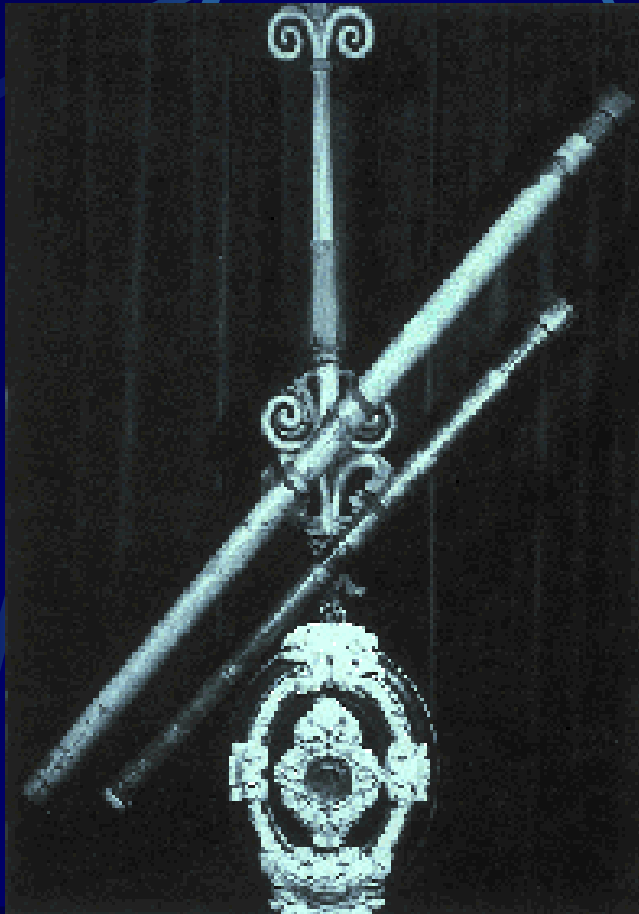


宇宙科学シンポジウム S6-04

# SPICAで探る太陽系

自然科学研究機構  
国立天文台 渡部潤一  
& SPICA SSSO Group

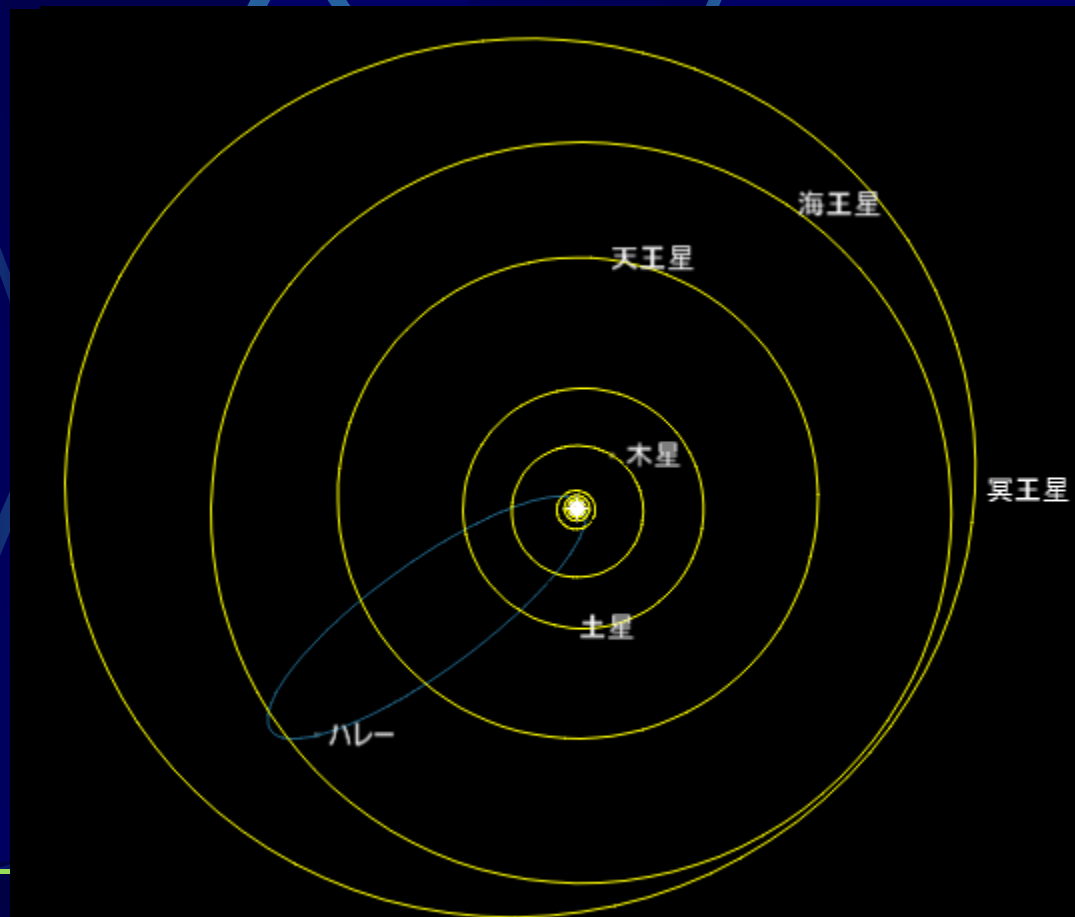
# 光学望遠鏡・技術革新によって 太陽系描像が大きく変遷



# 広がりゆく太陽系

一人類の宇宙を見る目：光学望遠鏡の発達と共に一

- 肉眼の時代
- 約 15 億 km 土星
- 天体望遠鏡 (1781)
- 約 30 億 km 天王星
- 天体力学・軌道計算 (1846)
- 約 45 億 km 海王星
- 天体写真技術 (1930)
- 約 60 億 km 冥王星

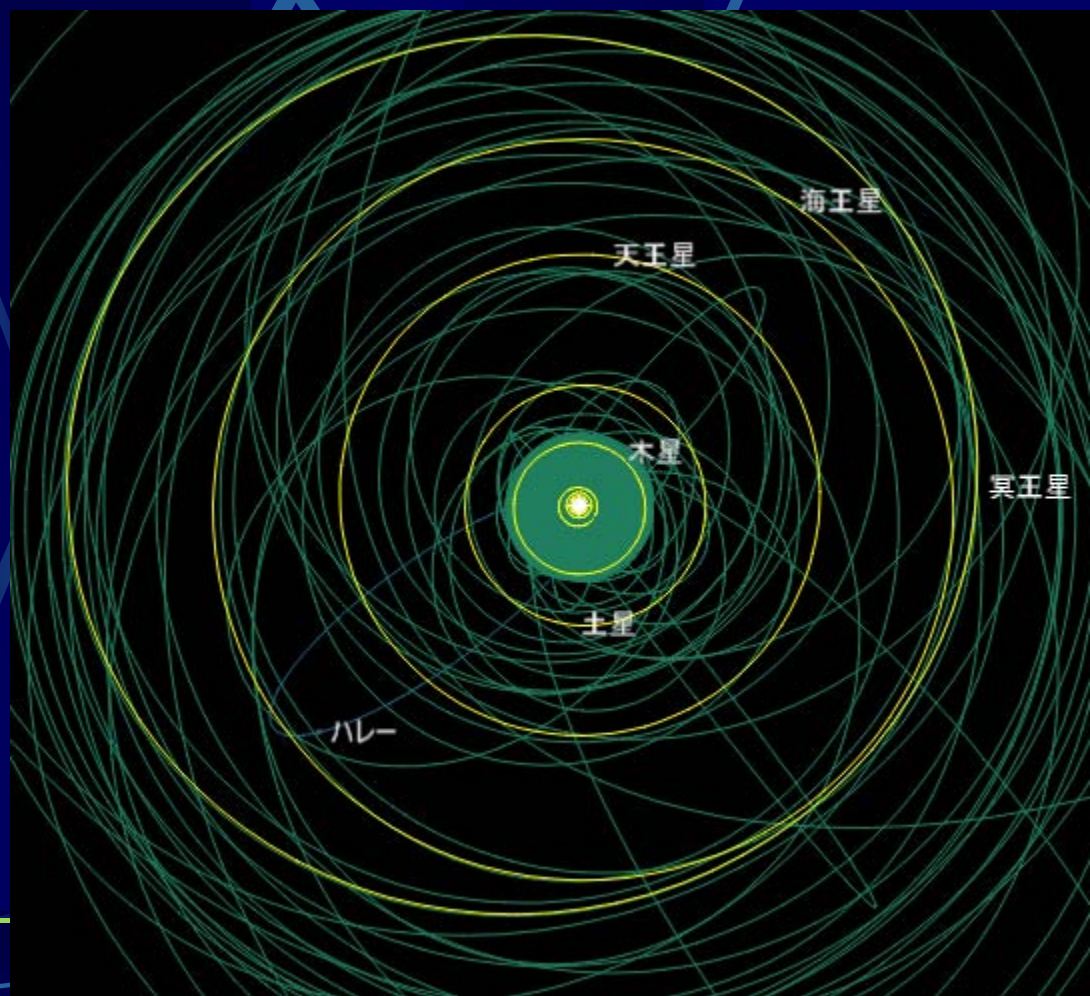




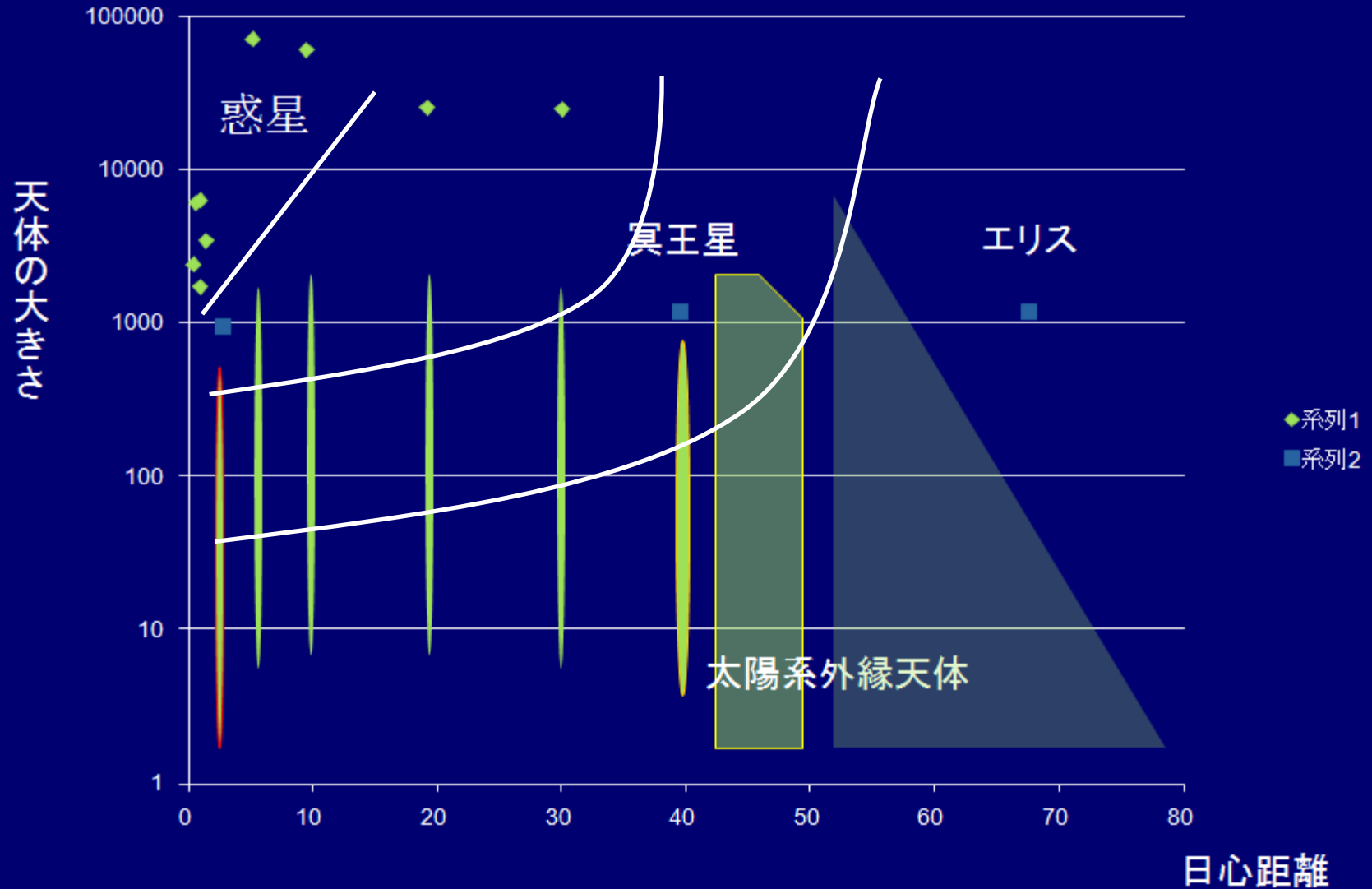
# 深まりゆく太陽系

一人類の宇宙を見る目：光学望遠鏡の発達と共に一

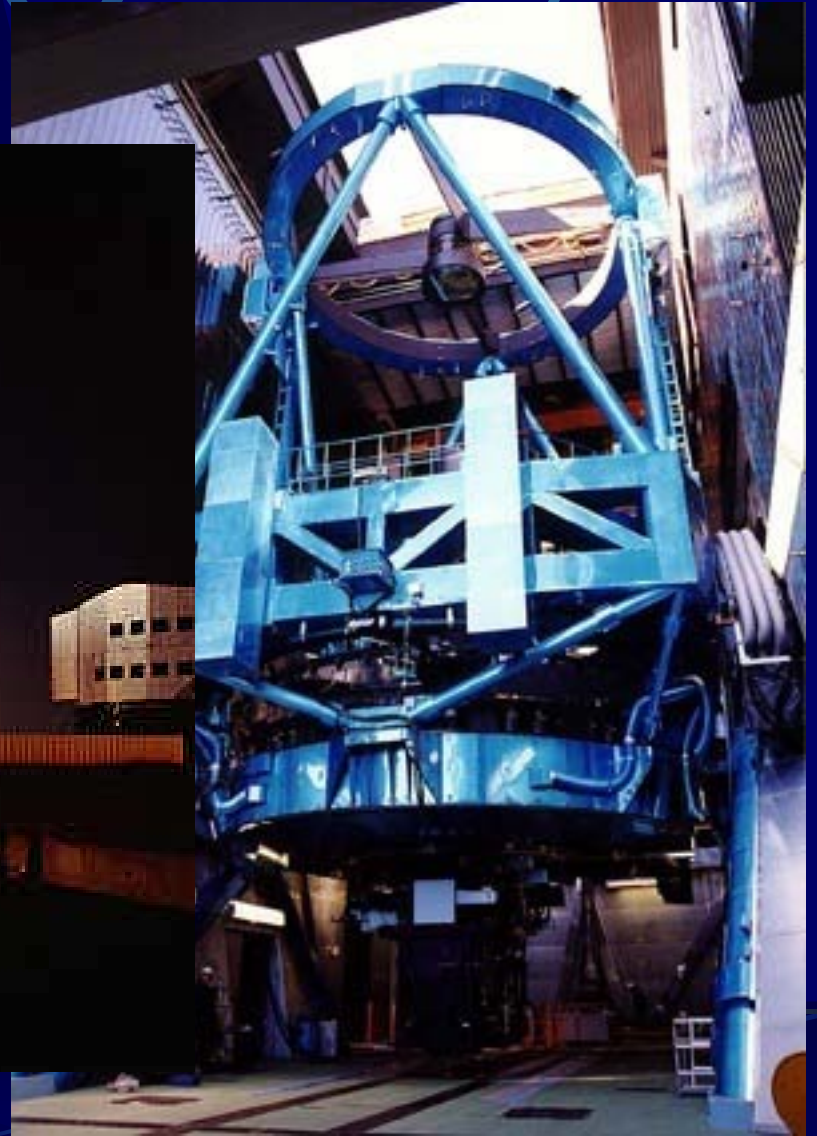
- 肉眼の時代
- 直径3500km 月
- 天体望遠鏡 (1610)
- 直径3000km ガリレオ衛星
- 天体望遠鏡 (1801)
- 直径約1000km 小惑星
- 直径<100km 小惑星
- 天体撮像技術 (20世紀)
- 約2400km 冥王星
- (太陽系外縁天体)



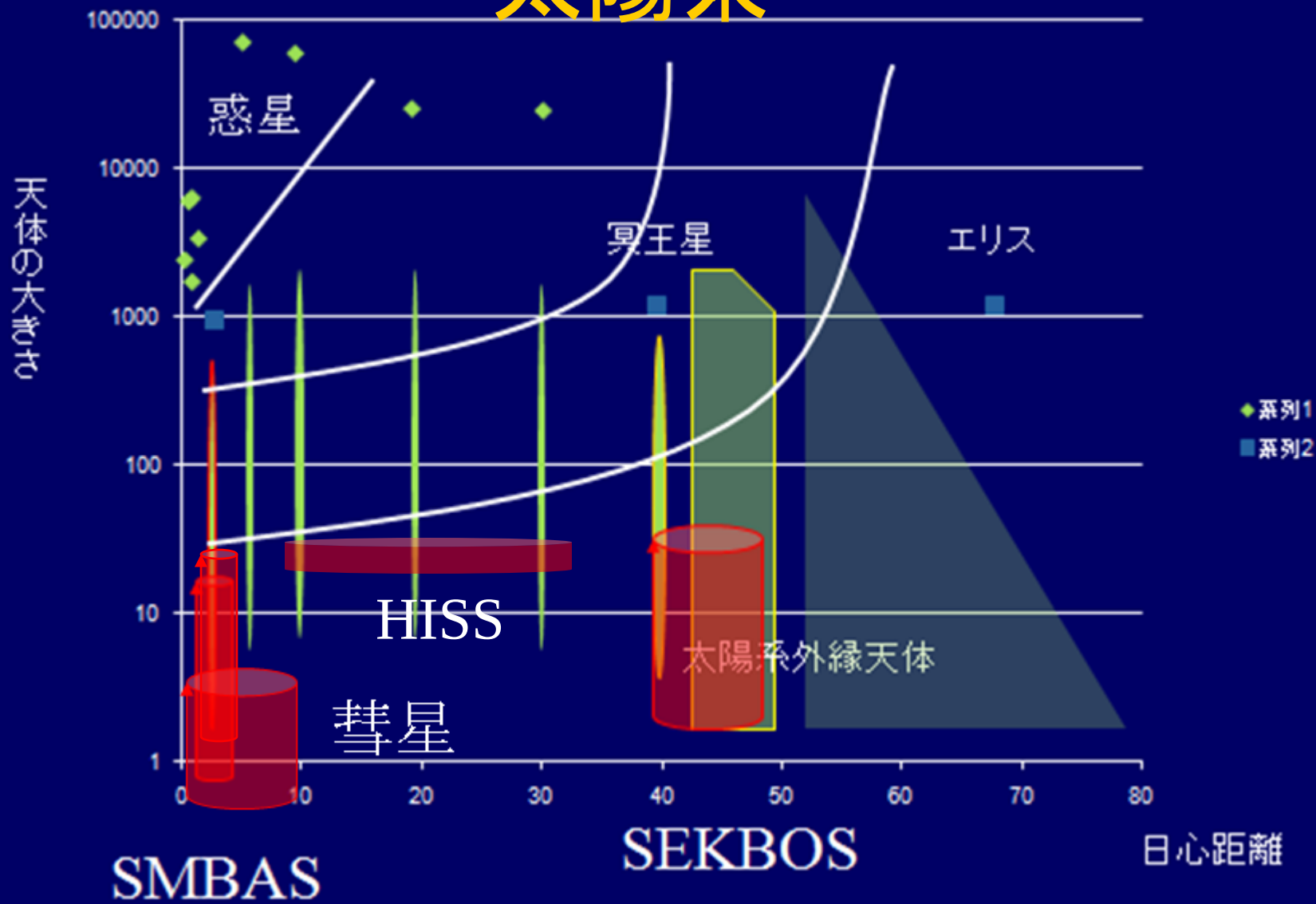
# 広く深く見えてきた太陽系



# 大型地上望遠鏡群 すばる望遠鏡など



# すばる望遠鏡等が探りつつある 太陽系





# 空間軸だけではない 見え始めた太陽系の過去：時間軸

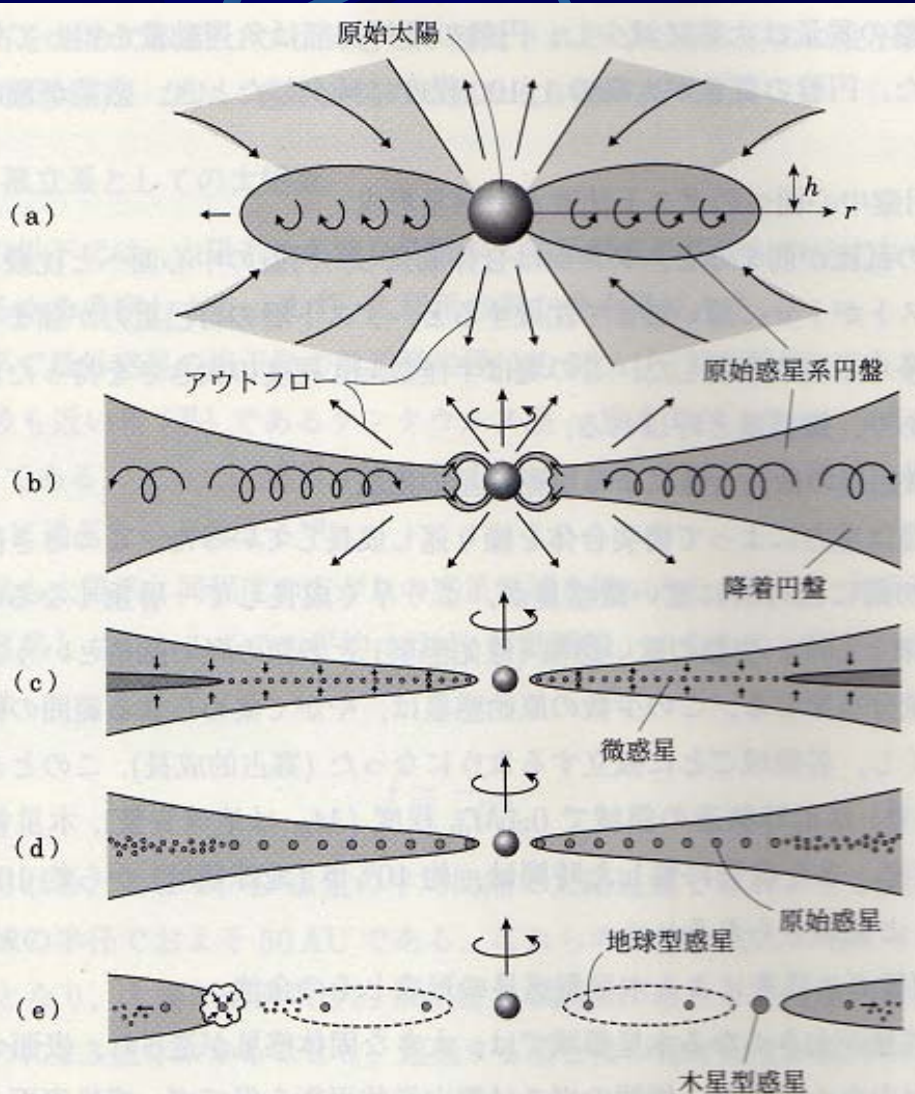
ガス円盤からデブリ  
(粒子) 円盤へ

原始惑星系円盤へ

円盤中での物質循環

惑星への合体成長と  
固体物質進化

成長しきった惑星た  
ちの振る舞い





# 時間軸 — 最初の8億年

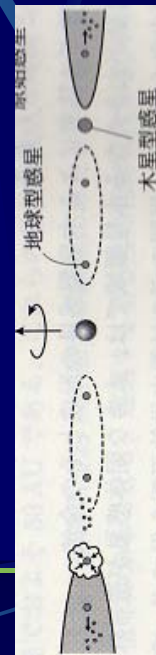
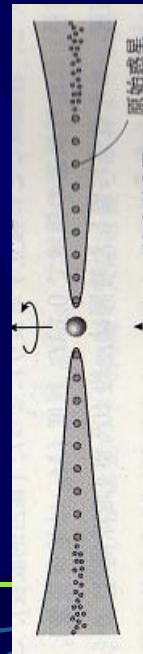
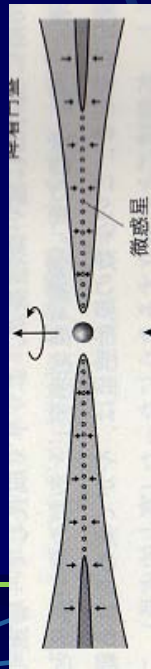
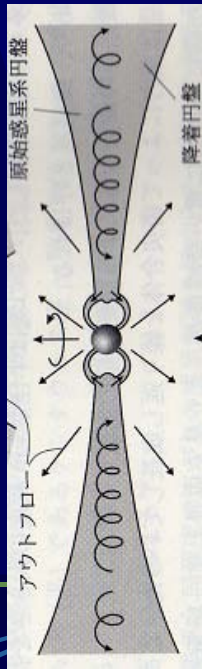
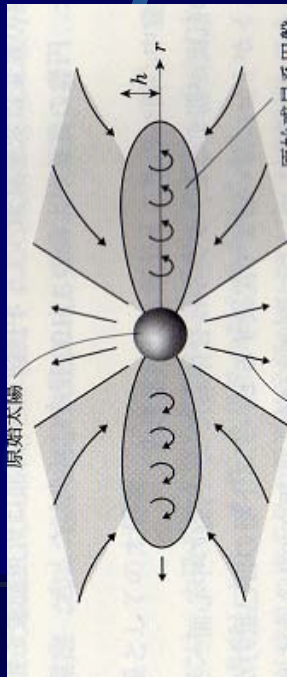
46億年前

現在

↓ 微惑星集積

惑星成長

重爆撃



38億年前

# 時間軸 — 他の惑星系と比較も

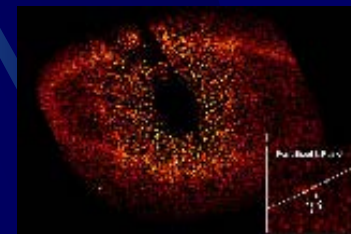
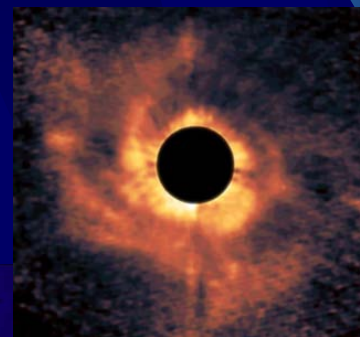
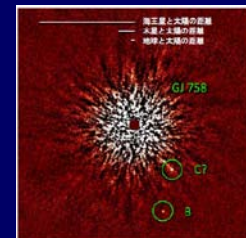
46億年前

現在

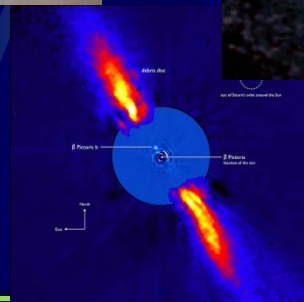
↓ 微惑星集積

惑星成長

重爆撃 →

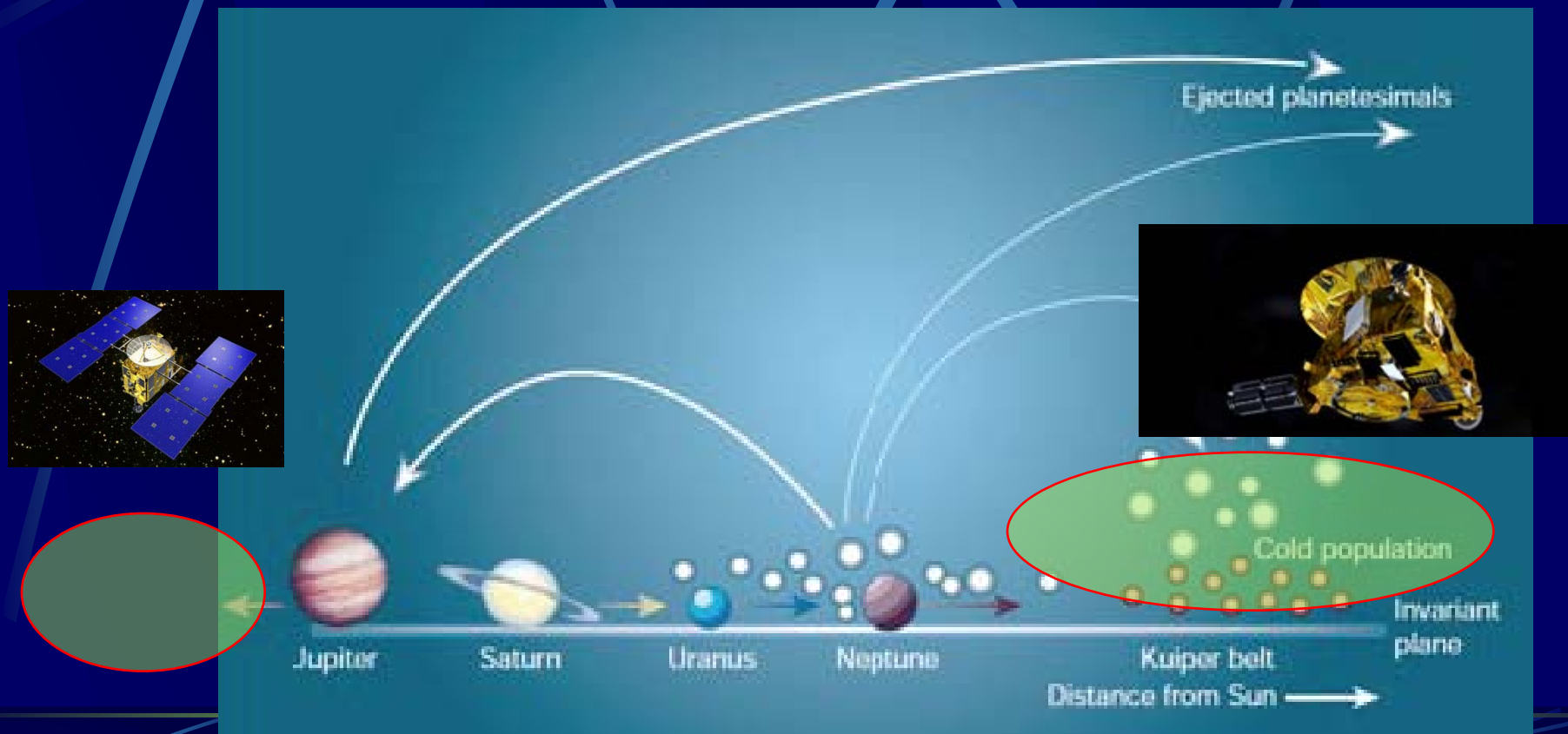


38億年前



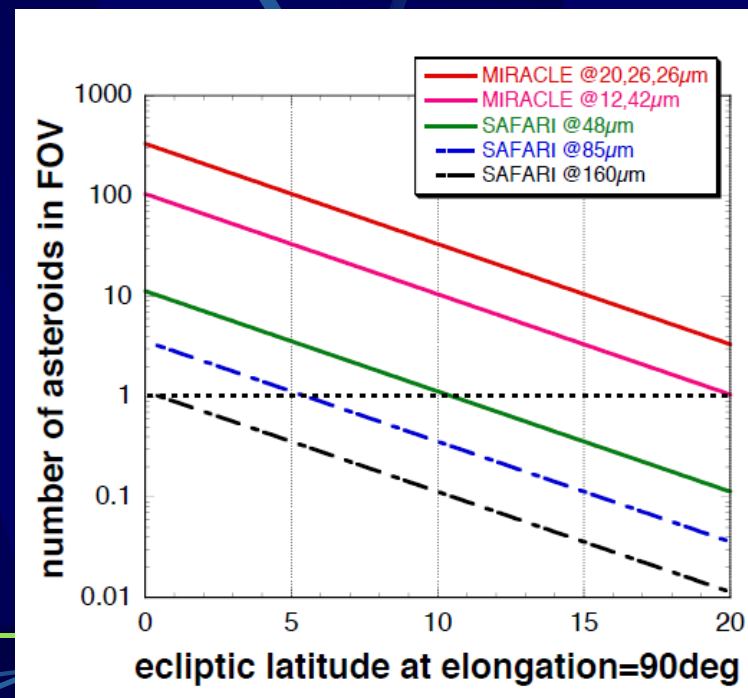
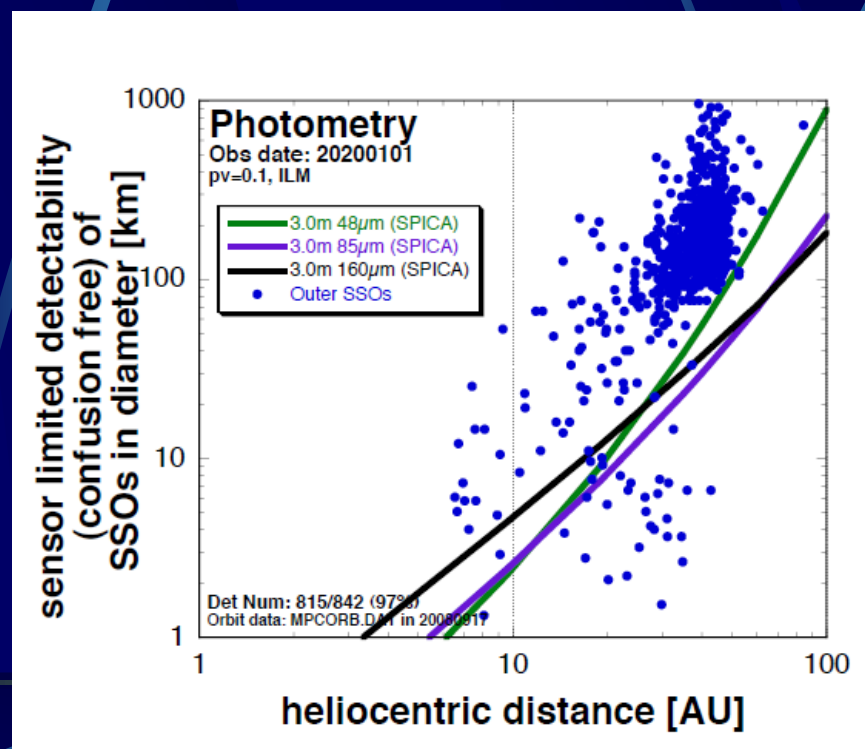
詳しくは田村さん講演

# ごく初期の記憶を残す小天体群 ＜太陽系外縁天体、小惑星＞



# SPICAでは太陽系外縁天体・小惑星の圧倒的な“国勢調査”が可能

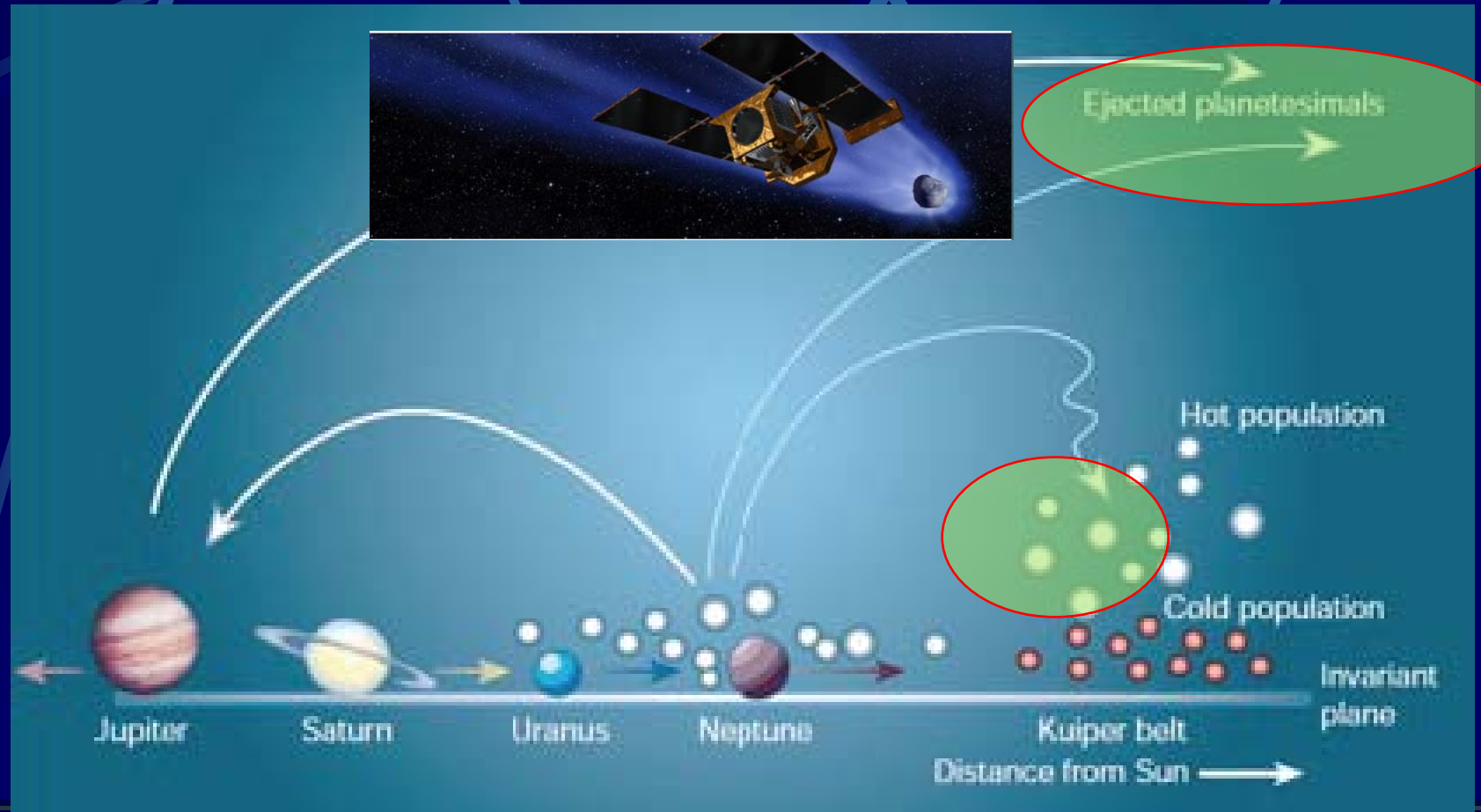
- 可視光による反射と赤外線による放射を計測することでサイズとアルベドを決定





# ごく初期の記憶を残す小天体群

## <彗星>



# 彗星：凍った化石として

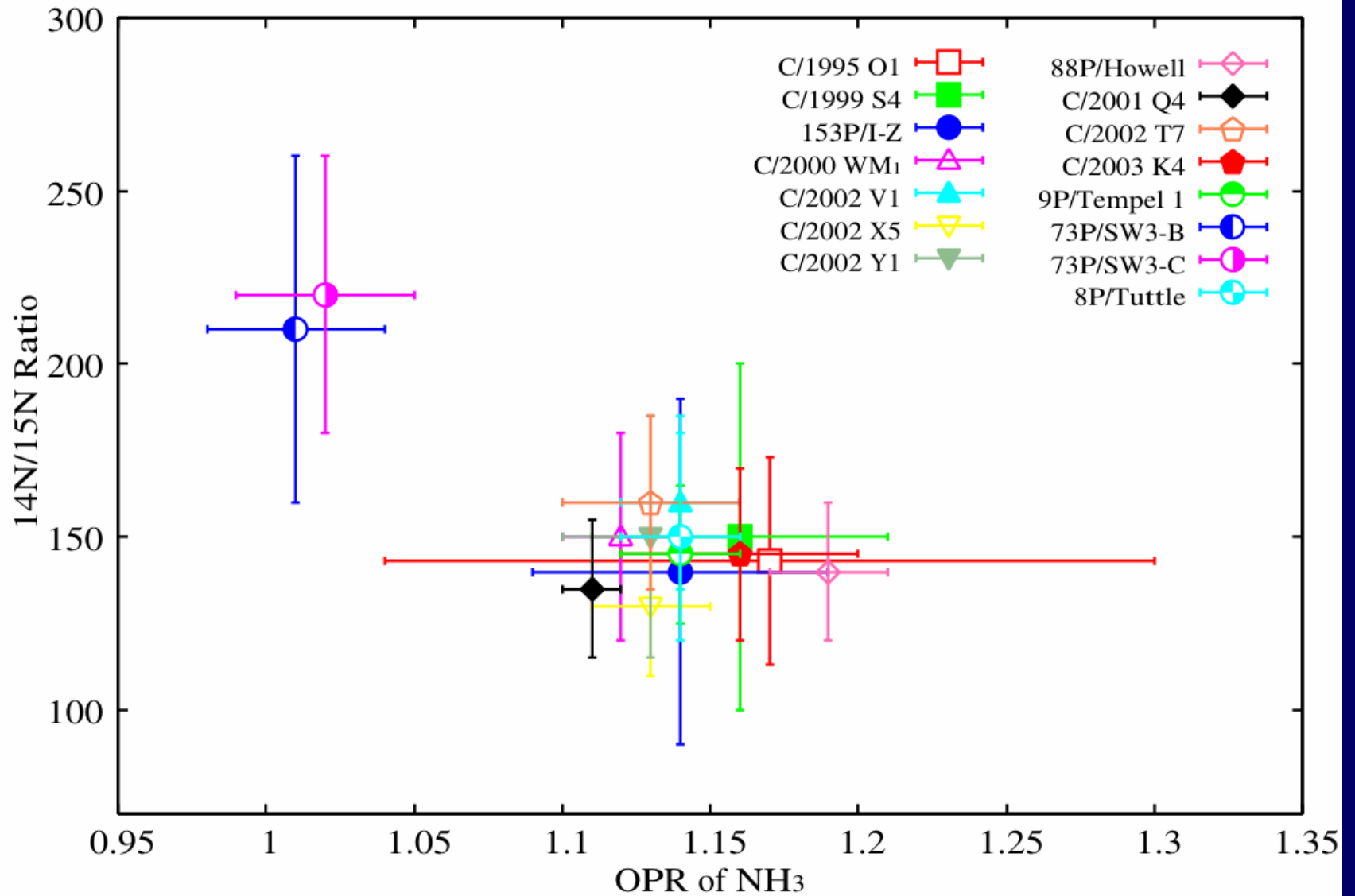


- 低温で凝縮した揮発性物質を46億年にわたって保持 — 太陽系初期の“化石”
- 太陽熱によって蒸発；“天然の加熱実験”
- ——> ガスとダスト両成分のリモート観測が可能
- アプローチの一例
  - ガス：水素を含む分子のオルソ・パラ比
  - ダスト：結晶質シリケートのミステリー

# ガス：彗星の誕生した場所を探る

## 一個々の彗星氷の核スピン温度決定

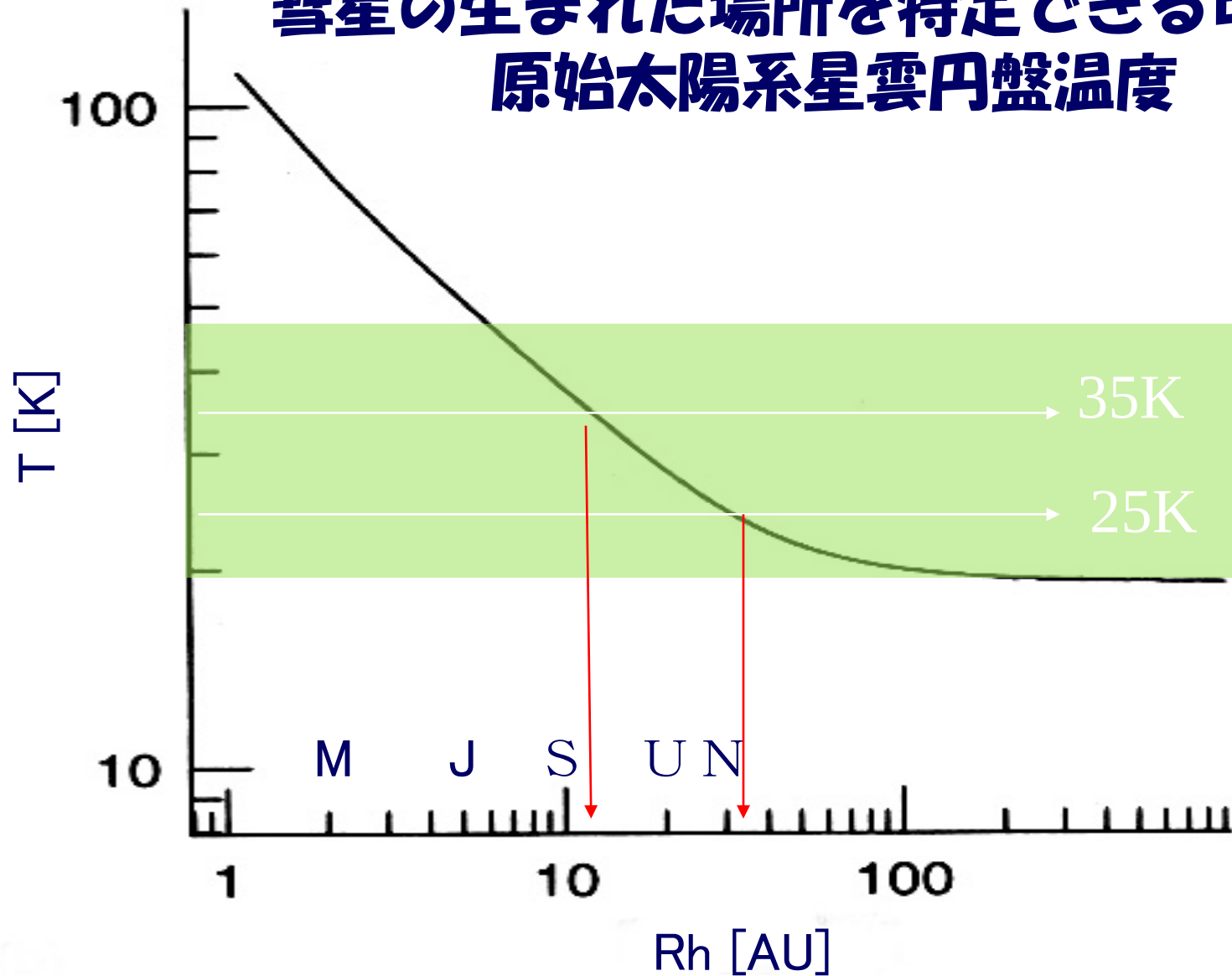
| Comet       | NH <sub>3</sub>    | Orbital Origin | References             |
|-------------|--------------------|----------------|------------------------|
| C/2001 A2   | 25 $^{+1}_{-2}$ K  | Oort Cloud     | Kawakita et al. (2003) |
| C/1999 S4   | 27 $^{+3}_{-2}$ K  | Oort Cloud     | Kawakita et al. (2003) |
| Hale-Bopp   | 26 $^{+10}_{-4}$ K | Oort Cloud     | Kawakita et al. (2003) |
| C/2000 WM1  | 30 $^{+5}_{-3}$ K  | Oort Cloud     | Kawakita (in prep.)    |
| Ikeya-Zhang | 32 $^{+7}_{-4}$ K  | Oort Cloud     | Kawakita et al. (2003) |
| C/2001 Q4   | 31 $^{+5}_{-4}$ K  | Oort Cloud     | Kawakita (in prep.)    |
| Encke       | $\geq 29$ K        | Jupiter Family | Kawakita et al. (2004) |



Shinnaka et al.

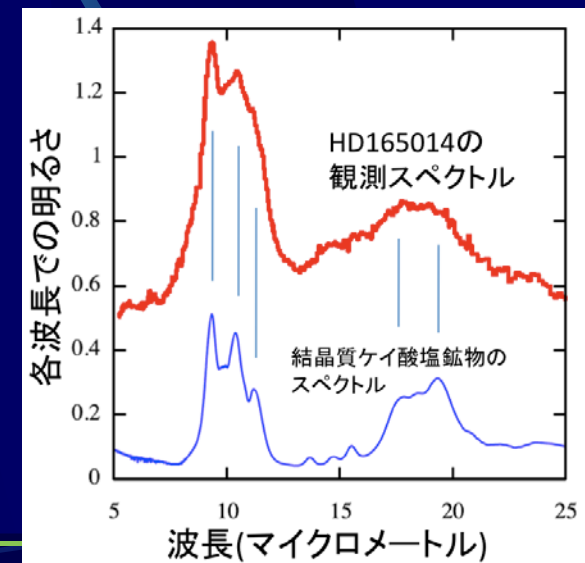


# 彗星の生まれた場所を特定できる可能性 原始太陽系星雲円盤温度

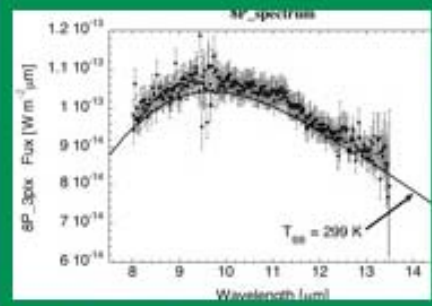
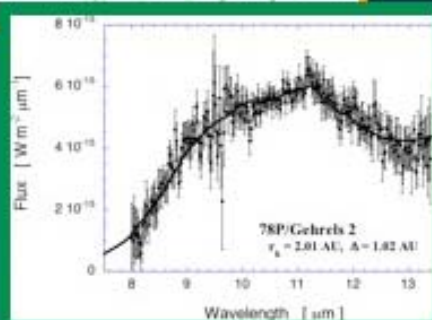
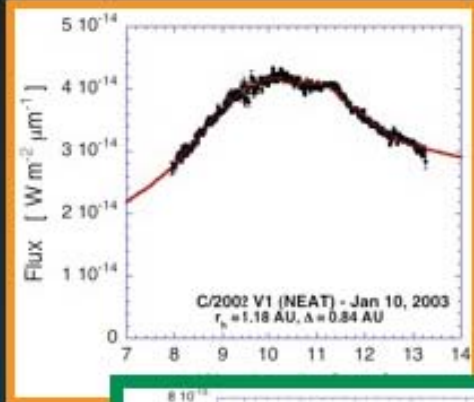


# ダスト：彗星における 結晶質シリケートのミステリー

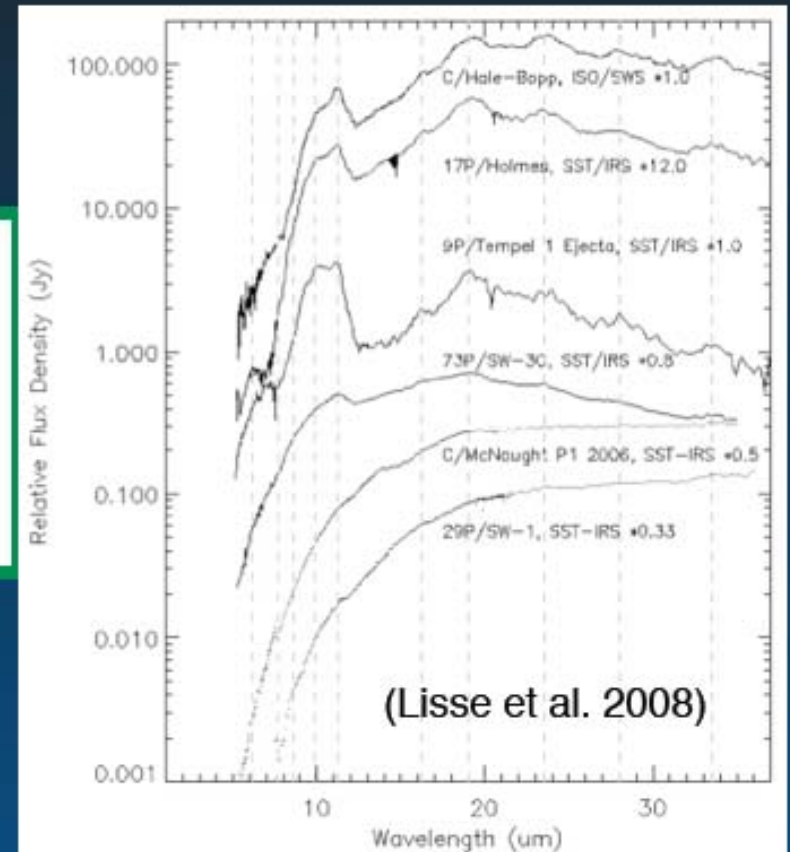
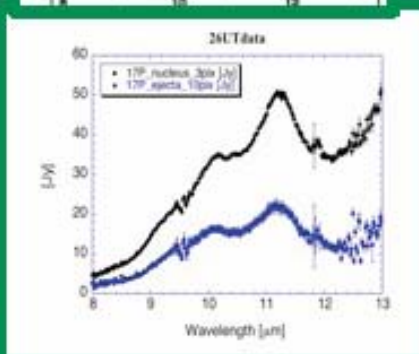
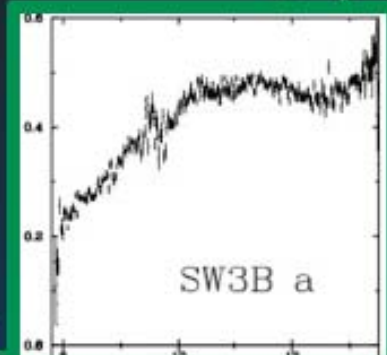
- 高温生成物である結晶質シリケートの存在（非晶質シリケートの加熱あるいは高温ガスからの凝結で生成（1200-1400 K））
- 低温凝縮天体である彗星にどうして結晶質シリケートが含まれているのか？



## Oort cloud comets



## active Jupiter family comets



Jupiter family comets  
 crystalline-to-amorphous silicate ratio  
 silicate feature strength



orbital  
 parameters?

# ダスト: 彗星における 結晶質シリケートのミステリー

- **Model 1:** 外側への物質移送  
turbulent radial mixing or X-wind:  
Timescale  $\sim 10^6$  yrs to 40 A.U.
- **Model 2:** 衝撃波加熱  
衝撃波加熱はガス密度に強く依存し、せいぜい10-20 A.U.まで
- **Model 3:** 化学反応熱によるその場結晶化  
彗星のコマの中で起こるモデル



# ダスト:彗星における 結晶質/非晶質シリケート比率

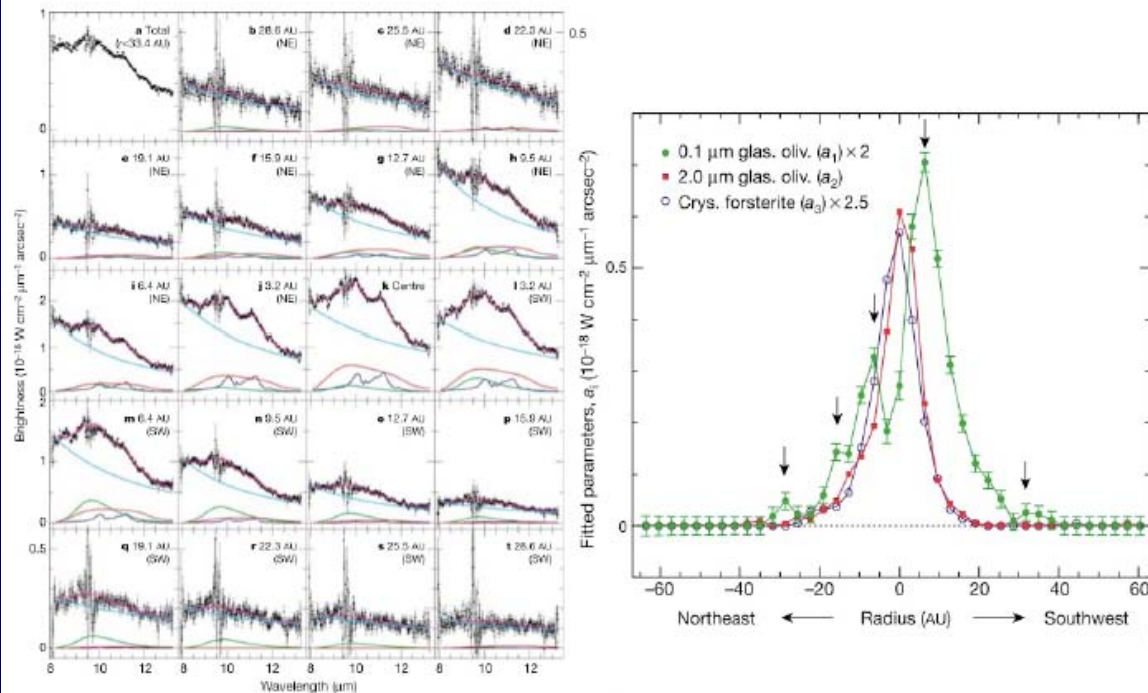
- 太陽系星雲内での物質移送の有無や、その効率を物語る可能性が高い
- **Model 1:** 彗星の生まれ故郷に弱く依存
- **Model 2:** 彗星の生まれ故郷に強く依存  
特に10-20 A.U.で激変
- **Model 3:** 彗星の生まれ故郷に依存しない

# これまでの状況

|               | Silicate feature | Crystalline feature |
|---------------|------------------|---------------------|
| JFCs *        | 83% (5/6)        | 17% (1/6)           |
| Halley-Type   | 50% (1/2)        | 50% (1/2)           |
| > Long Period | 82% (14/17)      | 41% (7/17)          |

- 特に短周期彗星では結晶質シリケート検出＋定量化はなされていない（彗星が暗い等）
- SPICAでは、年50-100個の彗星を観測可能
- 6ミクロンH<sub>2</sub>Oのオルソ・パラ比を同時に観測できれば。。。
- 彗星の“戸籍（生まれ故郷）を含めた国勢調査”が可能に
- 彗星を通して、原始太陽系円盤の状況が判明

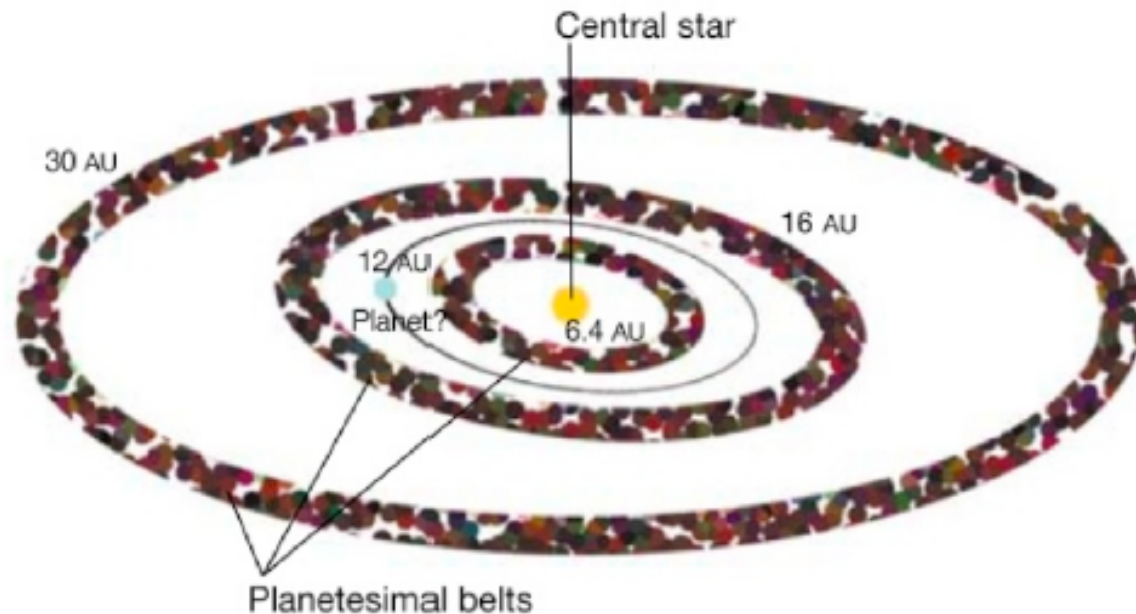
## 中間赤外線で見た $\beta$ Pic の塵円盤＝惑星領域



Okamoto et al. 2004

- 内側で結晶質シリケートが見えている
- (しかもリング状：惑星による共鳴か？)

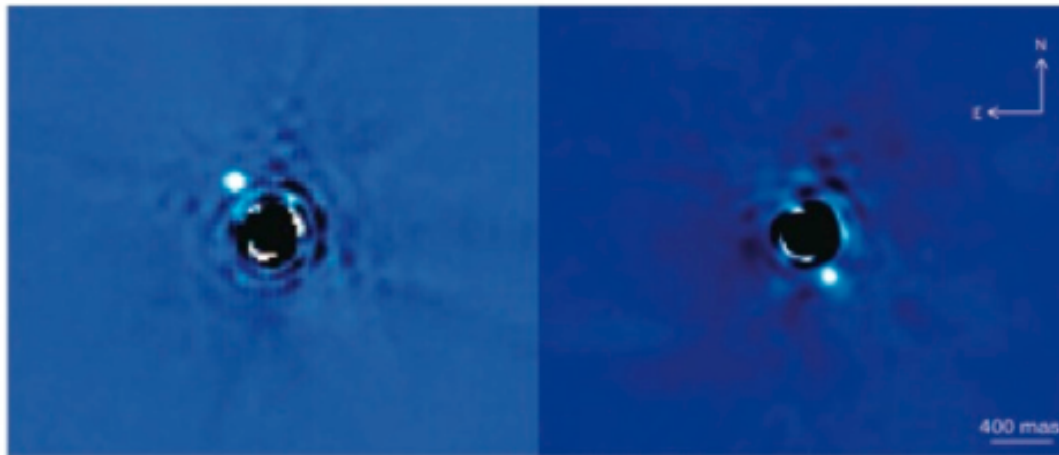
## すばるの観測結果から推測された系外小惑星帯の構造



12AU 付近に存在する惑星の影響で微惑星帯が形成？

# モデルの予測通りの距離にある 惑星が発見された！！

Lagrange et al. 2010

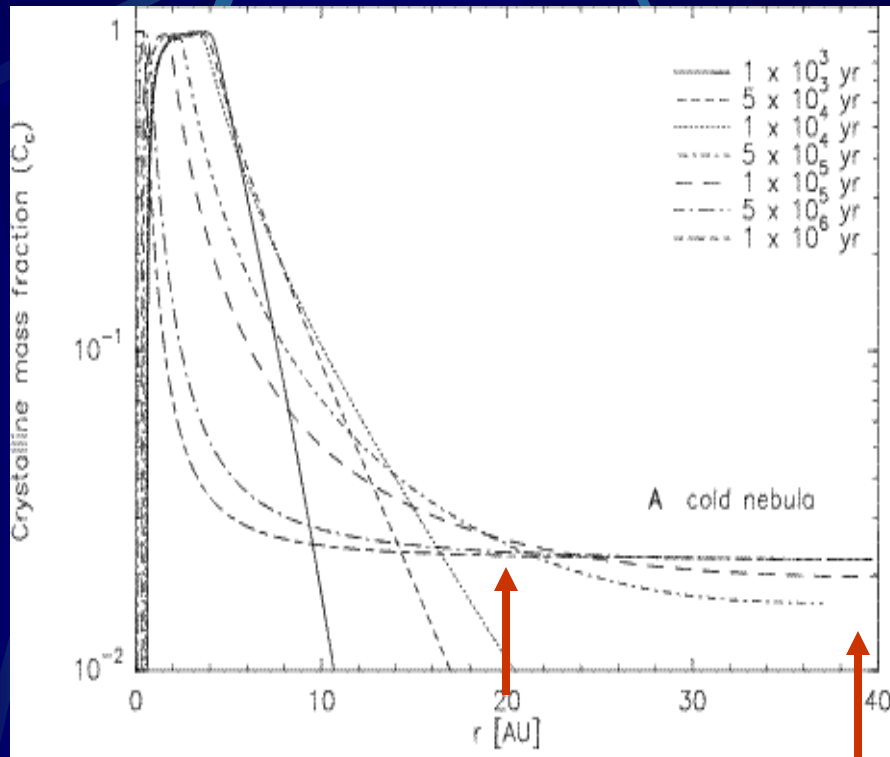


**Fig. 1.**  $\beta$  Pictoris imaged at  $L'$  band (3.78 microns) with the VLT/NaCo instrument in November 2003 (**left**) and the fall of 2009 (**right**). We used images of the comparison star HR2435 to estimate and remove the stellar halo (see SOM). Similar results are obtained when using angular differential imaging (see SOM).

- ・系外小惑星帯＋それに伴う塵円盤は一般的に存在？
- ・塵円盤観測の微細構造観測から、系外小惑星帯＋惑星に関する情報が得られる？

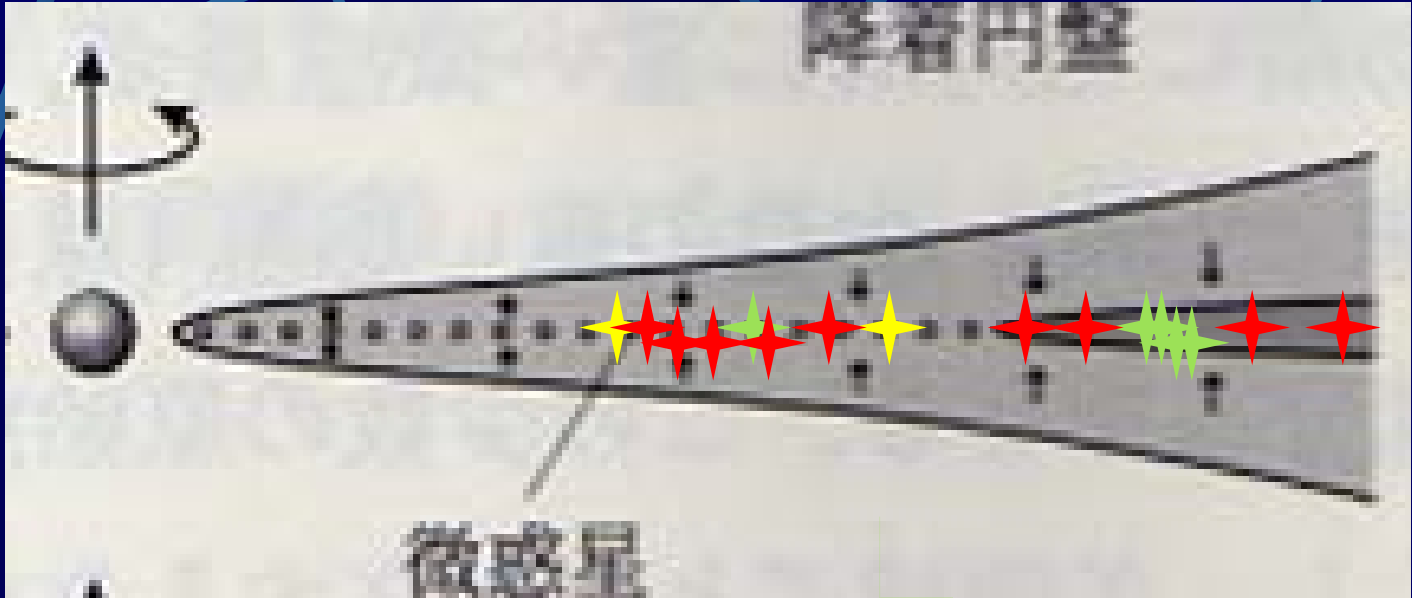


# もし動径方向移送なら



- Cold nebula Model
- 20:40天文単位での結晶質/非晶質比  
~ 2-3
- 5000年~5万年

# 原始惑星系円盤内の“化石”調査



- ・これまでの天文観測
- ・はやぶさシリーズ等の直接探査
- ・SPICAによる彗星の国勢調査

# まとめ

- SPICAは、その高い感度により、原始太陽系星雲の“化石”たる太陽系小天体の圧倒的な“国勢調査”を可能にする
- 太陽系の初期8億年に原始太陽系星雲で起きた“物質循環”を明らかにする
- 天体力学、系外惑星・円盤観測、惑星形成論、隕石・小天体探査・物質分析など日本が世界をリードする分野と連携