

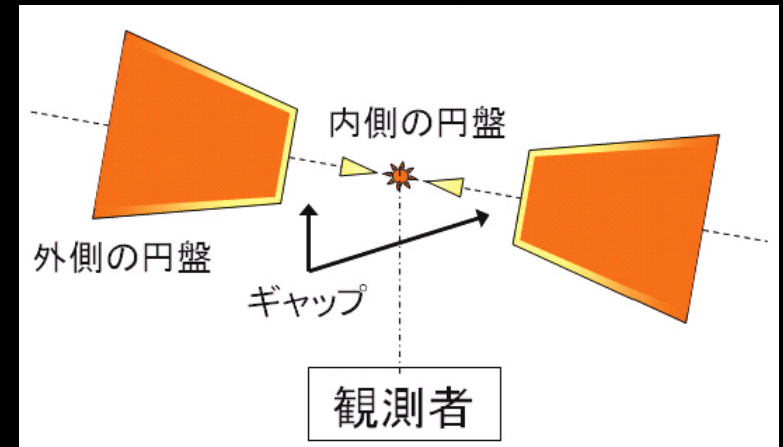
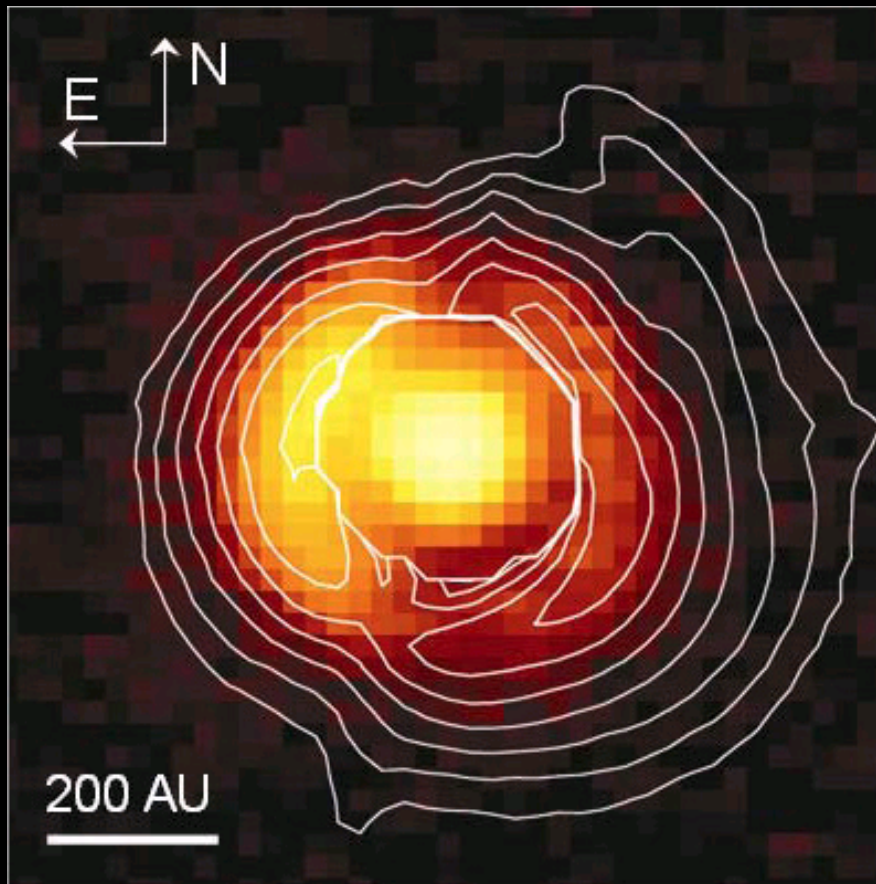
# 土星リングの中間赤外線撮像

藤原英明

国立天文台ハワイ観測所

共同研究者: 森島龍司 (UCLA/JPL)、  
藤吉拓哉、山下卓也 (国立天文台)

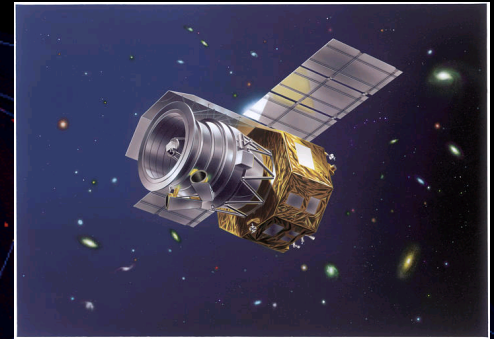
# HD 142527 の中間赤外線撮像



(Fujiwara+ 2006, ApJL)

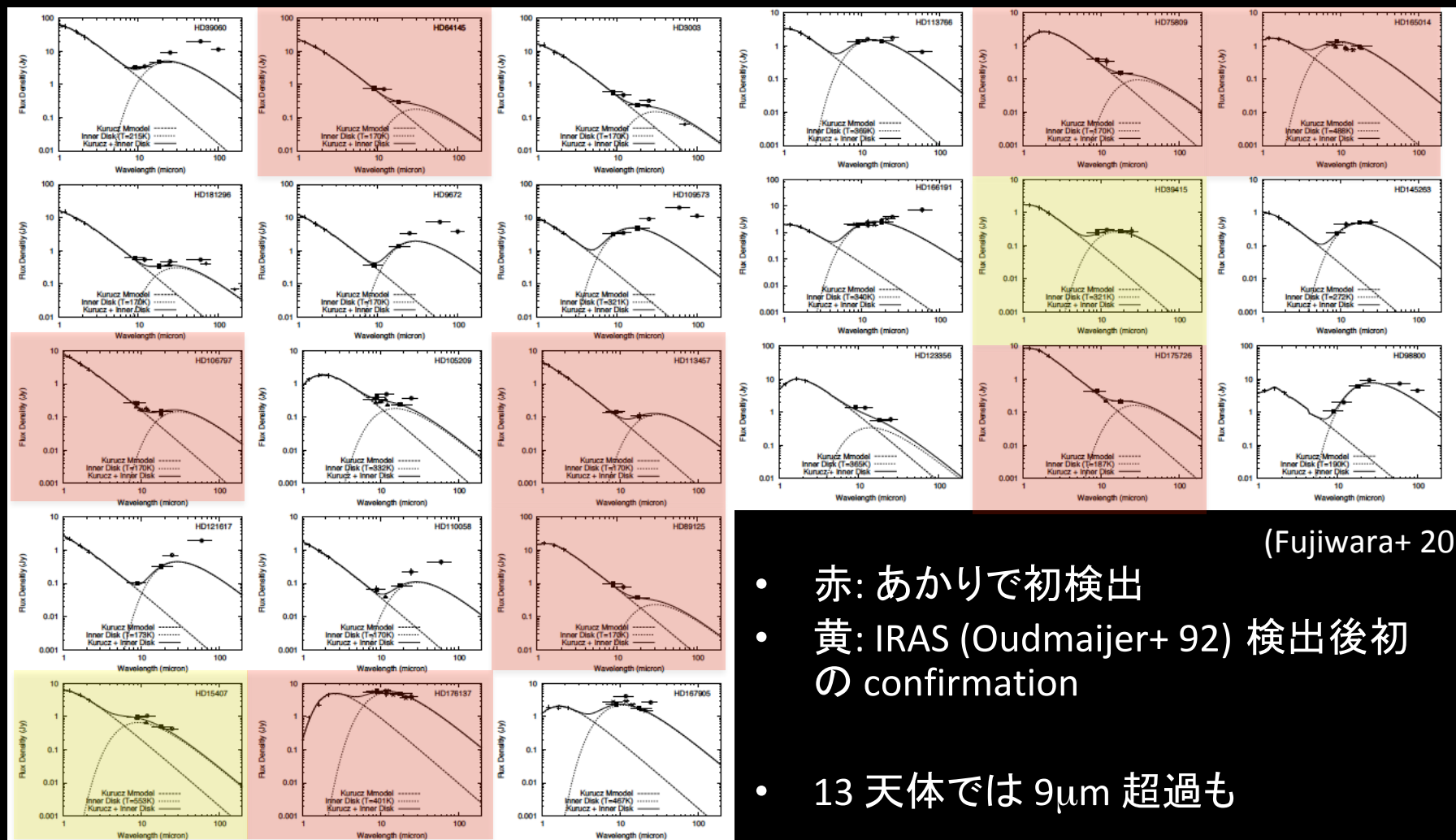
# 「あかり」中間赤外線全天サーベイ

- AKARI: a Japanese IR satellite (surveyor)
  - All-sky survey with higher sensitivity and spatial resolution than IRAS
  - MIR IRC survey (9 and 18 $\mu\text{m}$ ) is useful for warm debris disk search
- Warm Debris Disk Survey with AKARI MIR Data
- Method
  - Cross-correlating between AKARI, 2MASS, and Tycho-2 SpT catalog
  - Extract MS stars with large 18  $\mu\text{m}$  excess



# あかりで検出した温かいデブリ円盤

- 856 の恒星のうち 24 天体で 18 $\mu\text{m}$  超過を検出



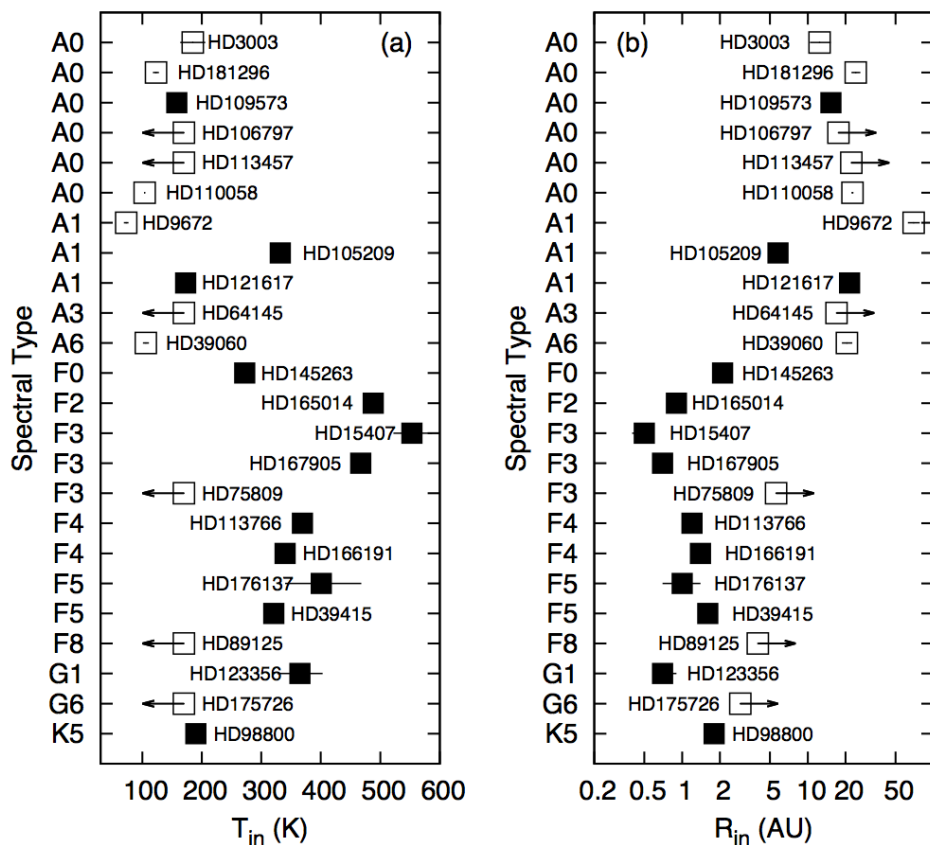
(Fujiwara+ 2013)

- 赤: あかりで初検出
- 黄: IRAS (Oudmaijer+ 92) 検出後初の confirmation
- 13 天体では 9 $\mu\text{m}$  超過も



# Debris Temperature & Radius

- 赤外線超過からダストの温度・中心星からの距離を推定
  - 黒体放射を仮定して



- A型星とFGK型星とで温度が異なる傾向

– A型星:  $T_{\text{dust}} < 200\text{K}$

- Wien-side tail of relatively cool debris dust of large disk

– FGK型星:  $T_{\text{dust}} = 300\text{-}500\text{K}$

- Inner warm dust

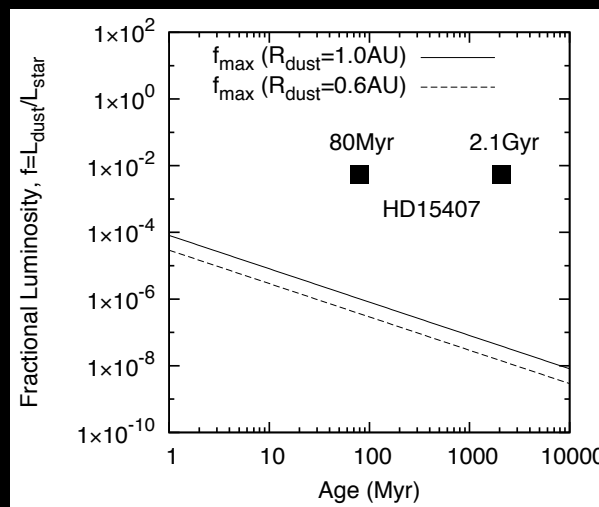
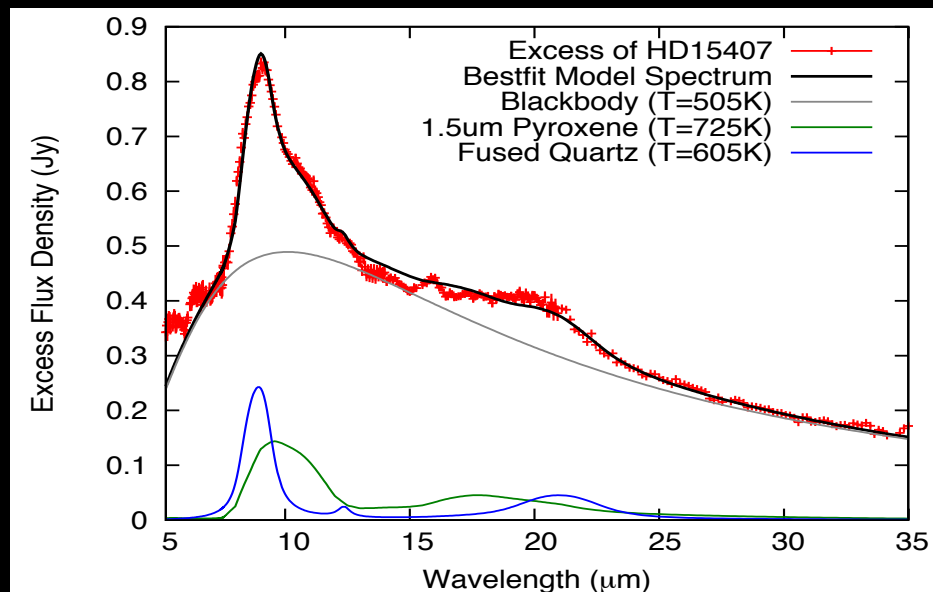
– 早期型  $\rightarrow$  高光度  $\rightarrow$  輻射圧が効いて中心星近傍に (小さな) ダストが存在できない

■ star w/  $9\mu\text{m}$  excess, □ star w/o  $9\mu\text{m}$  excess

# HD 15407A の中間赤外線スペクトル

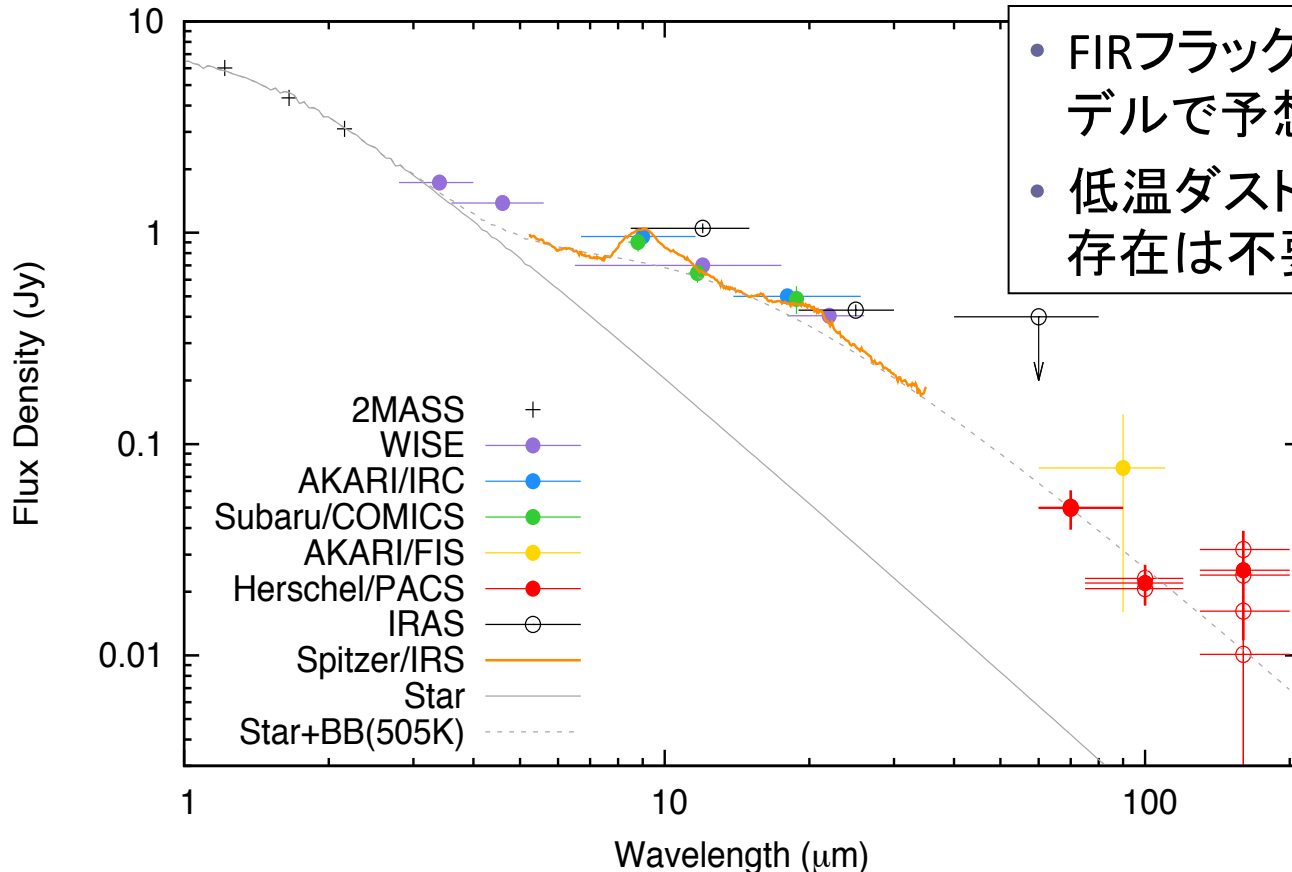
(Fujiwara+ 2012a)

- Spitzer/IRSスペクトルをモデル化
  - ダスト温度、組成、光度を導出
- $T_{\text{dust}}=500\text{-}600\text{K} \rightarrow R_{\text{dust}}=0.6\text{-}1.0\text{AU}$
- 非晶質シリケート + シリカ (SiO<sub>2</sub>) + 連続(黒体)成分
  - 極めてレアな「シリカ」の検出 (9 & 21 $\mu\text{m}$  フィーチャー)
  - 大きな母天体同士の高速衝突?  
(HD 172555; Lisse+ 2010)
- ダスト比光度  $L_{\text{dust}}/L_{\text{star}} \sim 0.005$ 
  - 5本の指に入るほど”dusty”な円盤
  - 微惑星帯の定常衝突モデル (Wyatt+ 2007) では説明できない
  - Transient なダスト生成イベント



# HD 15407A の赤外線 SED

(Fujiwara+ 2012a, 2012b)



- FIRフラックスは、MIRスペクトルモデルで予想される連続成分に一致
- 低温ダスト (50-130K@10-60AU)の存在は不要

- Transientな  
ダスト生成として
- 内側でのみダストを大量に放出させるようなイベント

- Herschel/PACS (PI: Zuckerman) – 70, 100, 160  $\mu\text{m}$
- AKARI/FIS (DT) – 65, 90, 140, 160  $\mu\text{m}$

# 土星リングの中間赤外線撮像

Fujiwara et al. 2017, A&A, 599, A29

Seasonal variation of radial brightness contrast of Saturn's rings  
viewed in mid-infrared by COMICS

藤原英明

国立天文台ハワイ観測所

共同研究者: 森島龍司 (UCLA/JPL)、  
藤吉拓哉、山下卓也 (国立天文台)



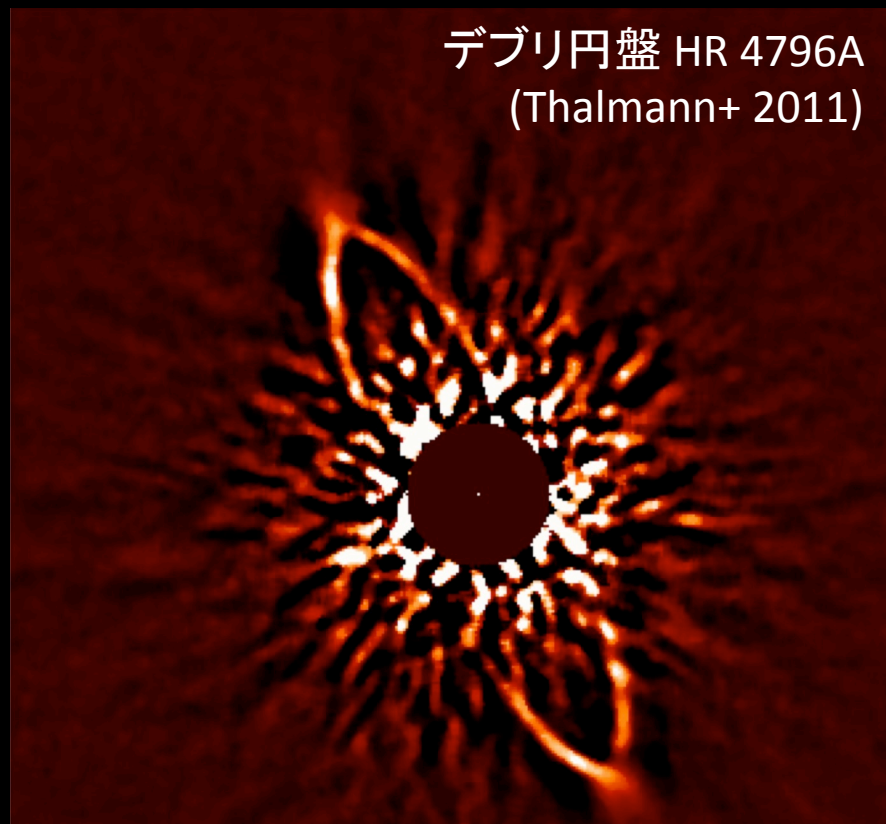
# 惑星リング: デブリ円盤のミニチュア?

- 固体粒子による円盤状構造
- ~~gas-free~~ gas-less な系
- 天体破壊によって生成された可能性

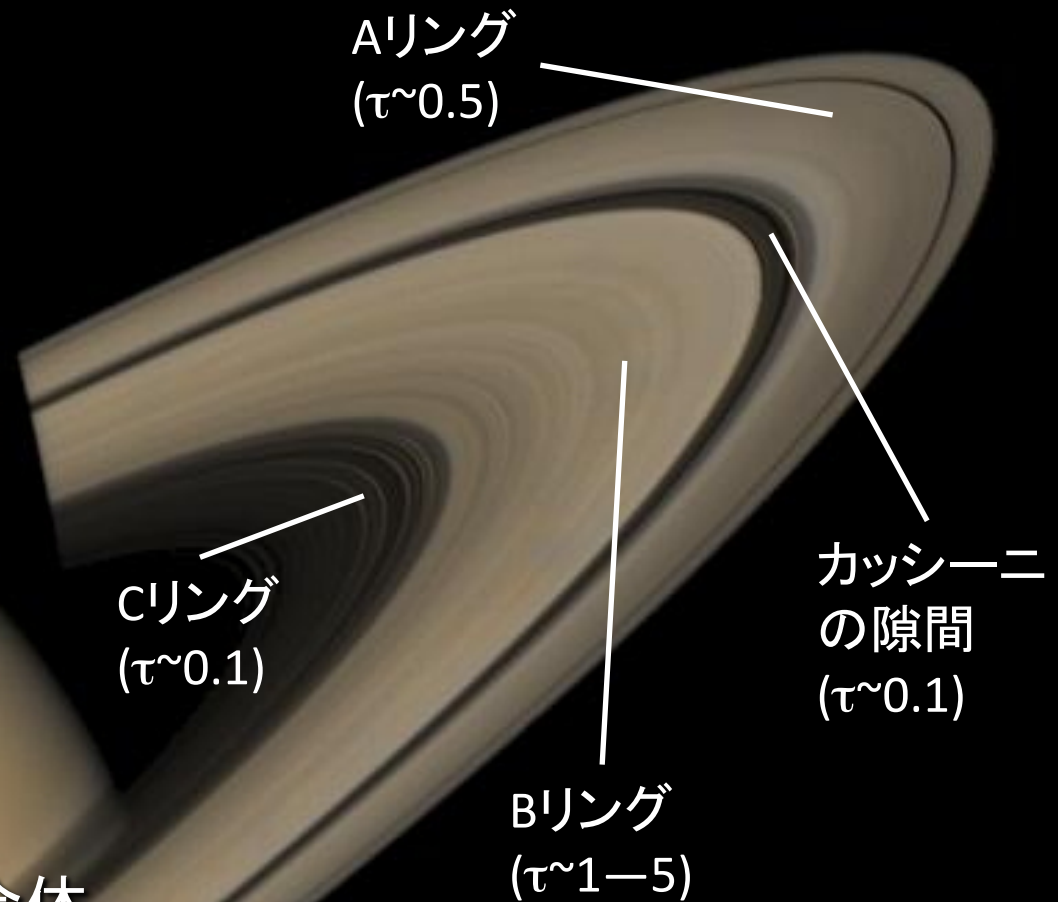
土星リング



デブリ円盤 HR 4796A  
(Thalmann+ 2011)



# 土星リング

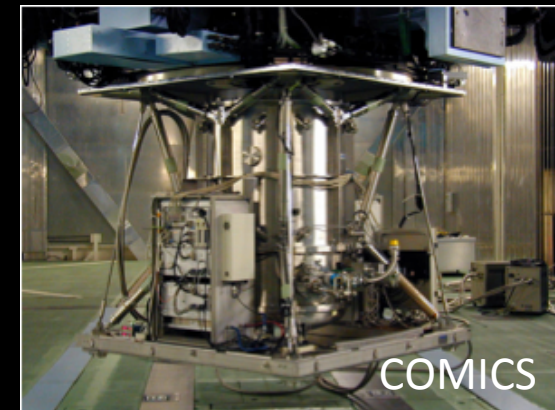
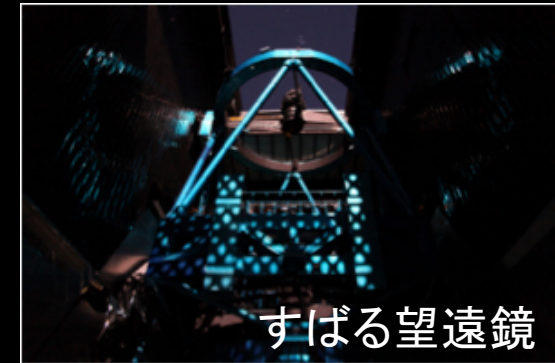


- 氷粒子の集合体
- 可視光 (反射光) では B, A リングが明るく、C リング・カッシーニの隙間がとても暗い
- 中間赤外線 (熱放射) でどのように見えるのか？

- (広報用画像としても魅力: ウラの動機)

# データ・解析

- 2008/1/23 (UT)
- すばる望遠鏡 中間赤外線カメラ COMICS
- 8.8, 9.7, 10.5, 11.7, 12.5, 17.7, 18.8, 20.5, 24.5  $\mu\text{m}$  での多波長観測
- 別チーム (S07B-076, Yanamandra-Fisher) のデータ (未出版！) を SMOKA から取得・解析
- エッジオンに近い状態での観測



Epoch (UT)	$r$ (au)	$\Delta$ (au)	$B'$ (deg)	$B$ (deg)	$\alpha$ (deg)
January 23, 2008	9.27	8.45	-8.7	-7.2	3.5

日心距離

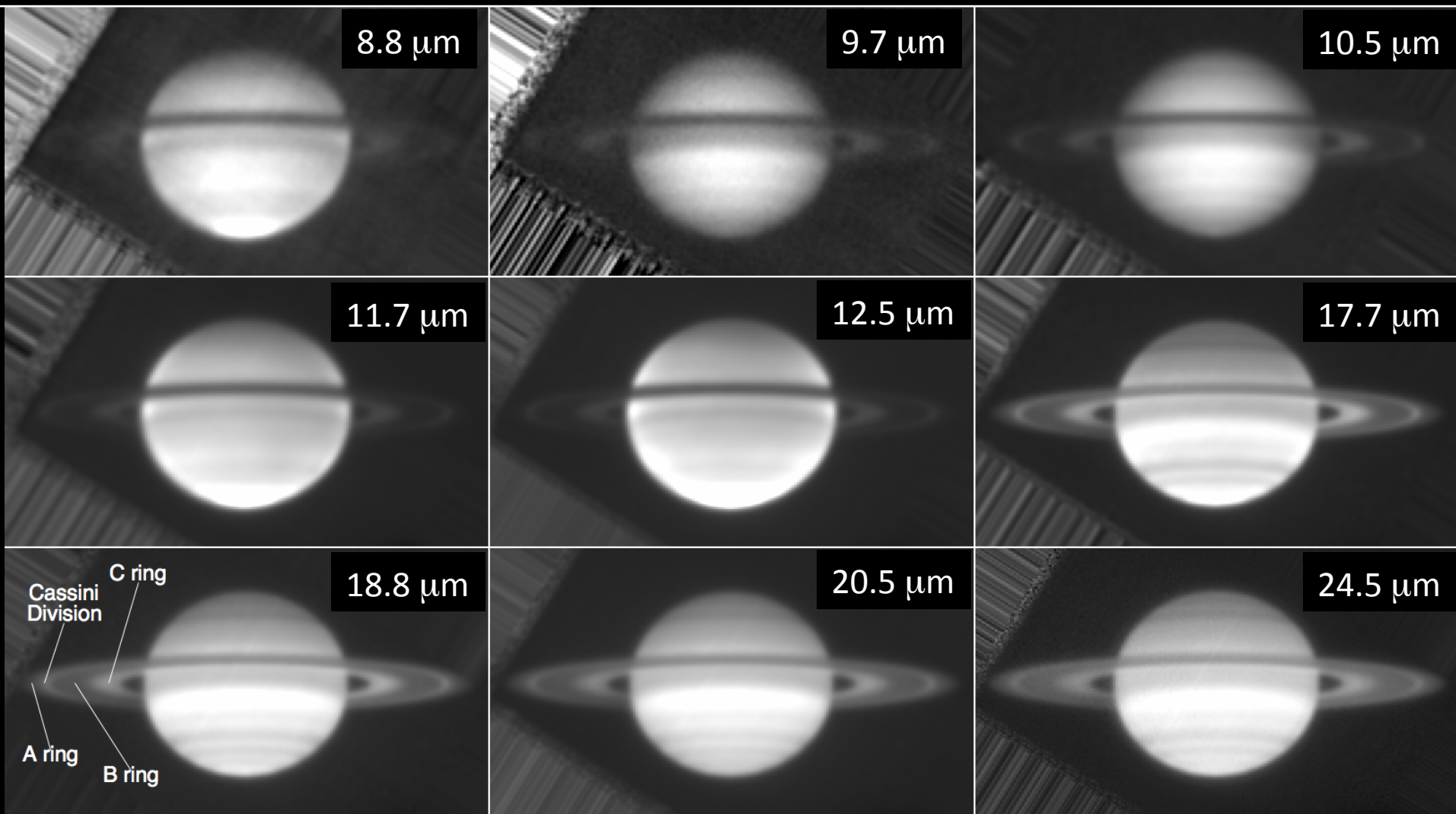
太陽高度

位相角

地心距離 リング面に対する 地球高度

# 結果: 輝度分布

空間分解能:  $0.38\text{-}0.67'' = \text{数 } 1000 \text{ km}$   
(中間赤外線地上観測では史上最高)





中間赤外線24.5 $\mu\text{m}$   
(2008/01)

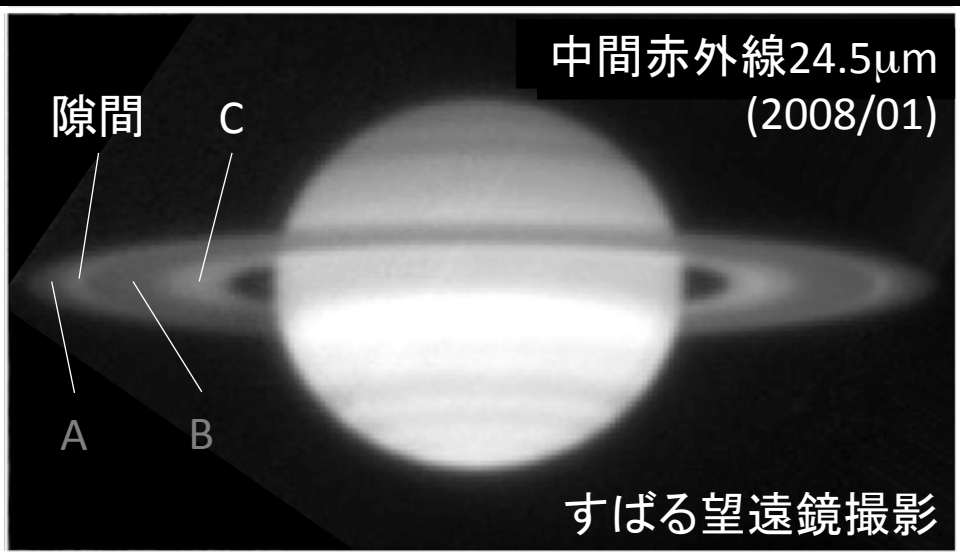
隙間

C

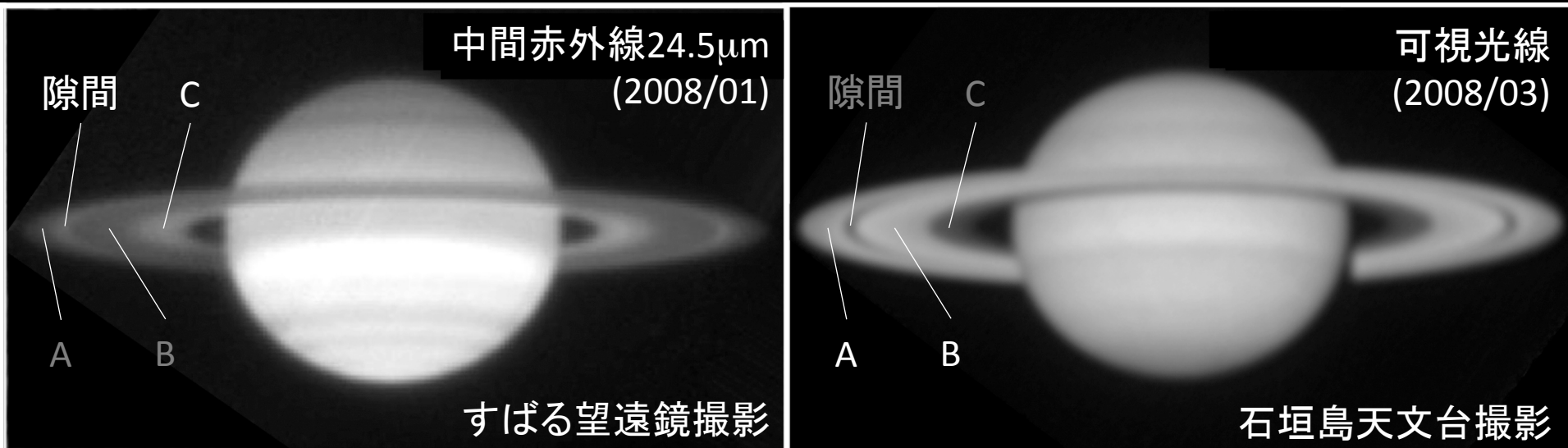
A

B

すばる望遠鏡撮影



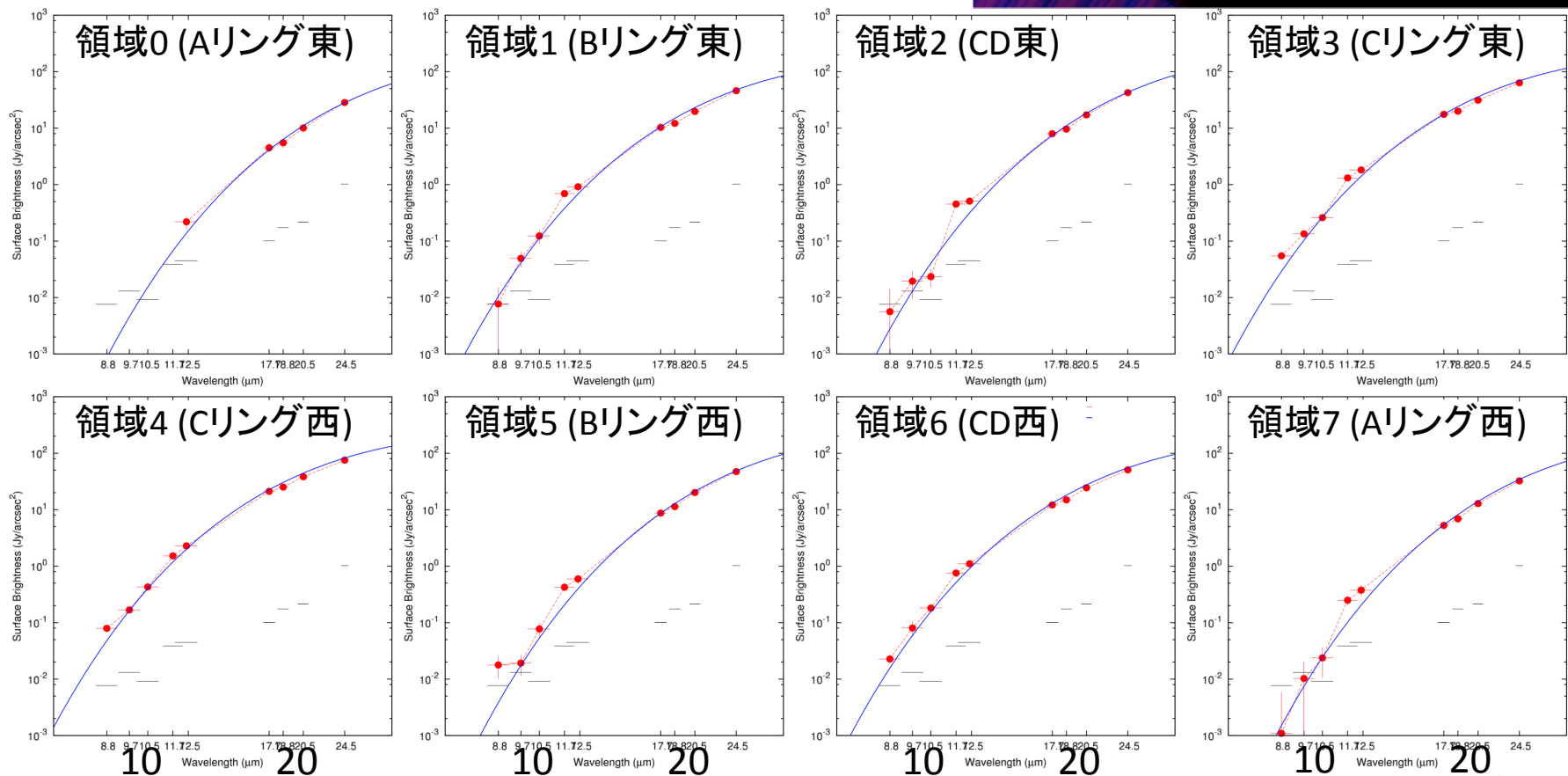
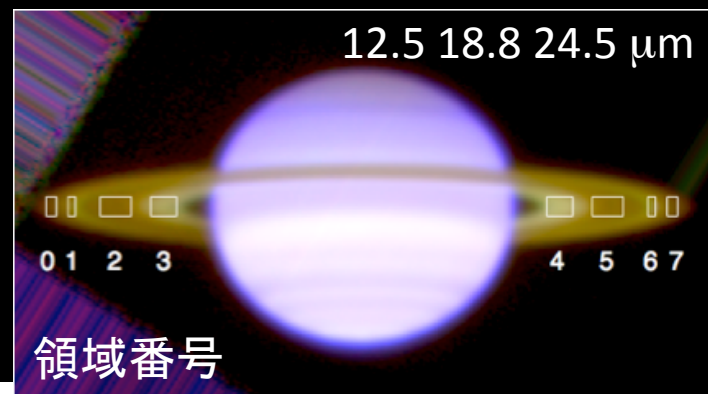
# 結果:可視光との比較



- 同年に石垣島天文台で撮影された可視光画像  
– (時期・リング開き角度・位相角は少し異なる)
- リングの輝度コントラストが可視光と中間赤外線とで反対
- 可視光では常に暗い Cリング および カッシーニの隙間 が中間赤外線では明るい

# 結果:各リングの SED

- 顕著なフィーチャーは見られない
- 黒体放射に合致 (ピーク > 25  $\mu\text{m}$ )



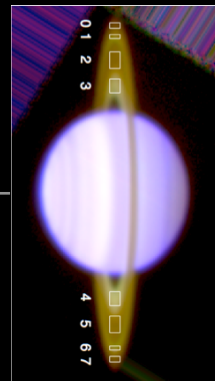
波長 ( $\mu\text{m}$ )

# 結果: 各リングの温度

- 単一温度黒体放射 (光学的厚み  $\tau$  仮定)  $\rightarrow$  粒子の物理温度
- 輝度  $I_{\nu}(\lambda) = \beta B_{\nu}(\lambda, T)$ ; 充填率  $\beta = 1 - \exp(-\tau/|\sin B|)$

Region	Ring	T by COMICS (K)					
		$\tau = 0.05$	0.1	0.2	0.5	1	2
0	A ring (East)	–	–	80	<b>78</b>	78	–
1	Cassini Division (East)	97	<b>91</b>	87	–	–	–
2	B ring (East)	–	–	–	82	<b>82</b>	82
3	C ring (East)	102	<b>97</b>	92	–	–	–
4	C ring (West)	105	<b>100</b>	95	–	–	–
5	B ring (West)	–	–	–	84	<b>84</b>	84
6	Cassini Division (West)	99	<b>93</b>	89	–	–	–
7	A ring (West)	–	–	82	<b>80</b>	80	–

東側  
(朝)



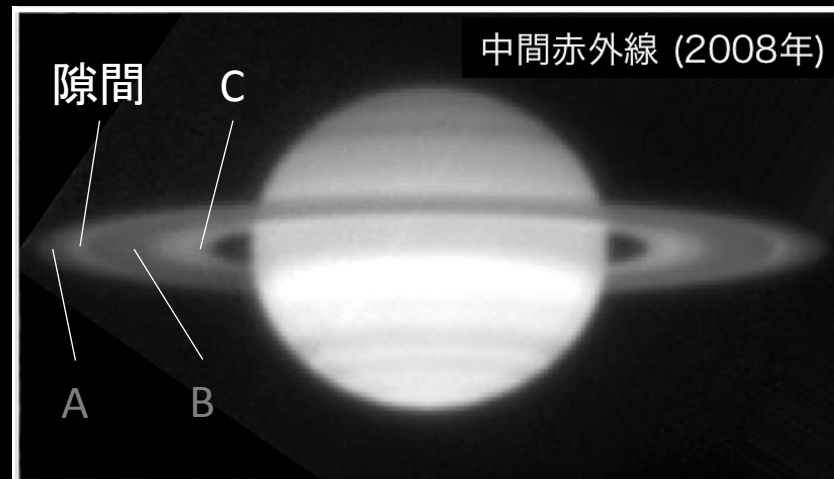
(夕)  
西側

- B, A リング に比べて Cリング・カッシーニの隙間 が高温
- いずれのリングでも 東側 (朝) に比べて 西側 (夕方) が高温 (輝度も高い)



# 議論

- 中間赤外線 (熱放射) での輝度  $I_{\nu}(\lambda) = \beta B_{\nu}(\lambda, T)$
- (2008年の観測条件で) Cリング・カッシーニの隙間 が明るいのは、高温の効果が高い粒子充填率を上回るため



- どのリングでも一律に西側 (夕側) が高温なのは、土星本体の影から脱したのちに、太陽光によって温められるから

# なぜCリング・隙間はより高温？

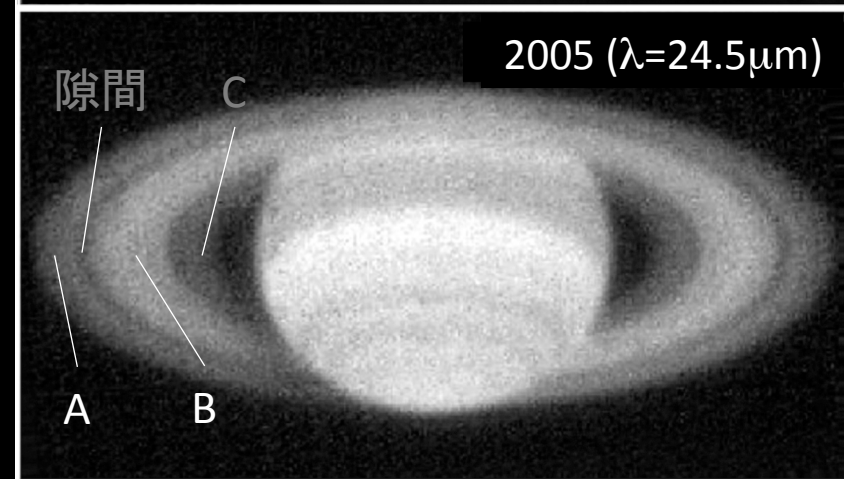
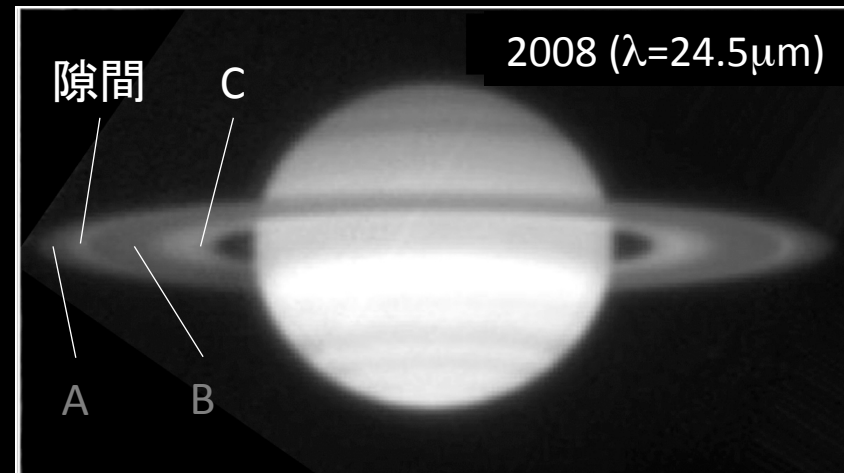
- 光学的に薄い
  - 粒子同士の相互影効果が小さく、太陽光で効率的に加熱されやすい？
  - 微小隕石などによる汚染が効き、アルベドが低くなるために、太陽光で効率的に加熱されやすい？
- リング粒子のサイズが小さい？

# 中間赤外線輝度の変動 (2005-2008年)

- リング開き角が大きい2005年4月のデータ (S05A-029) も解析・比較

Epoch (UT)	$r$ (au)	$\Delta$ (au)	$B'$ (deg)	$B$ (deg)	$\alpha$ (deg)
January 23, 2008	9.27	8.45	-8.7	-7.2	3.5
April 30, 2005	9.07	9.33	-21.9	-23.6	6.1

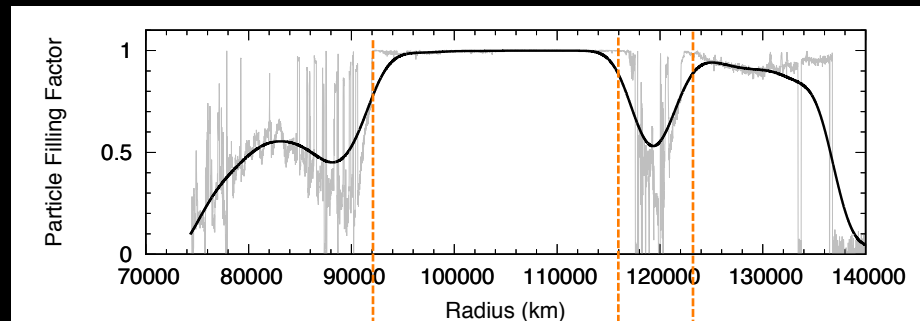
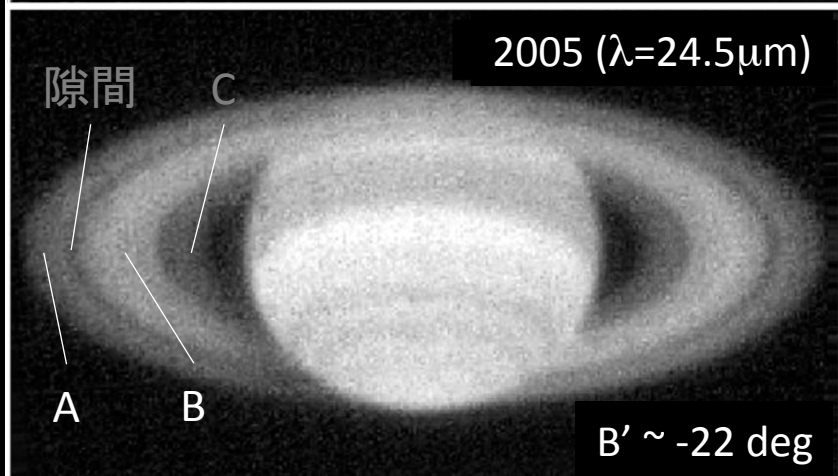
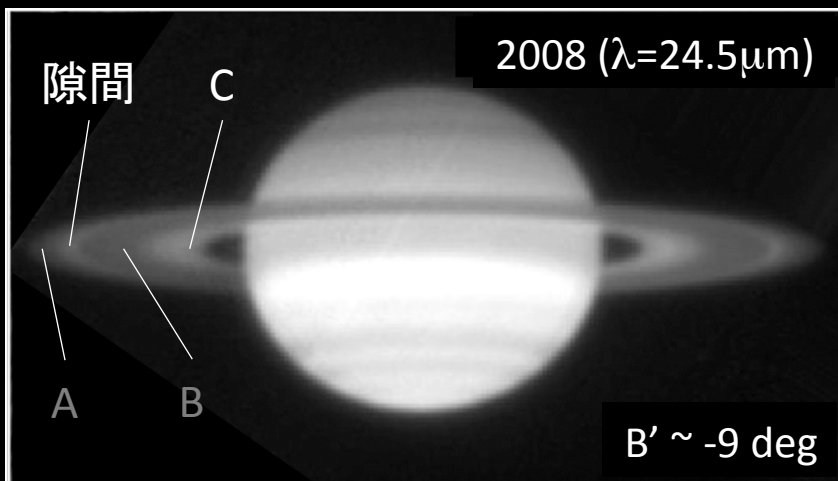
リング面に対する  
太陽高度 地球高度



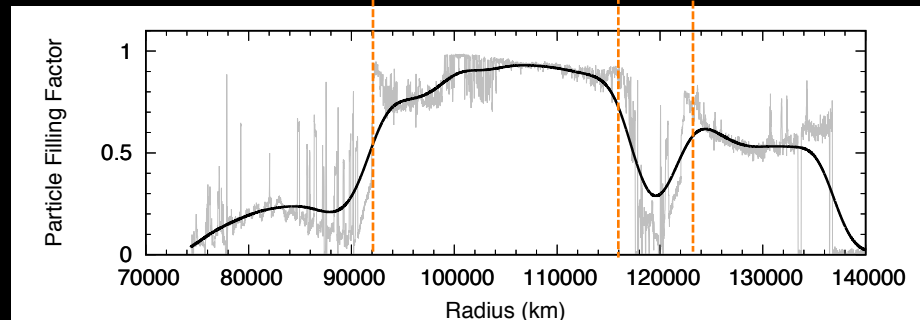
(より定量的な議論・探査機データとの比較は論文で)

- 2005-2008年でコントラストが反転
- 粒子温度・充填率は太陽・地球に対するリング開き角に依存
- リング開き角が大きいと充填率コントラストが大
- 結果としてCリング・カッシーニの隙間では輝度  $I_v(\lambda) = \beta B_v(\lambda, T)$  が小

# 中間赤外線輝度の変動 (2005-2008年)



C ring B ring CD A ring



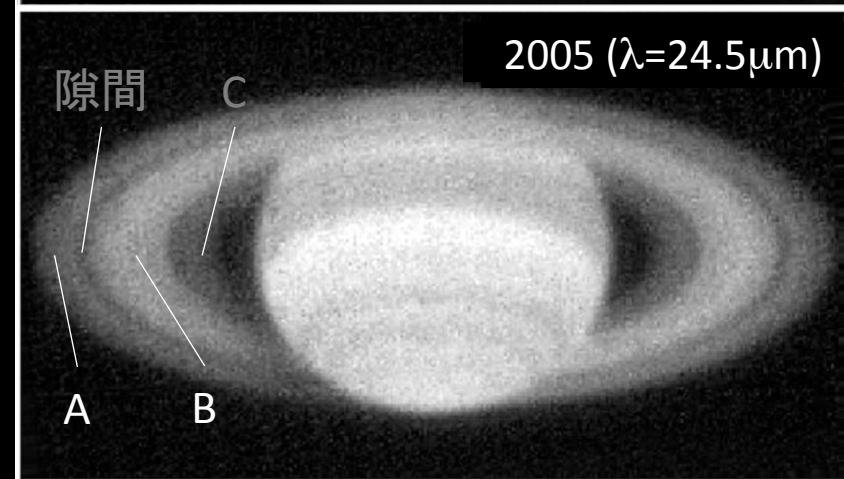
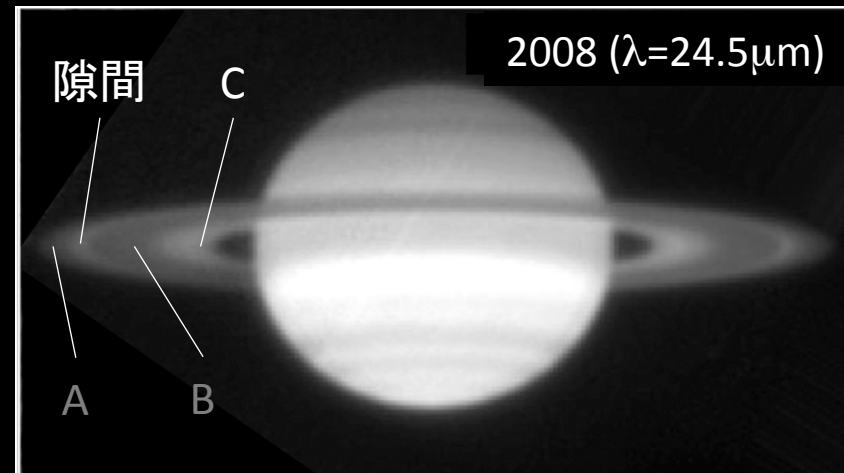
- リング開き角が大きいと充填率  
コントラストが大

# 中間赤外線輝度の変動 (2005-2008年)

- リング開き角が大きい2005年4月のデータ (S05A-029) も解析・比較

Epoch (UT)	$r$ (au)	$\Delta$ (au)	$B'$ (deg)	$B$ (deg)	$\alpha$ (deg)
January 23, 2008	9.27	8.45	-8.7	-7.2	3.5
April 30, 2005	9.07	9.33	-21.9	-23.6	6.1

リング面に対する  
太陽高度 地球高度



- 2005-2008年でコントラストが反転
- 粒子温度・充填率は太陽・地球に対するリング開き角に依存
- リング開き角が大きいと充填率コントラストが大
- 結果としてCリング・カッシーニの隙間では輝度  $I_v(\lambda) = \beta B_v(\lambda, T)$  が小

(より定量的な議論・探査機データとの比較は論文で)

# まとめ

- デブリ円盤の「ミニチュア」として惑星リングに着目
- アーカイブデータを活用した土星の中間赤外線画像
- リング輝度・温度の測定 (地上観測では最高空間分解能)
- 2008年では可視光輝度コントラストと反対 (Cリング・カッシーニの隙間 が B, A リング に比べて高温かつ明るい)
  - 高温の効果が低充填率 (光学的厚み) を上回る
- ただし2005年→2008年でコントラストが反転
  - 充填率は太陽・地球に対するリング開き角に依存
- リングも朝は寒い