

# MIMIZUKUを用いた 新星集のダスト形成・供給過程の解明

左近 樹、酒向重行、  
大澤亮、下西隆、中村友彦、尾中敬、  
宮田隆志、高橋英則、藤吉拓哉、  
野沢貴也、小笹隆司、他

# 古典新星

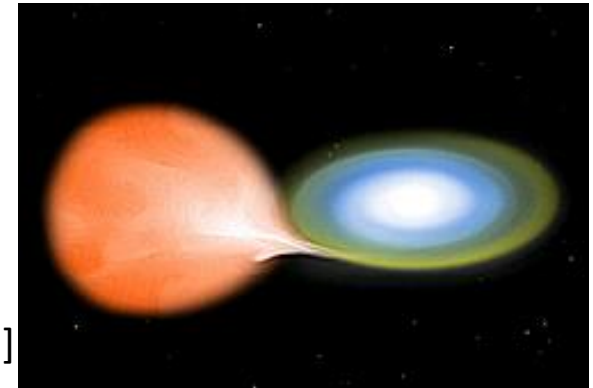
分類 (Gehrz, Truran & Williams 1993; Gehrz et al. 1998)

## 1). CO新星

- 比較的低質量のCO白色矮星( $M_{WD} < 1.1M_{\odot}$ )が熱核暴走に至る現象
- free-free phaseが終わった後に、ダスト形成が報告。

[e.g., V2362 CYGNI (Lynch et al. 2008), V705 Cas (Evans et al. 1997), etc.]

- 複雑なダスト組成 (both Silicates and Carbonaceous dust)



## 2). ONeMg新星

- 比較的大質量のONeMg白色矮星( $M_{WD} > 1.1M_{\odot}$ )の表面での熱核暴走の結果引き起こされる現象
- free-free phaseが終わった後は、coronal emission-lines phaseに移行する。
- No or little evidence of dust formation (cf., V1974 CYGNI; Woodward et al. 1995 )

### *Dust Forming Novae (Gehrz et al. 1998)*

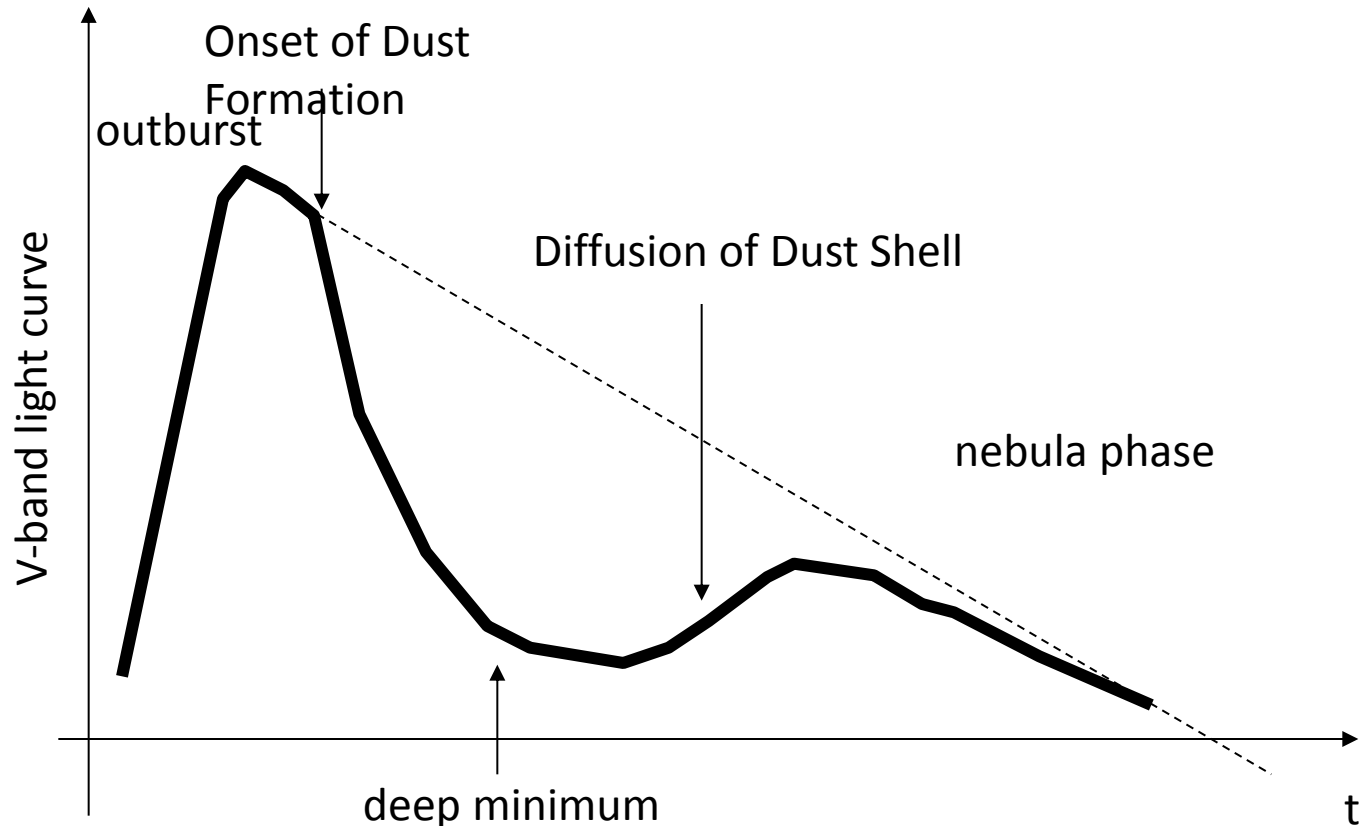
Object	Year	Type of Dust	Object	Year	Type of Dust
FH Ser	1970	C	OS And	1986	C?
V1229 Aql	1970	C	V842 Cen	1986	C, SiC, HC
V1301 Aql	1975	C	V827 Her	1987	C
NQ Vul	1976	C	QV Vul	1987	C, SiO <sub>2</sub> , HC, SiC
V4021 Sgr	1977	C	LMC1998#1	1988	C?
LW Ser	1978	C	V838 Her	1991	C
V1668 Cyg	1978	C	V704 Cas	1993	C, HC, silicates
V1370 Aql	1982	C, SiC, SiO <sub>2</sub>	V1419 Aql	1993	?
PW Vul	1984	C	V1494 Aql	1995	C
QU Vul	1987	SiO <sub>2</sub>	V2274 Cyg	2000	?

# 古典新星の光度曲線進化と白色矮星質量、ダスト形成

光度曲線の進化のスピードは、白色矮星質量に依存 (Kaler & Schmidt's law)

速 ← 光度曲線の進化スピード → 遅  
大( $> \sim 1.3M_{\odot}$ ) ← 白色矮星質量 → 小( $< \sim 0.6M_{\odot}$ )

ダスト形成を伴う古典新星 → 大半がCO新星 ( $M_{WD} < 1.1M_{\odot}$ )



# Light Curve Evolution and Mass loss/Dust Formation History of V1280Sco

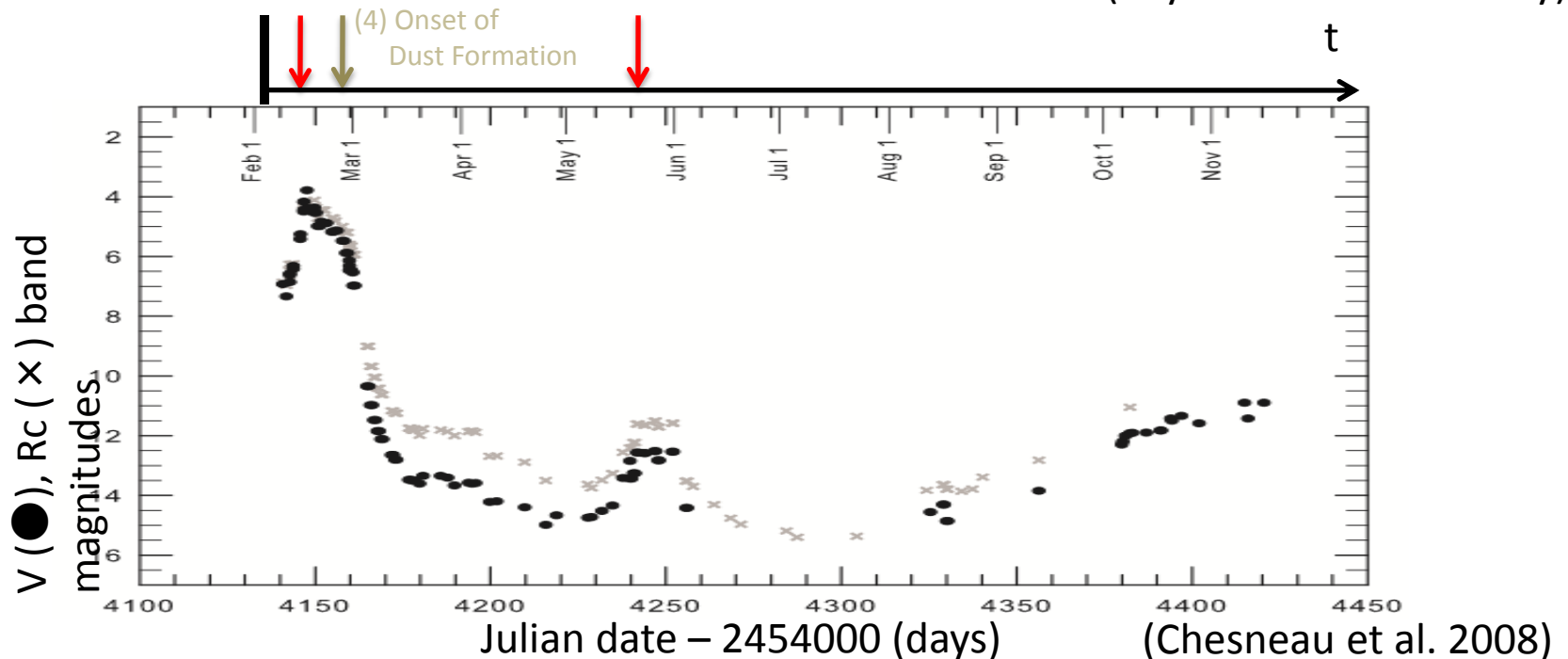
- (1) DISCOVERY ; 2007, Feb., 4.85 [JD=2454136.85] (t=0 days; Yamaoka et al. 2007)
- (2) THE TIME OF EJECTION ; 2007, Feb., 15 (t~10.5±7 days; Das et al. 2008; Chesneau et al. 2008)
- (3) MAXIMUM LIGHT CURVE ; 2007, FEB., 16 (t=12 days after the discovery)
- (4) ONSET OF DUST FORMATION ; 2007, FEB., 28 (t=23 days after the discovery)
- (5) HIGHEST DUST FORMATION ; t=36-45 days 7.4x10<sup>-9</sup> M<sub>sun</sub>/day (Chesneau et al. 2008)
- (6) SECOND MAXIMUM ; 2007, MAY, 20 (t=104 days after the discovery)

(2) The time of ejection (t=10.5d)

(3) Maximum light curve

(6) Second Maximum light curve (t=104d)

(days after the discovery)

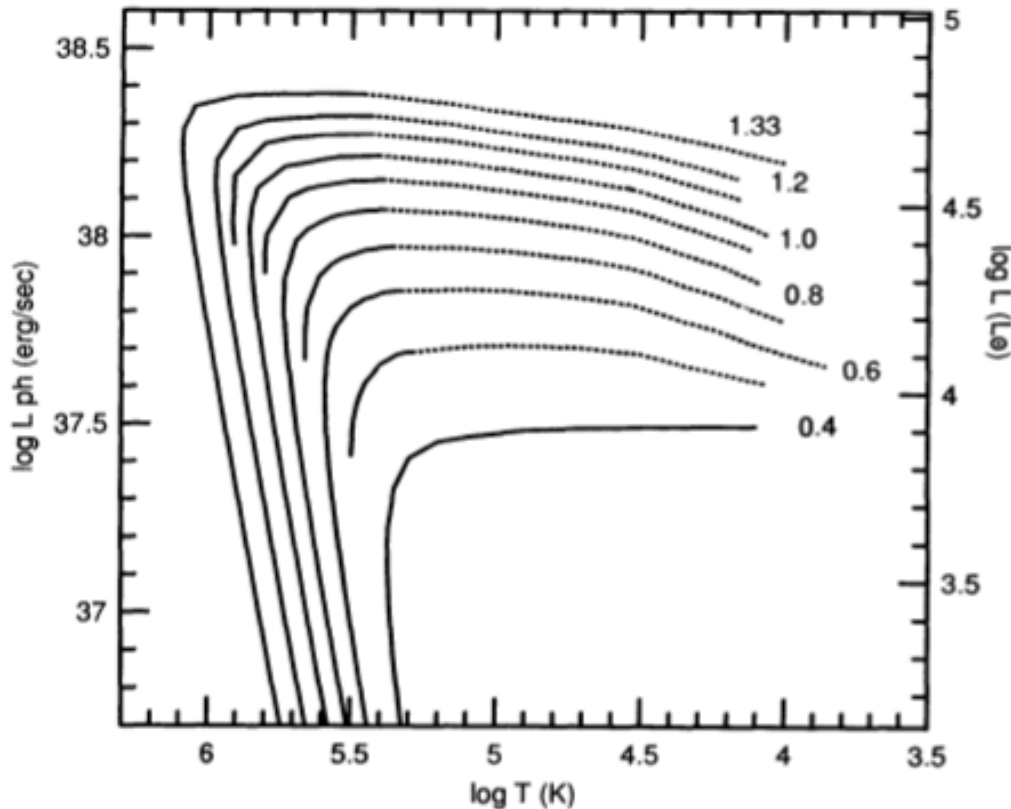


V1280Scoの白色矮星質量は0.6M<sub>⊙</sub> (Naito et al. 2012)

→ 最も光度曲線進化の遅い古典新星の一つ。

Nebular phaseに移行するまで2000日以上かかる。

# Luminosity and Temperature Evolution WD



(Kato & Hachisu 1994, ApJ, 437, 802)

*V1280Sco*;  $M_{\text{WD}} = 0.6 M_{\odot}$   
Assuming  $X = 0.35$ ,  $Y = 0.33$ ,  $C+O = 0.30$

Day 150d;

$T_{\text{WD}} = 25,000 \text{ K}$

$M_{\text{WD}} = 16,000 L_{\odot}$

Days  $> 1000 \text{ d}$ ;

(close to nebular phase)

$T_{\text{WD}} = 100,000 \text{ K}$

$M_{\text{WD}} = 18,000 L_{\odot}$

# Expanding Dust Structures Around V1280Sco

$d=1.1 \pm 0.4$  kpc (Naito et al. 2012)

1"



1" corresponds to the distance at which the ejected materials with 350km/s can travel in 5000 days

0.25"



the distance at which the ejected materials with 350km/s can travel in ~1250 days

0.32"

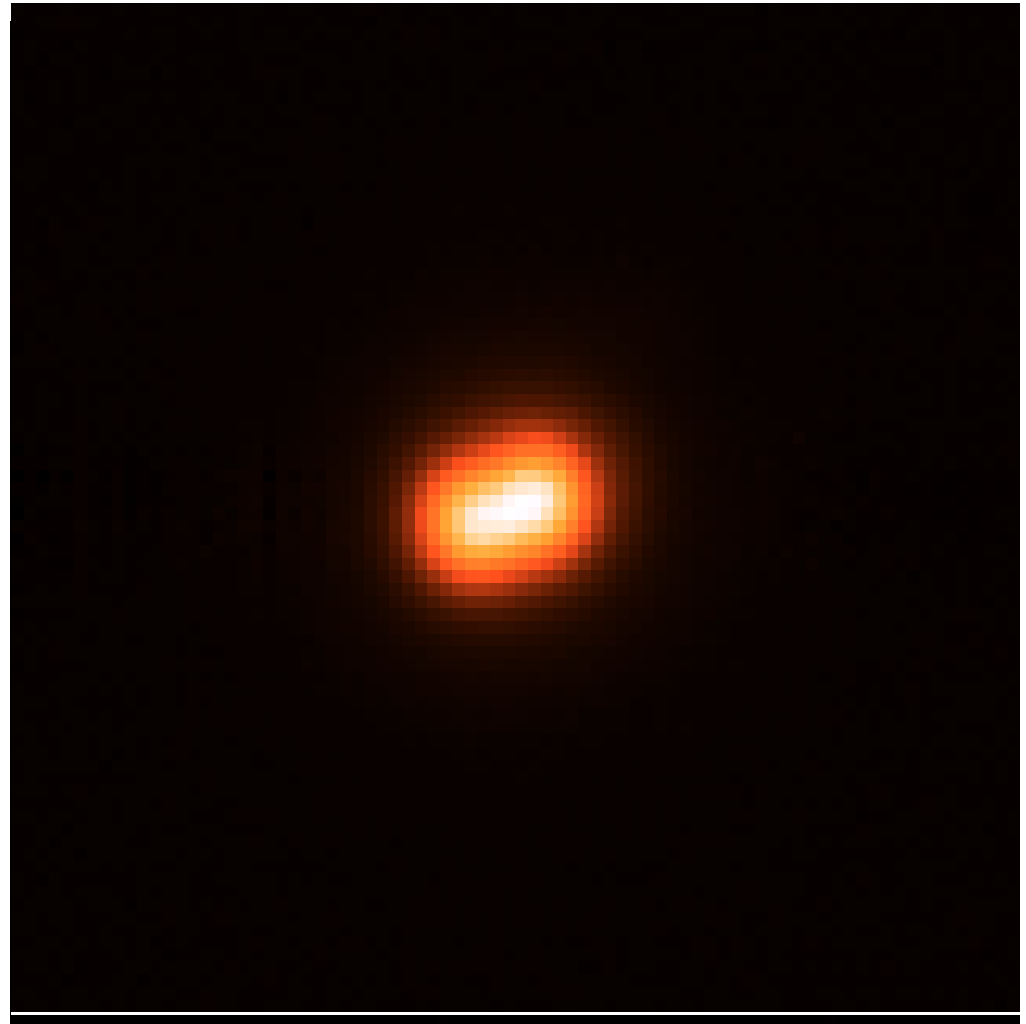


the distance at which the ejected materials with 350km/s can travel in ~1600 days

0.40"



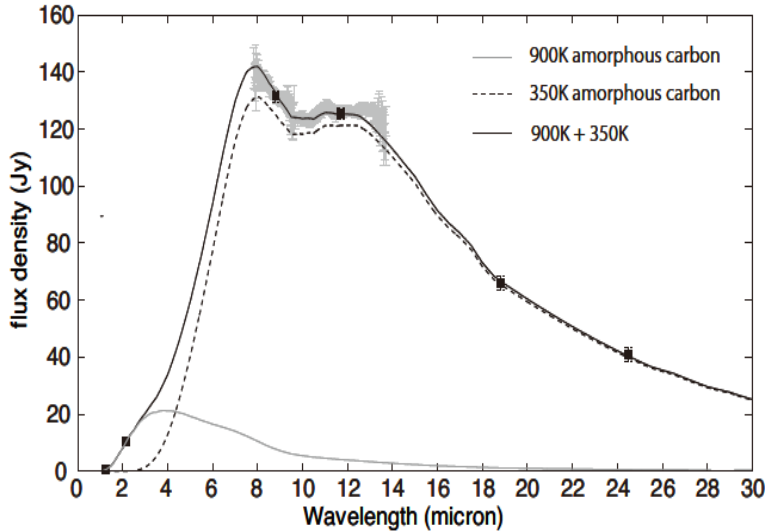
the distance at which the ejected materials with 350km/s can travel in ~2000 days



Day 1947 (5<sup>th</sup> Aug, 2013)  
Day 1916 (10<sup>th</sup> Aug, 2011)

Subaru/COMICS N11.7, Gemini-S/TReCS Si-5 (11.7 $\mu$ m)

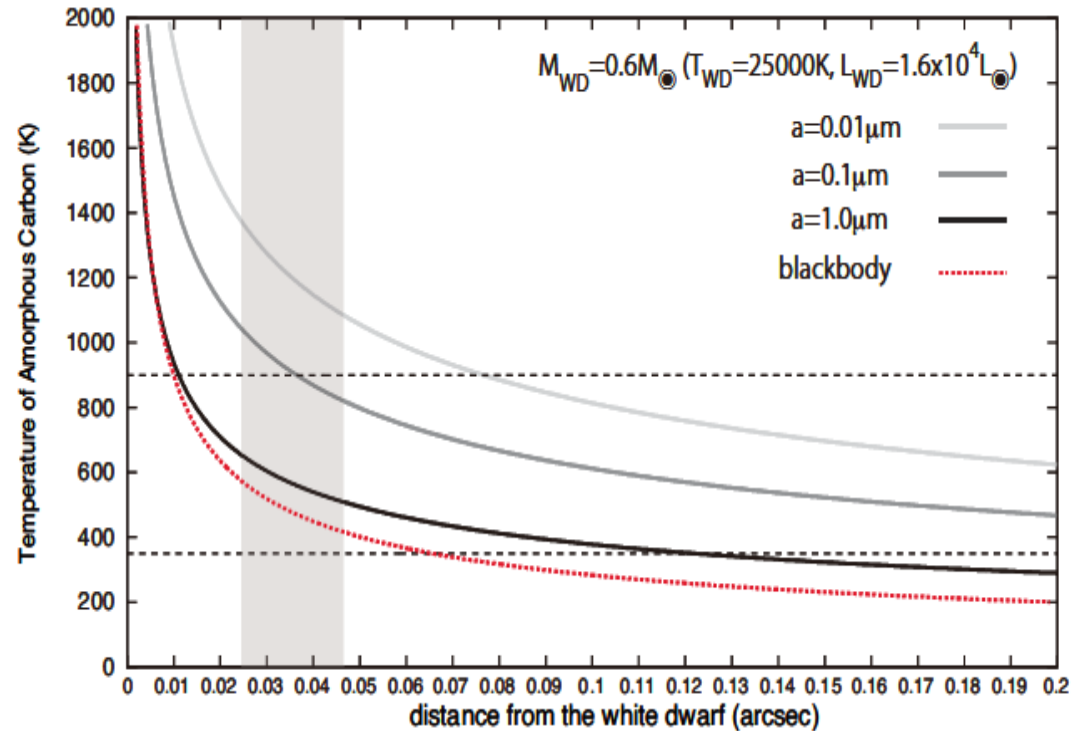
# Dust SED Model Fit (V1280Sco at Day 150)



	Component 1	Component 2
Composition	Amorphous Carbon	Amorphous Carbon
Temperature $T_i$	$900 \pm 10\text{K}$	$350 \pm 10\text{K}$
Mass $M_i$	$3.2 \times 10^{-9}M_{\odot}$	$1.0 \times 10^{-6}M_{\odot}$

Silicate absorption;  $\tau_{9.7}=0.238$

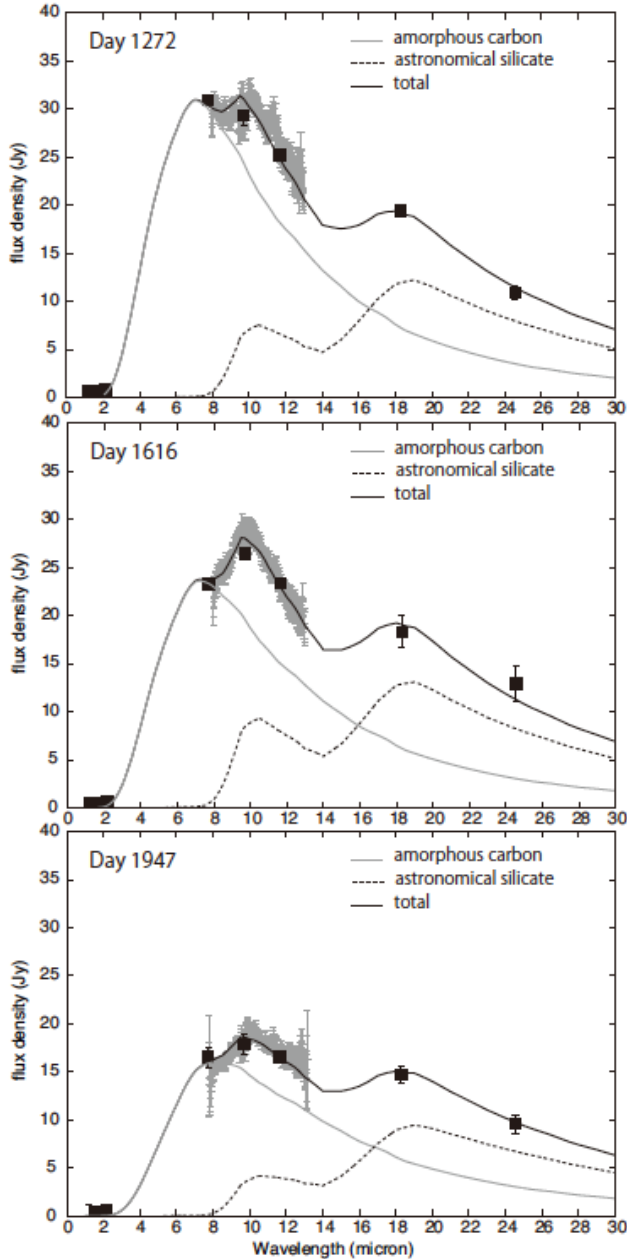
Temperature evolution of amorphous carbon of various size assuming optically thin geometry



影部 ; 320km/s – 620km/sで広がる新星の放出ガスが150日時点で到達する距離

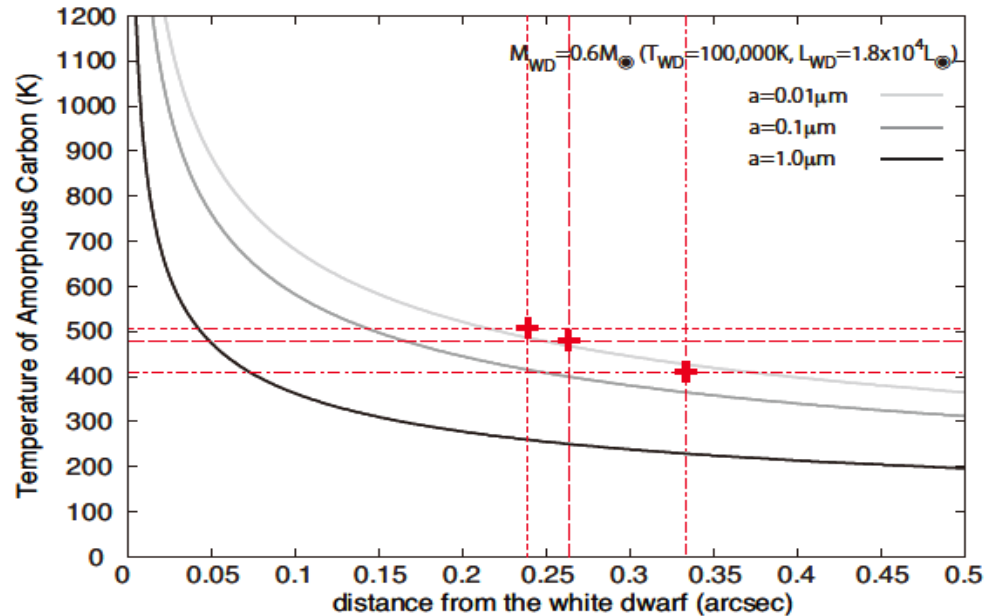
少なくとも紫外線-可視光領域でOptically thickな環境を想定する事が必要。

# Dust SED Model Fit (V1280Sco at Days 1272, 1616, 1947)



Epoch (days)	Amorphous Carbon			Astronomical Silicate		
	1272	1616	1947	1272	1616	1947
Temperature (K)	$505 \pm 10$	$480 \pm 10$	$410 \pm 10$	$200 \pm 10$	$210 \pm 10$	$180 \pm 10$
Mass ( $10^{-7} M_{\odot}$ )	$0.94^{+0.05}_{-0.05}$	$0.89^{+0.06}_{-0.05}$	$1.19^{+0.14}_{-0.13}$	$10.6^{+3.5}_{-1.2}$	$9.4^{+3.2}_{-1.5}$	$12.6^{+4.2}_{-2.0}$

Temperature evolution amorphous carbon of various size assuming optically thin geometry

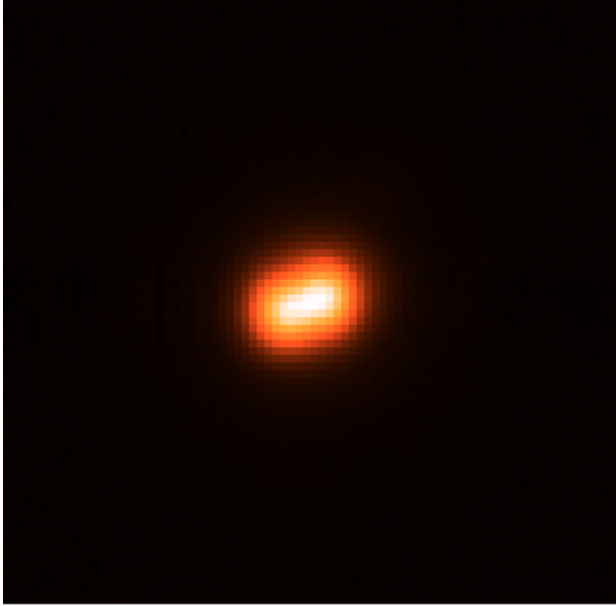


問題点 ; Astronomical silicateを、観測値から想定されるWDからの距離範囲内に200Kで配置できない。

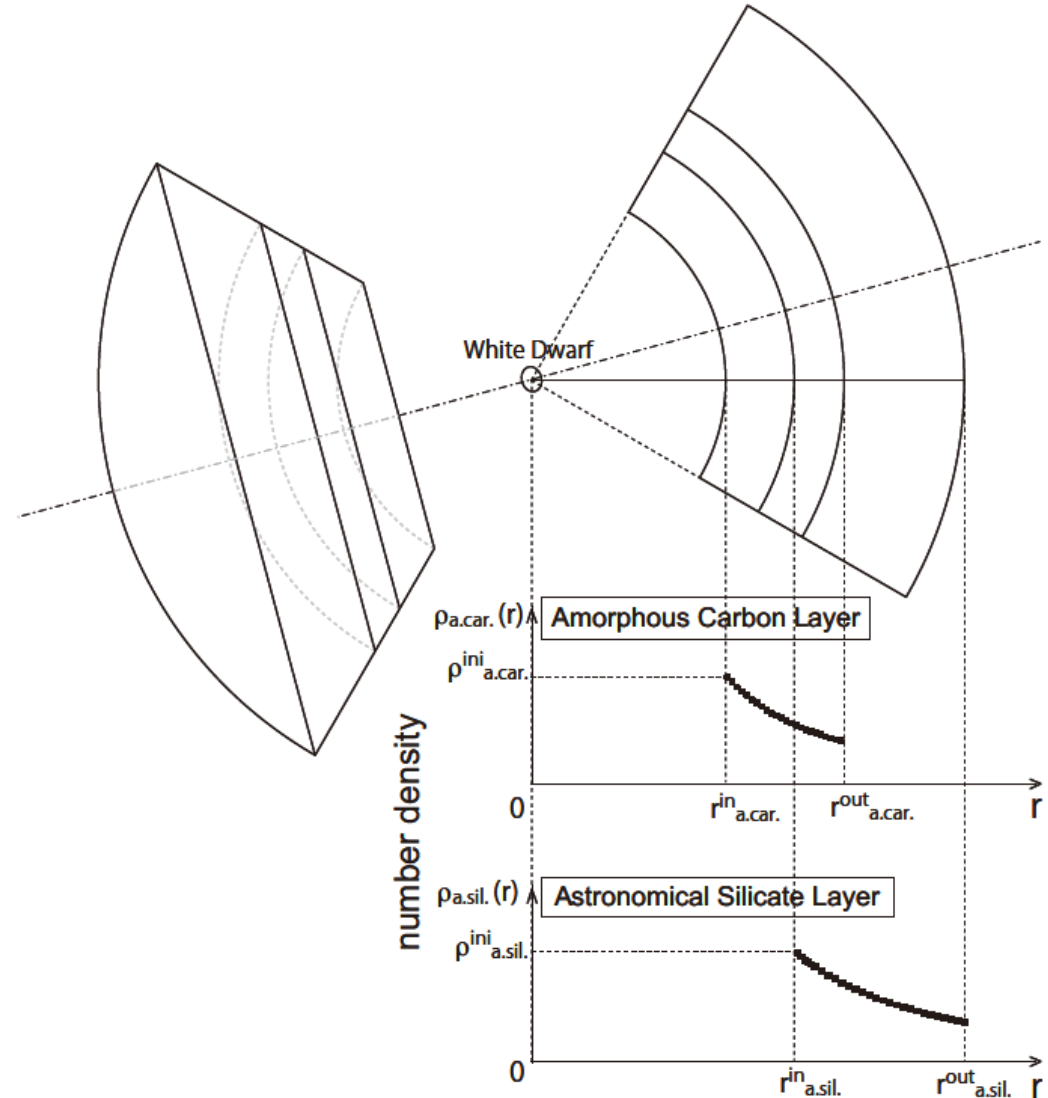


# Dust SED Model Analyses (Days 1272, 1616, 1947)

11.7 $\mu\text{m}$  image of V1280Sco (Day 1947)



Geometry of dust around V1280Sco

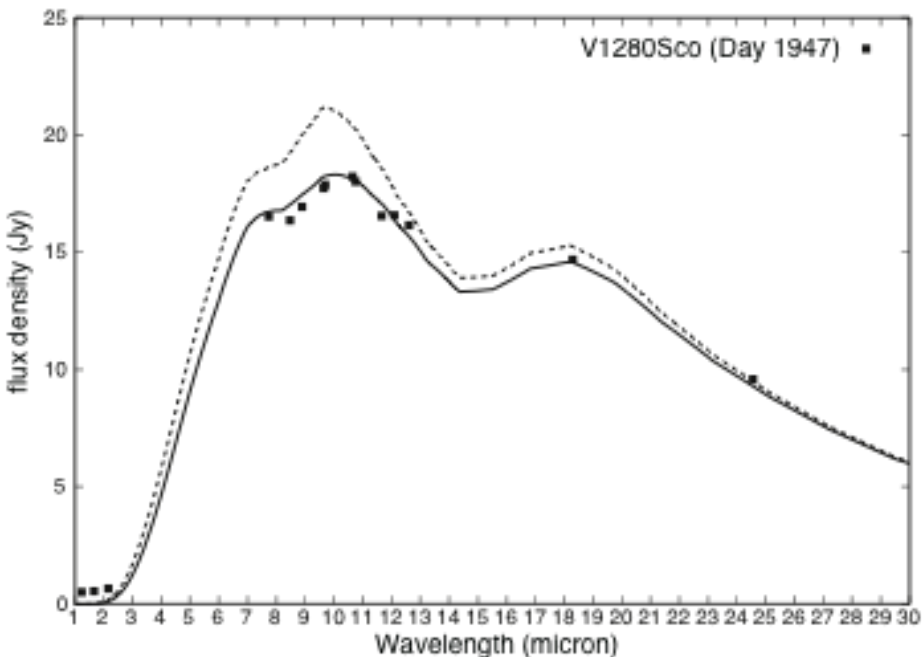


$$\rho_{a.car.}(r) = \begin{cases} 0 & (r < r_{a.car.}^{in}) \\ \rho_{a.car.}^{ini} \times \left(\frac{r}{r_{a.car.}^{in}}\right)^2 & (r_{a.car.}^{in} < r < r_{a.car.}^{out}) \\ 0 & (r_{a.car.}^{out} < r) \end{cases}$$

$$\rho_{a.sil.}(r) = \begin{cases} 0 & (r < r_{a.sil.}^{in}) \\ \rho_{a.sil.}^{ini} \times \left(\frac{r}{r_{a.sil.}^{in}}\right)^2 & (r_{a.sil.}^{in} < r < r_{a.sil.}^{out}) \\ 0 & (r_{a.sil.}^{out} < r) \end{cases}$$

# 赤外線波長域でoptically thinは成立するか？

Day 1947のV1280Scoに対する  
SEDモデル解析の結果



Composition of Dust;

Amorphous Carbon with  $a=0.01\mu\text{m}$

Astronomical Silicate with  $a=0.01\mu\text{m}$

$Q_{\text{abs}}^{\text{car}}(\lambda)$ ,  $Q_{\text{abs}}^{\text{sil}}(\lambda)$  for  $\lambda < 0.1\mu\text{m}$ ; Dwek & Smith (2006)

$Q_{\text{abs}}^{\text{car}}(\lambda)$  for  $\lambda > 0.1\mu\text{m}$ ; Zubko et al. (1996)

$Q_{\text{abs}}^{\text{sil}}(\lambda)$  for  $\lambda > 0.1\mu\text{m}$ ; Draine et al. (1984)

----- Stellar Parameters -----

White Dwarf Mass;  $M_{\text{WD}}=0.6 M_{\odot}$

Effective Temperature at Day 1272; 100,000K

Total Luminosity at Day 1272; 18,000 $L_{\odot}$

----- best-fit parameters -----

Inner Radius of Carbon Dust Shell;  $r_{\text{in}}^{\text{car}}=0.16''$

Outer Radius of Carbon Dust Shell;  $r_{\text{out}}^{\text{car}}=0.32''$

Inner Radius of Silicate Dust Shell;  $r_{\text{in}}^{\text{sil}}=0.32''$

Outer Radius of Silicate Dust Shell;  $r_{\text{out}}^{\text{sil}}=0.80''$

Initial Number Density at  $r_{\text{in}}^{\text{car}}$ ;  $\rho_{\text{in}}^{\text{car}}=1.0 \times 10^3 \text{ (m}^{-3}\text{)}$

Initial Number Density at  $r_{\text{out}}^{\text{sil}}$ ;  $\rho_{\text{out}}^{\text{sil}}=2.5 \times 10^3 \text{ (m}^{-3}\text{)}$

Opening Angle; 15deg

実線; 観測される赤外放射のベストフィットモデル結果

点線; 仮に赤外線波長域で完全にoptically thinであった場合の放射スペクトル

→ 完全には、赤外線波長域でもoptically thinとは言えない。

# MIMIZUKUによる古典新星の継続観測の意義

## (1) 近・中間赤外線Spectral Energy Distribution(SED)の成分解析

- ・比較的初期のダスト放射のSEDの成分解析は、optically thinの仮定は不適切。
- ・ダストの分布、geometryに対して、適切なモデルを選択する必要がある。
- ・ダストの組成、形成場所、条件
  - free expanding nova ejecta中でのダスト凝縮は可能か？
  - 既存の星周ガスとの衝突による密度情報が不可欠か？

## (2) 空間情報に対する制限

例えば、空間分解能 $0.5''$ が達成されるとすると、 $1.1\text{kpc}$ にある新星の場合、速度 $500\text{kms}^{-1}$ で放出されたのejectaが、約1年で到達する距離(半径)に相当。

→ 比較的初期のダストの赤外放射の放射領域を撮像バンドの波長毎に制限できる。

→ 赤外SED成分分離解析の結果に、強い制限を与えられる。

## (3) 近・中間赤外線SEDの時間進化

- ・形成されるダスト種の温度進化、質量進化
  - ダストの核形成、粒子成長、破壊過程のバランスが、時間とともにどう進化するか、
- ・様々な質量の白色矮星を親星とする新星爆発に伴うダスト形成史を系統的に理解する。

# MIMIZUKUによる古典新星の継続観測の意義

## (1) 星周ダストの形成過程に対する制限

- optically thickなphaseを扱うためには、比較的ダスト形成後早い時期(通常~100日以内)の時間分解能の高い観測が有効。
- 高空間分解能の観測が、既存のダストからの放射の寄与の調査に必須。

## (2) 新星に至るまでの質量放出史の化学的理解

- 1000-2000日程度の長期的な継続観測によって、ejectaと星周物質の相互作用の情報を得る。Optically thinになれば、ダストのジオメトリに対する質量評価の不定性は低減されるので、赤外SED解析に基づく質量評価を通じて、ダストの粒子成長、あるいは、破壊過程を調べる。
- 特にシリケートの振る舞いは詳細に調べる必要がある。

## (3) ダストの変質(annealing)

- N-bandの低分散分光観測、およびQ-bandの低分散分光観測が有効。
- amorphous carbonについては aliphatic → aromaticの変化
- astronomical silicateについては crystallizationの評価が重要

# 古典新星中間赤外線観測の戦略

V1280Sco;

- 中間赤外線SED及びN-band分光継続観測 (本発表内容)
  - Day 150; Subaru/COMICS N8.8, N11.7, Q18.8, Q24.5, NL spectroscopy
  - Day 1272; Gemini-S/TReCS Si-1, Si-3, Si-5, Qa, Qb, NL spectroscopy
  - Day 1616; Gemini-S/TReCS Si-1, Si-3, Si-5, Qa, Qb, NL spectroscopy
  - Day 1947; Gemini-S/TReCS Si-1, Si-3, Si-5, Qa, Qb, NL spectroscopy
- Q-band分光観測(silicateの結晶化の有無調査)
  - Day 1947; Gemini-S/TReCS QL spectroscopy

V1309Sco;

- 2010/8; Gemini-S/TreCS Si-1, Si-3, Si-5, NL spectroscopy
- 2012/6; Gemini-S/TreCS Si-1, Si-3, Si-5, Qa, Qb, NL spectroscopy

V5587Sgr;

- 2012/6; Gemini-S/TreCS Si-1, Si-3, Si-5, Qa, Qb, NL spectroscopy

V445 Pup;

- 2012/6; Gemini-S/TreCS Si-1, Si-3, Si-5, Qa, Qb, NL spectroscopy

Gemini-S/TReCS 撤退(2012.8-) ※南天天体の観測は困難に  
Subaru/COMICS および Subaru/Mimizuku (2014(?)以降) ※北天天体に対応  
SOFIA/FOCASTでの中間赤外観測 ※南北天体の観測の単発的な観測は可能？

# Appendix

# Temperature Evolution of Dust Formed in the Nova Wind

Assuming the radiative equilibrium

$$4\pi a^2 \langle Q_{\text{abs}}(a, T_d) \rangle T_d^4 = \pi a^2 \langle Q_{\text{abs}}(a, T_{\text{WD}}) \rangle T_{\text{WD}}^4 (R_{\text{WD}}/r)^2$$

$$L_{\text{WD}} = 4\pi\sigma R_{\text{WD}}^2 T_{\text{WD}}^4$$

$\langle Q_{\text{abs}}(a, T) \rangle$  ; the Planck mean absorption cross-section for amorphous carbon

$a$ ; the radius of a dust grain [m]

$T_d$ ; the temperature of a dust grain

$r$ ; the distance between the dust and the white dwarf [m]

$R_{\text{WD}}$ ; effective radii of the White dwarf star [m]

$T_{\text{WD}}$ ; effective temperature of the white dwarf star [K] ( $\sim 10000\text{K}$ ; Chesneau et al. 2008)

$L_{\text{WD}}$ ; total luminosity of the white dwarf star [W] ( $\sim 8400L_{\odot}$ ; Chesneau et al. 2008 )

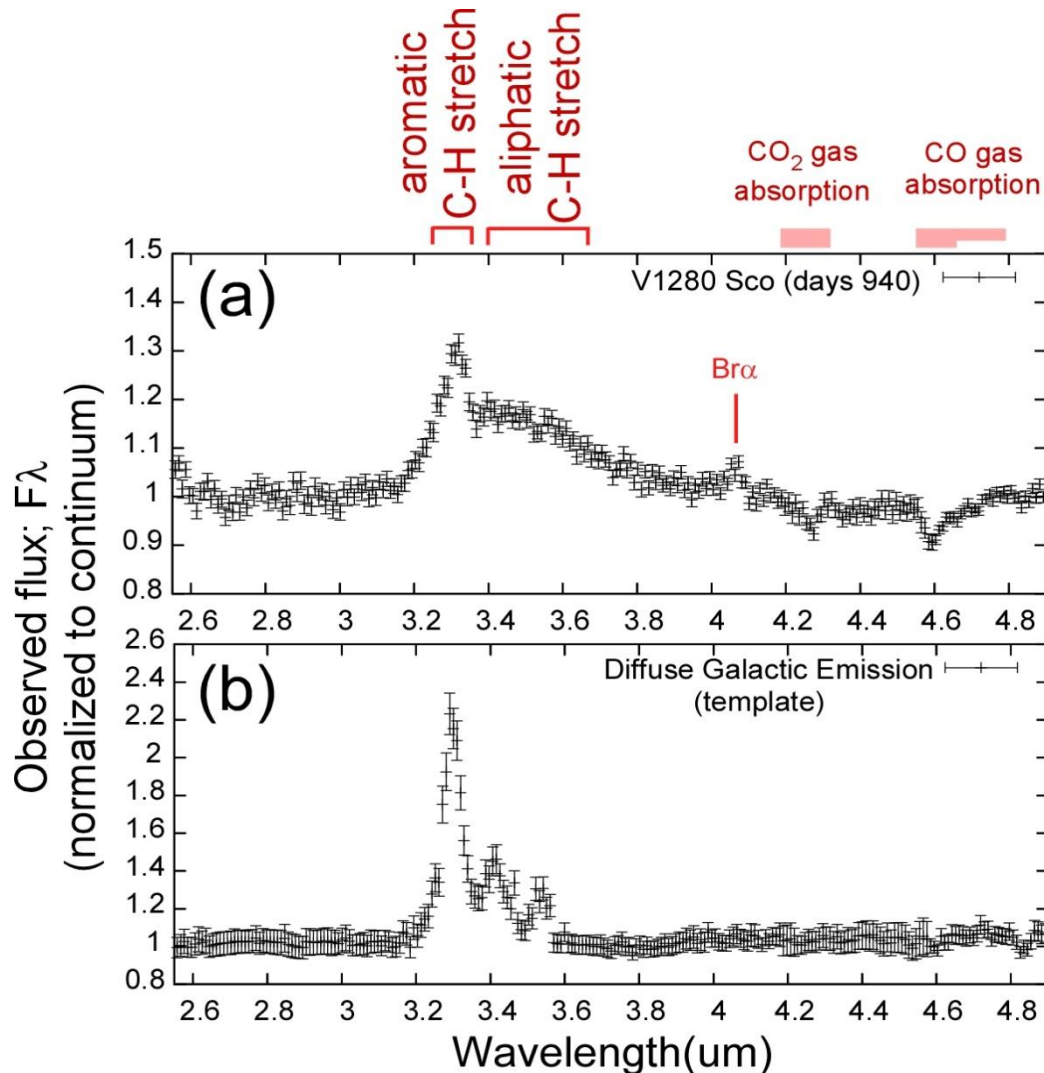
$\sigma$  ; Stephan-Boltzmann constant [ $\text{W K}^{-4} \text{m}^{-2}$ ]

$$r = (L_{\text{WD}}/16\pi\sigma)^{1/2} (\langle Q_{\text{abs}}(a, T_{\text{WD}}) \rangle / \langle Q_{\text{abs}}(a, T_d) \rangle)^{1/2} T_d^{-2}$$

If the dust particles formed in the nova wind ejected at  $t=t_{\text{ej}}$  are assumed to expand with a constant velocity  $v_{\text{ej}}$  [ $\text{km s}^{-1}$ ], they reach at  $r = 8.64 \times 10^7 v_{\text{ej}} (t - t_{\text{ej}})$  [m]

$$(L_{\text{WD}}/16\pi\sigma)^{1/2} (\langle Q_{\text{abs}}(a, T_{\text{WD}}) \rangle / \langle Q_{\text{abs}}(a, T_d) \rangle)^{1/2} T_d^{-2} = 8.64 \times 10^7 v_{\text{ej}} (t - t_{\text{ej}})$$

# Near Infrared Spectrum of V1280Sco at $\sim 940$ days with AKARI/IRC

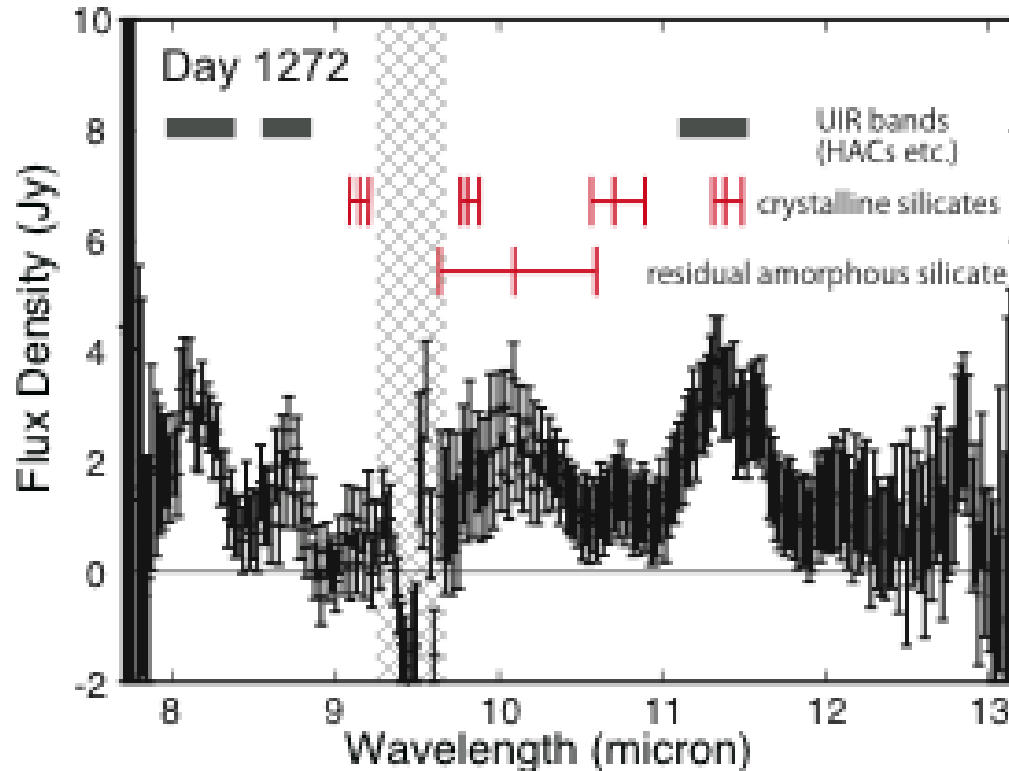


(a) Near-Infrared spectrum of V1280 Sco on the epoch 940 days after the discovery normalized to the continuum obtained with Infrared Camera (IRC) onboard AKARI. A PAH 3.3  $\mu\text{m}$  feature with a strong redwing in 3.4-3.6  $\mu\text{m}$  was recognized.

(b) Near-infrared spectrum of Galactic ISM as an example of typical spectrum of PAH features with a normal inter-band ratios among 3.3, 3.4 and 3.5  $\mu\text{m}$  features obtained with AKARI/IRC.



# Mid-Infrared Spectral Features over the Infrared Continuum modeled with amorphous carbon and astronomical silicate at 1272 days



Features at  $\sim 8.1\mu\text{m}$ ,  $\sim 8.7\mu\text{m}$ ,  $\sim 11.35\mu\text{m}$ ;

Hydrogenated Amorphous Carbons (HACs), NH<sub>2</sub>-rocks (Grishko & Duley 2002)

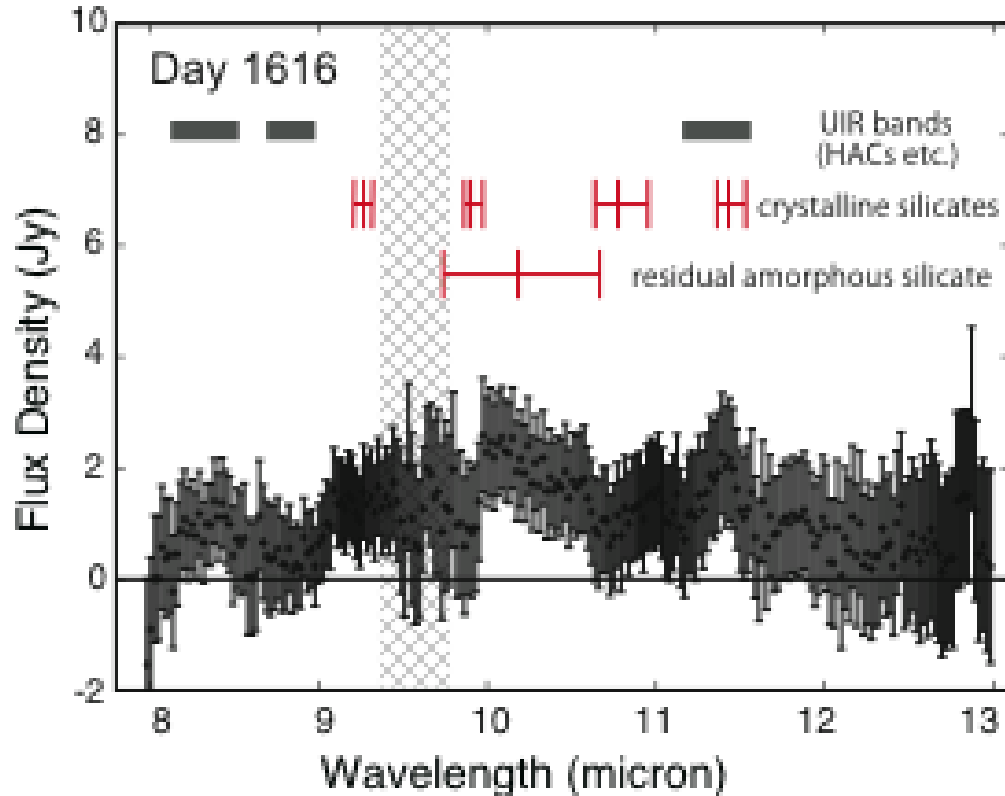
→ similar to those found in V704 Cas 1993 (Evans et al. 1997, 2005)

A Broad Feature at  $\sim 10.1\mu\text{m}$ ; amorphous silicate

Features at  $\sim 9.2\mu\text{m}$ ,  $\sim 9.8\mu\text{m}$ ,  $\sim 10.7\mu\text{m}$ ,  $\sim 11.4\mu\text{m}$ ;

Possible contributions of forsterite, enstatite and diopside (Molster et al. 2002)

# Mid-Infrared Spectral Features over the Infrared Continuum modeled with amorphous carbon and astronomical silicate at 1616 days



Possible HAC features at  $\sim 8.1\mu\text{m}$ ,  $\sim 8.7\mu\text{m}$ ,  $\sim 11.35\mu\text{m}$  have diminished at  $t=1616$  days