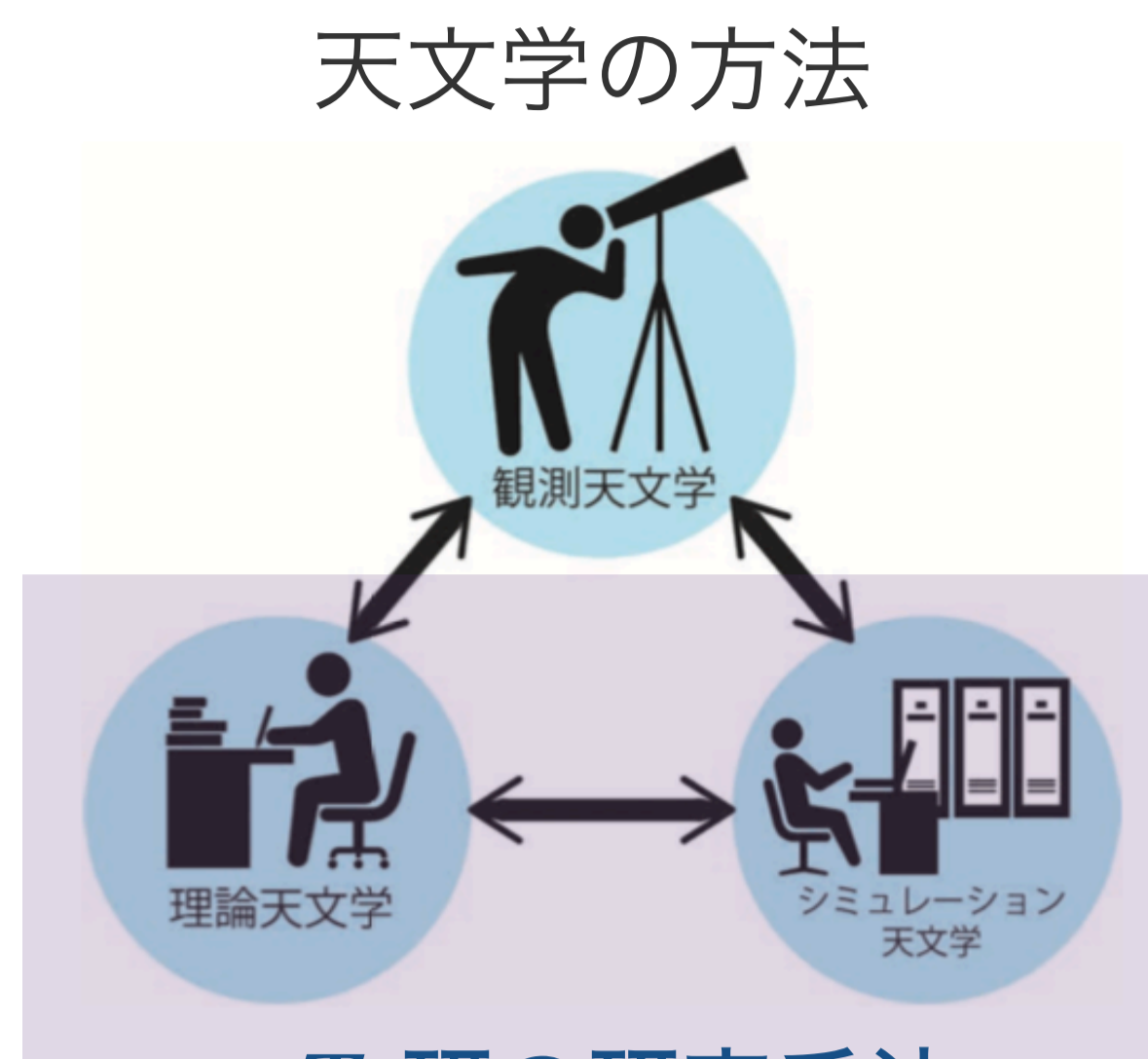


理論宇宙物理学研究室 (T_A 研) での研究内容

導入

T_A 研の概要

T_A 研 (理論宇宙物理学研究室) は恒星や惑星の形成・進化、星間物質の物理、高エネルギー天体現象など、銀河内で起こる様々な天体現象を理論的な側面から研究している研究室です。数式を用いた解析的な手法や、コンピュータを使った数値シミュレーションなどを用いて、この宇宙に存在する多数の未解決問題に迫っています。



http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2015_108_02/108_88.pdf

研究室メンバーのそれぞれが特色ある研究を行っています。

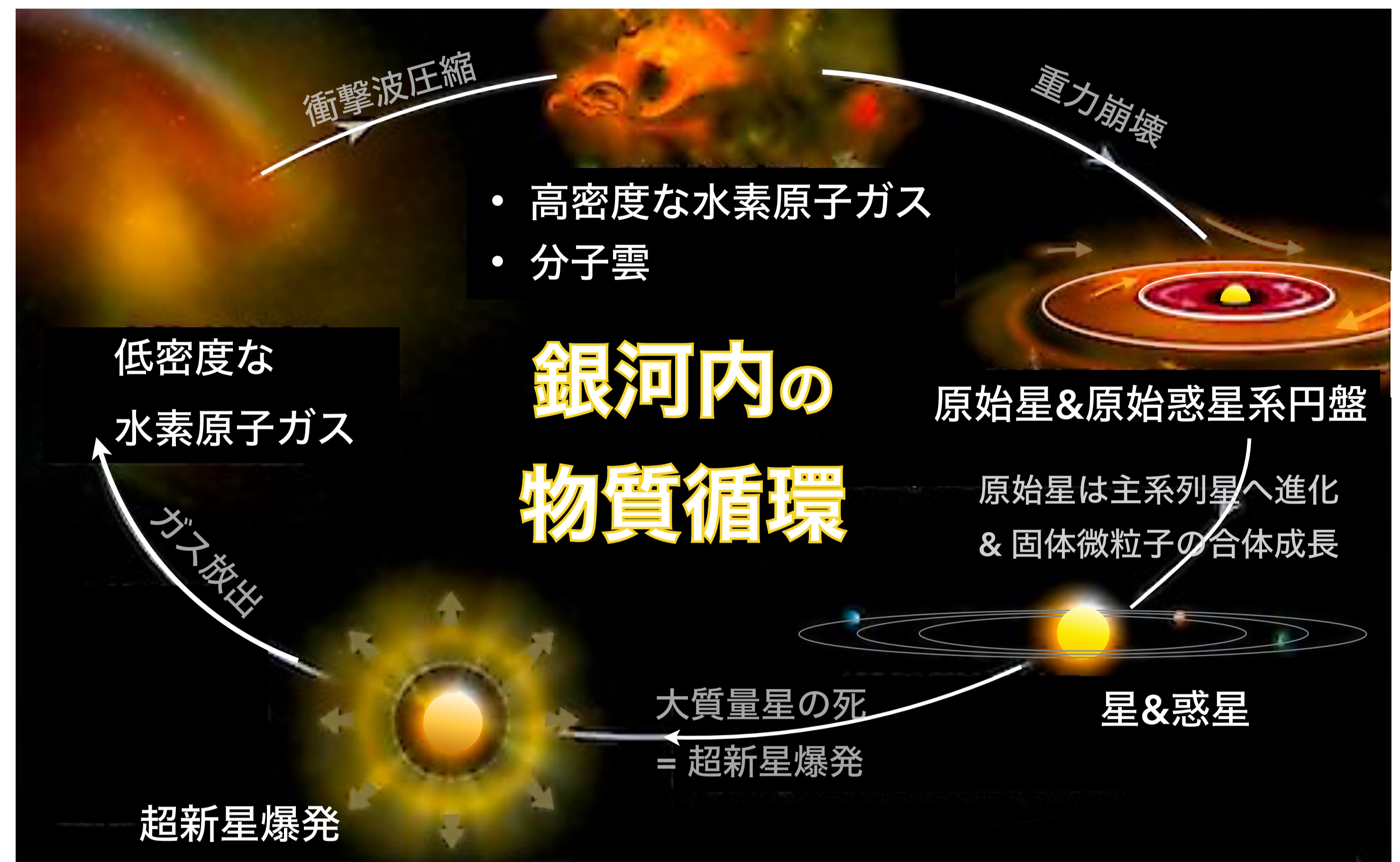
T_A 研における研究内容

- 星間物質の物理
- 星形成の現場となる、分子雲の形成と進化
- 分子雲コアの重力崩壊による星形成のダイナミクス
- 原始惑星系円盤 (惑星の母体) の形成と進化
- 惑星の形成と進化 (塵の成長、微惑星・原始惑星の形成)
- 超新星爆発による宇宙線加速や、ジェット放出等の高エネルギー現象
- 数値計算法の開発

このポスターでは、 T_A 研で行われている研究内容のうちの代表的なものをいくつかピックアップして紹介します。

銀河内の物質循環

宇宙には数千億個の銀河が存在し、銀河進化の理解は宇宙全体の理解につながっています。銀河進化の重要なキーワードとして「銀河内の物質循環」があります。銀河の内部には水素を主成分とし、わずかな重元素を含んだ物質がダークマターの重力によって閉じ込められており、下図のように星になったり、希薄なガスになったり、分子雲になったりしながら循環しています。



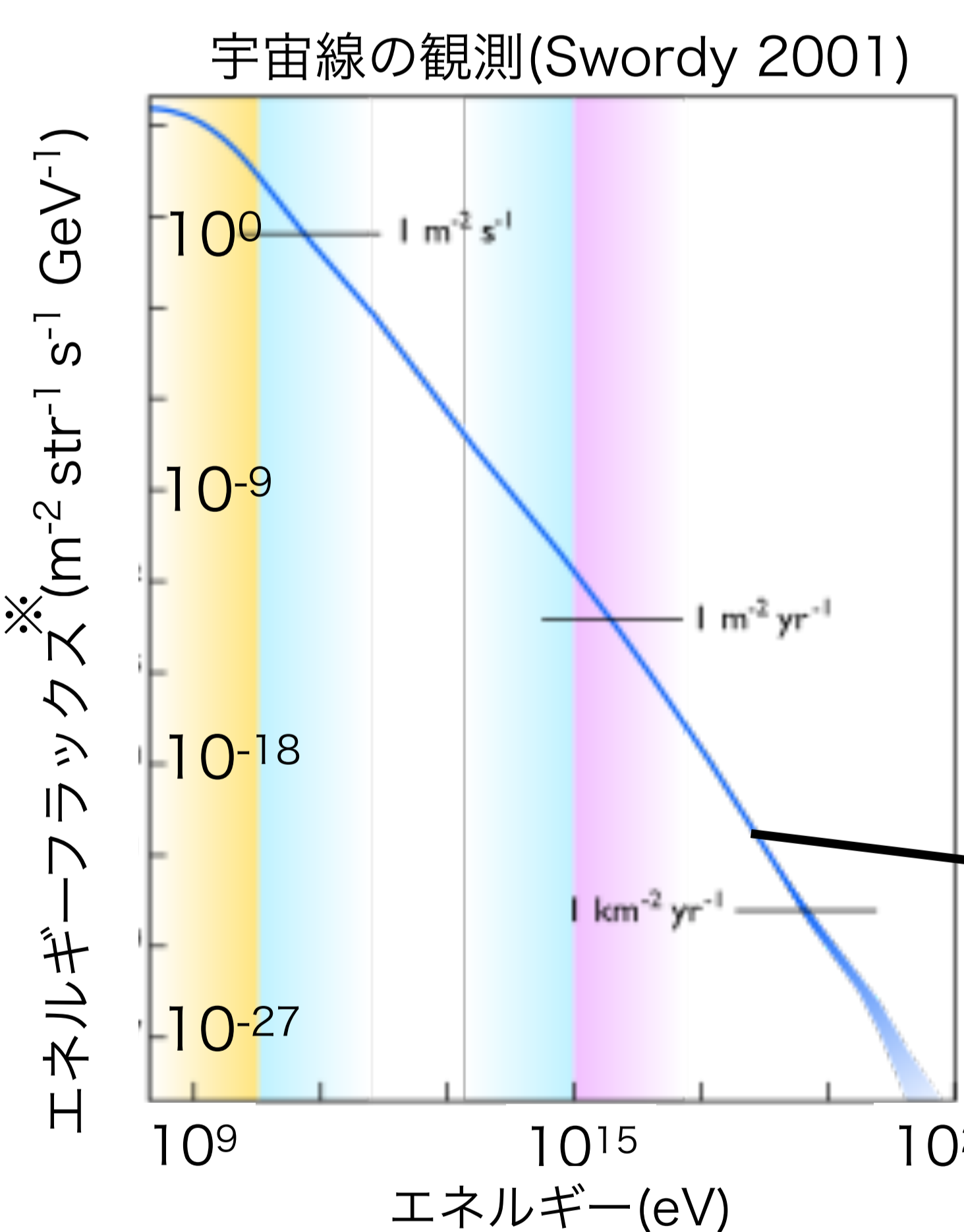
© Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF

T_A 研ではこの循環過程に関するほとんどの現象が研究されています。

高エネルギー天体物理

T_A 研では宇宙で起きる高エネルギーな現象も研究しています。その一例として、宇宙線加速に関する研究を紹介します。

宇宙線: 宇宙空間を超高速で飛び回る荷電粒子(陽子、電子、原子核など)



宇宙線が地球に降り注ぎ、大気と相互作用するイメージ(<http://karapaia.com/>)



高エネルギー領域で熱平衡状態より上側に分布しており、宇宙線は加速されていると考えられる

宇宙線の謎
どこで、どのように加速されているのか?

※宇宙から降り注ぐ宇宙線のエネルギーに比例する量

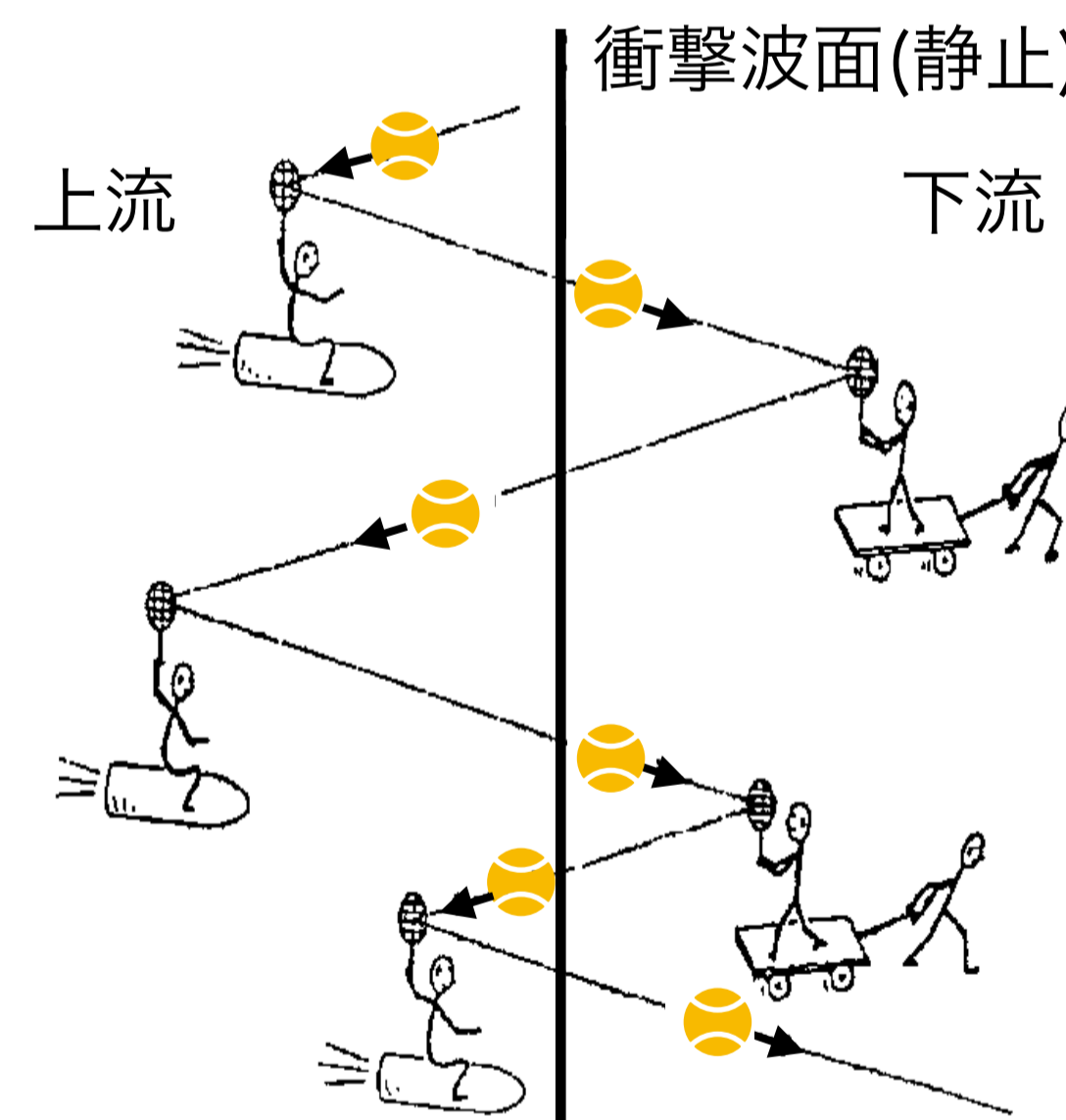
どこで: $10^{15.5} \text{eV}$ 以下は銀河系内の超新星残骸、それ以上は銀河系外の高エネルギー天体と信じられているが、具体的な起源は両方とも未解明である。

超新星残骸: 大質量星が超新星爆発した後に形成される高温の天体



どのように: 超新星残骸の衝撃波と乱流磁場による1次フェルミ加速

フェルミ加速



1次フェルミ加速のイメージ(M.Scholer)

加速には**衝撃波と乱流磁場(打ち返すテニスプレーヤー)**が必要!

宇宙線が加速する仕組み

1. 宇宙線(ボール)は衝撃波面を横切り乱流磁場(人+ラケット)に散乱され、何回も行き来する。
2. 上流と下流には速度差がある(トロッコよりロケットが速い)ため、互いに近づいている。
3. そのため宇宙線は往復するごとにエネルギーを得て加速する。

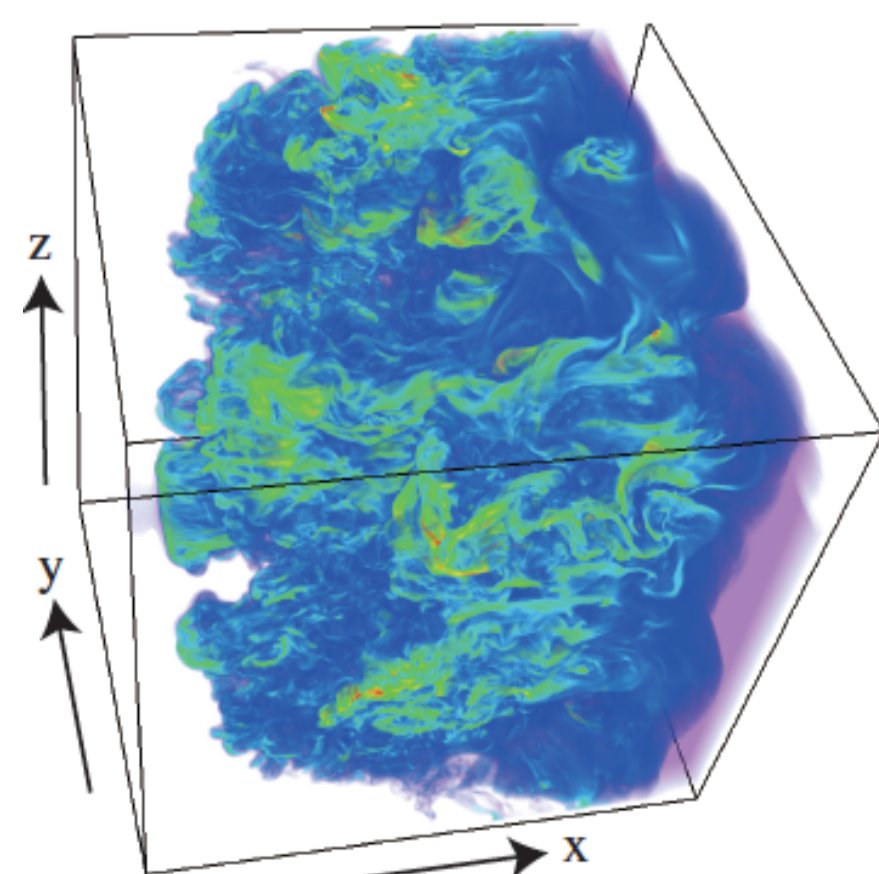
T_A 研での宇宙線加速に関する研究

衝撃波下流での乱流磁場の形成

Inoue, Yamazaki, Inutsuka & Fukui (2012)

超新星爆発による衝撃波が星間媒質中に伝播する際に不安定性により乱流を生成し、その結果加速に必要な強磁場が形成されるシミュレーション(右図)

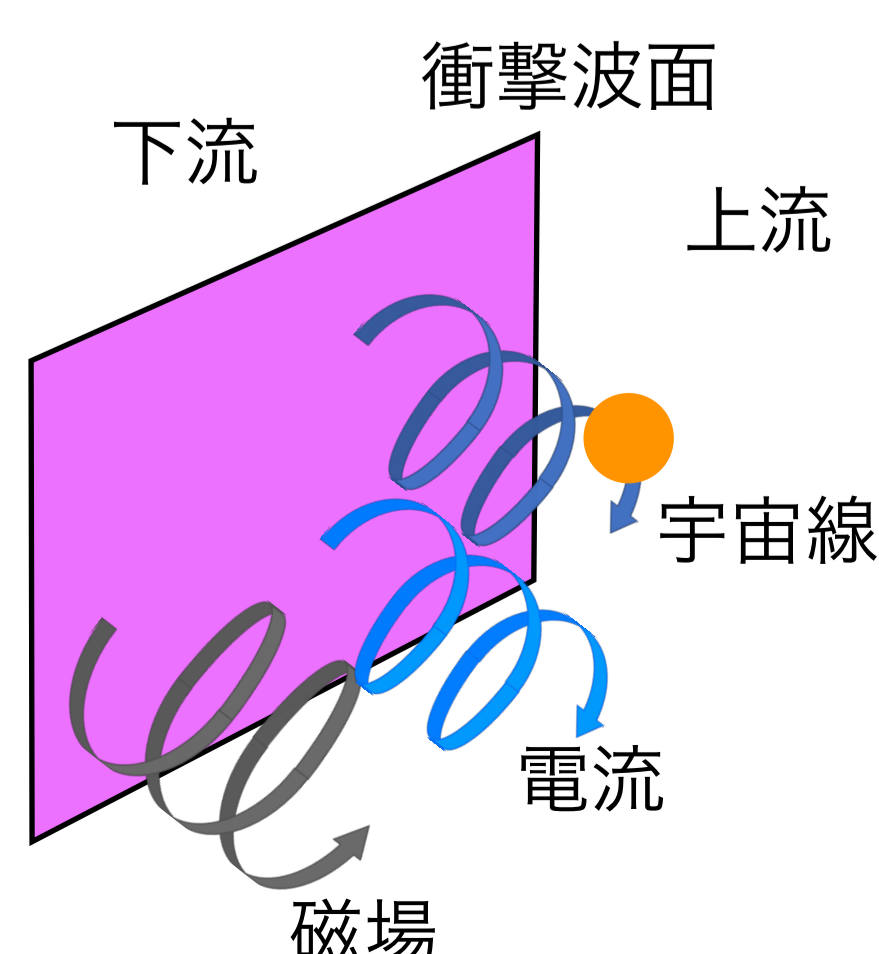
青→緑→赤の順に磁場が強い。衝撃波は右端に存在する。



衝撃波上流での乱流磁場の形成

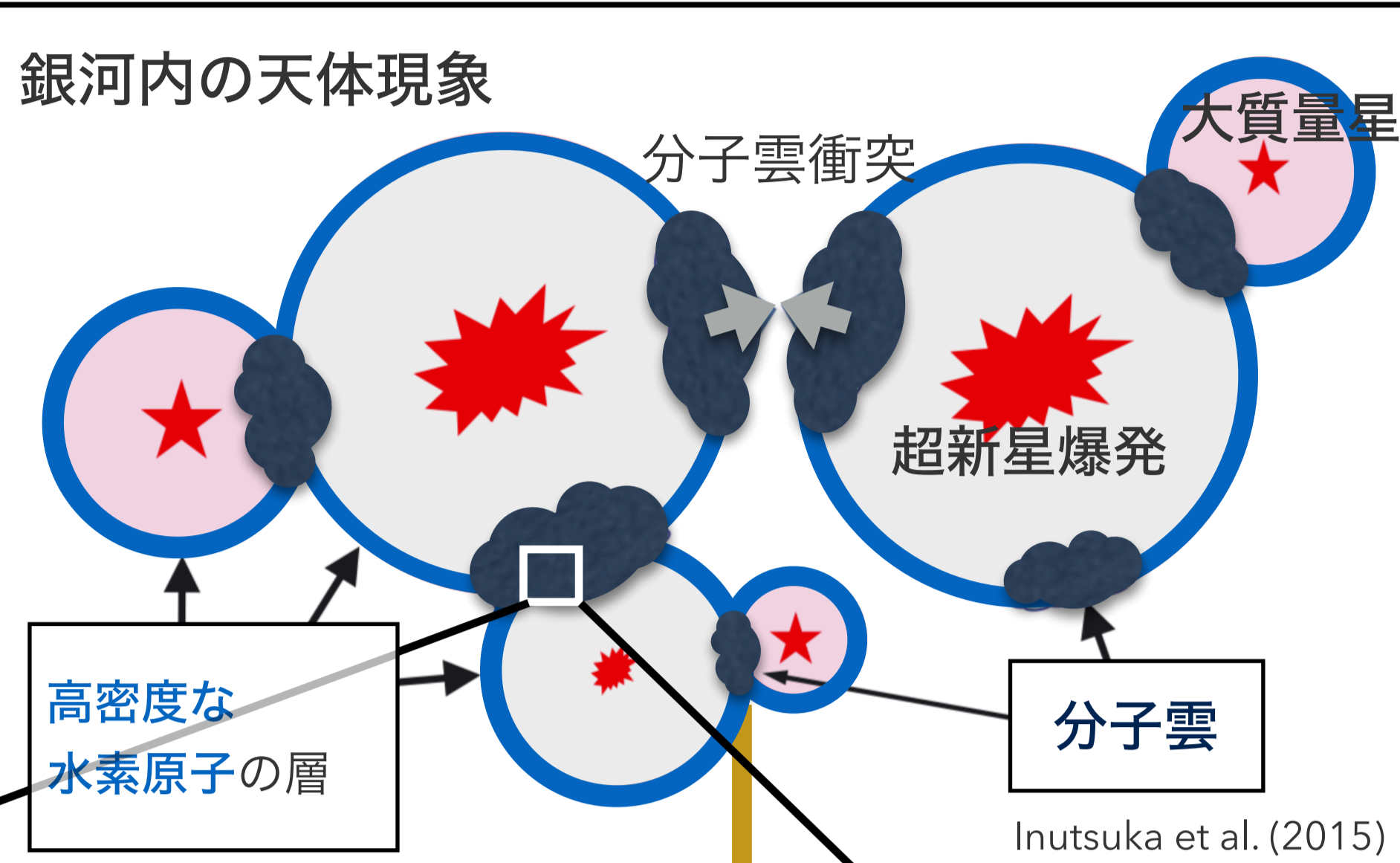
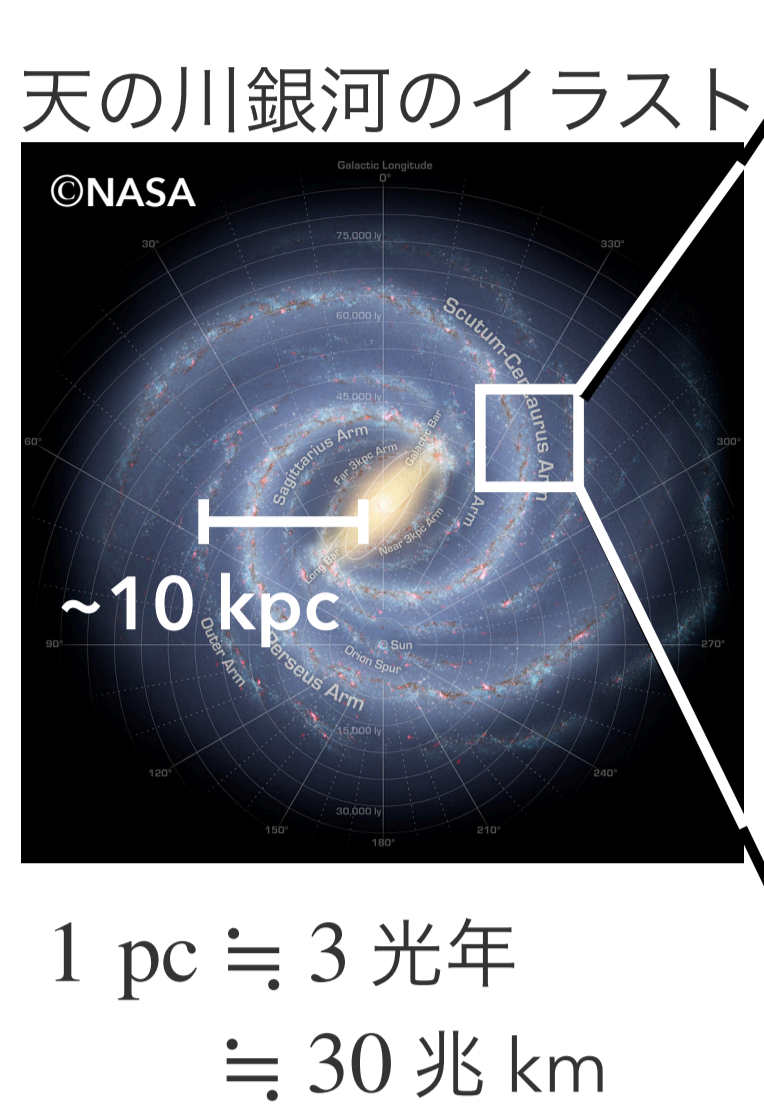
Bell (2004), Inoue (2019)

初期に星間空間に存在する弱い磁場によって加速された宇宙線の一部は、衝撃波上流に逃げ出していく。逃げた宇宙線はほとんどが陽子なので上流には電流が流れ、弱かった上流の磁場が増幅される。



星間物質の物理と星の形成

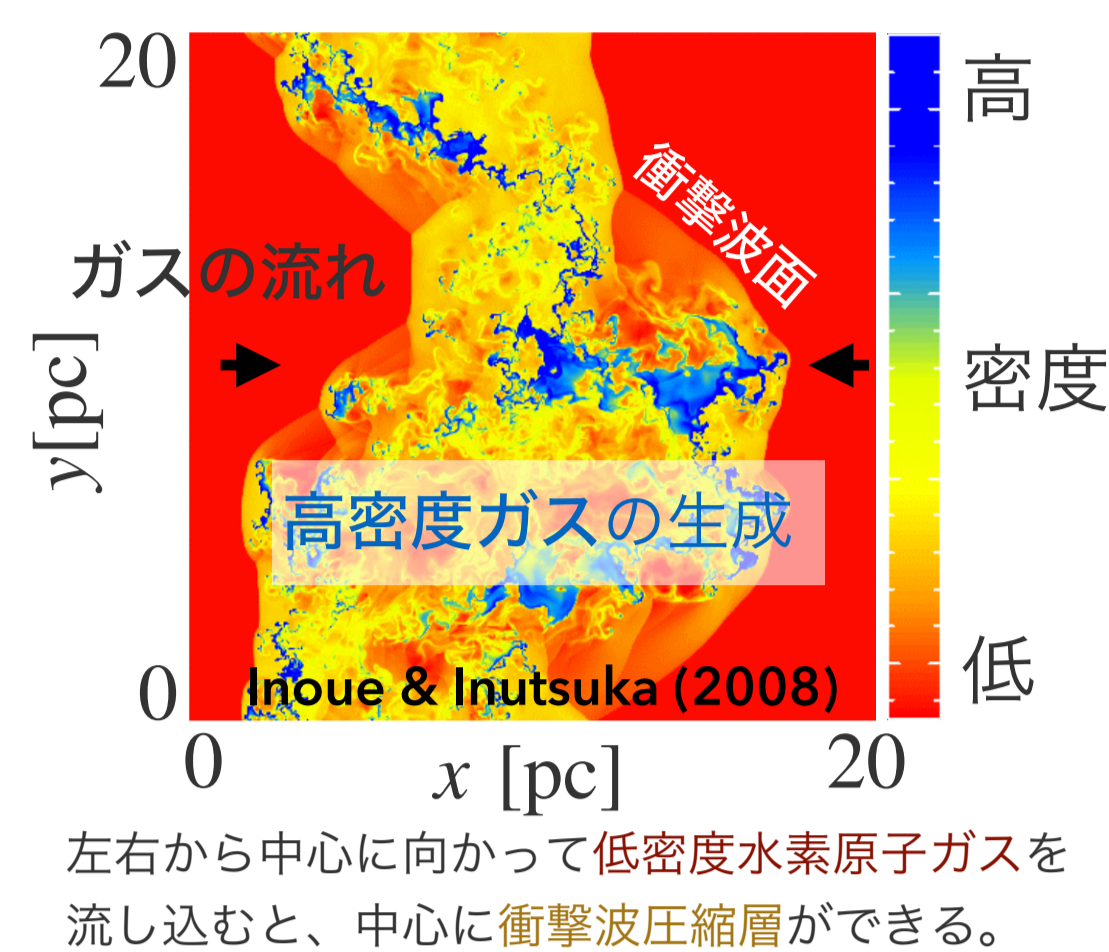
T_A研では、星間物質から星が生まれるまでの一連の過程 ①-③ を研究しています。



① 分子雲の形成

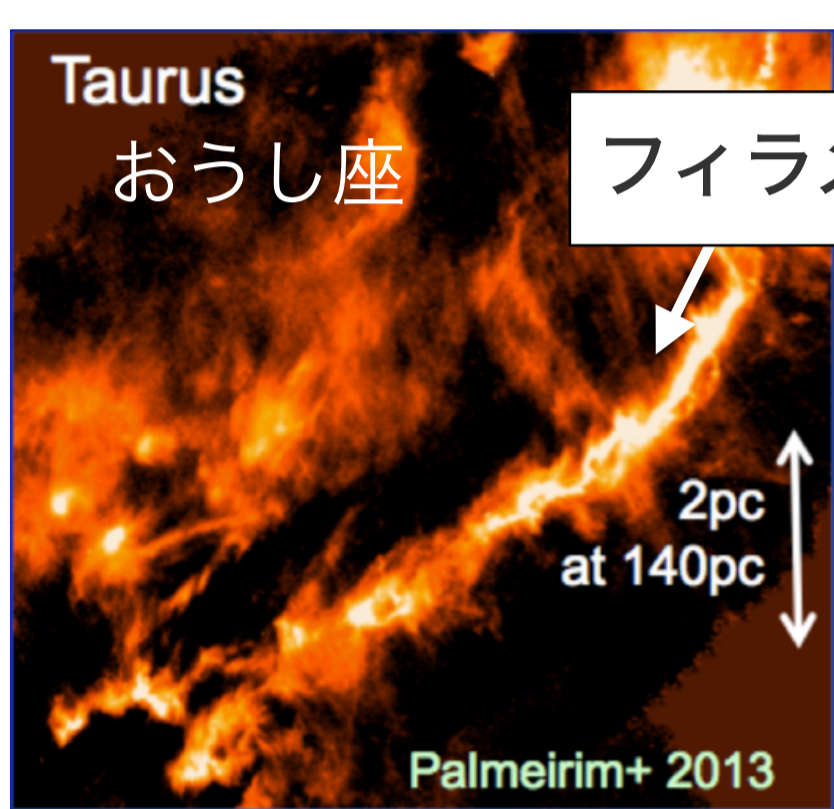
星間空間には低密度な水素原子ガスが存在
 衝撃波により高密度な水素原子ガス雲が生成(右図)
 → 多数回の衝撃波により圧縮されることで、
 水素分子ガスを主成分とする濃密な分子雲に進化

低密度な水素原子ガスの衝突シミュレーション

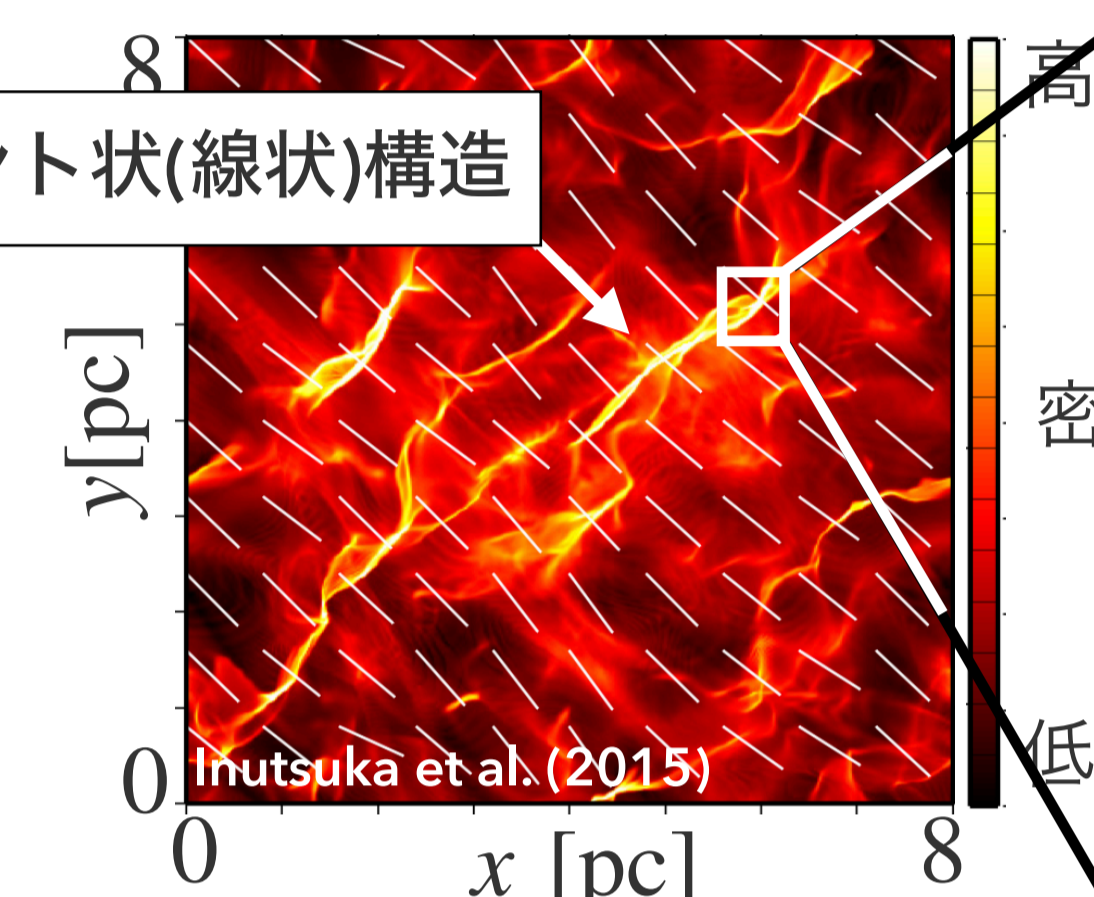


分子雲の圧縮

分子雲の観測



衝撃波による、分子雲圧縮の数値シミュレーション(Ta研の研究)



重力収縮

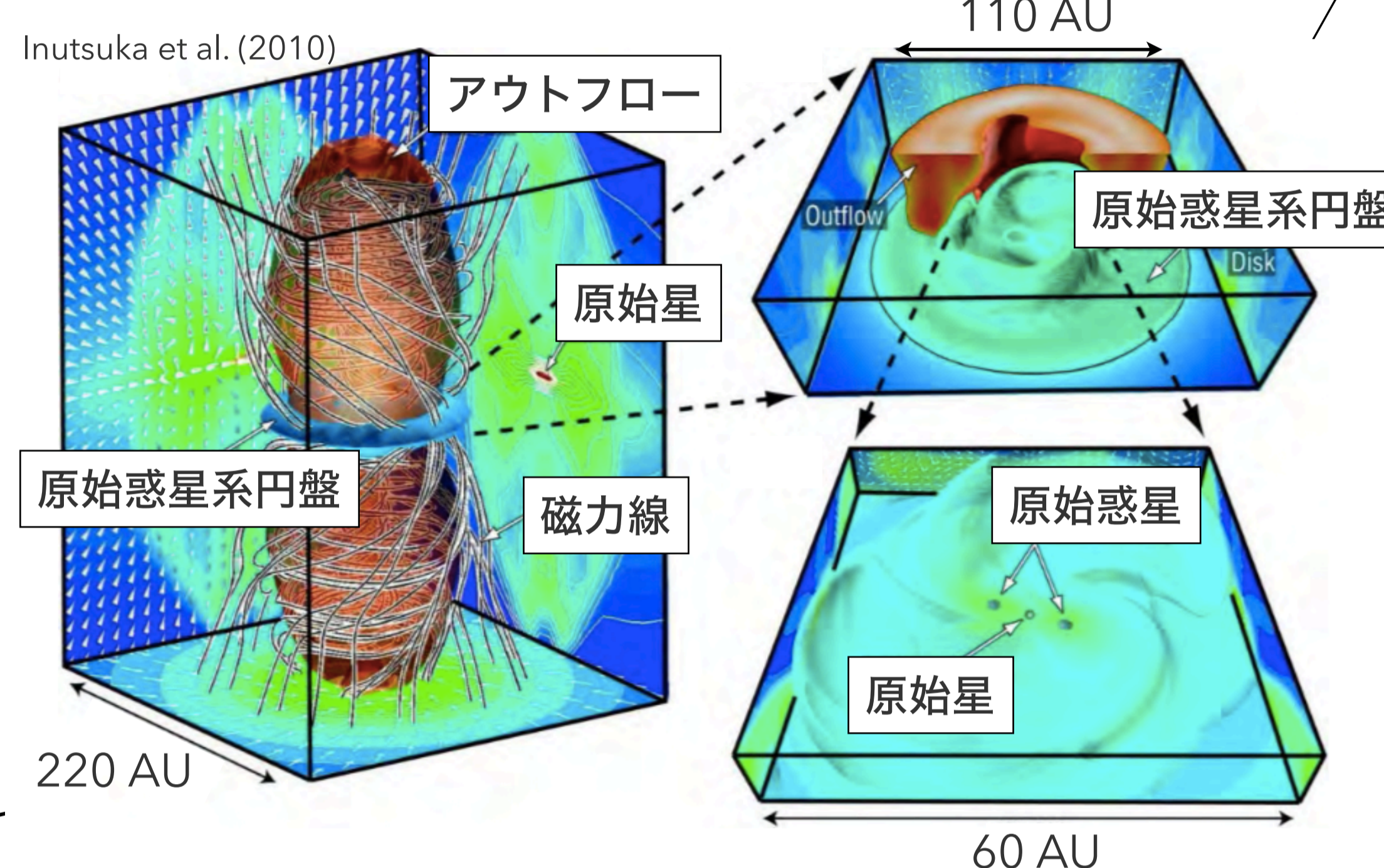
② フィラメント状雲の形成

形成された分子雲が衝撃波によってさらに圧縮
 → フィラメント状の分子雲が形成
 重力崩壊の臨界質量を超えたフィラメントは星形成を開始

分子雲コアの重力崩壊による原始惑星系円盤の形成

③ 原始星・原始惑星系円盤の形成

フィラメントの重力収縮・分裂
 → 原始星形成
 原始星形成に付随して、原始惑星系円盤(惑星の母体)が形成



1 AU = 地球と太陽の間の平均距離 (≒ 8 光"分" ≒ 1 億 km)
 光"年" に対し、光"分" (光の速さで何分かかかるか)

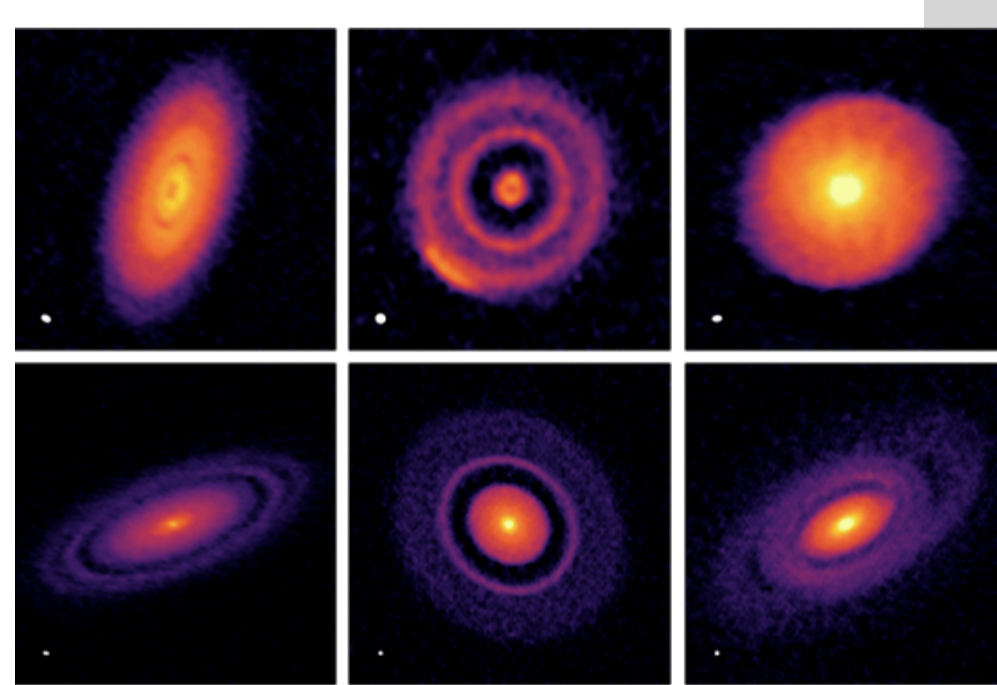
惑星形成理論の再構築

星形成の副産物として形成される原始惑星系円盤の中で惑星は形成されます

原始惑星系円盤から惑星系形成の古典モデル



見えてきた原始惑星系円盤



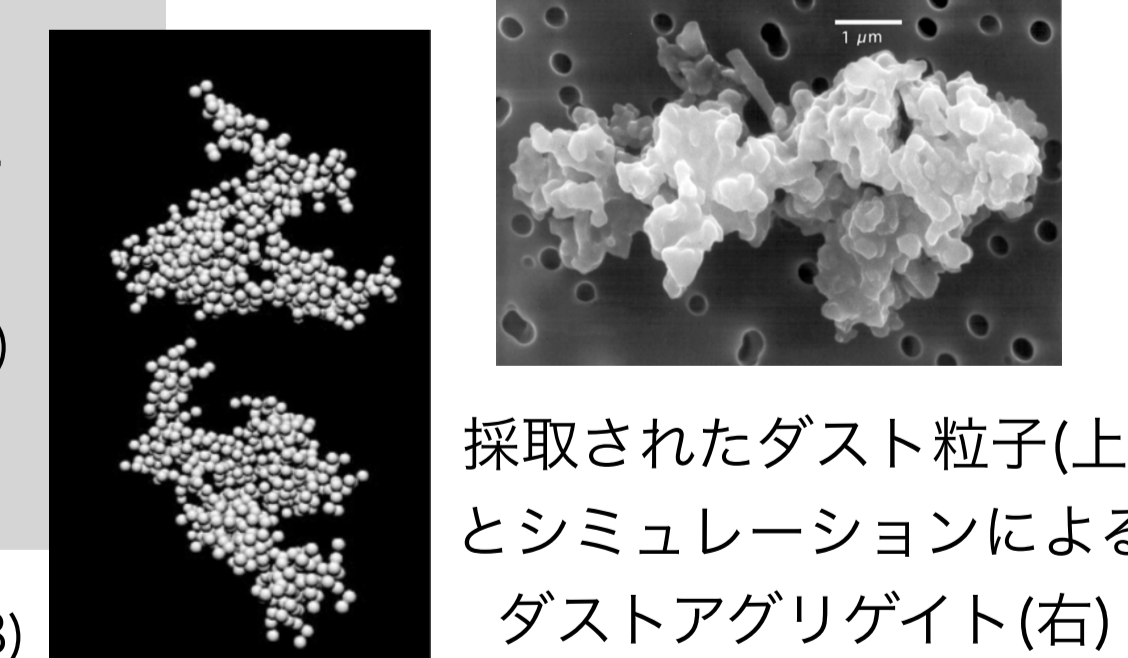
高解像度観測により、多種多様な構造を持つ円盤が見つかった
 → 滑らかな分布の円盤を仮定した古典モデルでは不十分か

円盤のリング構造について、複数の理論を提唱
 ・ガス-ダスト間の摩擦に起因する不安定性による機構
 (Takahashi & Inutuka (2014, 2016); Tominaga et al. (2018; 2019))
 ・ダストの焼結に起因する機構 (Okuzumi et al. (2016))

最大の謎、微惑星形成

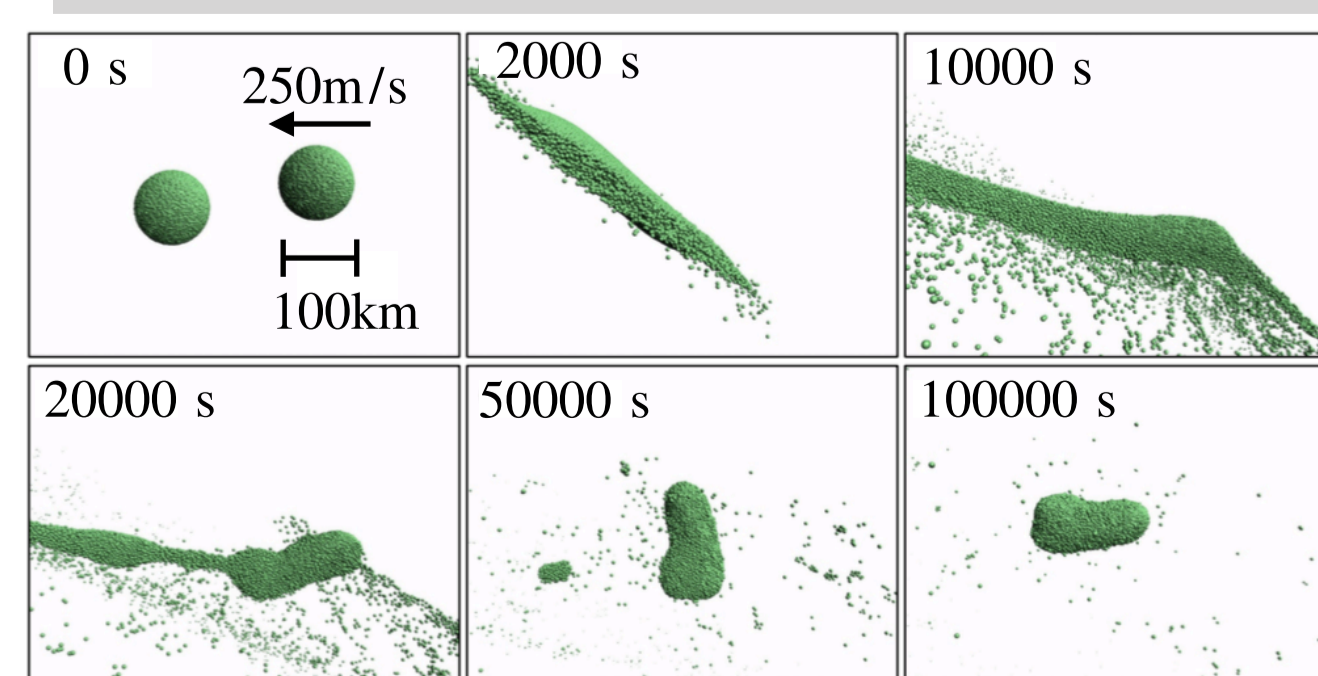
初期0.1μmサイズのダストが衝突・合体をくりかえし、微惑星サイズ(1 ~ 100km)まで成長できるか?

ダストが微惑星へと成長する過程で、1m程度のサイズになると、
 円盤ガスからの向かい風で角運動量を失い、数千年程度で中心星に落下
 → ・右図のような"ふわふわ"なダストは成長が早い (Okuzumi et al. 2012)
 ・不安定性により微惑星形成できるか (e.g., Tominaga et al. 2019)



微惑星の成長とその痕跡

微惑星は自己重力で引き合いながら衝突・合体を繰り返し、その結果、原始惑星が形成



惑星形成中の衝突速度・角度・物質の付着力の違いは、
 衝突後の天体の形・大きさに様々な違いを生じる
 → 小惑星帯の小惑星の形状に惑星形成の痕跡が残るかもしれない

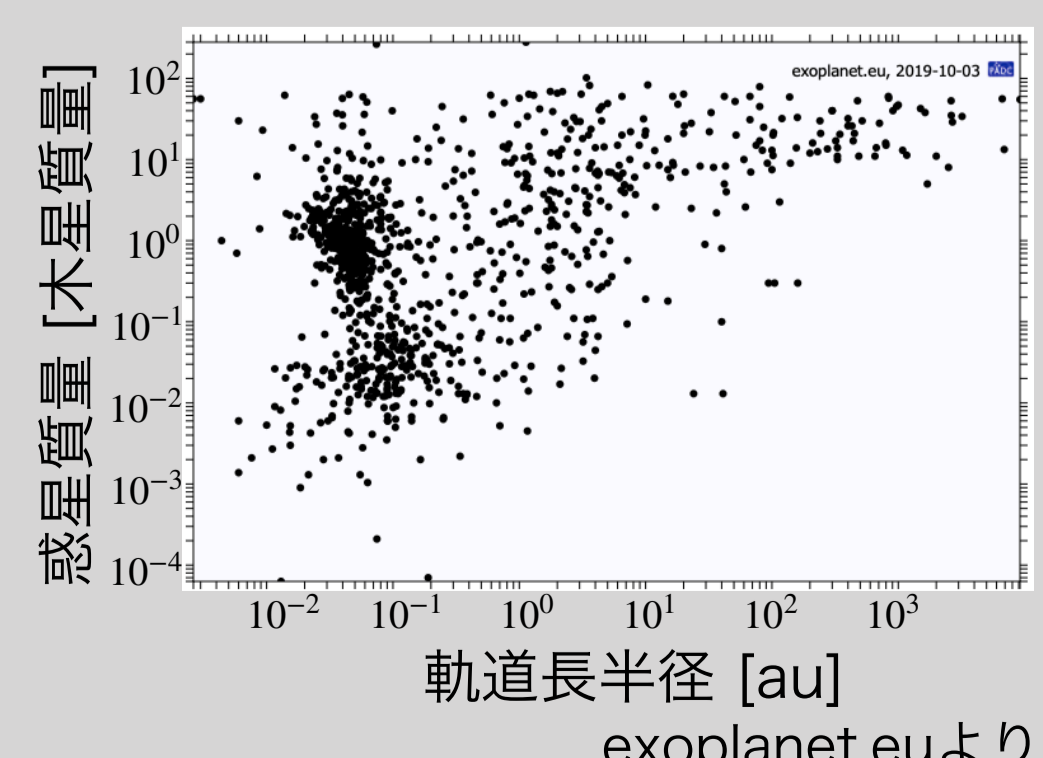
©NASA



直径100kmの固体天体の相対速度250m/s、
 正面から20°ずれた衝突のシミュレーション
 Sugjura et al. (2018)

歪な形をしている小惑星たち
 951 Gaspra(右)と243 Ida(左)

系外惑星



太陽以外の恒星の周りで現在では4000個以上もの惑星が発見されていて、
 太陽系では見られない特徴の惑星がある
 ・水星よりも中心星近くに木星質量以上の惑星
 ・地球の100倍近くの軌道半径を持つ、巨大ガス惑星
 → 古典モデルのみでは説明が出来ない
 ポスター右上の「中心星と同時に巨大惑星が形成される」理論も提唱

※ 1木星質量 = 地球質量の318倍