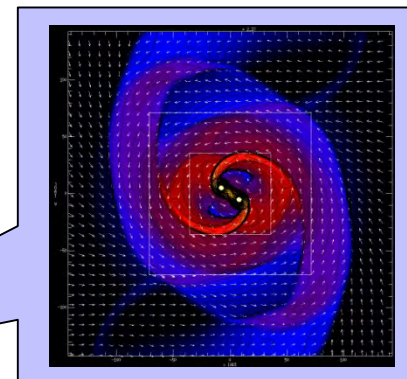
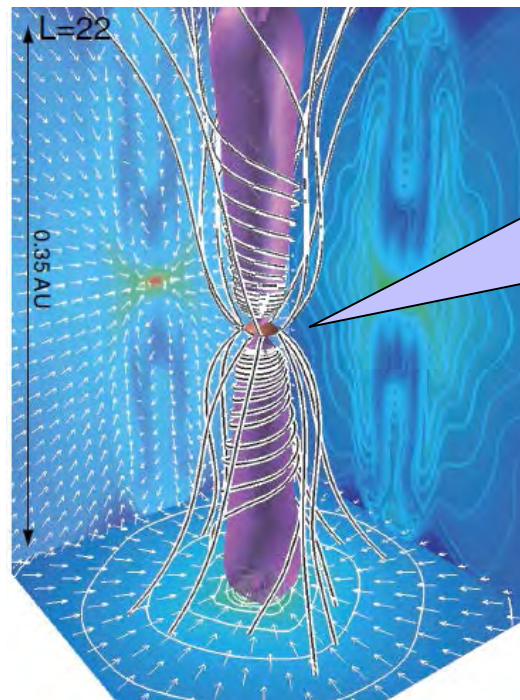
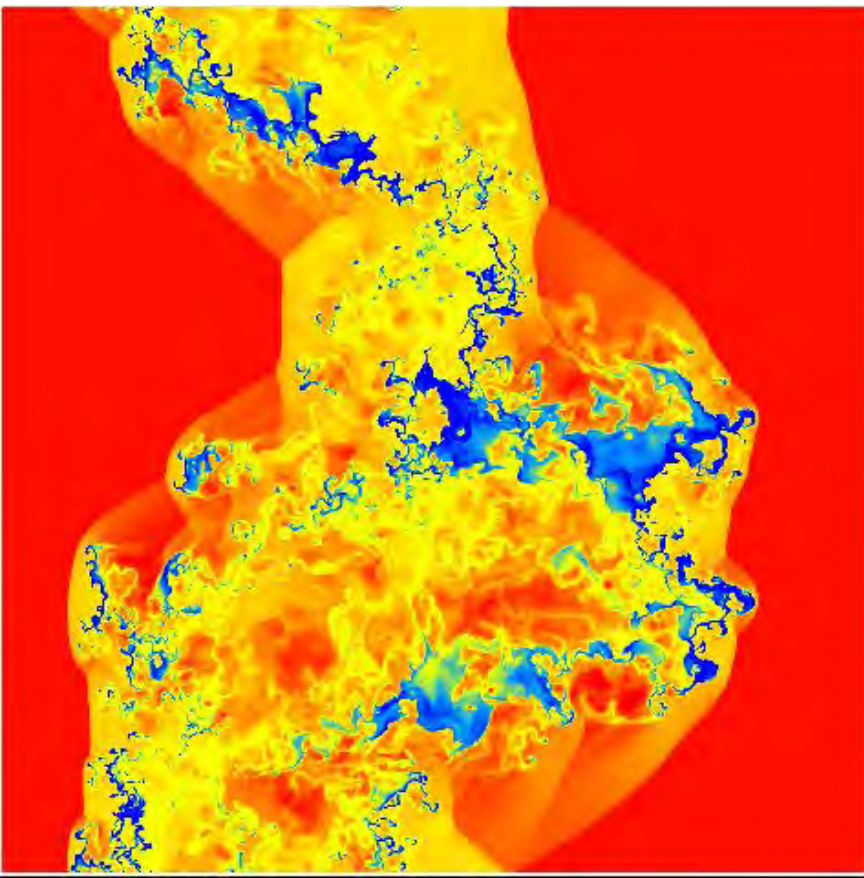


# 最新の天体形成論

犬塚修一郎(名大・理・物理)



教室：A31

レポートは[ポストB](#)へ

# 宇宙の進化

すばる望遠鏡で見た宇宙のかなた



- 宇宙は銀河で満ちている
- 銀河は星の集合体



**Subaru Deep Field**

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, K')

September 16, 1999

Copyright© 1999 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



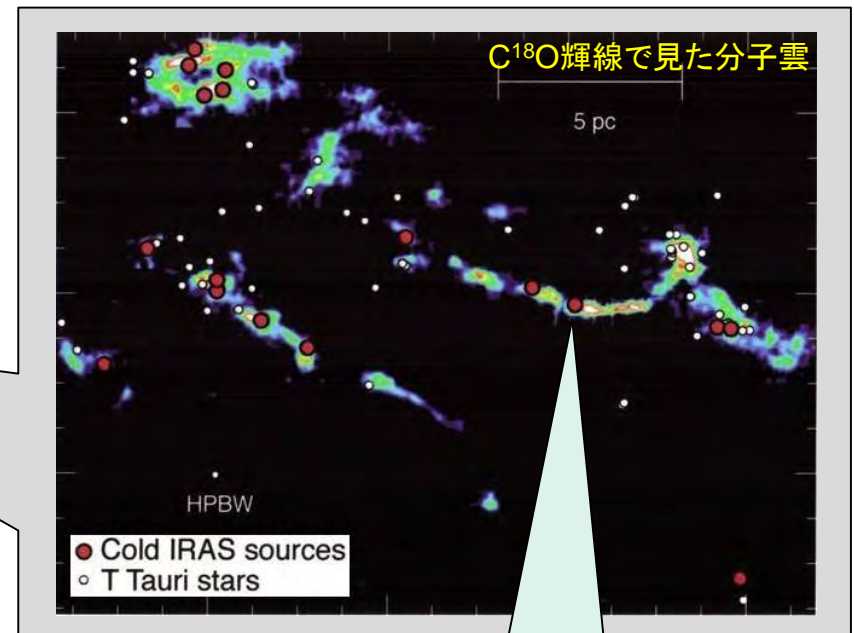
# 暗黒の世界：分子雲

可視光の写真



極低温の世界：分子雲

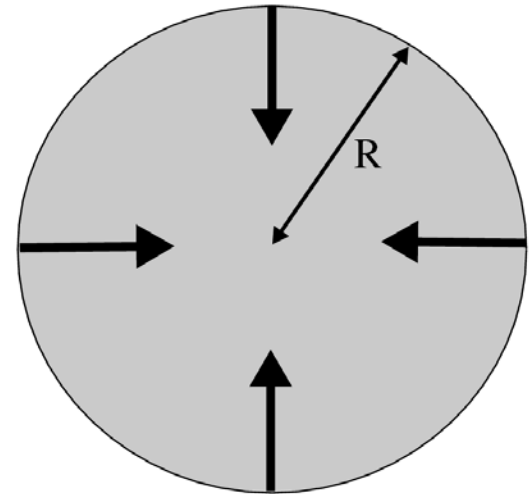
絶対温度  $10\text{K} = -263^\circ\text{C}$



原始星（赤ちゃん星）

# 重力の性質1

大きな塊ほど大きな力となり，他の力を凌駕する.



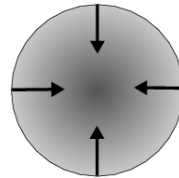
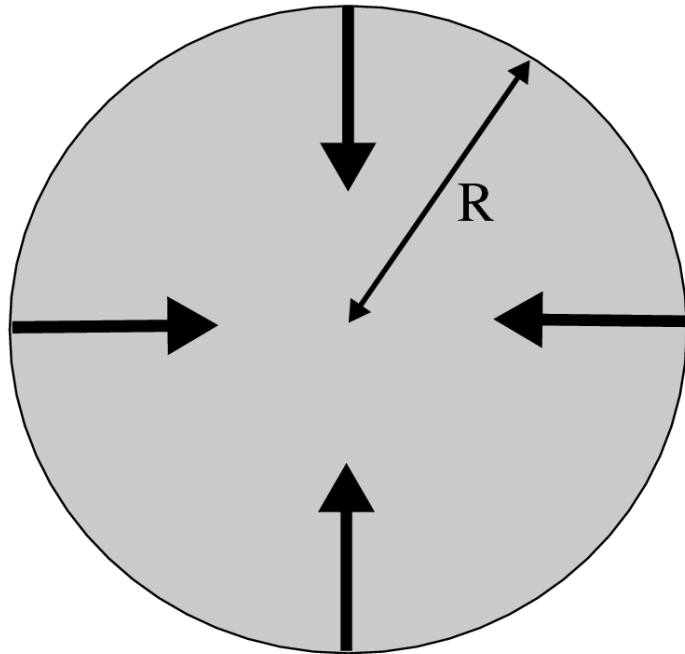
天体の総質量  $M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$

密度

質量  $m$  の物質に及ぼす重力  $F = \frac{GMm}{R^2} = \frac{4\pi}{3} Gm\rho R$

$R$  に比例して増大する

# 自己重力 対 ガスの圧力

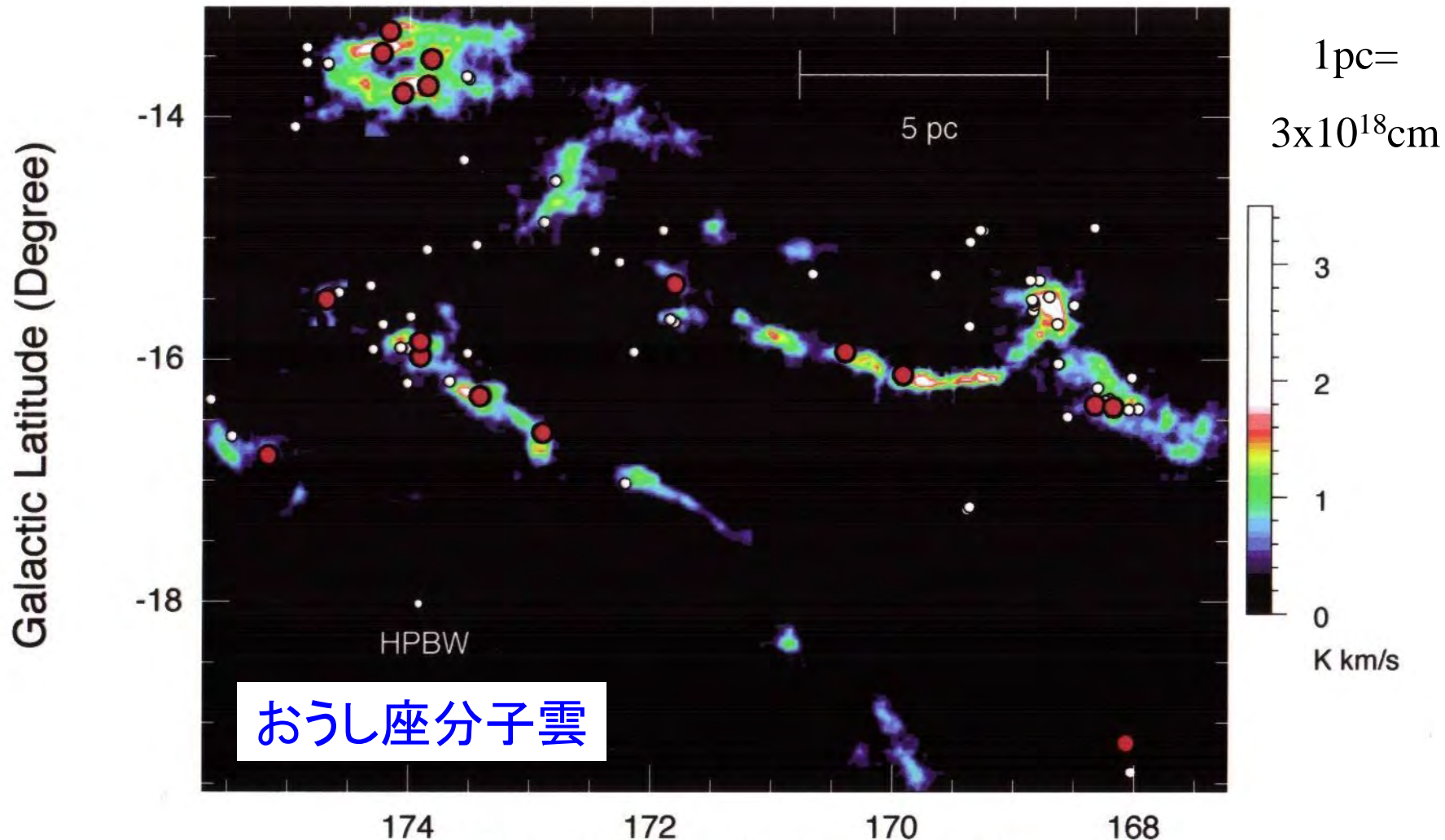


太陽と同じ質量で0.1pcの大きさの分子雲コアの表面での重力は地球上の重力の1兆分の1

膨張しようとする分子雲コアが自己重力で収縮できるためにはガスの温度は低いことが必要である→

**暗黒星雲(10K)**では可能

# 星形成の舞台：暗黒星雲



- 原始星 (赤ちゃん星)    ○ Tタウリ型星 (子供の星)



# 暗黒世界を覗く窓

低温ガスを電波望遠鏡で見る！

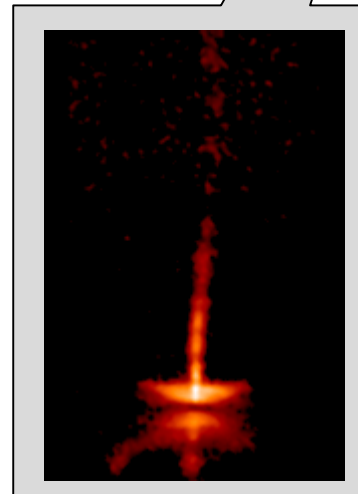
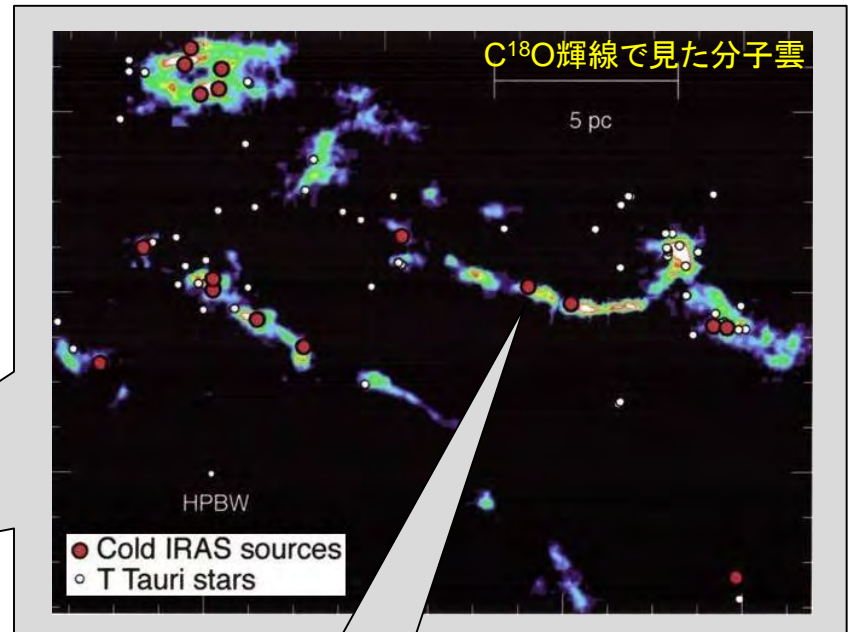
アレシボ天文台(プエルトリコ)の  
口径約300mの電波望遠鏡



電波干渉計(VLA)  
米国ニューメキシコ州ソコロ



# 分子雲コアの重力収縮と星形成



形成された  
直後の星から  
放出される  
ジェット  
(ハッブル望遠鏡)

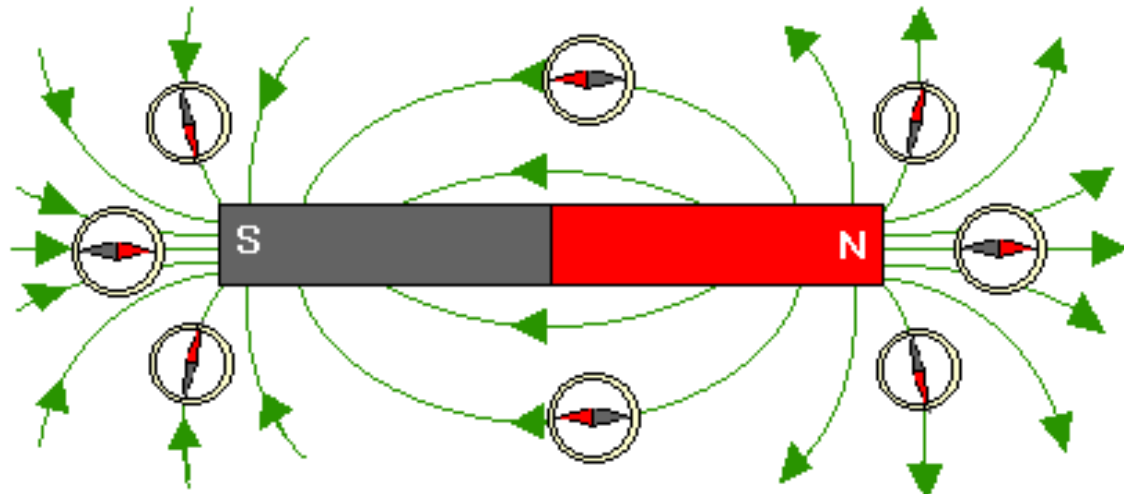
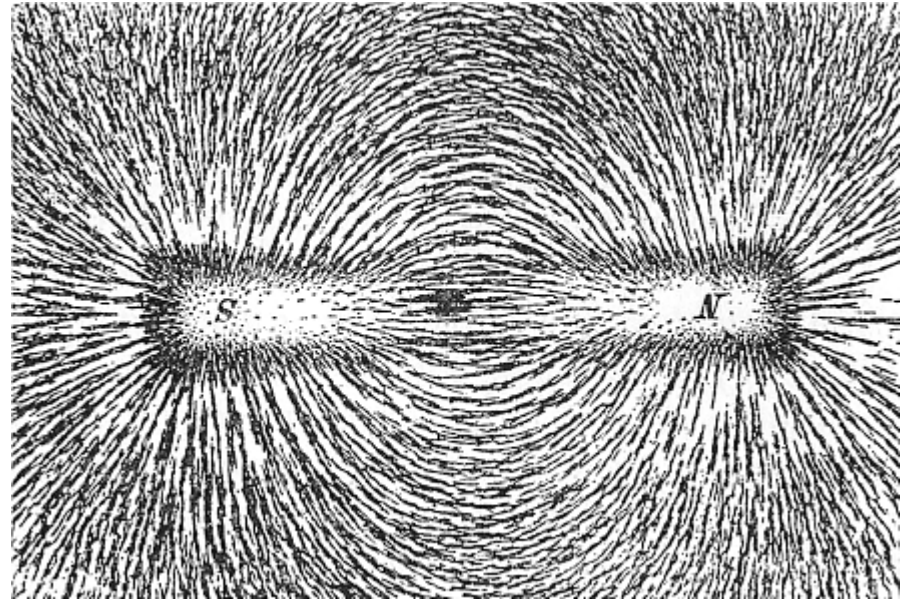


# 宇宙のガスのほとんどはプラズマ

電磁場がガスに  
力を及ぼす

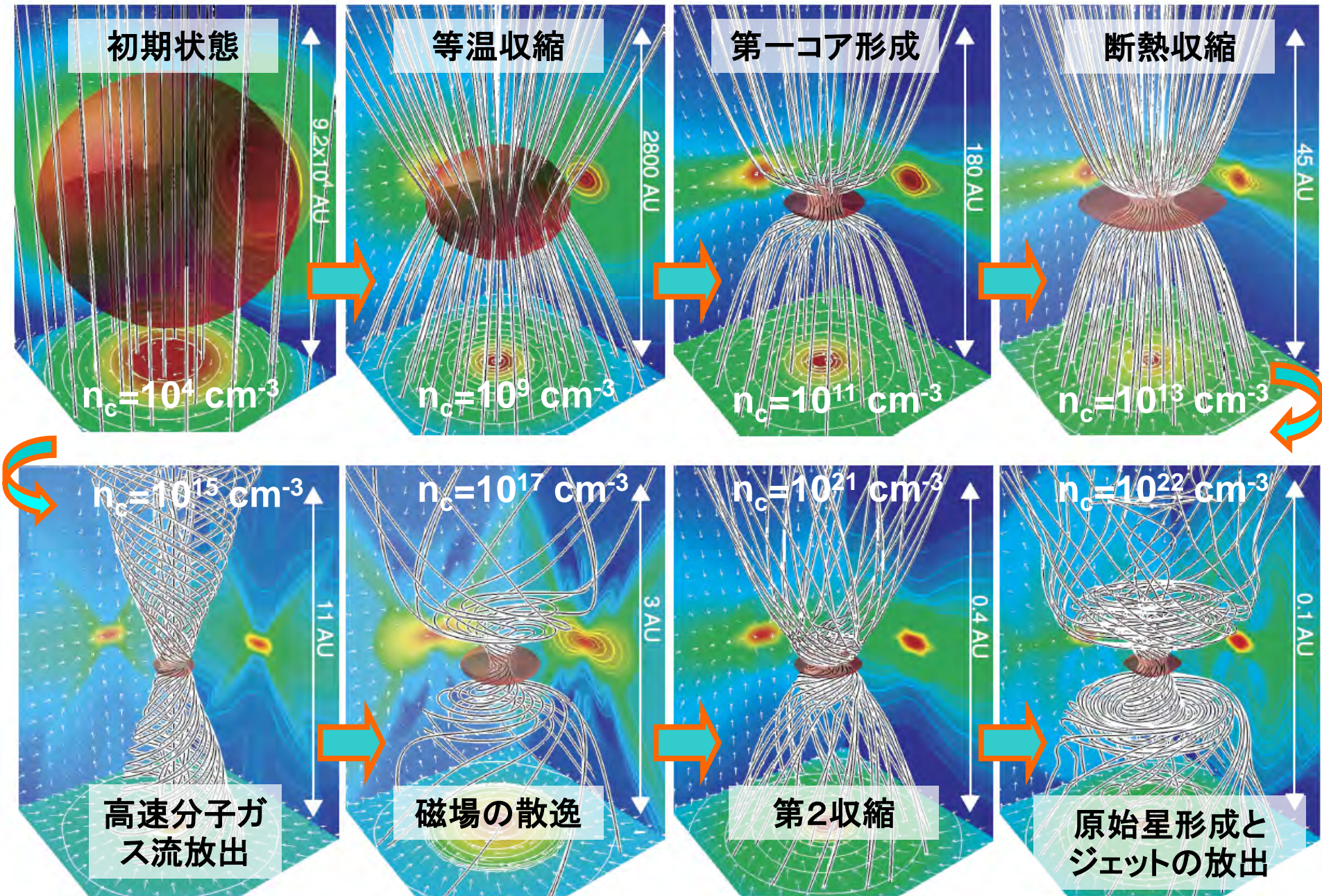
磁力線とは？

磁石の周りの砂鉄の分布





# 分子雲コアから原始星への進化



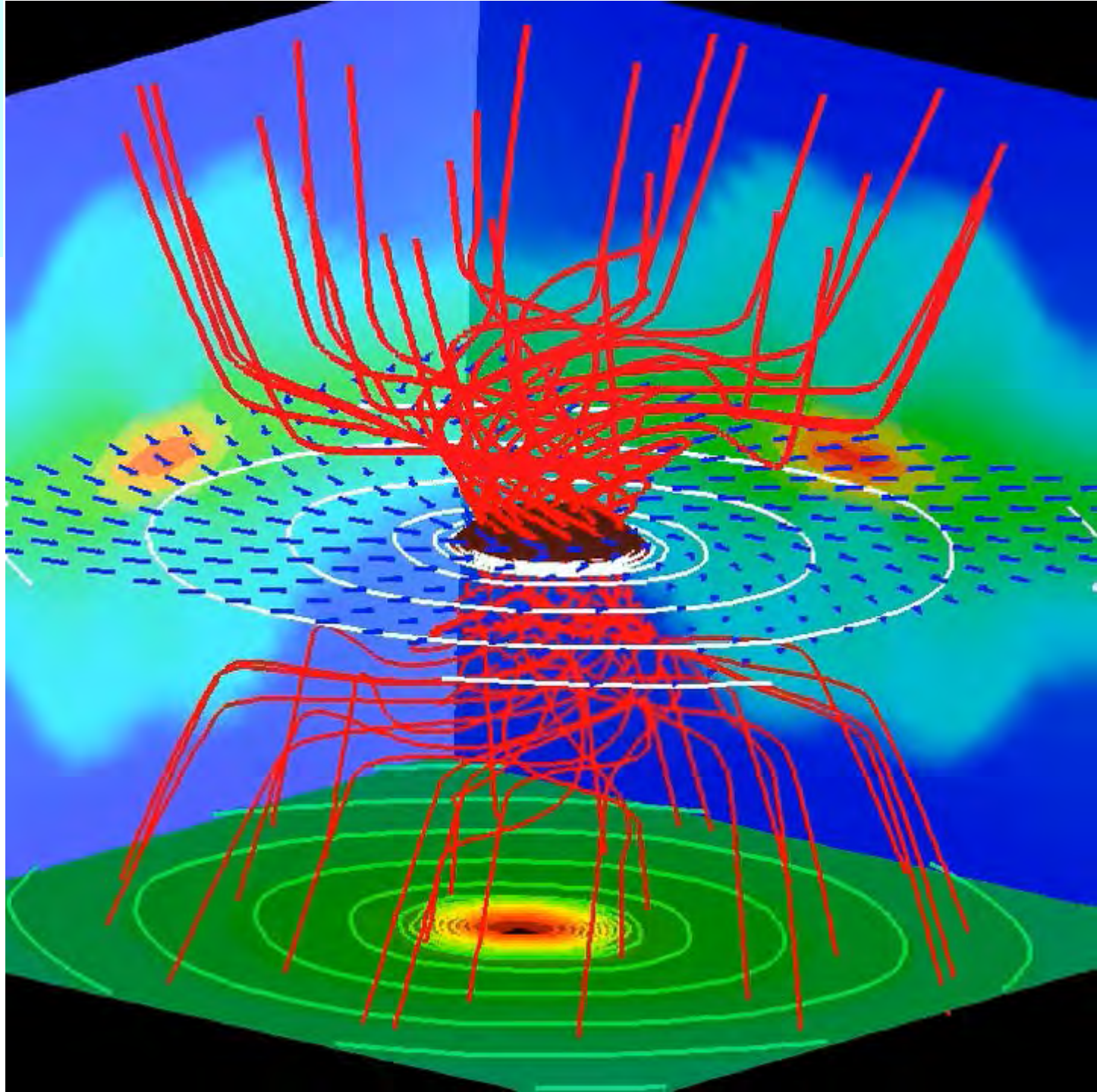


# 星が生まれる時

Resistive  
MHD with  
Nested Grids

Outflows from  
First Core

赤線は磁力線



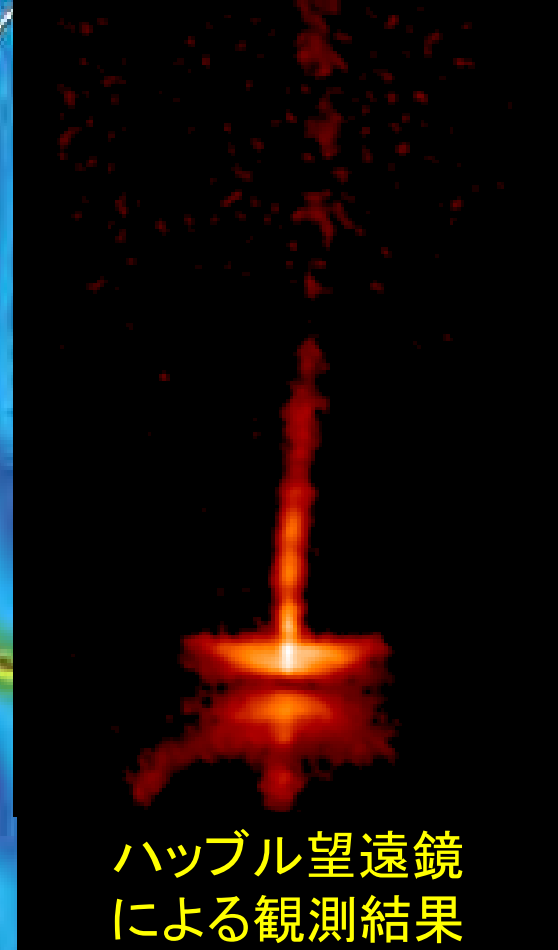
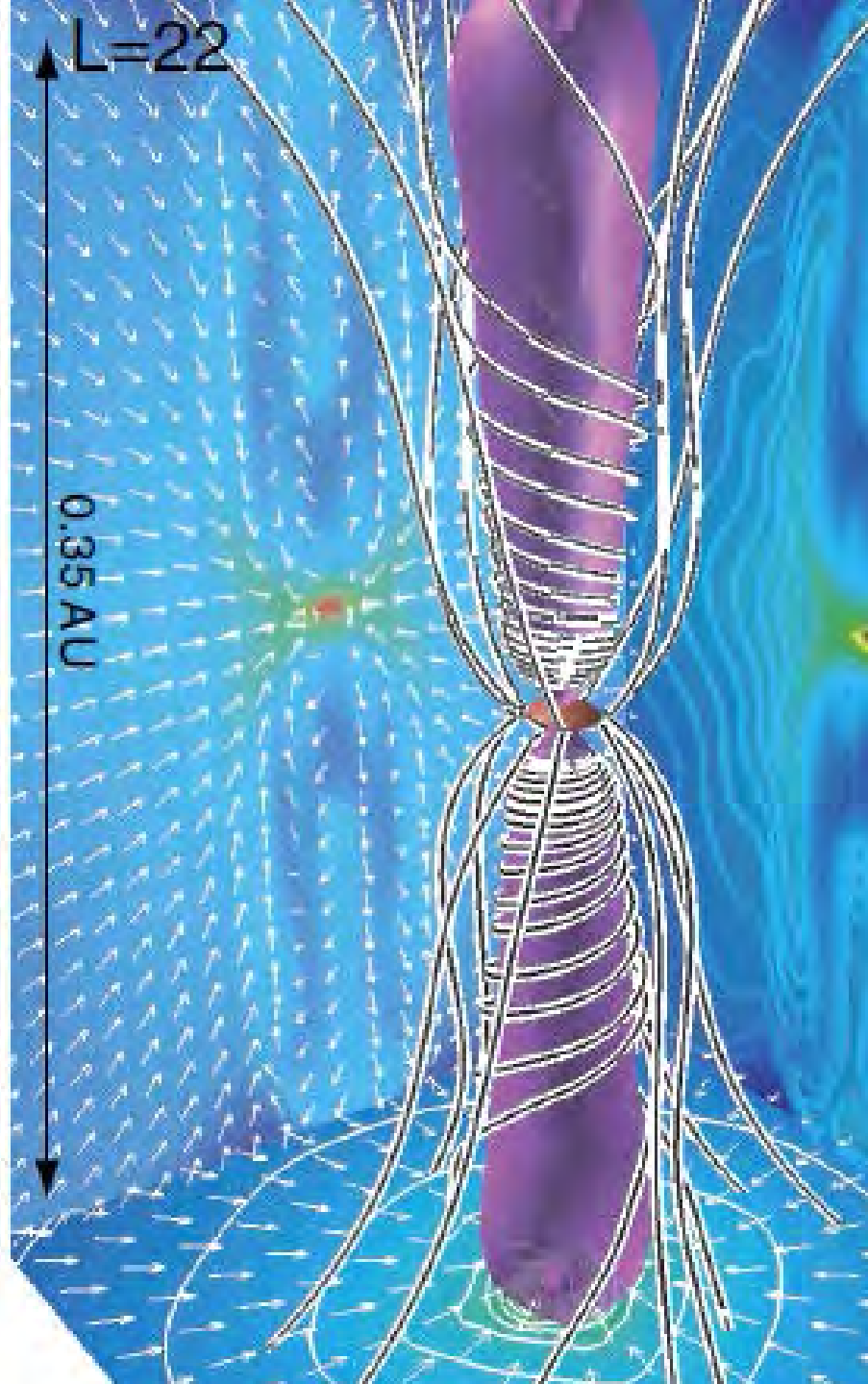


# 星が生まれる時

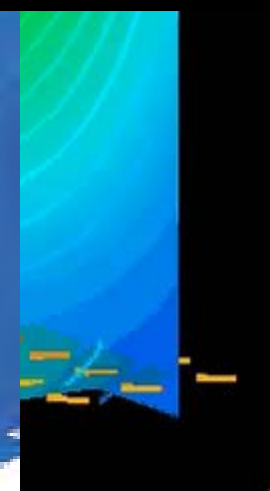
細く絞られた高速ジェット流の放出現象

速度 > 80km/s

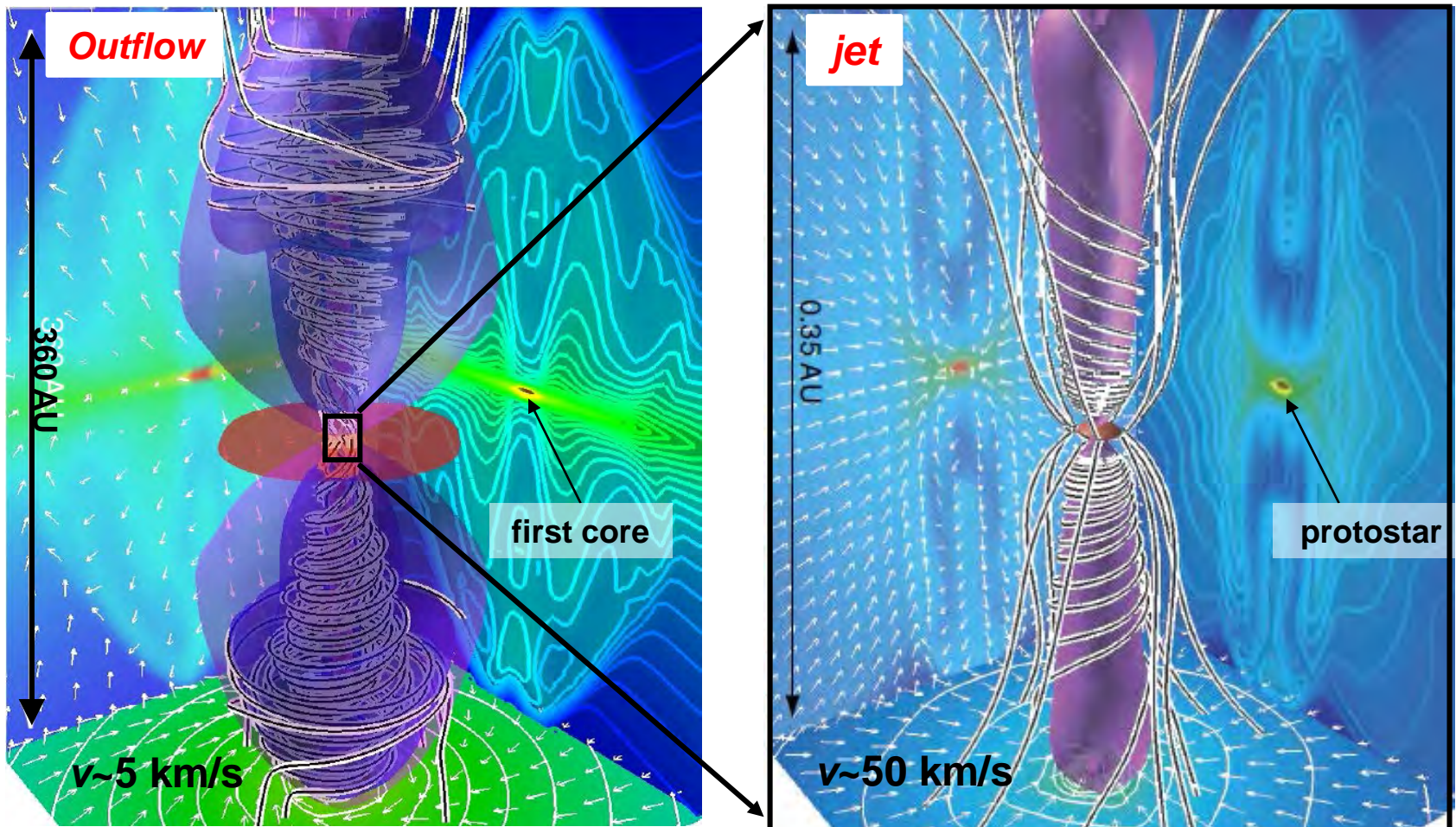
赤線は磁力線



ハッブル望遠鏡による観測結果



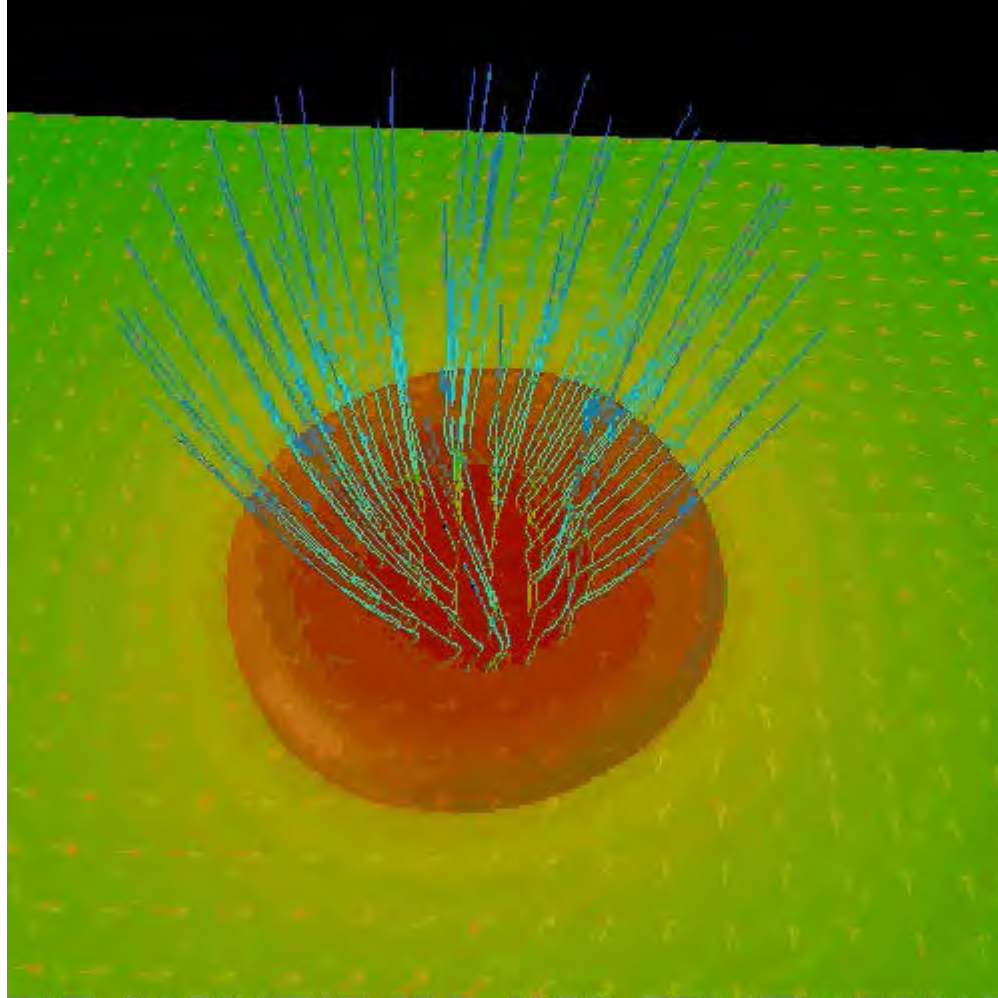
# 解明された原始星形成期



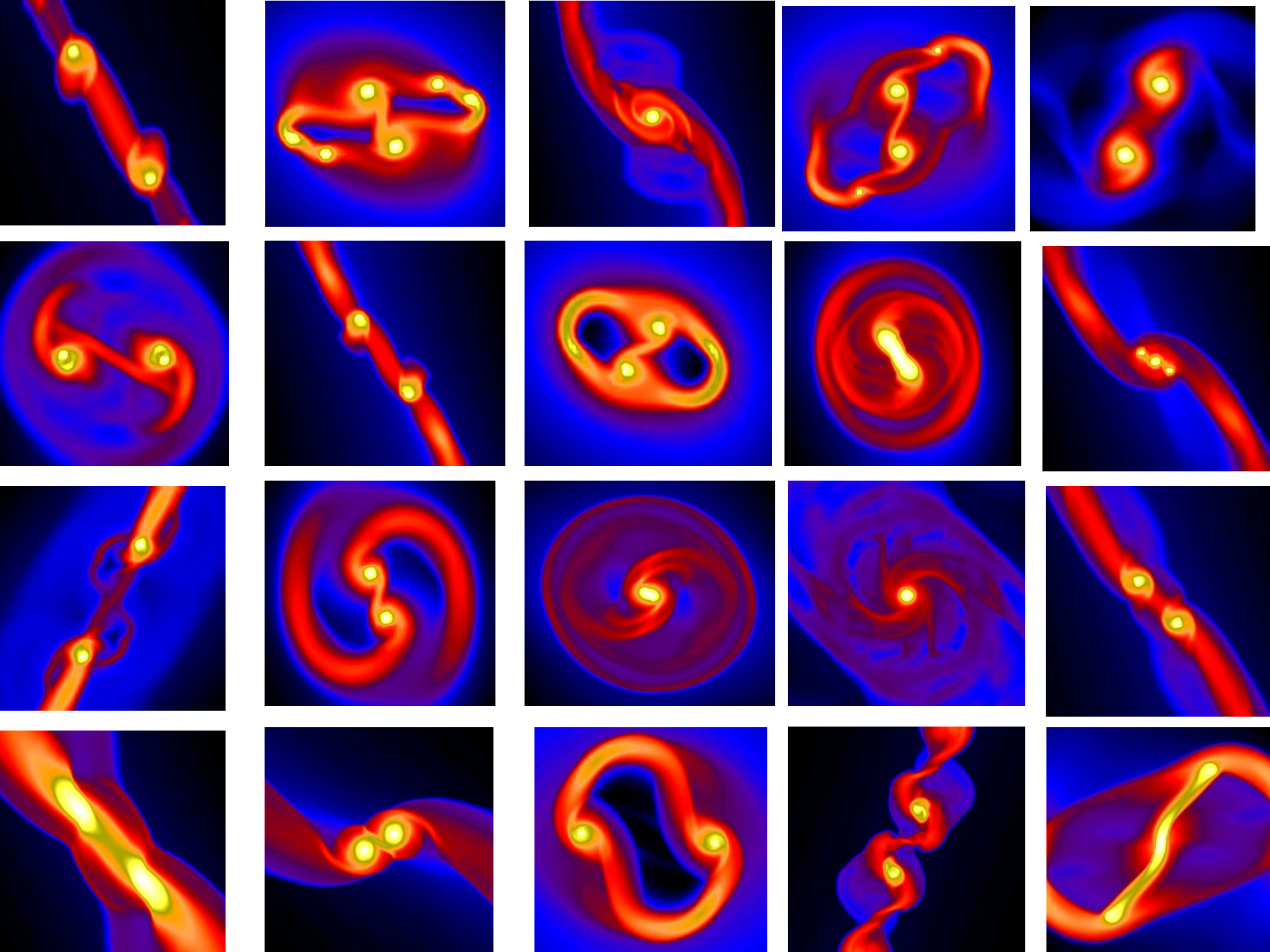
3D数値シミュレーション⇒2種類の回転ジェット放出

# 実際の星形成の様子

実は単独星よりも連星ができやすい。







# 連星頻度

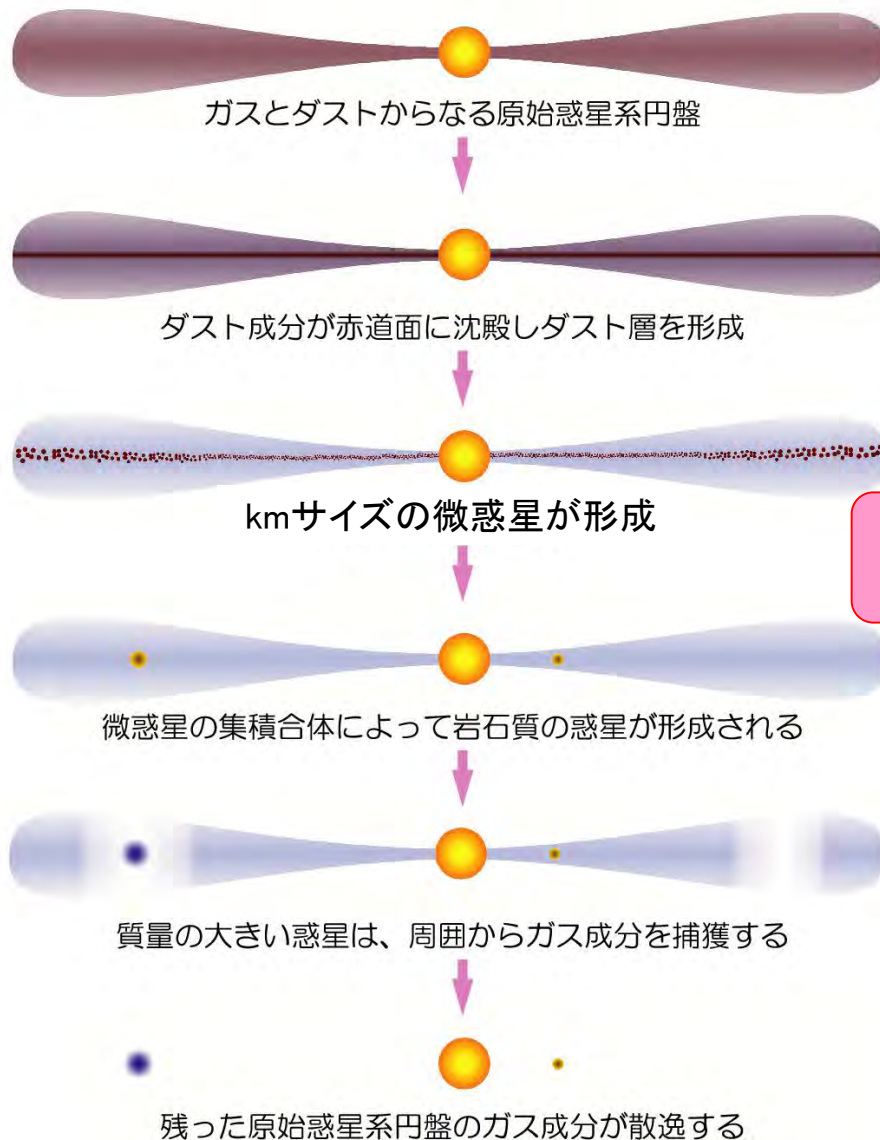
- 太陽のような単独星は一般的か？

単独星の数 < 連星の数

# 惑星形成の標準モデル

宇宙に存在している  
ガスのほとんどは**水素**  
と**ヘリウム**！

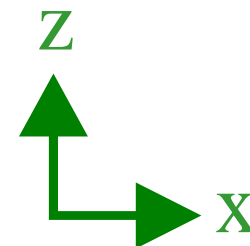
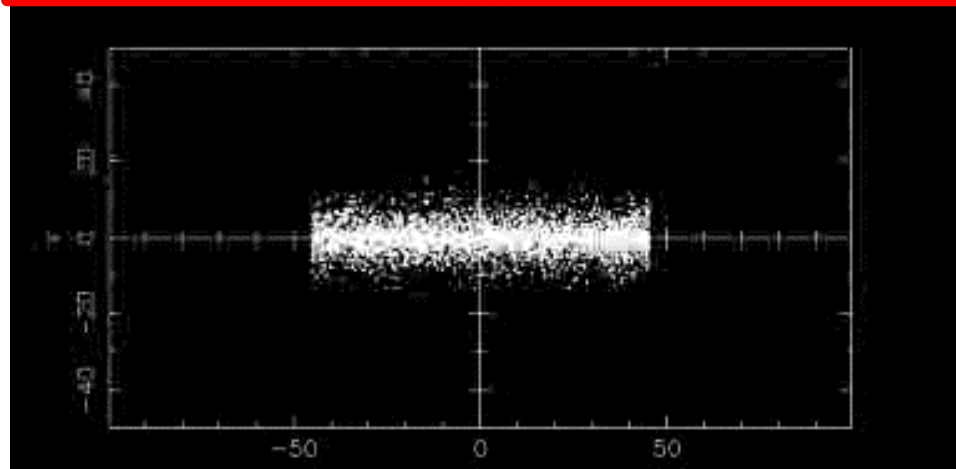
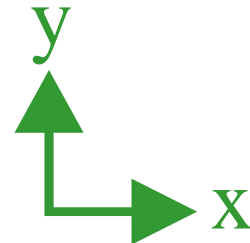
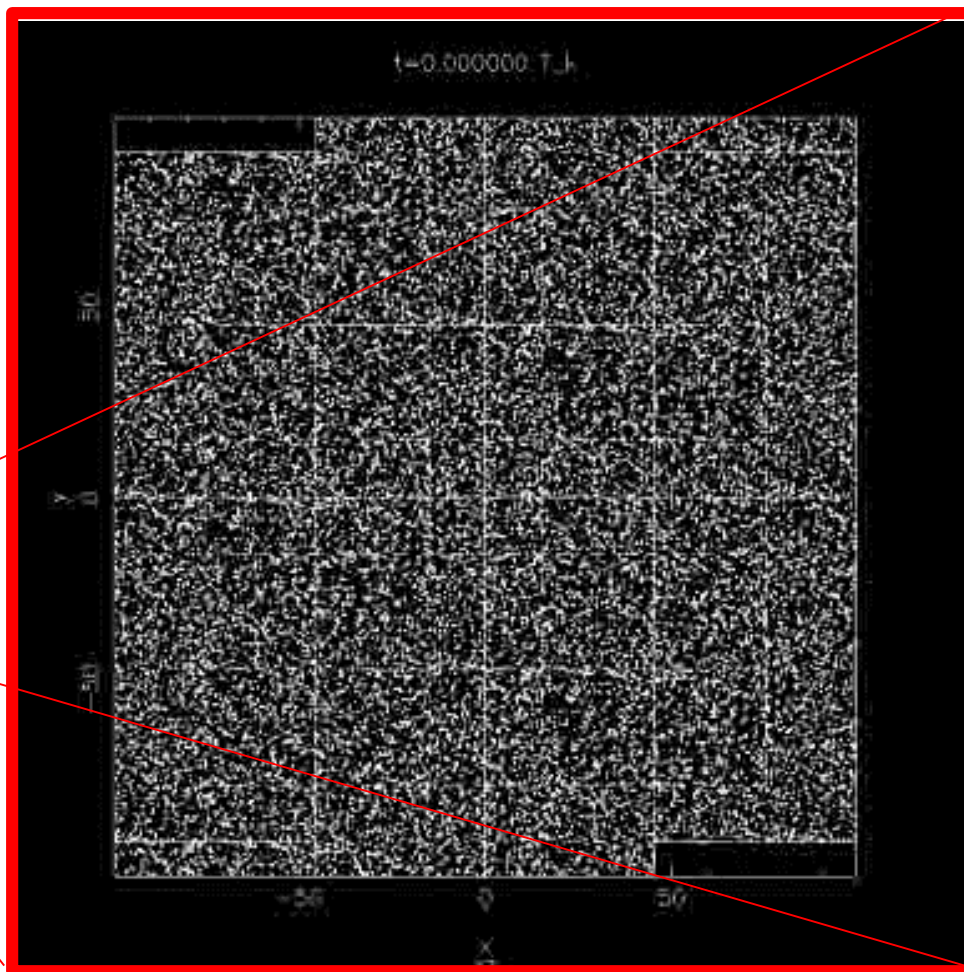
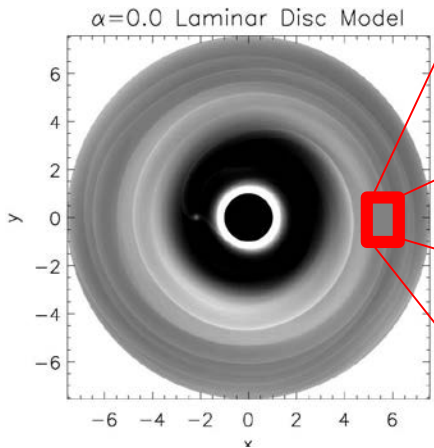
地球や生物の体を作る  
材料(酸素・炭素・  
鉄・シリコン等)は**全**  
**物質の数%程度**しか  
ない！



小惑星の材料



# 微惑星の形成過程



円盤面の一部  
の拡大図

# 主要な Trans-Neptunian Objects (海王星以遠天体)

冥王星:

1930年に発見された海王星以遠天体。  
2006年8月24日、国際天文学連合総会でdwarf planet (仮訳: 矮惑星)に分類される。

カロン:

冥王星の衛星



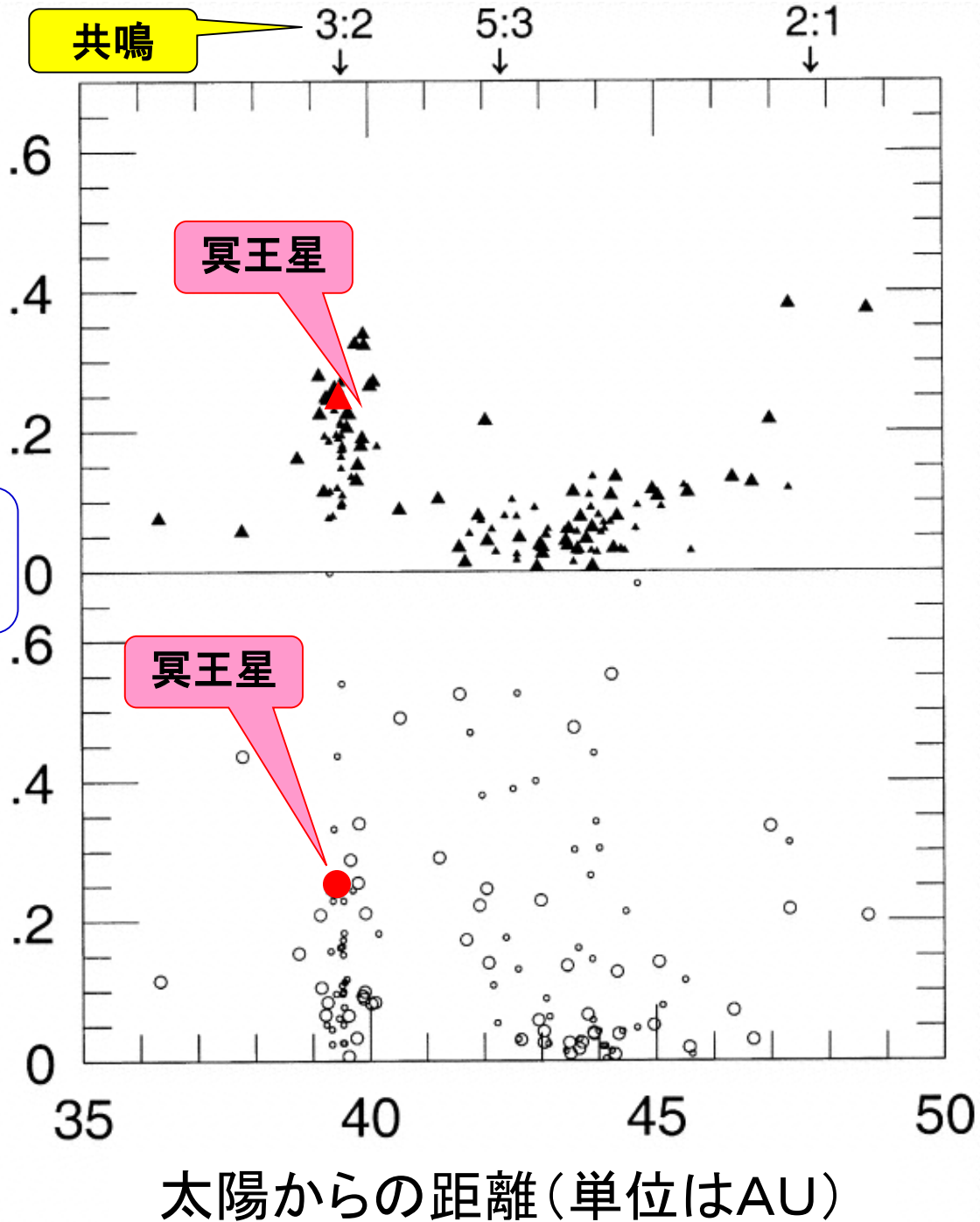
# Trans-Neptunian Objects (TNOs:海王星以遠天体)

冥王星は数多いTNOsの一つにすぎない。

過去に海王星が内側から外側に移動したとすると、TNOsの分布をよく説明する。

楕円軌道の離心率

黄道面からの傾き





# 惑星形成シナリオの2つの困難

1. 塵粒子が沈殿できない！

沈殿すると乱流が発生して攪乱

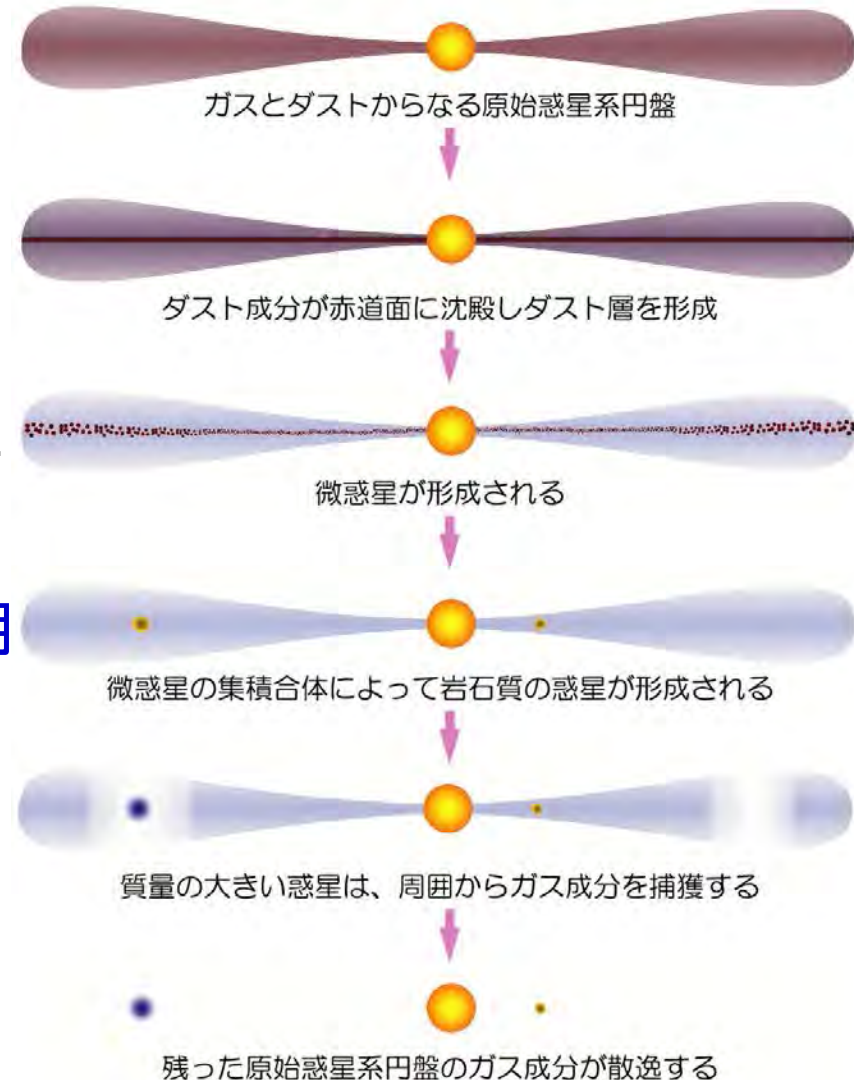
→ 微惑星ができない！

2. もし、原始惑星ができたとしても、時間をかけて中心星に落下する！

質量の大きなガス円盤との相互作用

→ 惑星ができてでも失われる！

惑星系形成の標準的なシナリオ（京都モデル）



# これまでの惑星形成理論は正しいのか？

1970年代 標準モデル(京都モデル)が生まれる

1980年代 電波天文学により星形成の現場が  
観測される

1990年代 原始惑星系円盤が直接観測される

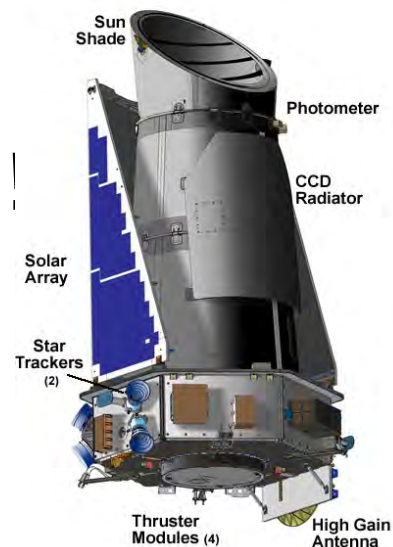
1995年 系外惑星の発見

2009年 ケプラー宇宙望遠鏡打上げ

現在 発見された系外惑星は**2千個以上**

惑星形成論は急速な展開期

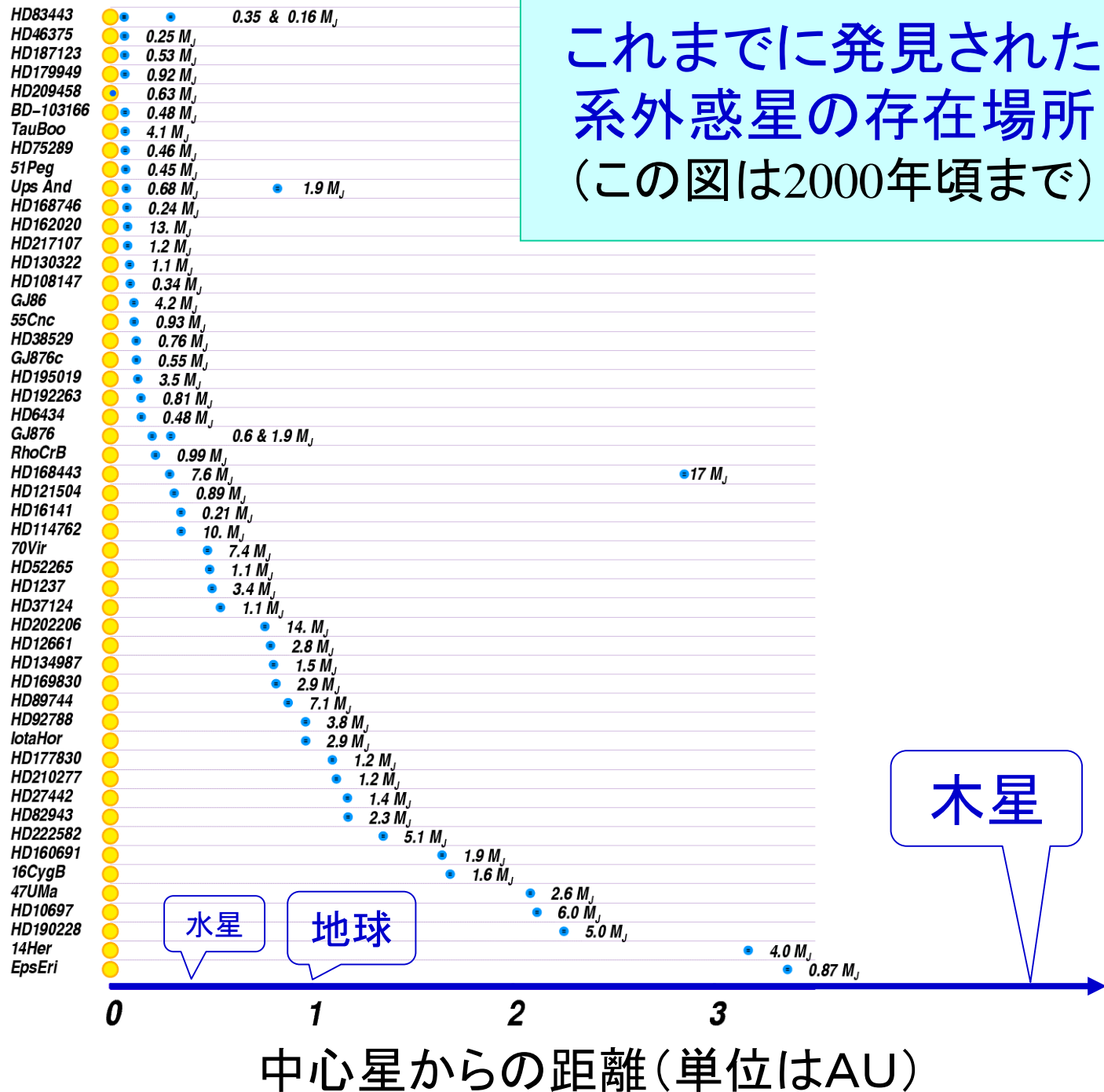
を迎えている！



検出された系外惑星の数は、既に2千個以上

しかも、そのほとんどは太陽系の姿とはかなり違う！

これまでに発見された系外惑星の存在場所 (この図は2000年頃まで)



水星

地球

木星

中心星からの距離 (単位はAU)



# ベガ型星の周りにデブリ円盤を発見

画架座β星

(β Pictoris)

織姫星(ベガ)

と似た星の周りに

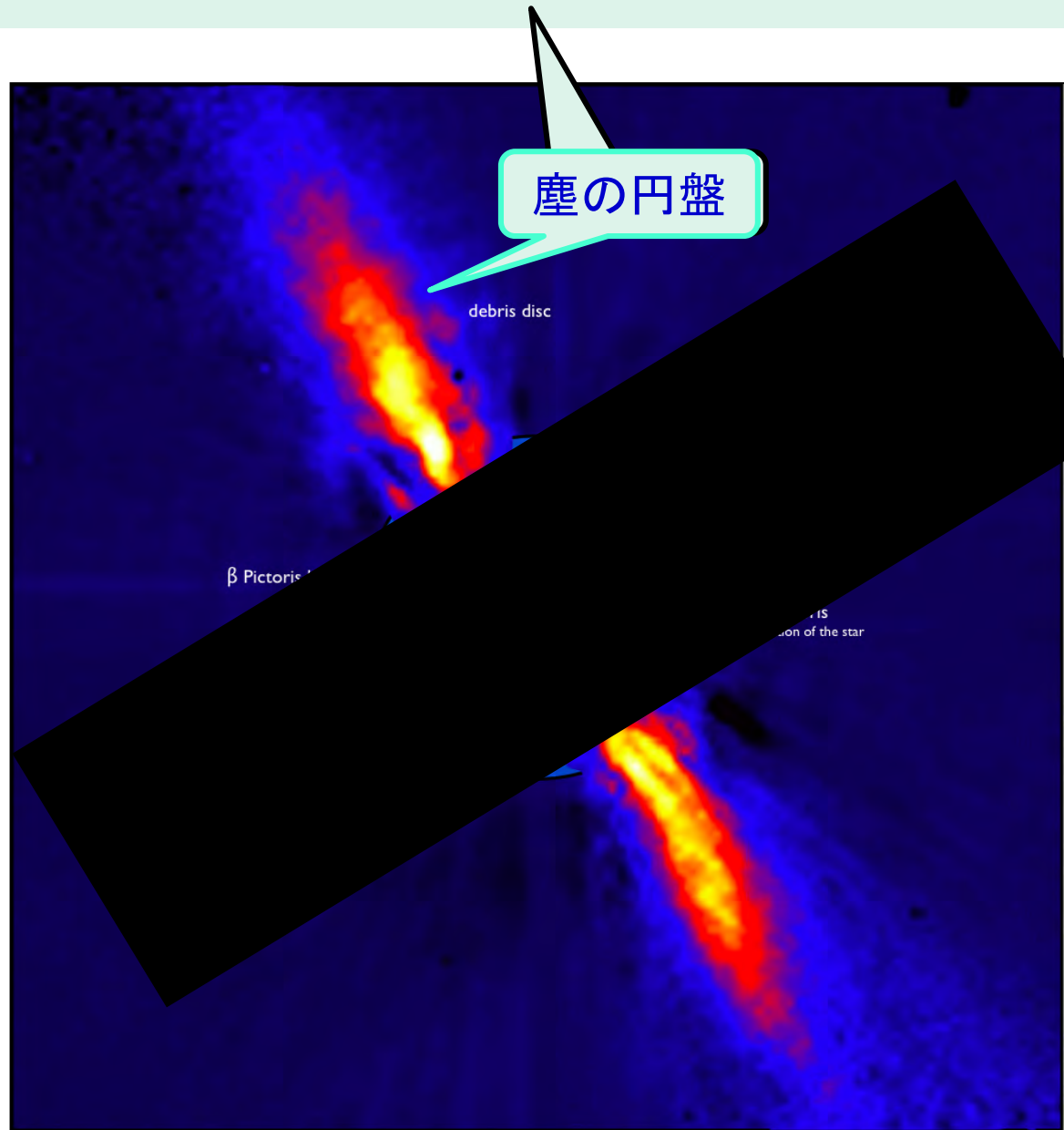
**塵の円盤**を発見

(Smith & Terrile 1984)

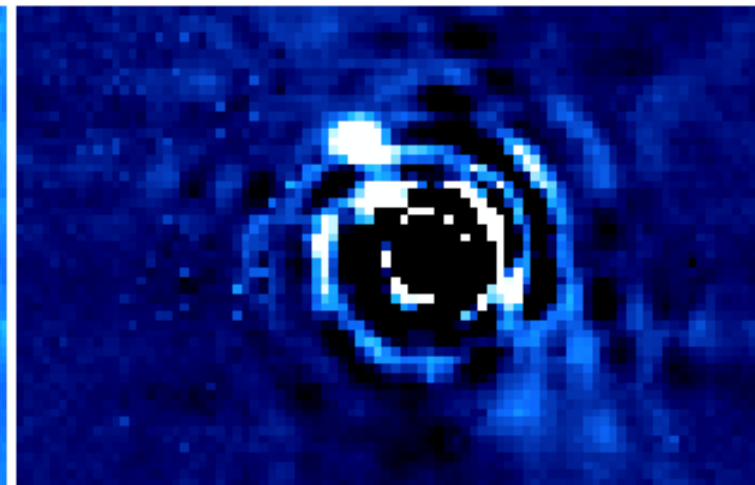
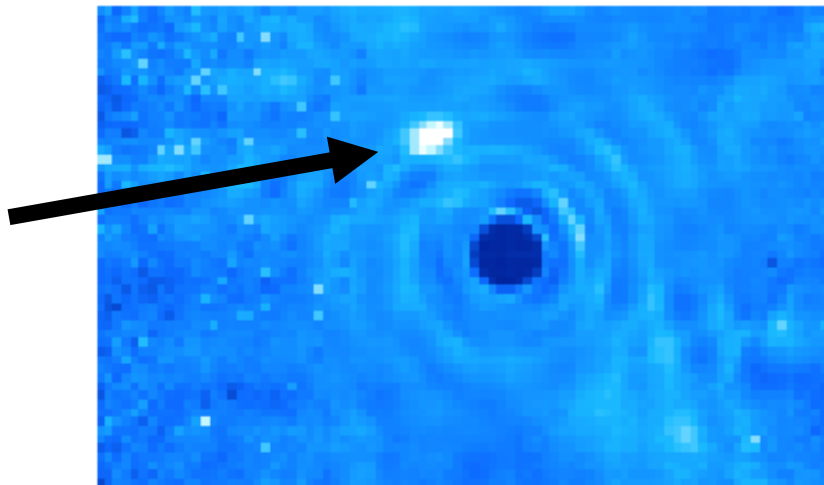
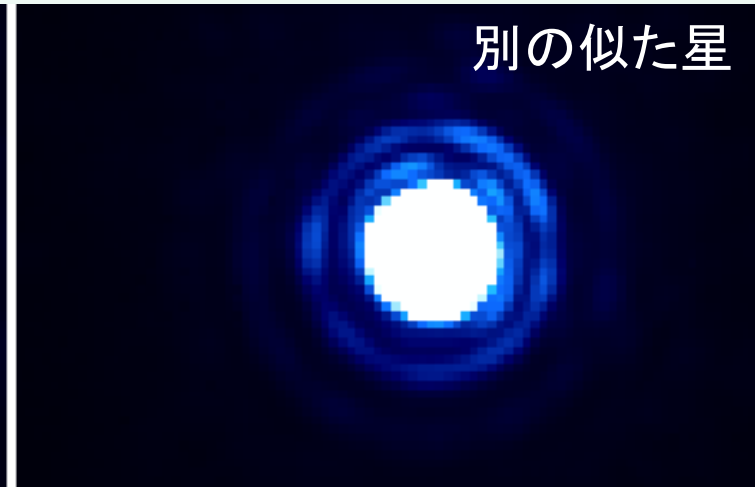
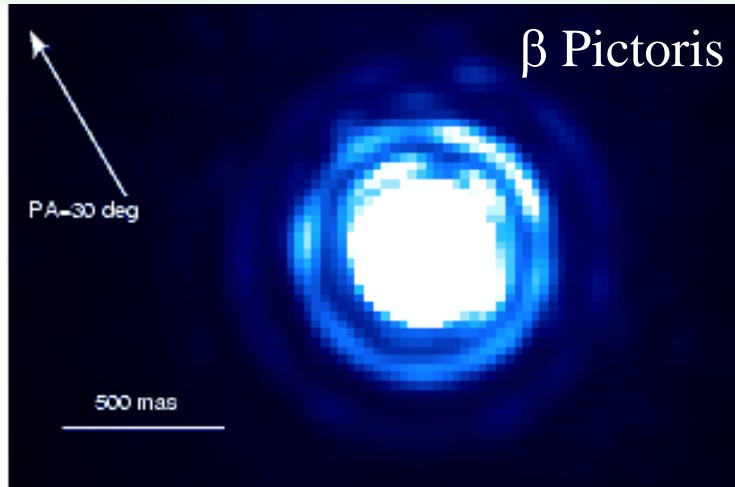
→このような星を

**ベガ型星**

と総称する



# 中心星近くをもっと詳しくみると、



惑星が発見された！ (Lagrange et al. 2008)

$M_* \sim 1.8M_{\odot}$ , Age  $\sim 12$  Myr,  $R \sim 8$  AU,  $M_p \sim 8M_J$

# ベガ型星の周りにデブリ円盤を発見

画架座β星

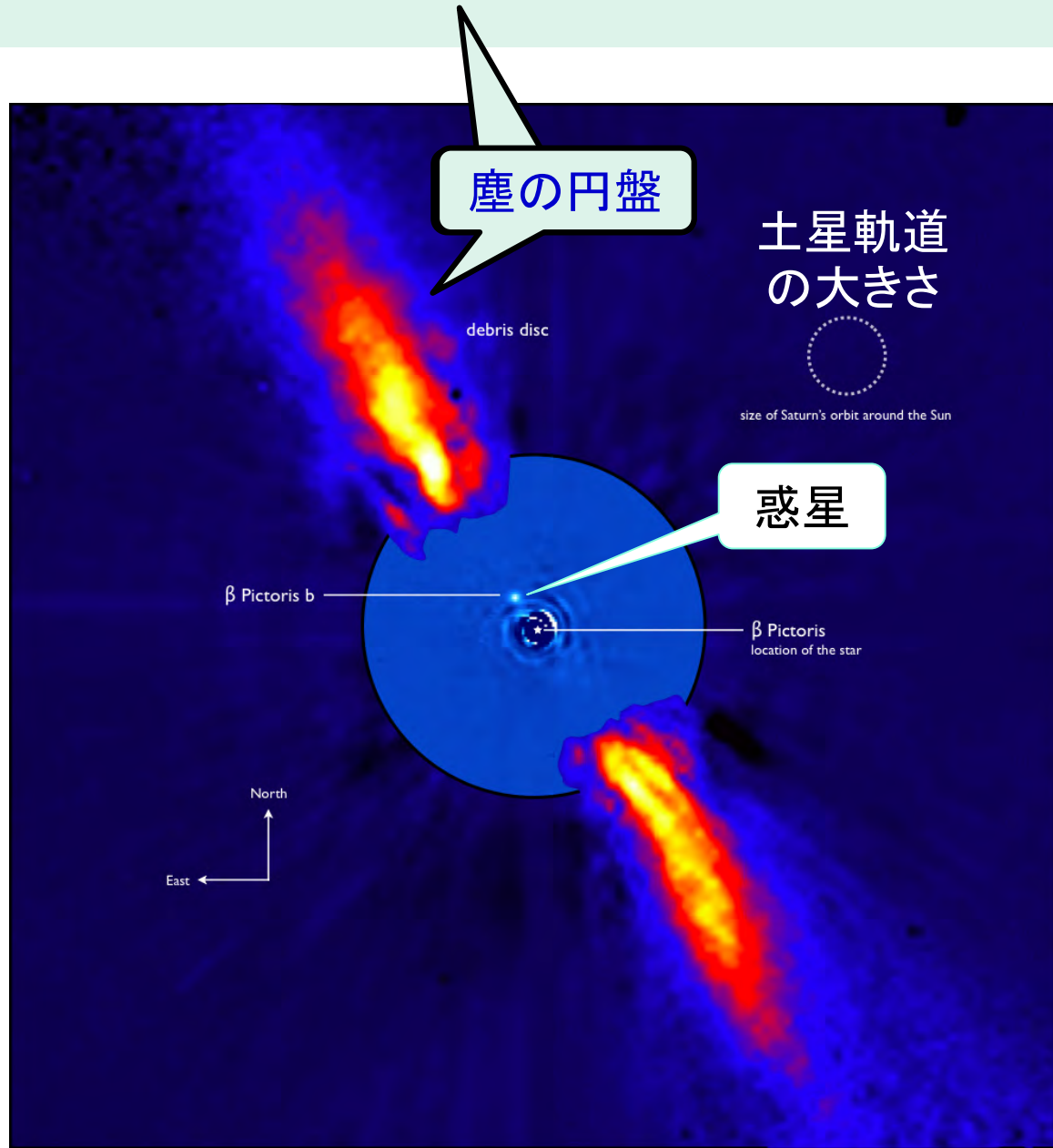
(β Pictoris)

織姫星(ベガ)

と似た塵の円盤を  
持つ星の周りに

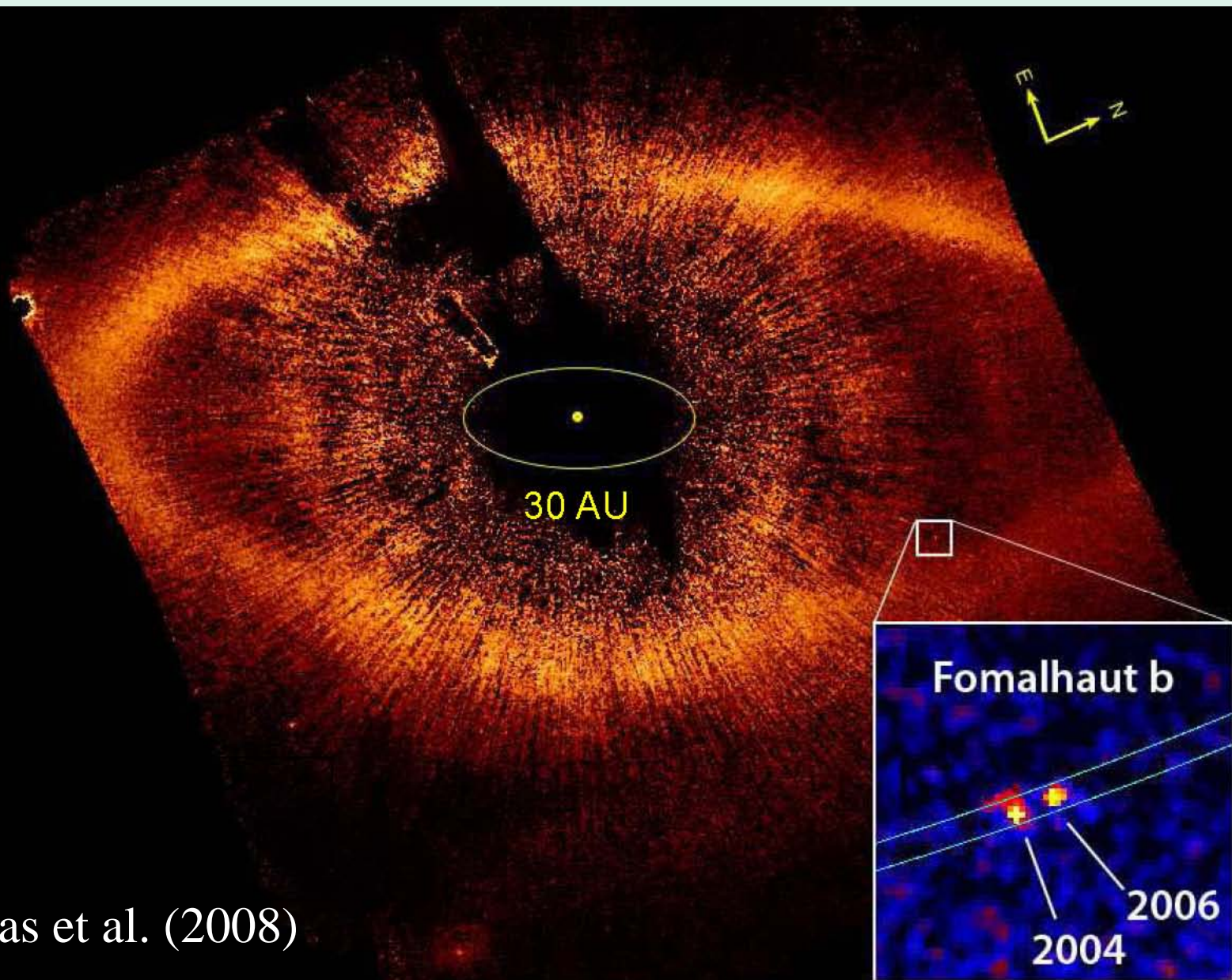
惑星を発見

→ ベガ型星は  
惑星を持つもの  
がある.





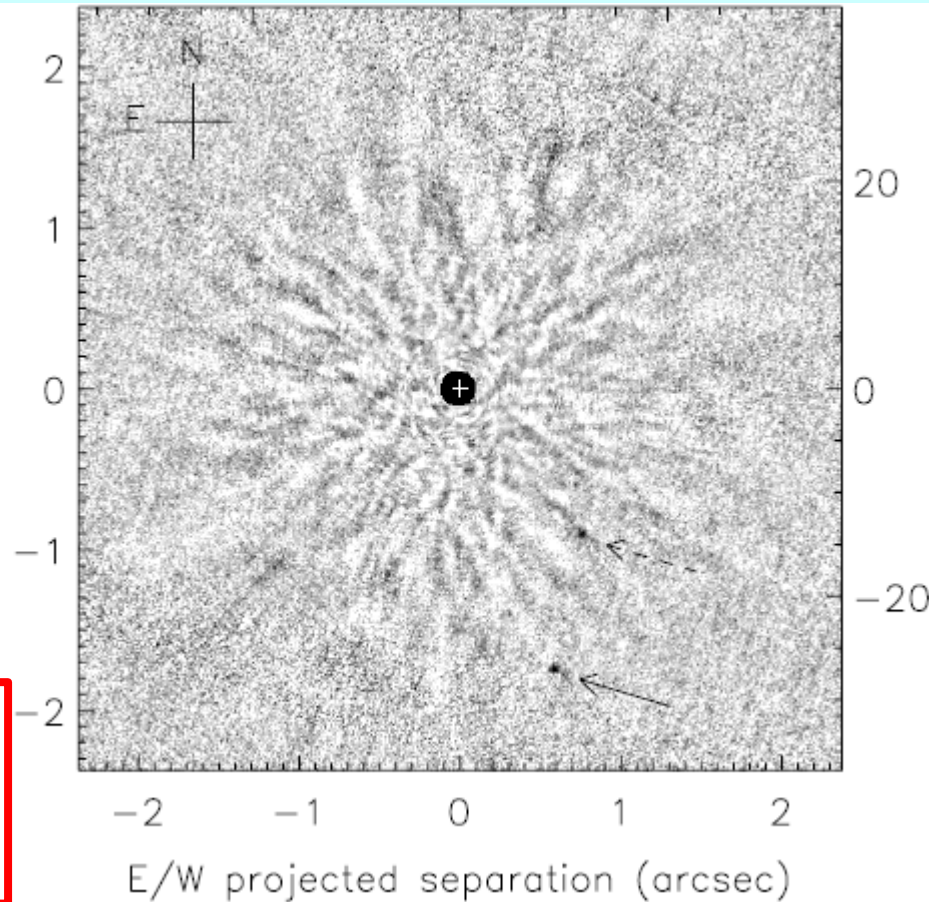
# 別のベガ型星(Fomalhaut)のデブリ円盤



Kalas et al. (2008)

# さらに中心星から遠く離れた惑星の発見

- Kalas et al. (2008)
  - $R=98\text{AU}$
- Marois et al. (2008)
  - $R=24, 38, 68\text{AU}$
- Lagrange et al. (2008)
  - $R=8\text{AU}$
- **Thalmann et al. (2009)**
  - GJ758,  $R = 35, 54.5\text{AU}$



すばる望遠鏡による観測

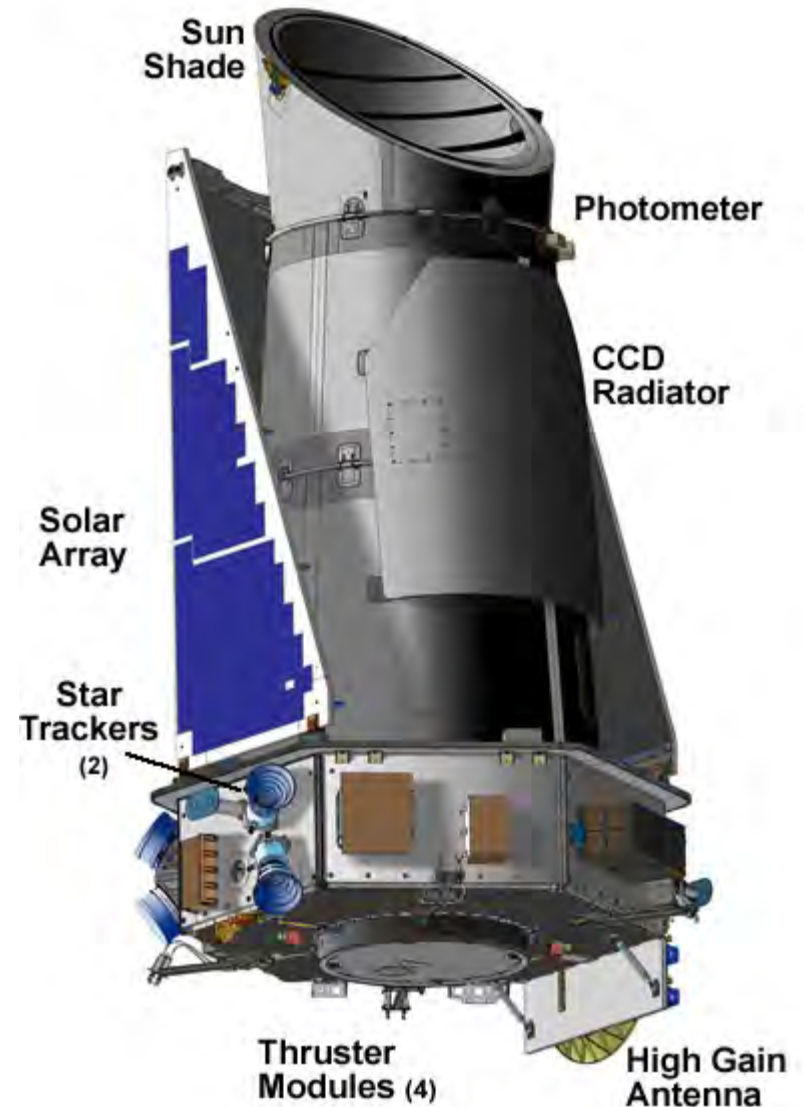
こんなに遠くでは標準惑星形成理論では形成が**困難**である。

# ケプラー衛星プロジェクト

地球型の太陽系外惑星を探すNASAの望遠鏡(約1トン)

2009年3月6日打上

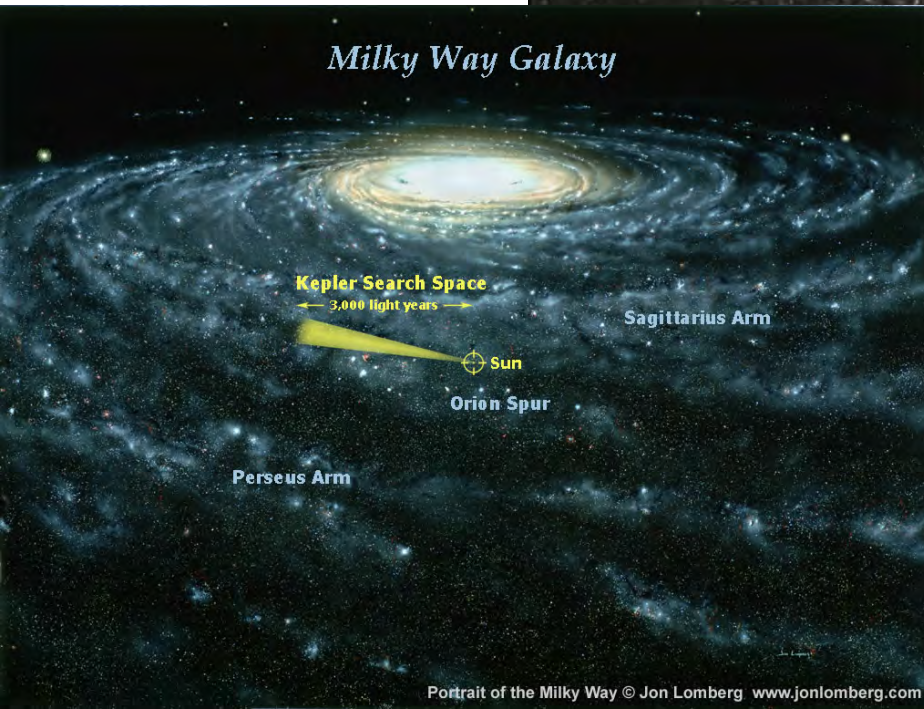
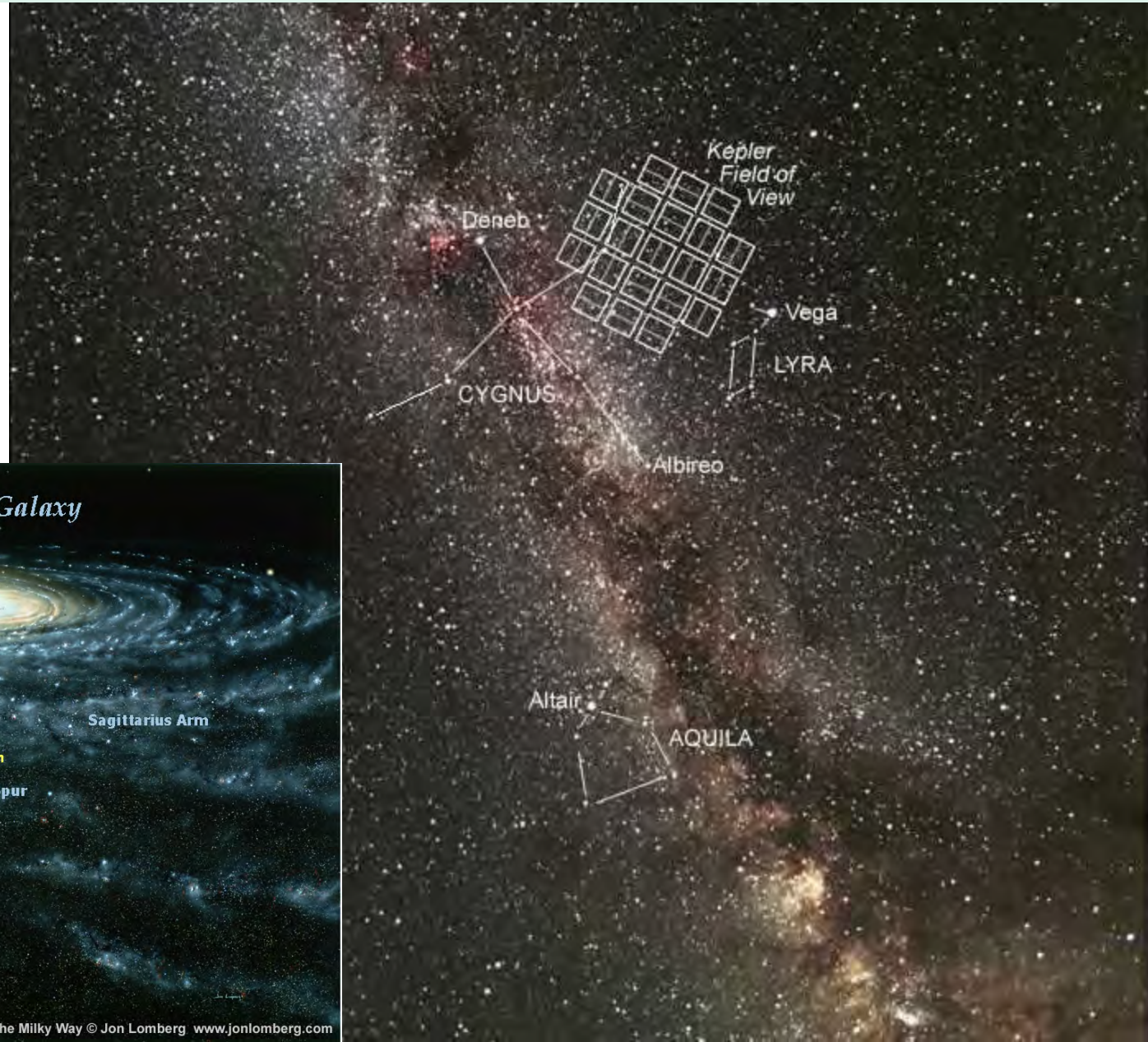
3年半にわたって10万個の恒星の明るさの時間変化を測定





# ケプラー衛星プロジェクト(続き)

ターゲット領域  
白鳥座の方向



# ケプラー衛星が見つけた惑星

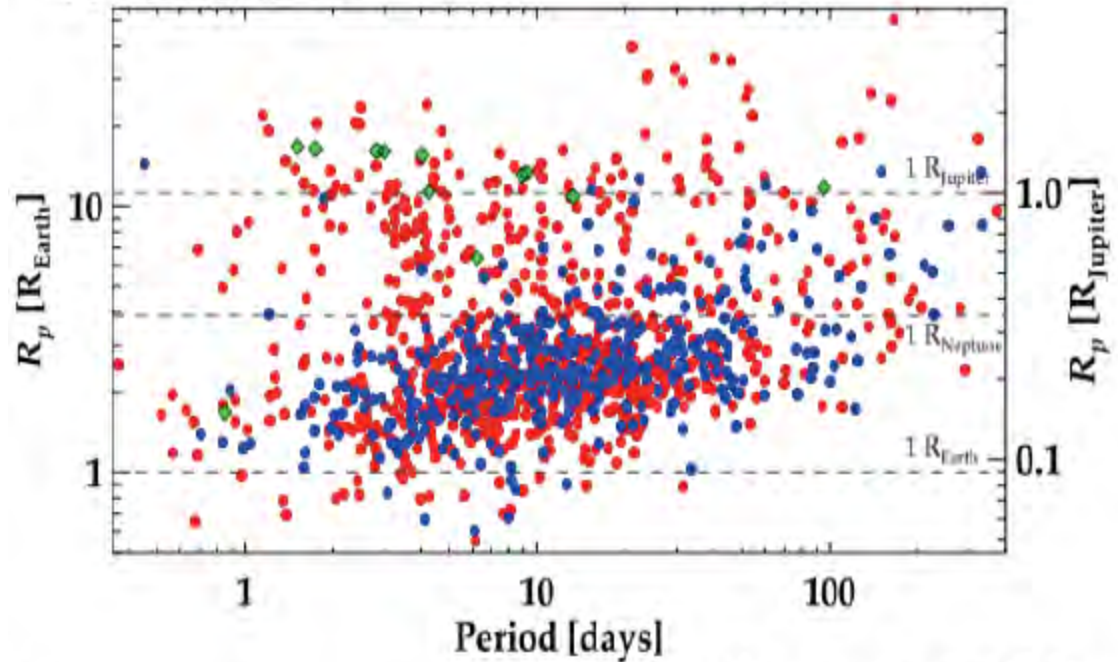
4千個ほどの候補  
天体

巨大ガス惑星は  
単独？

岩石惑星は  
複数惑星系？

Radius-Period Distribution of Kepler Candidate

赤: 単独惑星  
青: 複数惑星



Latham et al. 2011



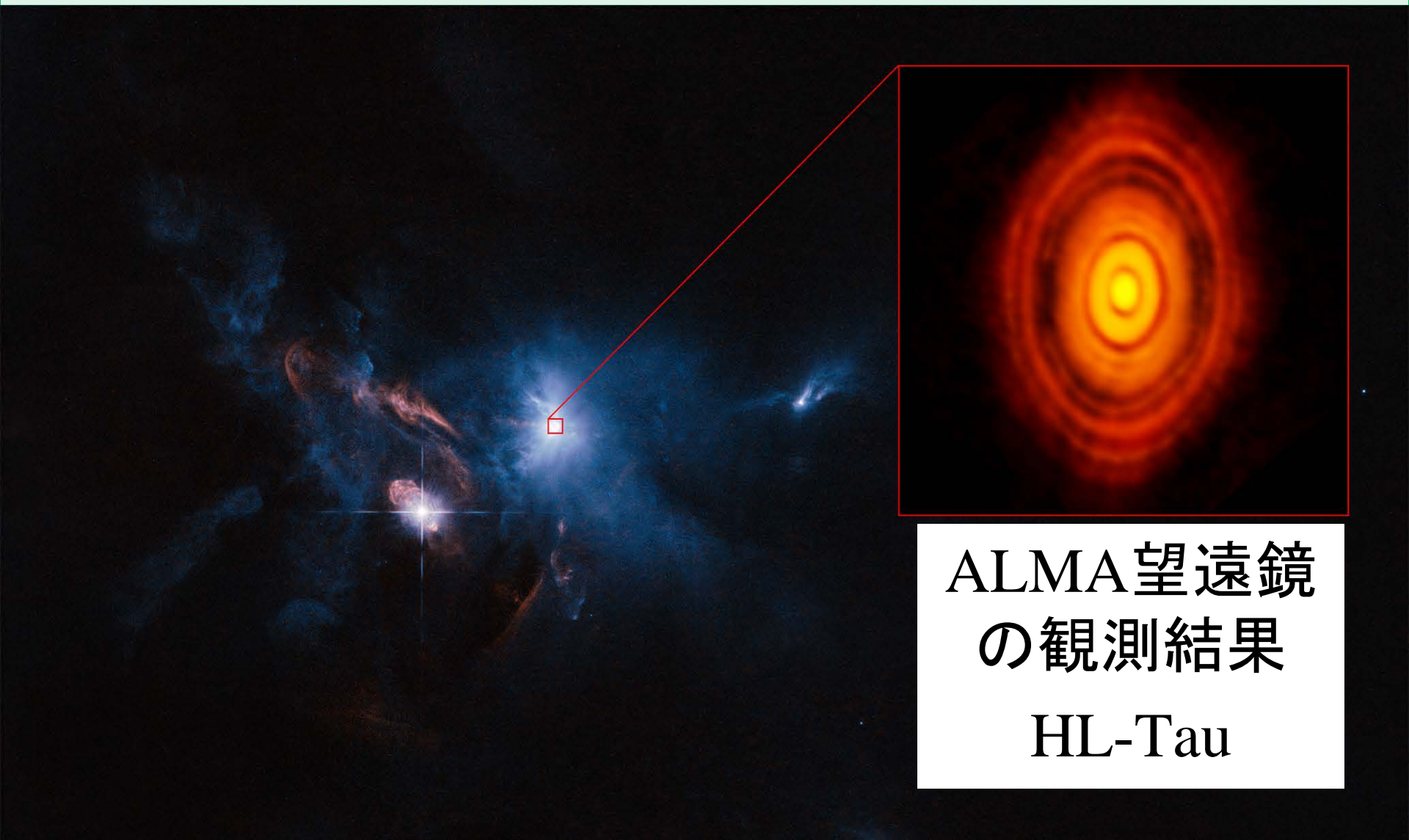
# もっと新しい発見

ALMA望遠鏡＝日米欧が南米チリに建設したある電波干渉計





# 複数リング構造の大発見(2014年11月)



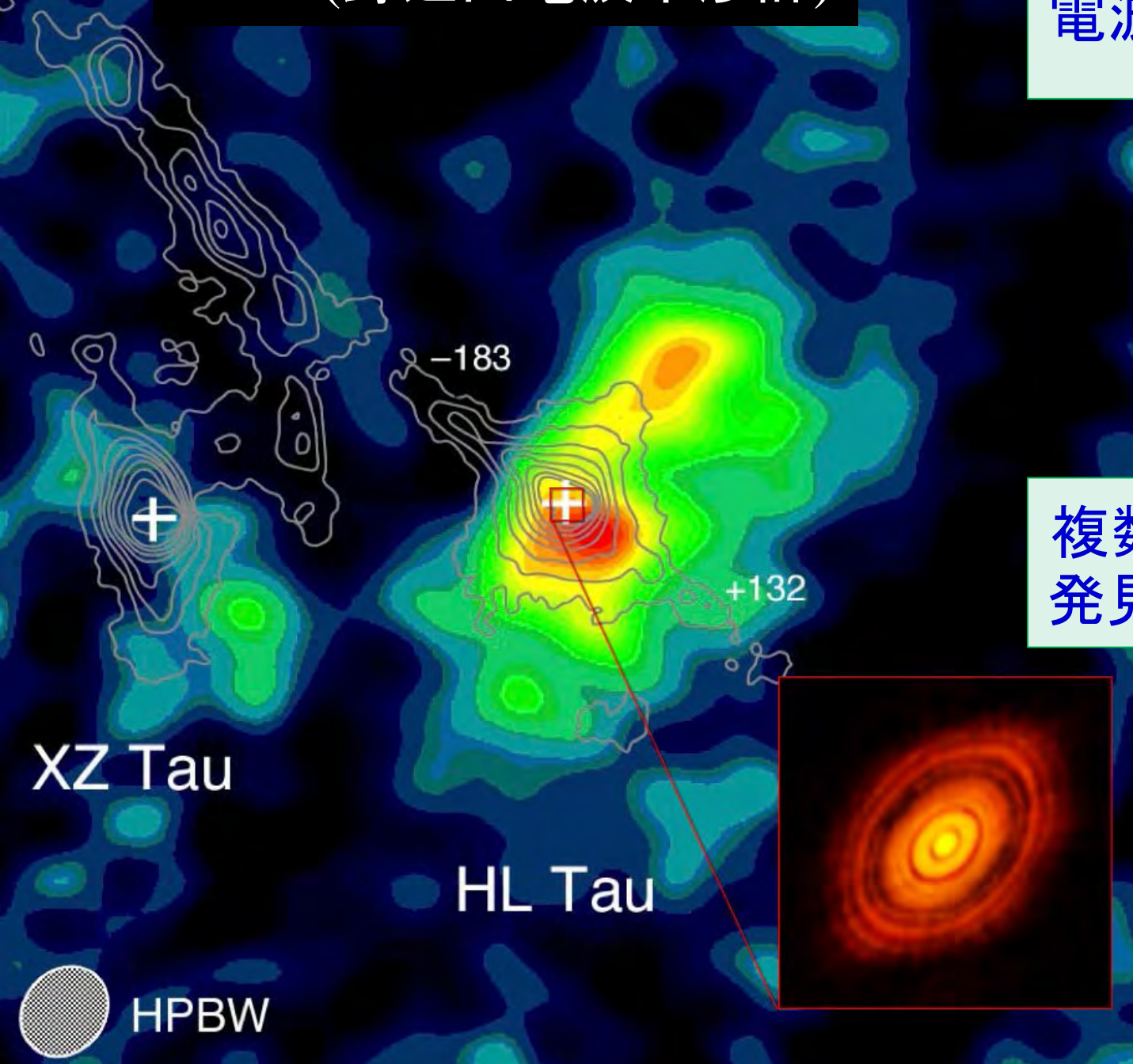
ALMA望遠鏡  
の観測結果  
HL-Tau

星形成領域の光学・赤外線望遠鏡による写真

-210

# NMA (野辺山電波干渉計)

電波望遠鏡による



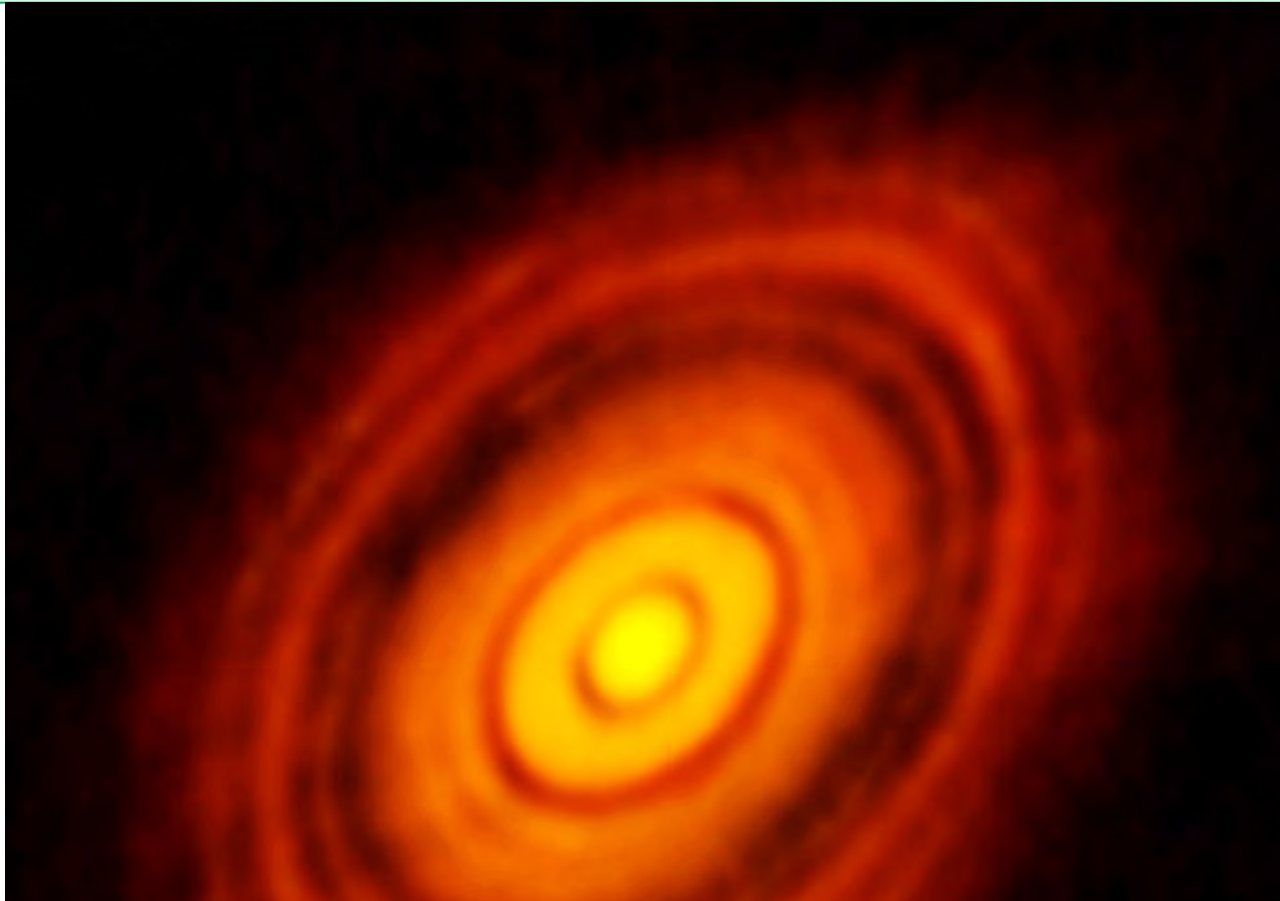
複数リング構造の  
発見(2014年11月)

XZ Tau

HL Tau

HPBW

# 複数リング構造の発見(2014年11月)



ALMAが見た  
縞々模様の  
幅は約10AU



# 複数リング構造の予言(2014年9月)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 794:55 (7pp), 2014 October 10

doi:10.1088/0004-637X/794/1/55

© 2014. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

## TWO-COMPONENT SECULAR GRAVITATIONAL INSTABILITY IN A PROTOPLANETARY DISK: A POSSIBLE MECHANISM FOR CREATING RING-LIKE STRUCTURES

SANEMICHI Z. TAKAHASHI<sup>1,2</sup> AND SHU-ICHIRO INUTSUKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602,

Japan; [takahashi.sanemichi@a.mbox.nagoya-u.ac.jp](mailto:takahashi.sanemichi@a.mbox.nagoya-u.ac.jp), [inutsuka@nagoya-u.jp](mailto:inutsuka@nagoya-u.jp)

<sup>2</sup> Department of Physics, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku,

Kyoto 606-8502, Japan; [sanemichi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:sanemichi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp)

*Received 2013 December 25; accepted 2014 July 28; published 2014 September 24*

### 4.3. Ring Structure Formation in Protoplanetary Disks

Observations of protoplanetary disks show that ring structures form at a radius of about 100 AU. We evaluate the most unstable wavelength and the growth timescale of the instability at a radius of 100 AU for the case of a  $1 M_{\odot}$  central star, a temperature of 28 K, and a dust stopping time  $t_{\text{stop}} = t_{\text{stop, crit}} = 1.3 \times 10^{-1} \Omega^{-1}$ . We assume the case  $Q = 3$ , corresponding to a marginally gravitationally stable disk, a high dust-to-gas mass ratio,  $\epsilon = 0.1$ , and  $\alpha = 4 \times 10^{-4}$ . These parameters correspond to  $\eta = 10^{-2}$ . Then, the most unstable wavelength is about **13 AU** and the growth timescale is about  $2 \times 10^4$  yr. These results are consistent with observation because the disk lifetime is about  $10^6$  yr and the observed ring width is a few tens of AU. The dust radius that corresponds to a stopping time  $t_{\text{stop}} = 0.13 \Omega^{-1}$  in this disk is about 4 mm.

永年重力不安定性

ALMAのプレス・リ

リースの1カ月以上

前に出版済み

→ デブリ円盤の起

源を説明

# まとめ

- ジェットの放出 → 角運動量の放出  
→ 原始星の誕生
- 残った角運動量 →  
ガスとダストの原始惑星系円盤の形成  
→ その中で惑星形成
- 標準惑星形成理論の破綻
- 新しい惑星形成シナリオの台頭  
すばるやALMA望遠鏡による発見のラッシュ





# Integrated Scenario

- Binary Formation
  - Planet Formation in Circum-Stellar Disks?
  - Planet Formation in Circum-Binary Disks?
- Single Star Formation
  - With Early-Born Gaseous Planets
    - Rocky Planet Formation in Outer Region → **Hybrid Scenario**
  - Without Early-Born Gaseous Planets
    - **Classical Core-Accretion Scenario**
- Secular GI → Planet Formation in Outer Regions
  - Origins of Debris Disks?

**Planet Formation in Various Environments**