



中間赤外線によるデブリ円盤の観測

—「あかり」による温かいデブリ円盤探査—
—追観測によるデブリダストの性質の解明—

○藤原英明、尾中敬(東京大学)、
石原大助(名古屋大学)、あかりVEGADチーム

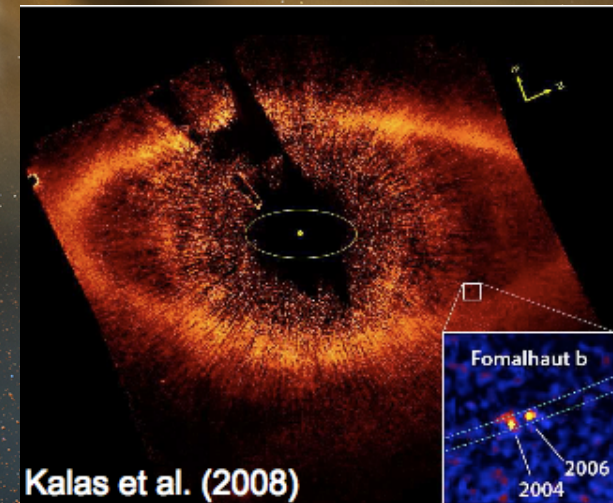
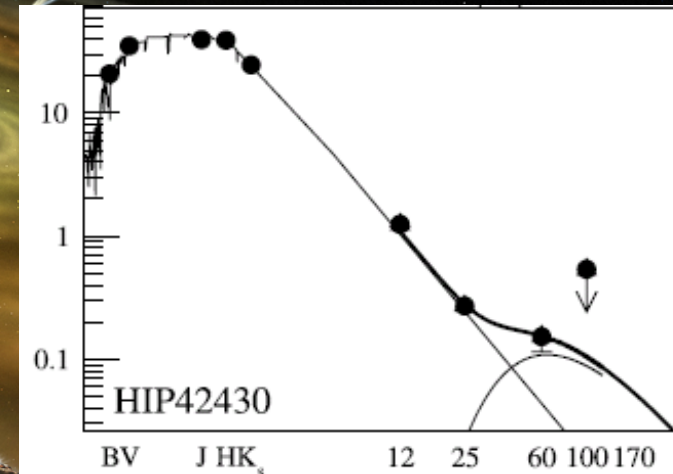
- 「あかり」IRC全天サーベイデータに基づき、中間赤外線超過を示す温かいデブリ円盤の探査を行った
- これまでに25天体検出、うち9天体が新たなデブリ円盤候補
- Subaru, Gemini-S, Spitzerによる追観測
 - (F3V, 2Gyr)をSpitzer/IRSで分光観測(5-35 μ m)
- 年齢に対して極めて大きな超過
- シリカ(SiO₂)ダストの9, 20 μ mフィーチャーを検出
- 岩石質(原始)惑星から放出された可能性を示唆



Introduction: Debris Disk

• デブリ円盤

- 主系列星に見られる星周ダスト円盤
- 赤外線超過として検出
- 可視～近赤外線散乱光などで円盤構造が検出されているものもある
- 起源
 - 二次的に供給されたダスト
 - ダスト散逸タイムスケールを考えると原始惑星系円盤ダストの生き残りではない
 - 惑星形成後期に微惑星の衝突・破壊が彗星状天体の昇華により供給?
- 惑星形成過程と深い関係?
 - Fomalhaut: デブリ円盤 + 惑星



Introduction: Hot Debris Disk

- **Cold Debris ($T_d < 100\text{K}$)**

遠赤外線超過

主系列星の~15%

IRASで多く見つかっていた

- **Warm Debris ($T_d \sim 200\text{K}$)**

中間赤外線超過

主系列星の~2-3%??

- **Hot Debris ($T_d > 300\text{K}$)**

10ミクロン超過

主系列星の~1%??

- Spitzer,「あかり」で見つかりだしてきた
(e.g. Fujiwara+ 09, ApJ 695, L88)

- 惑星形成領域に存在

- 母天体の性質

- 惑星形成との関係

- ダストフィーチャーの議論



AKARI/IRC 18 μ m Survey of Warm Debris Disks

Fujiwara+, in prep.



AKARI MIR All-Sky Survey

- AKARI/IRC 9 & 18 μm

AKARI 9 μm all-sky image
(Zodiacal light subtracted)

Band	S9W	L18W
Wavelength	6-12 micron	14-26 micron
Sensitivity	50 mJy	120 mJy
Resolution	9.4"	

- ▶ Peak of the thermal emission from warm dust grains (~200K) comes to ~ 10-20 micron
- ▶ AKARI/IRC is a powerful tool to search for hot debris disks



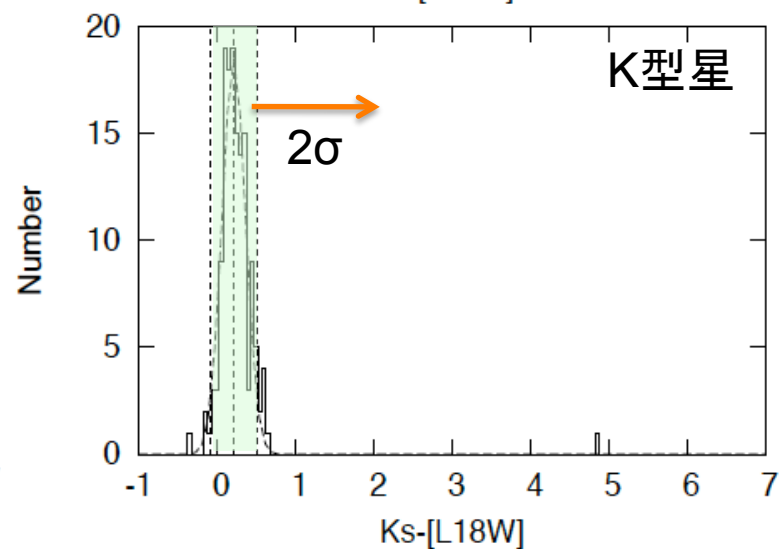
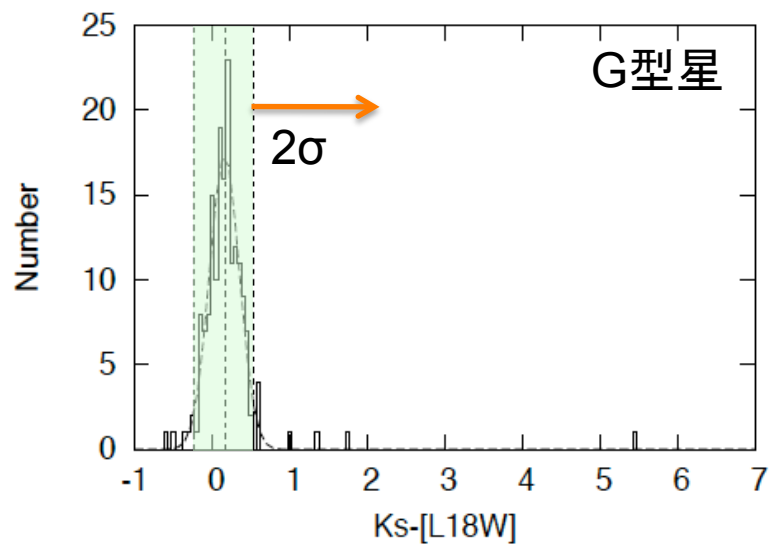
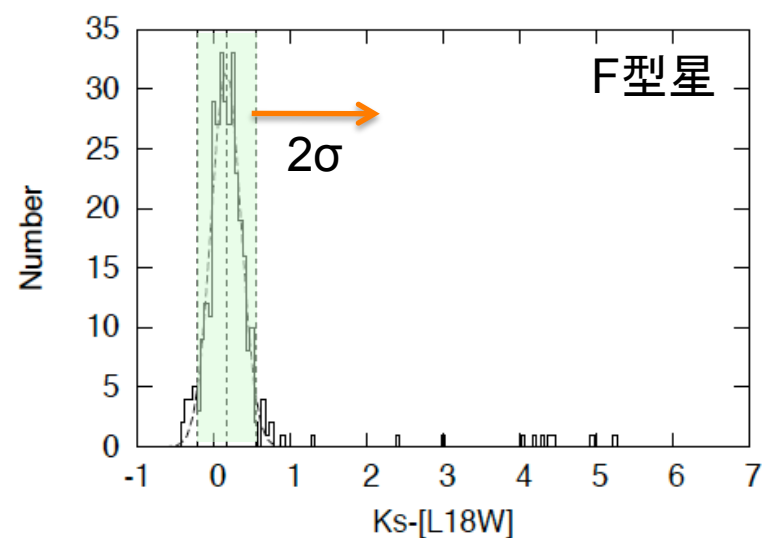
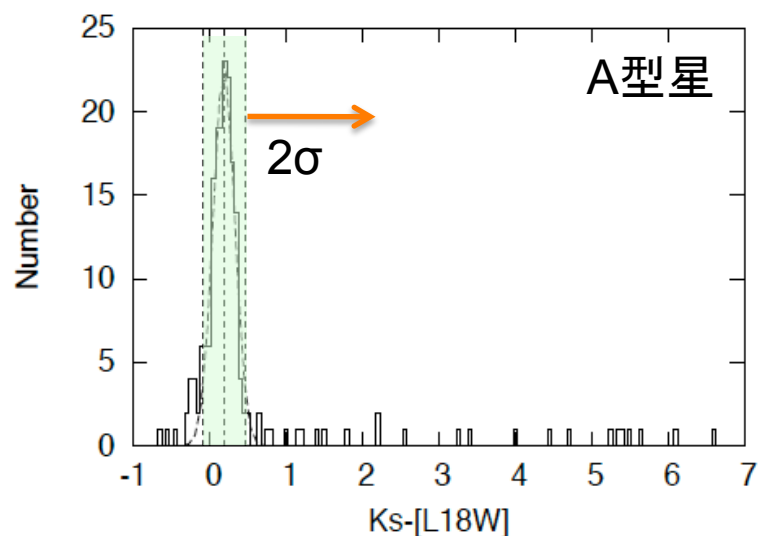
「あかり」IRCによるデブリ円盤サーベイ

- Cross-correlation ($\Delta r < 5''$)
 - AKARI/IRC全天サーベイ点源カタログ
 - Tycho-2 SpT カタログ (Wright+ 2003)より光度階級Vの星
 - 2MASS
- 18 μ m超過を持つ主系列星の抽出
 - Ks-[18]カラーからempirically
 - スペクトル型毎にKs-[18]の分布の 2σ をしきい値に
$$\text{Threshold}(2\sigma) = \mu_{K_S-[L18W]} + 2\sigma_{K_S-[L18W]}$$
- 目視によるチェック → 超過天体候補
- 既知のYSO, late-typeのチェック → デブリ候補





デブリサーベイ: Ks-[18]カラー



結果

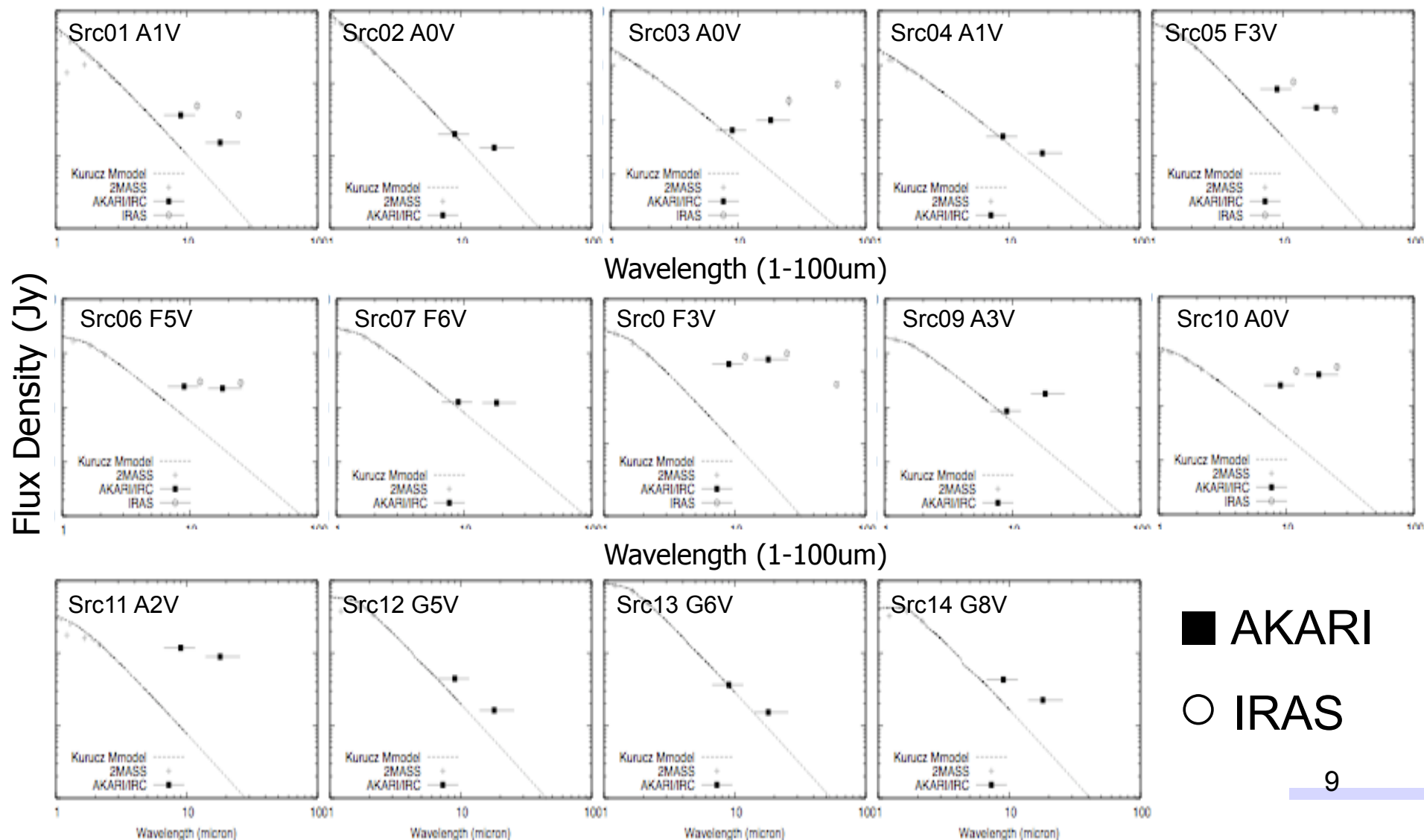
- 光球成分の数十%以上の超過を示す天体の抽出に成功

SpT	Input	Detection	Excess	Debris	Frequency
A	18232	196	21	11	0.056
F	29766	324	12	10	0.031
G	14013	173	4	3	0.017
K	2122	144	2	1	0.007
M	76	19	4	0	0.000
Total	64209	856	43	25	0.029

- このうち、超過がこれまでに未報告のものが9天体
 - ただし(未報告の)YSOがまぎれているかもしれない
- デブリ円盤頻度にスペクトル型依存性?



「あかり」で検出したデブリ円盤の一部





Violent Debris Dust Ejection from a Rocky Planet around 2Gyr Star



Fujiwara+, submitted





Spitzerによる追観測

- Target:
 - F3V主系列星
 - Geneva-Copenhagen survey (Holmberg+ 2007)
 - Age=2.1Gyr, $T_{\text{eff}}=6300\text{K}$, $[\text{Fe}/\text{H}]=+0.8$, $d=55\text{pc}$ (Hipparcos)
 - T_{eff} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, Ageは岡山HIDESの観測で確認
- あかりMIR全天サーベイにより9, 18 μm で大きな超過検出
- IRAS Faint Source Catalogでも超過が示唆 (Oudmaijer +1992)
- Spitzer宇宙望遠鏡/中間赤外線分光器IRSで追観測
 - SL,LLで観測 ($R\sim 100$)
 - 波長精度は0.1 μm 以下



Results: IR Photometry

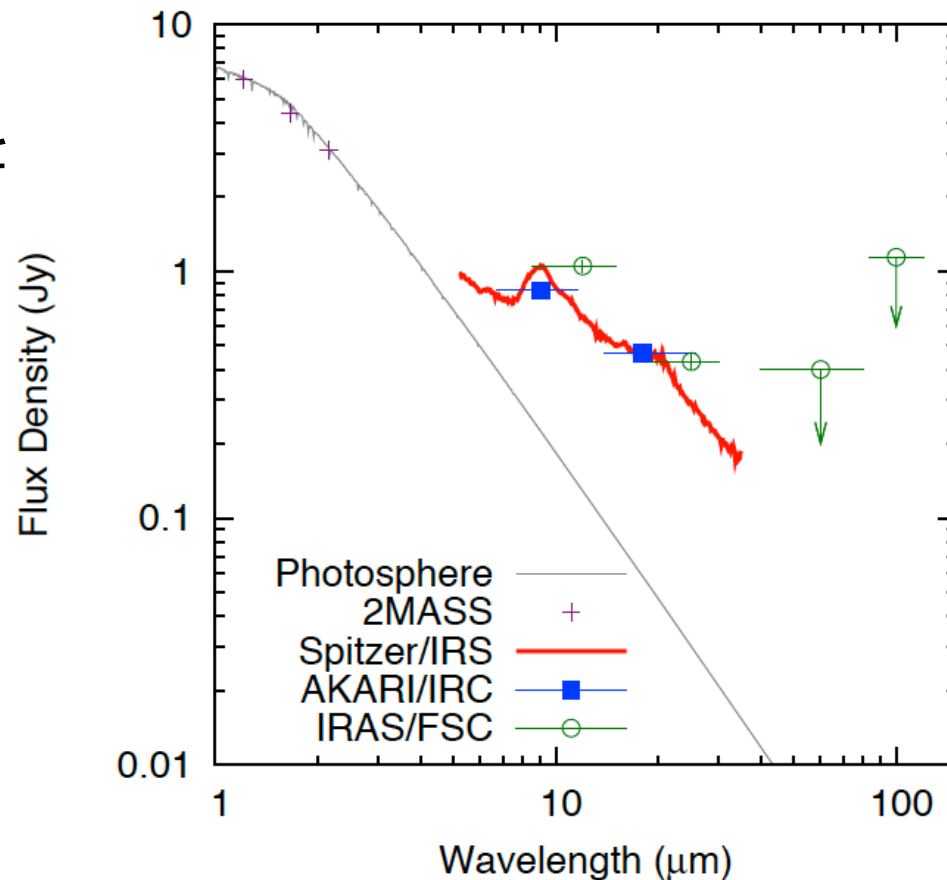
- Tab.: 中間赤外線でのフラックス (by AKARI/IRC & IRAS/FSC)
 - IRASの方が若干明るい ... ビームサイズの違い?
 - IRAS/FSC 60, 100 μ mはupper limit
- Kuruczモデル($T_{\text{eff}}=6500\text{K}$, $\log g=+4.0$) + 2MASS JHKsで光球フラックスを計算
- 超過成分
 - 9 μ mで光球予想フラックスの4倍
 - 18 μ mで8倍

λ (μm)	F_{ν} (Jy)	Instrument	Photosphere ^a (Jy)	Significance, χ^b
9	0.84 ± 0.06	AKARI/IRC	0.22	10.3
12	1.05 ± 0.06	IRAS	0.12	15.5
18	0.47 ± 0.07	AKARI/IRC	0.06	5.9
25	0.43 ± 0.03	IRAS	0.03	13.3
60	< 0.40	IRAS	0.005	...
100	< 1.14	IRAS	0.002	...



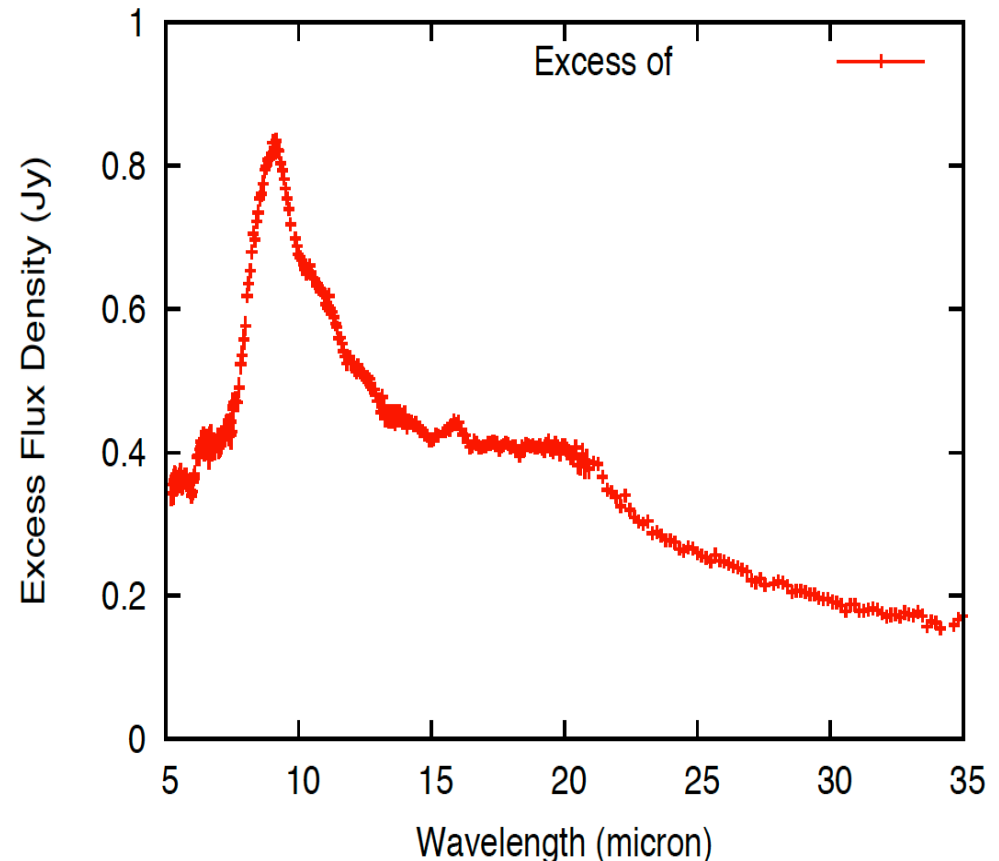
Results: NIR-FIR SED

- Fig. : 近~遠赤外線 SED
 - AKARI/IRC と Spitzer/IRS とは良く合っている
 - $>5\mu\text{m}$ で顕著な超過
 - Hot dust の存在
 - 10, 20 μm に顕著なフィーチャー
 - Si-O, O-Si-O の振動モードか



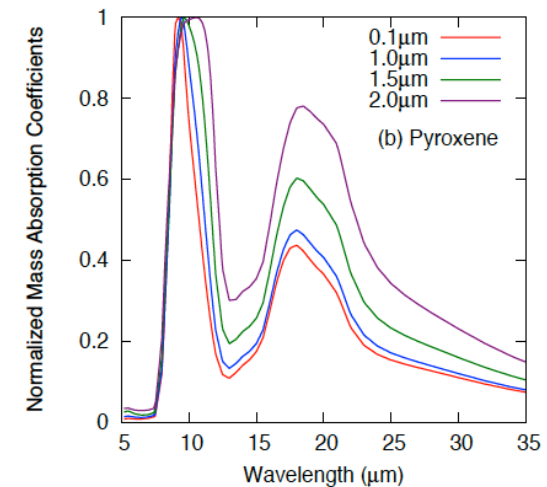
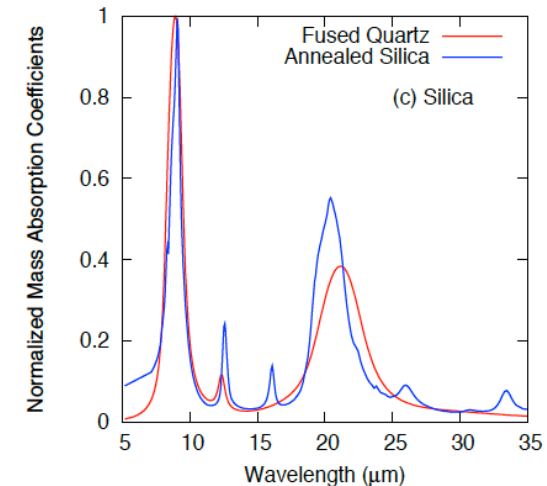
Results: Dust Features

- Fig.: 光球成分を差し引き後のスペクトル
- フィーチャーのピークは9 μm および20-21 μm
 - 非晶質シリケートのピークは9.3-9.7 μm および17-18 μm
 - シリケートだけでは説明できない
 - シリカは9 μm , 20-21 μm にフィーチャーを示す



シリカ

- シリカ(SiO_2)
 - Siを中心とする四面体構造が頂点のOを共有しながら無数につらなる構造
 - 例: quartz(石英)
 - 温度や圧力に応じて様々な構造(多形)
 - 10 μm 付近にSi-Oストレッチモード、20 μm 付近にO-Si-Oベンディングモードに由来するフィーチャー(シリケートと同じ)
 - 星間ダストには見られない(Kemper+ 04)
 - 星間空間ではシリケートがほとんど
 - Sargent+ 09 が T Tau 型星で検出(結晶質)



Results: Dust Features

- 超過成分スペクトルのモデル

$$F_{\text{exc},\nu}^{\text{mod}}(\lambda) = \underbrace{\Omega_{\text{BB}} B_{\nu}(\lambda, T_{\text{BB}})}_{\text{blackbody}} + \underbrace{a_{\text{silicate}} \kappa_{\text{silicate}} B_{\nu}(\lambda, T_{\text{silicate}})}_{\text{シリケイト}} + \underbrace{a_{\text{silica}} \kappa_{\text{silica}} B_{\nu}(\lambda, T_{\text{silica}})}_{\text{シリカ}}$$

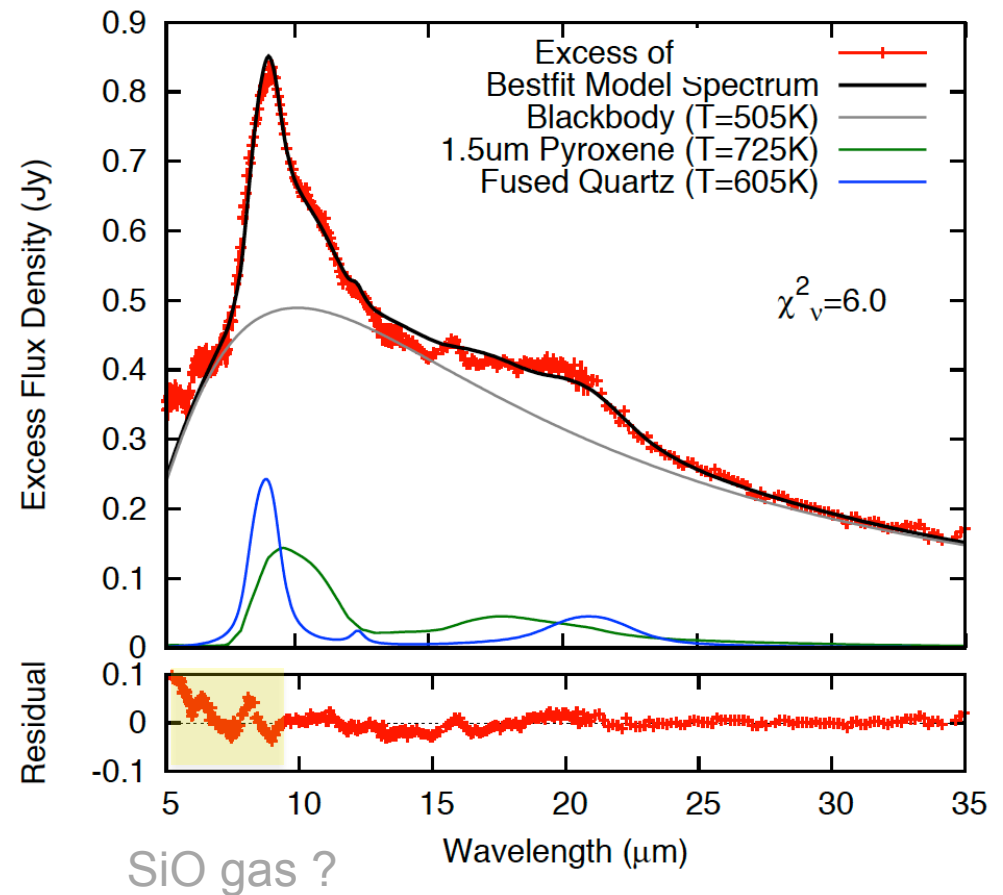
- シリケイト: 1.5 μm サイズの非晶質パイロキシシン ($\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{SiO}_3$)
 - 太陽系／原始惑星系円盤では普遍的なダスト
 - 質量吸収係数は Dorschner+ 95 の光学定数からMieで計算
- シリカ: 非晶質(溶融)石英 (by Koike+ 89)
 - Koike+ 89 の光学定数からCDEで計算

Results: Dust Features

- 1.5 μm -sized pyroxene と非晶質石英の組み合わせで非常に良く再現
- blackbodyからの寄与が最大
- ダスト温度は $T_d=500\text{-}700\text{K}$ (誤差10%程度)
- Pyroxene 対 Silica の質量比 = 0.6 : 0.4

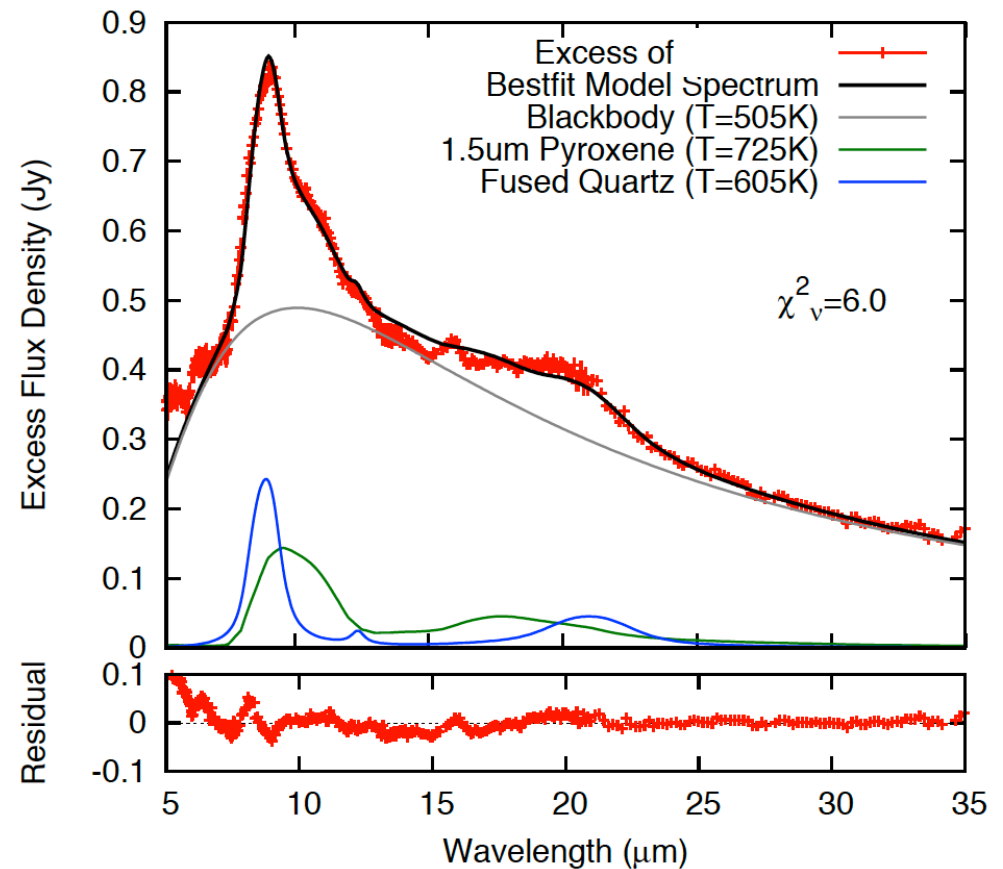
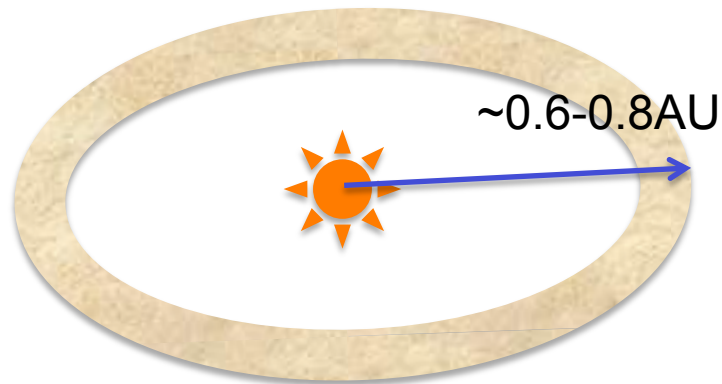
Table 2: Best-fit parameters.

Parameter		Best-fit value
temperature of blackbody	T_{BB}	505 K
solid angle of blackbody	Ω_{BB}	2.34×10^{-16} str
temperature of silicate	T_{silicate}	725 K
weight parameter of silicate	a_{silicate}	1.05×10^{-20} g·str·cm $^{-2}$
temperature of silica	T_{silica}	605 K
weight parameter of silica	a_{silica}	7.53×10^{-21} g·str·cm $^{-2}$
resultant χ^2_{ν}		6.06



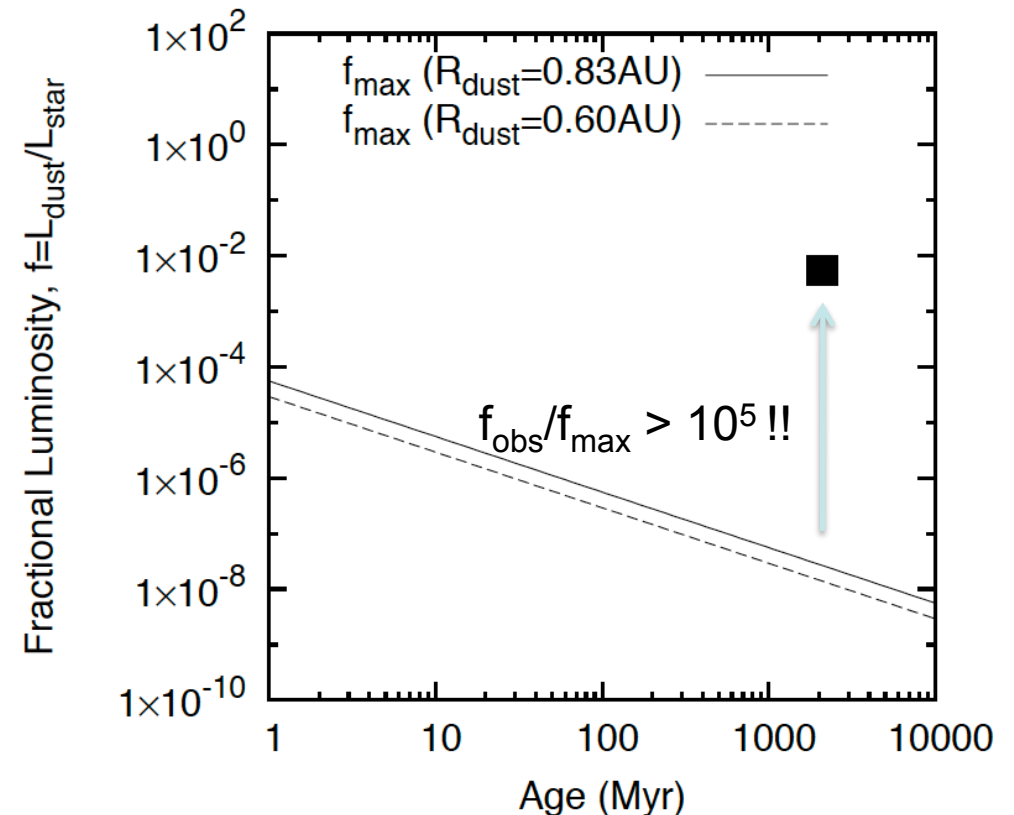
Results: Dust Features

- ダスト温度 $T_d=500-700\text{K}$ は $R=0.6-0.8\text{AU}$ に相当
- パイロキシン+シリカダスト質量 $M_{\text{dust}}=5 \times 10^{17}\text{kg} \sim 10^{-7} M_{\text{Earth}}$
 - ただし下限値
- シリカはUV~可視での吸収率が極めて低い
 - 高温で存在するためには、他のダスト種と接触している必要がある



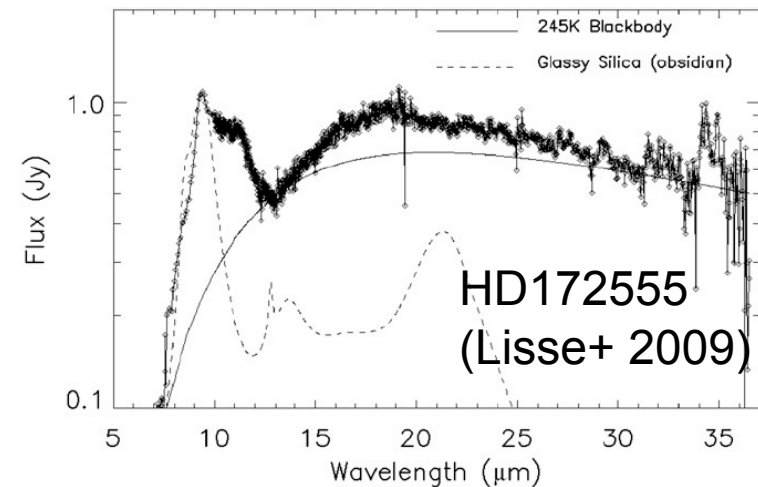
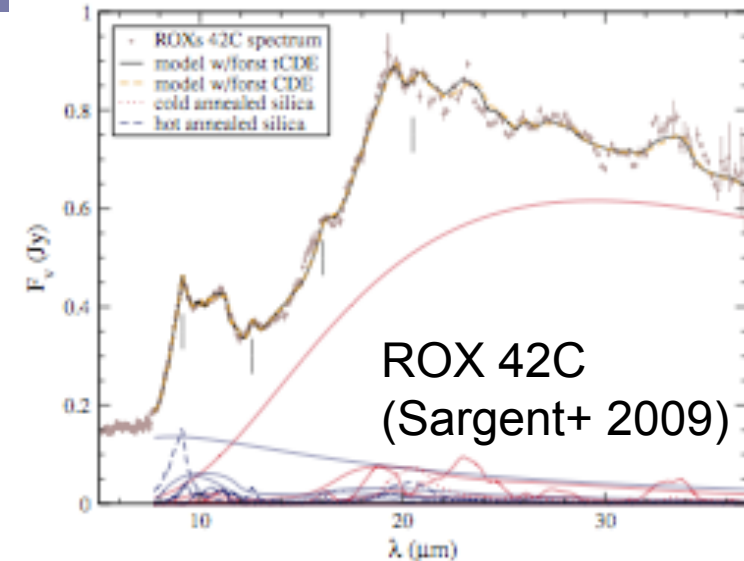
Results: Fractional Luminosity

- $f = L_d/L_* = 5 \times 10^{-3}$
- 小惑星同士の定常的な衝突破壊によるデブリ円盤進化モデル (Wyatt+ 06)
 - 典型的なパラメタでのFLの最大値
$$f_{\max} = 0.16 \times 10^{-3} R_{\text{dust}}^{-7/3} M_*^{-5/6} L_*^{-0.5} t_{\text{age}}^{-1}$$
 - $\sim \text{a few} \times 10^{-8}$
- はるかに大きな($\times 10^5$!!)超過
- Transient なダスト生成現象を考える必要がある
 - Late Heavy Bombardment ?
 - しかし2Gyrでは惑星形成は終了しているはず !



Discussion

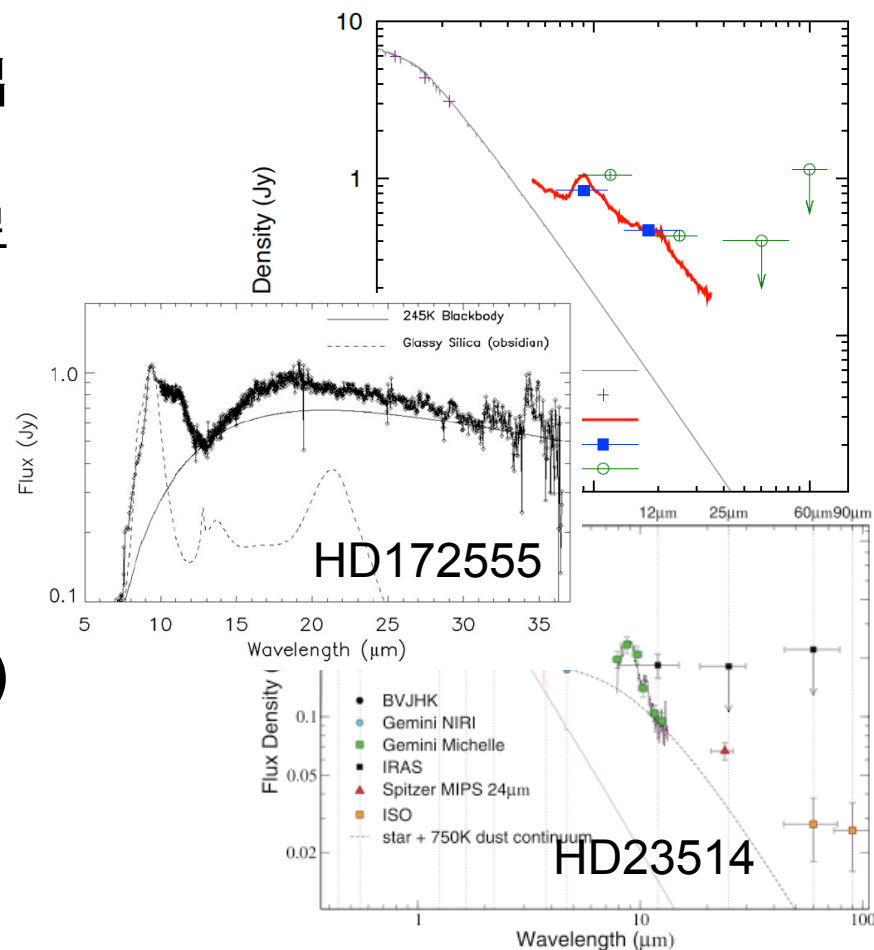
- 宇宙におけるシリカ
 - 星間空間では未検出(Kemper+ 04)
 - いくつかのTTSsで検出 – 結晶質 (Sargent+ 09)
 - 太陽系天体でも検出
 - コンドライト(Dodd+ 81) - 結晶質
 - Wild2/STARDUST - 結晶質 (Zolensky+ 06)
 - 地球の造岩鉱物 – 非晶質,結晶質
 - デブリ円盤
 - HD172555(A5V,12Myr; Lisse+ 09)
 - HD23514(G0,100Myr; Rhee+ 08) ?





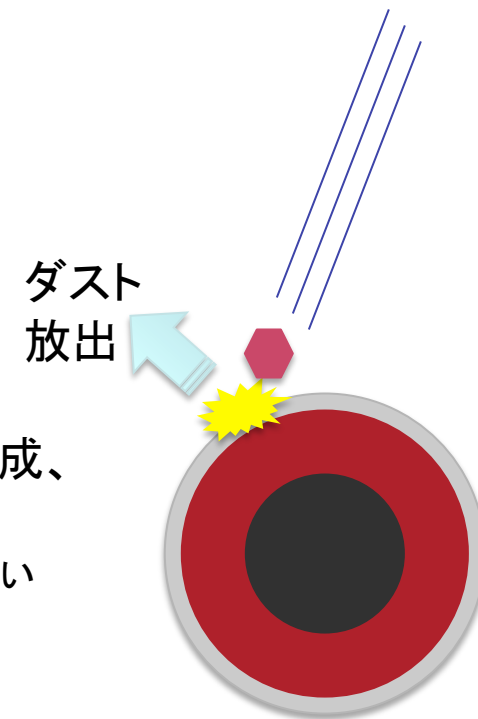
Discussion

- ,HD172555でシリカ検出
 - HD23514もおそらく
 - 原始惑星系円盤->デブリ円盤->惑星系(太陽系)の全てのフェーズにシリカ検出
- 惑星系形成プロセスにおいてはシリカは実は普遍的？
- シリカが検出されたデブリ円盤にはすべて高温ダスト(>200K)
 - 中心星のごく近傍に存在しダストが十分に温められるケースでのみ観測される？



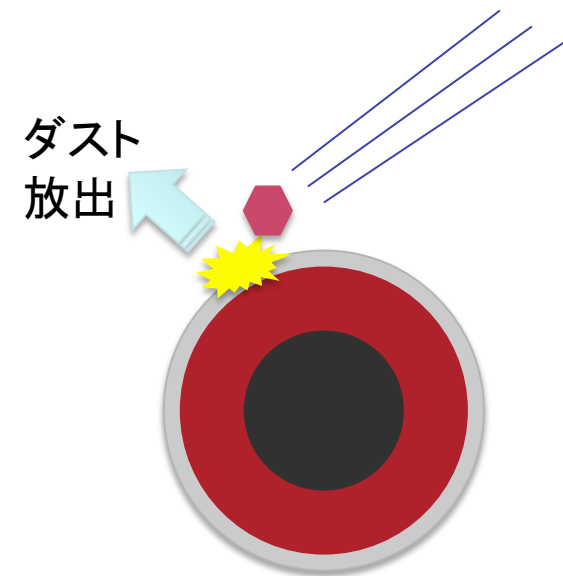
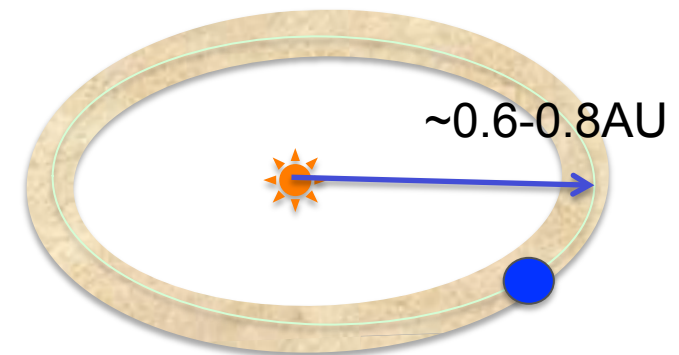
Discussion: シリカ生成過程

- 原始惑星系円盤(TTS): Sargent+ 09で議論
 - Faban+ 2000: エンスタタイトのレーザー加熱実験
 - エンスタタイトから小さなSiO₂ smoke 粒子が生成
 - ショック加熱など平衡状態を経ない加熱により、円盤内で生成
 - 高温低圧下生成物tridymite, cristobalite(結晶質)様のものが主
- デブリ円盤
 - 高温低圧下生成シリカはminor (12.6 μ mフィーチャの欠如)
 - しかも、ダスト全体として金属がdepleteしている
 - 原始惑星系円盤と同じメカニズムを考えるのは厳しい
- 集積、内部分化した(原始)惑星の表面(地殻)で石英生成、天体の高速衝突などにより放出された可能性
 - 地球表層には多量の石英(花崗岩), tridymite, cristobaliteは少ない
 - 極めて大きなLuminosity Fraction、SiOガスフィーチャも傍証



まとめ

- 主系列星 にシリカ(非晶質石英)ダストフィーチャーを検出
 - 原始惑星系円盤と太陽系との間を埋める存在
- 非常に大きなfractional luminosity
 - Transient event
- 岩石質感星起源のダストの可能性
 - R~0.6-0.8AUに岩石質感星？
- ごく最近に高速衝突現象か
 - しかも2Gyrの星で！
- 太陽系における衝突現象との関連？
 - クレーター、SL9、水星の密度の高さ、...



ダストをトラップする機構

- 放射圧 (Meyer+ 04)
- $\beta = F_{\text{rad}} / F_{\text{grav}}$
 $\sim (0.4 \mu\text{m}/a)(2.7 \text{g/cm}^3/\rho)(L_{\text{star}}/M_{\text{star}})$
 ~ 1.1
 - $a=1 \mu\text{m}$, $\rho=2.7$, $L_{\text{star}}=3.9L_{\text{sun}}$, $M_{\text{star}}=1.4M_{\text{sun}}$
- μm サイズのダストは放射圧ですぐに飛ばされるはず
- 観測確率を考えると、ダストを星周にトラップし、寿命を長引かせる機構を考える必要がある？
 - 羊飼い衛星
 - 土星、天王星
 - 惑星のresonant
 - 地球との共鳴による "Cirucumsolar Dust Ring" の発見 (Reach+ 95)