

TAOで紐解くダスト形成過程

野沢 貴也 (Takaya Nozawa)

国立天文台 理論研究部

(National Astronomical Observatory of Japan)

Targets in this talk:

1. Core-collapse supernovae in MW/LMC/SMC
2. Type II_n supernovae in nearby galaxies
3. Galactic luminous blue variables (candidates)

0-1. Introduction: origin and evolution of dust

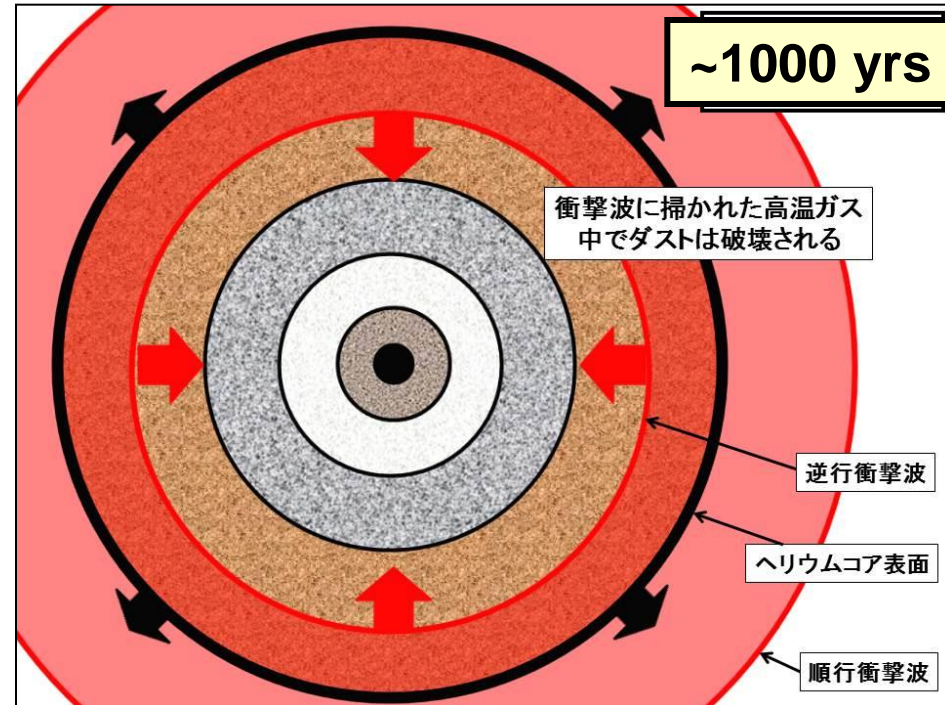
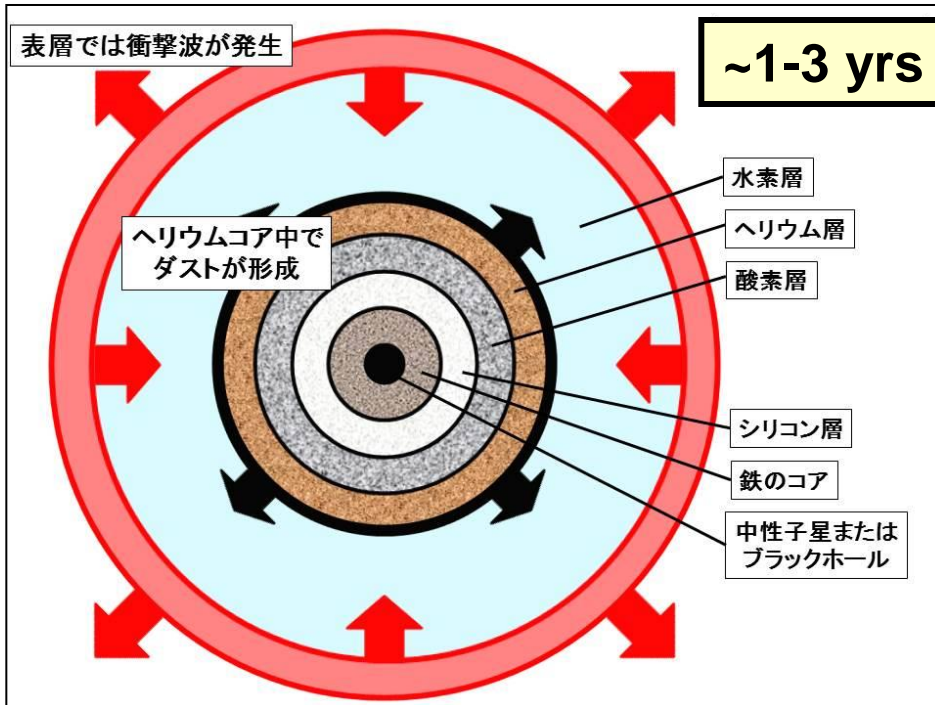
○ 星の進化と宇宙の物質循環



講演
Z113a
Z119b
Z120b
を参照

0-2. Formation and processing of dust in SNe

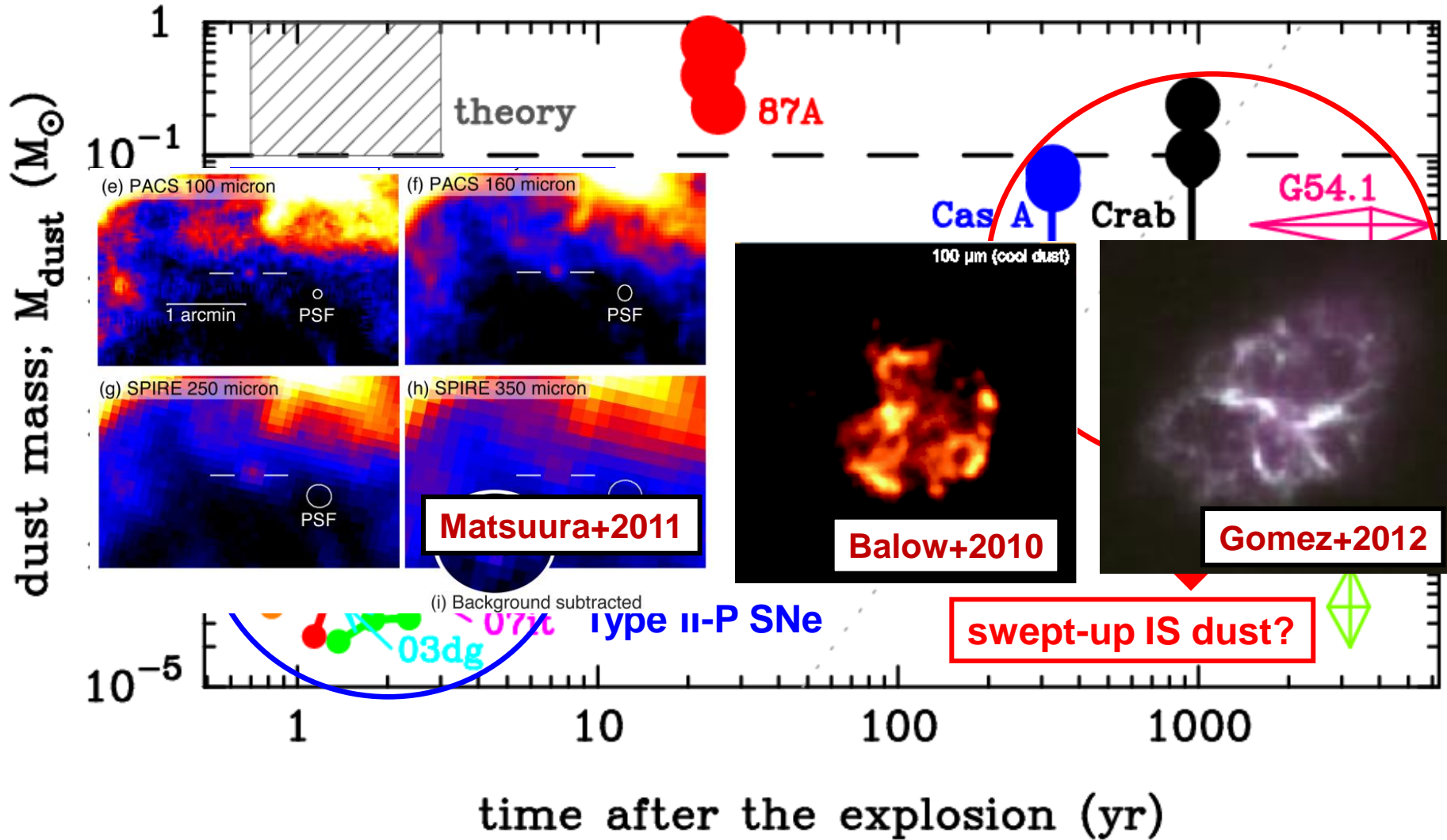
野沢 貴也 2014, 天文月報



Destruction efficiency of dust grains by sputtering in the reverse shocks depends on their initial size

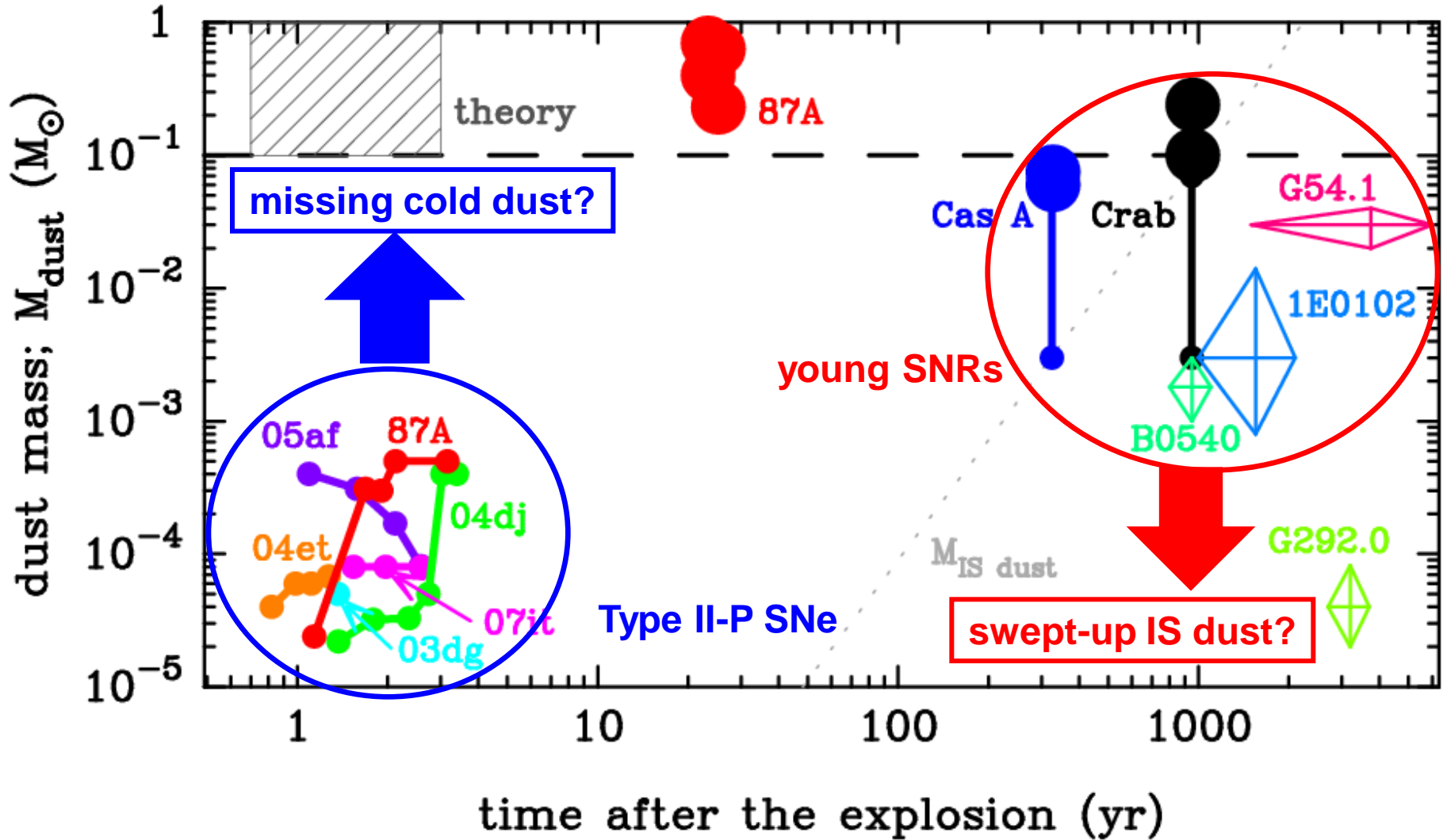
The size of newly formed dust is determined by physical condition (gas density and temperature) of SN ejecta

0-3. Summary of observed dust mass in CCSNe



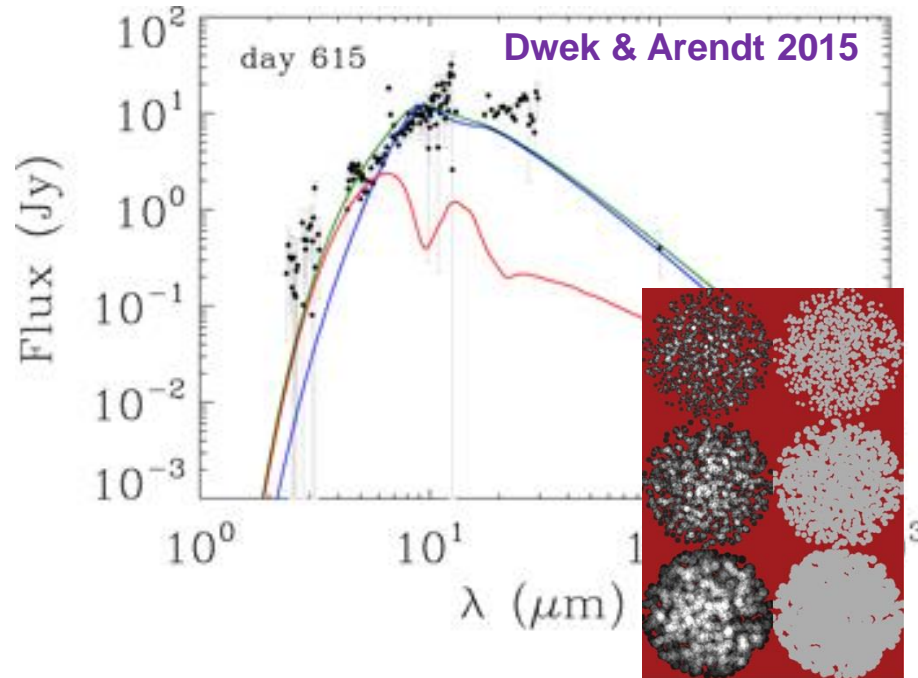
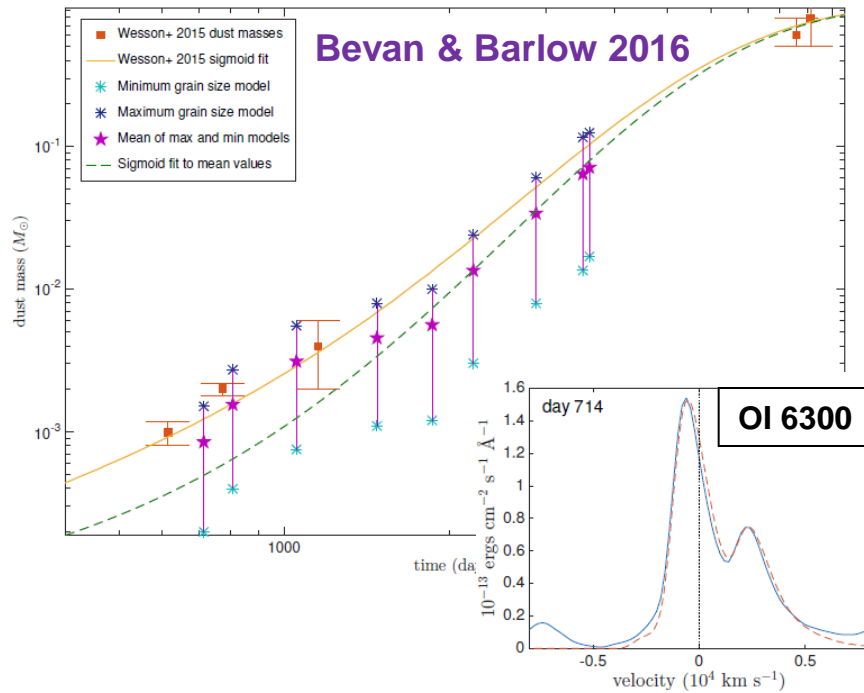
Far-IR to sub-mm observations are essential for revealing the mass of dust grains produced in the ejecta of SNe

0-3. Summary of observed dust mass in CCSNe



There are increasing pieces of evidence that massive dust in excess of $0.1 M_{sun}$ is formed in the ejecta of SNe

0-4. Evolution of dust mass in SN 1987A



可視減光からのダスト質量

→ **ダスト量は時間とともに増加**

- $\sim 10^{-3} M_{\text{sun}}$ @ 600 days
- $\sim 0.1 M_{\text{sun}}$ @ 4000 days

時間とともにダスト形成が効率的に起こるのは不自然

→ **clumpyな構造をしていれば、 $0.4 M_{\text{sun}}$ のダストが600日後に形成されていても赤外線SEDを説明できる**

0-5. Achievement and issues on SN dust

○ これまでの研究でわかったこと

(重力崩壊型)超新星は、放出ガス中で**大量(0.1 Msun以上)のダスト**を形成することができる



○ 超新星ダスト研究における現在の二つの課題

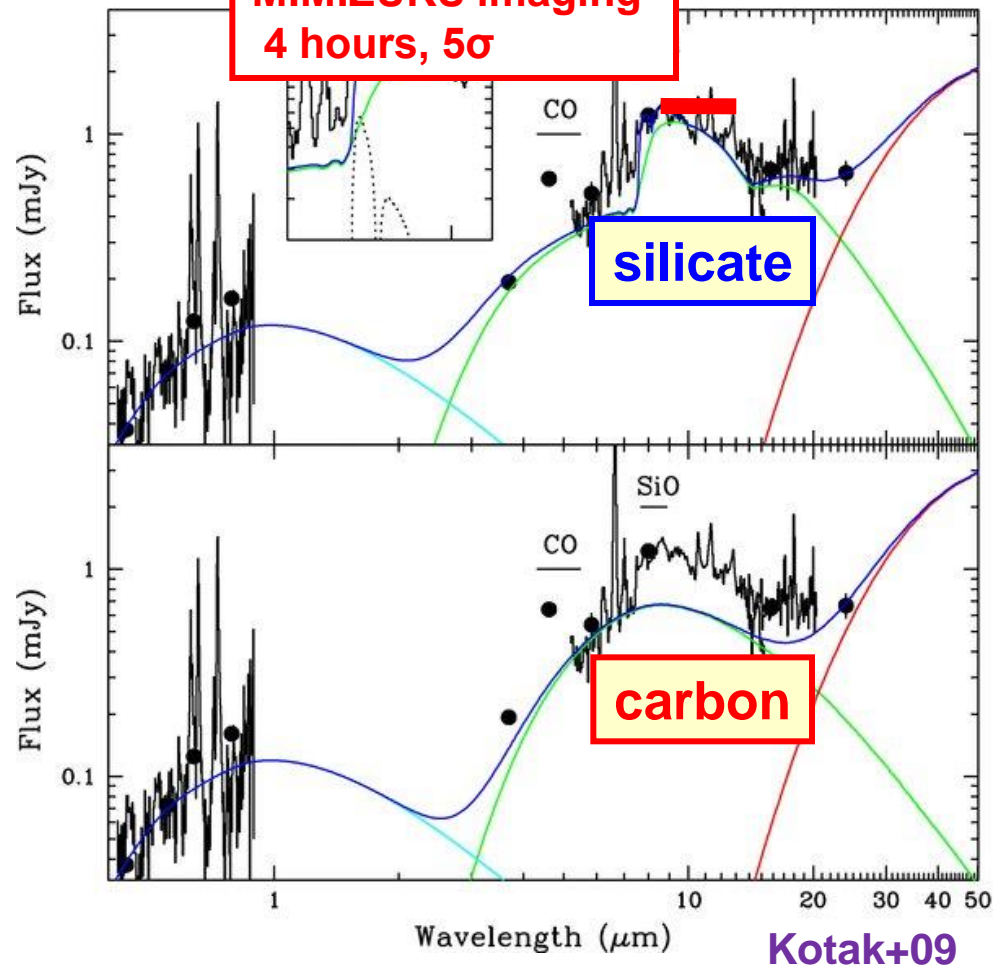
- 1) 観測された大量の**ダストはいつ形成されたのか?**
→ 中間赤外線と遠赤外線でのダスト量の違いを説明したい
- 2) 形成される**ダストのサイズはどれくらいか?**
→ 超新星による最終的なダスト放出量を明らかにしたい

1. Observations of dust formation in nearby core-collapse SNe

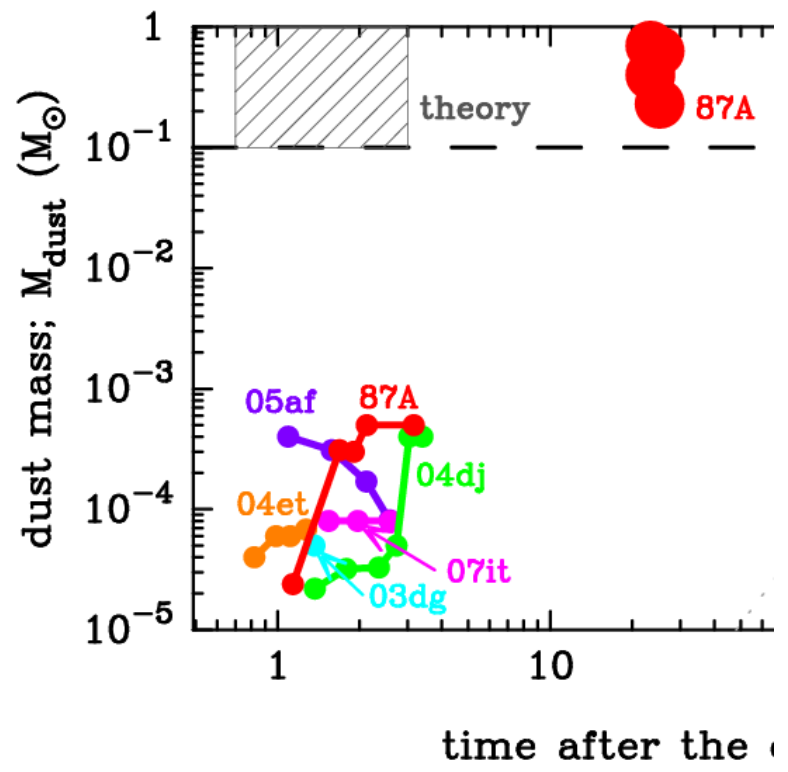
1-1. Detectability of dust emission from SNe

Type II-P SN 2004et ($d=5.6$ Mpc)
 $M_d \sim 10^{-4} M_{\text{sun}}$, $T_d \sim 650\text{K}$ @ 464 day

MIMIZUKU imaging
 4 hours, 5σ



TAO/MIMIZUKUでは、系外銀河の超新星内で形成されたダストからの熱放射を捉えることはかなり難しそう



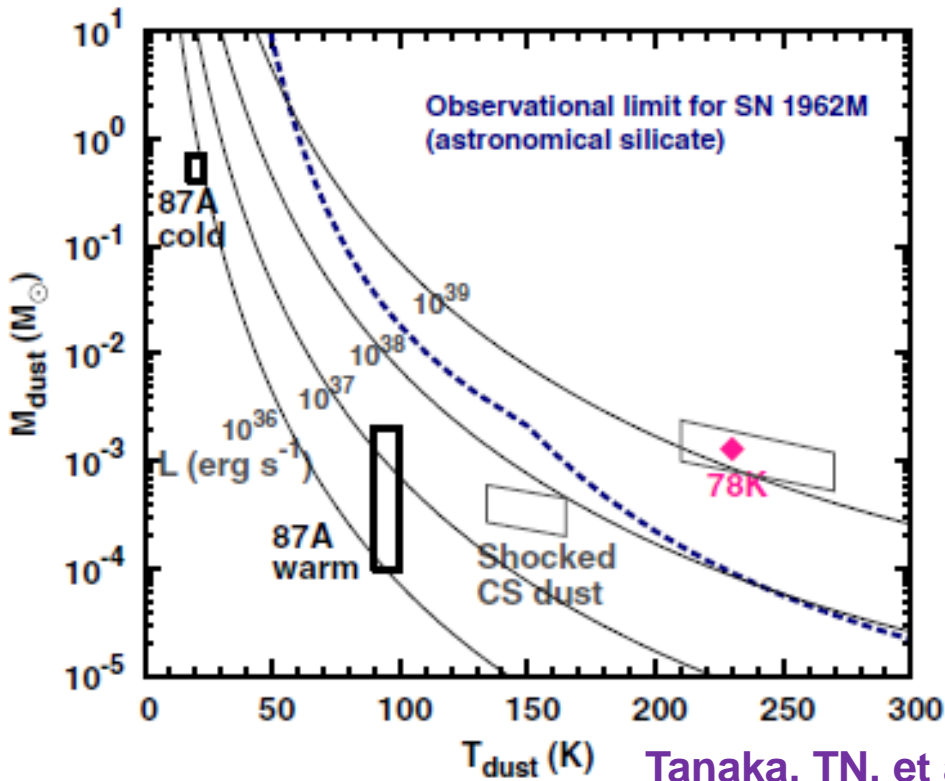
1-2. Mass and temperature of dust grains

○ Thermal radiation from dust grains

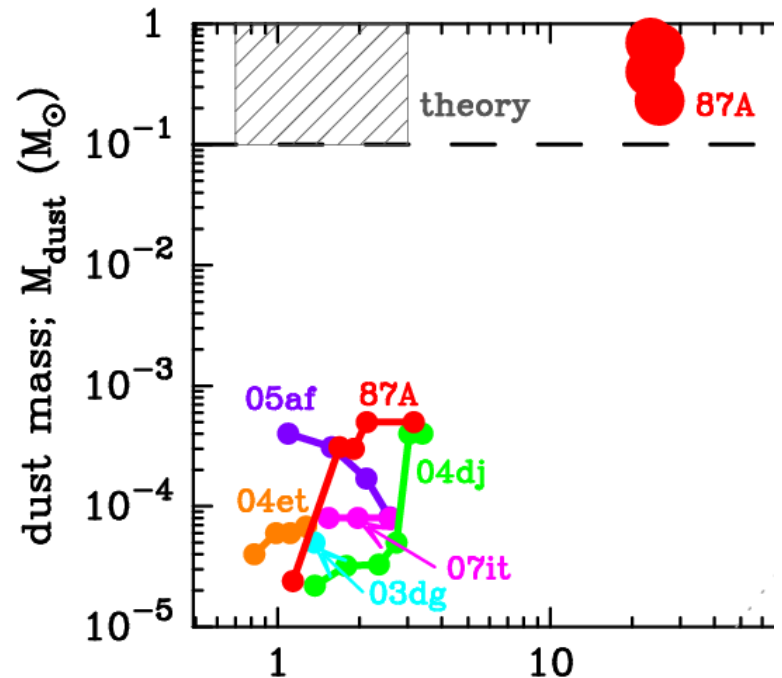
$$L_{\text{IR}} = N_{\text{dust}} 4\pi a^2 \int Q_{\text{emis}}(a, \lambda) \pi B_{\lambda}(T_{\text{dust}}) d\lambda$$

$$= 4 M_{\text{dust}} \int \kappa_{\text{emis}}(\lambda) \pi B_{\lambda}(T_{\text{dust}}) d\lambda$$

where $\kappa_{\text{emis}}(\lambda) = 4 Q(a, \lambda) / 3 \rho_{\text{dust}} a$



Tanaka, TN, et al. (2012)



time after the

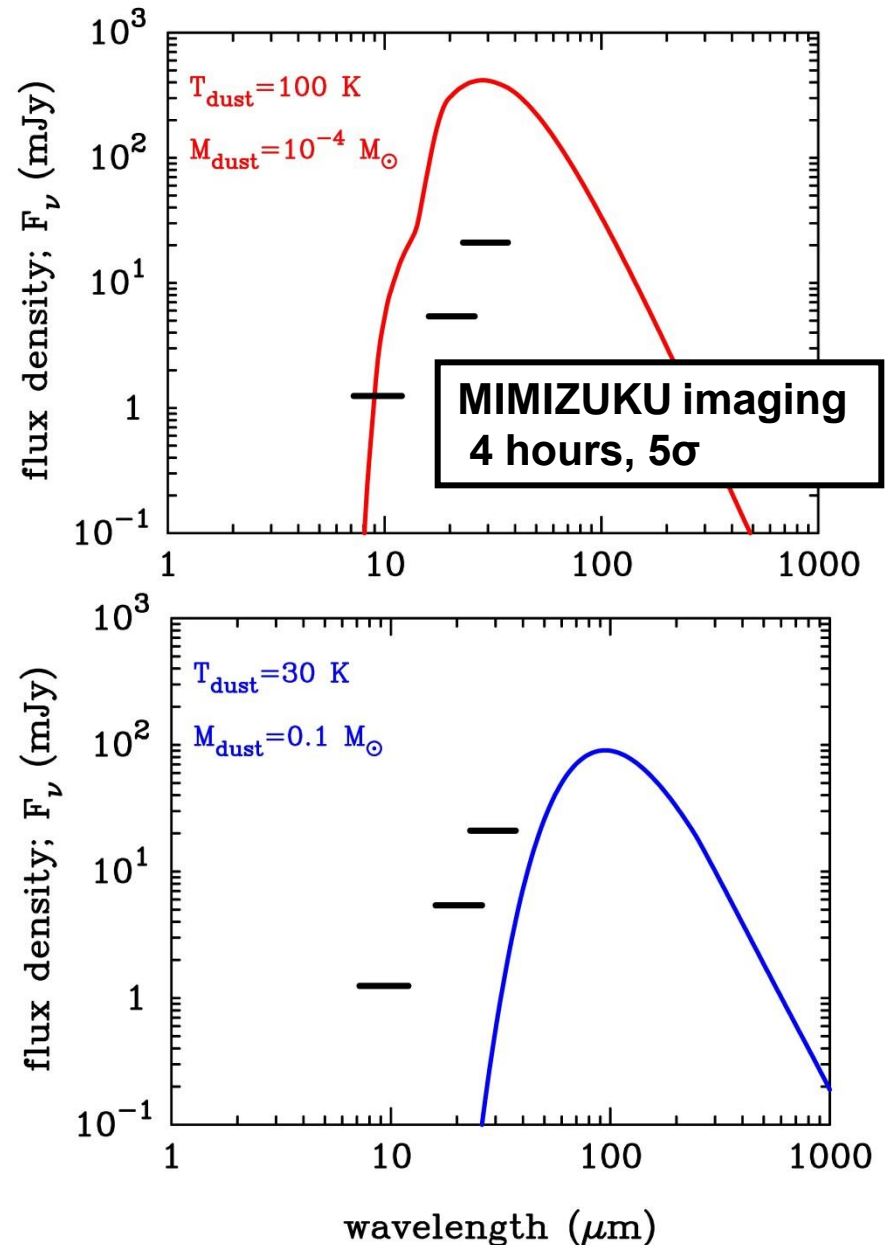
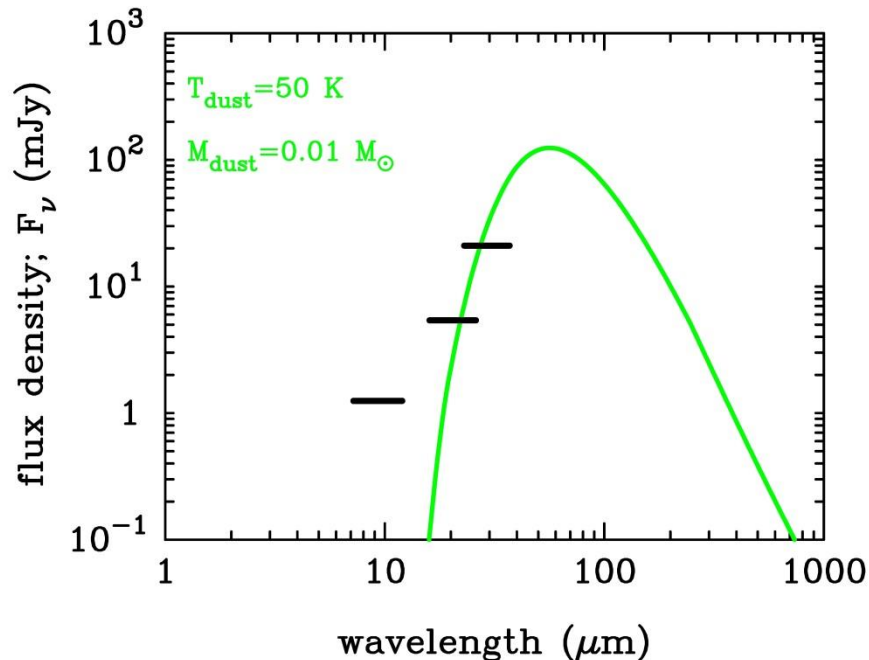
1-3. Detectability of dust in SNe in LMC/SMC

MW or LMC/SMCでぜひ超新星を！

LMC/SMC($d=50$ kpc)での超新星でのダスト熱放射のSED

- dust species: silicate
- LIR = 10^{36} erg/s (up to ~ 10 yr)

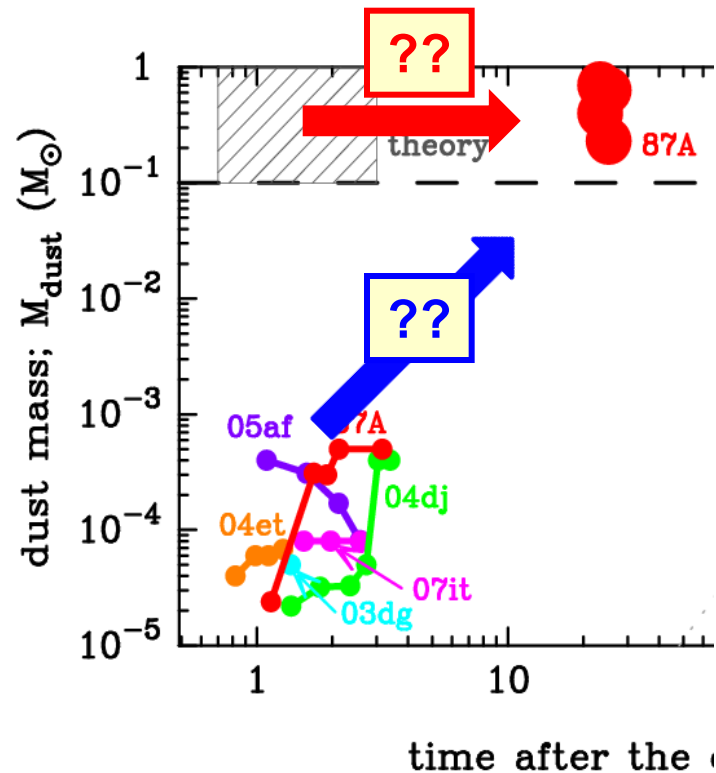
MIMIZUKUによるhigh cadenceの観測が決定的！！



1-4. Observations of SN dust with TAO

○ TAO/MIMIZUKUによる超新星ダスト観測

- 系外銀河のII型超新星で形成されたダスト熱放射は検出できそうにない
 - MWまたはLMC/SMCで超新星が起こることを期待
- TAOによるhigh cadenceの赤外線観測は、ダスト形成時期(ダスト量の時間進化)について革新的な成果をもたらすことができる



超新星残骸ダストの観測は？

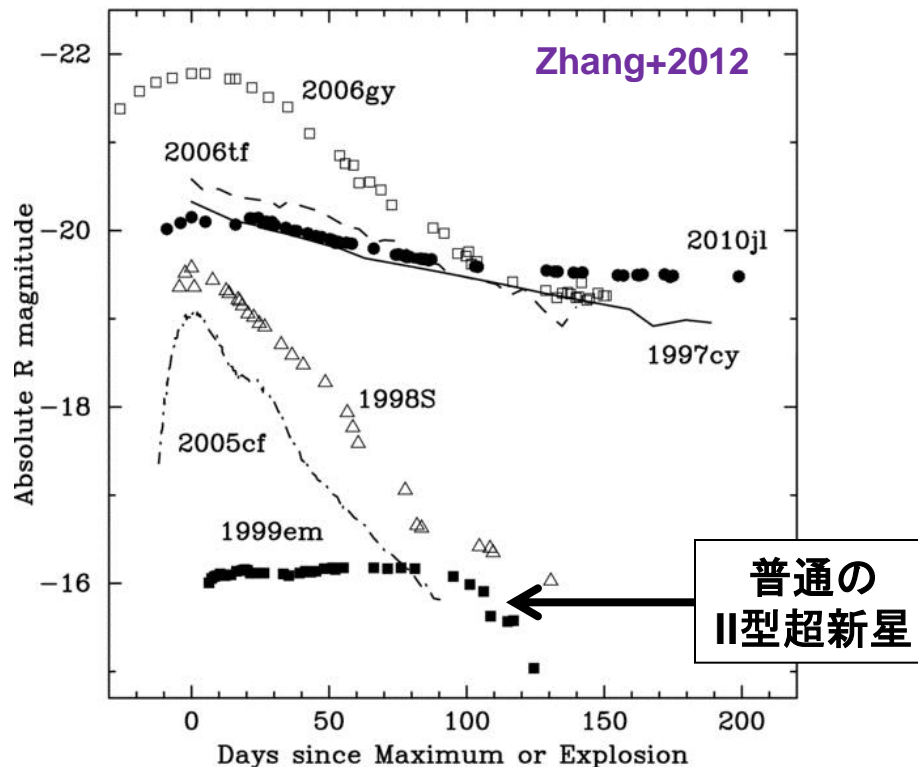
- 南天に若い(< ~300 yr)超新星残骸が存在しない
- LMC/SMCの超新星残骸を観測するには感度が足りない

2. Dust formation in cool dense shells of Type II_n supernovae

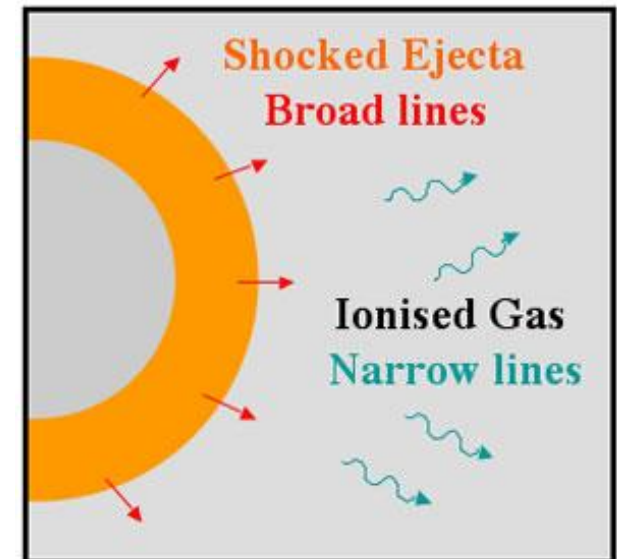
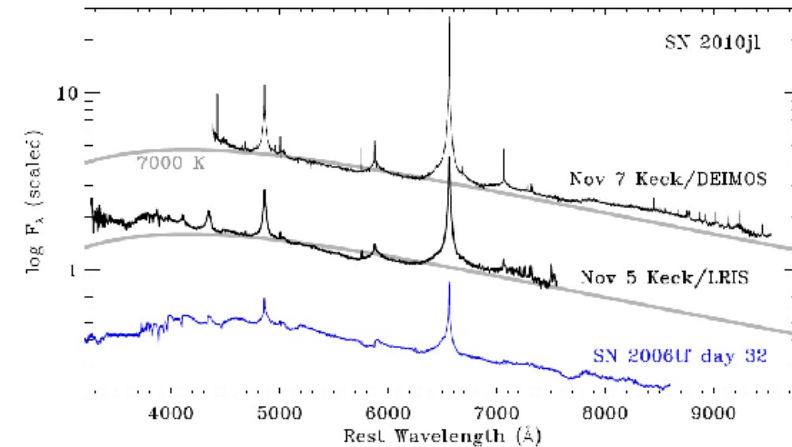
2-1. Type II supernovae

○ II型超新星

- 水素のnarrow emission lineを示す
 - 厚い星周ガスと超新星イジェクタとの衝突(相互作用)により光輝く
- 通常の超新星よりも10倍以上明るい

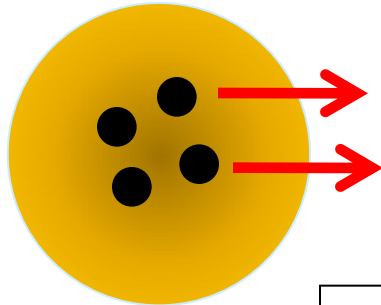


II型超新星の可視スペクトル



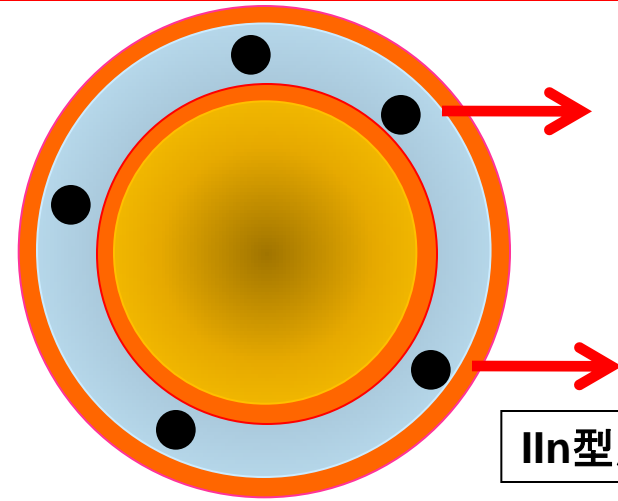
2-2. Dust formation in cool dense shells

Dust formation in the ejecta



普通の
II型超新星

Dust formation in dense shell



IIIn型超新星

○ Cool dense shellsでのダスト形成

- 形成されたダストの温度が高い → ダスト熱放射は近赤外線で見える
- ダスト形成時期が比較的早い (~100 dayくらいから) 傾向にある
- このダスト形成過程については、理論的にほとんどわかっていない

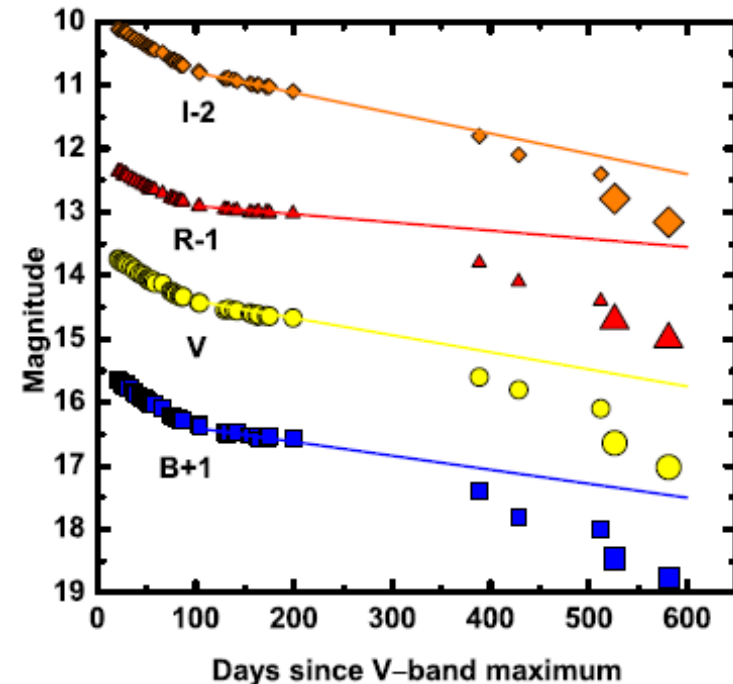
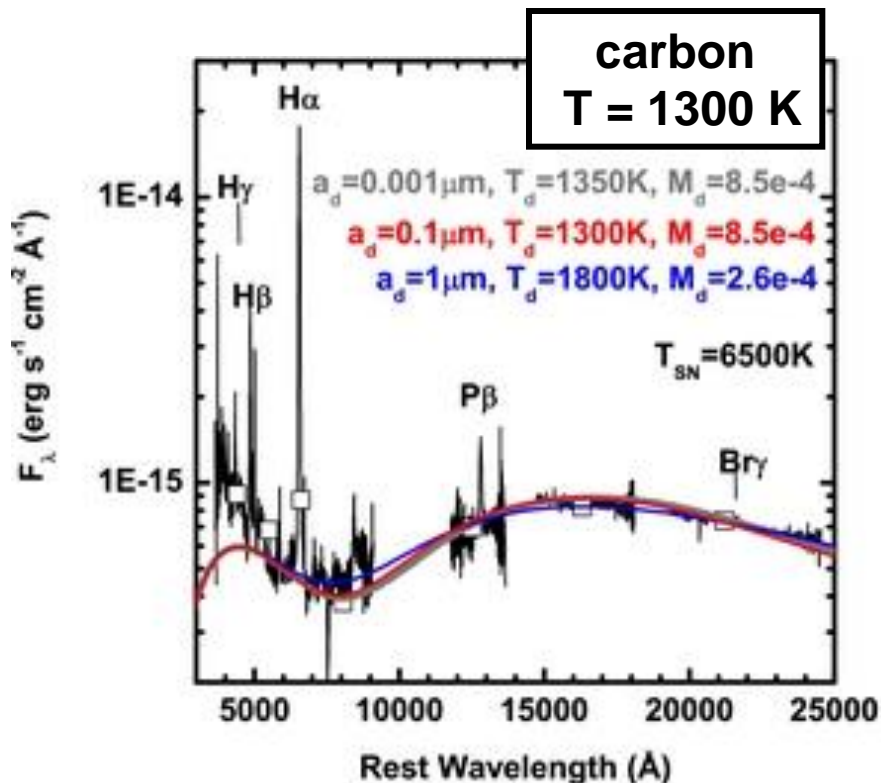
2-3. Dust formation in Type IIn SN 2010jl

○ Type IIn SN 2010jlのすばる/IRCS観測

- 近赤外線超過が見られる(爆発の約570日後)
→ $10^{-3} M_{\text{sun}}$ の炭素質ダストの形成
- 400日くらいから(ダストによる)可視光の減光



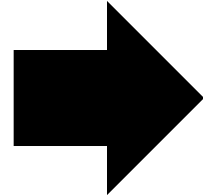
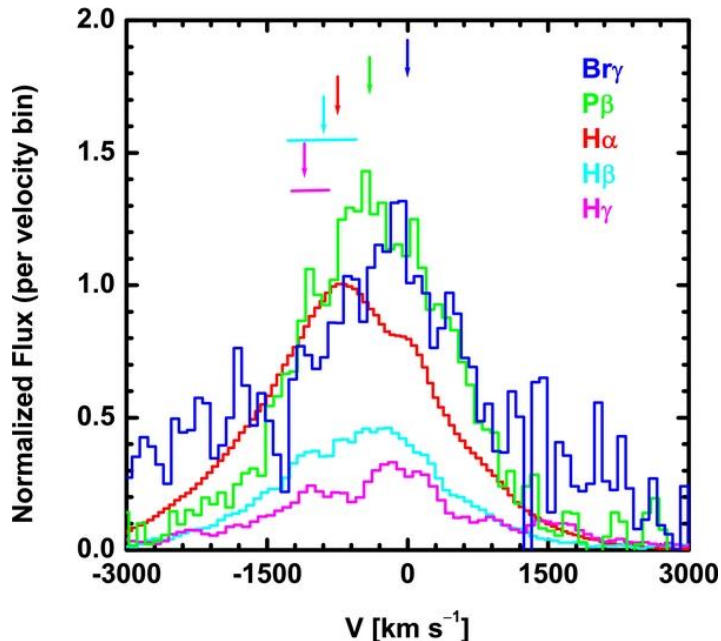
UGC 5189A @ ~50 Mpc



Maeda, TN, et al. (2013)

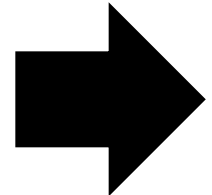
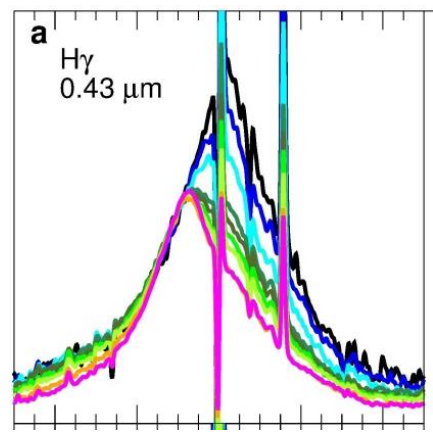
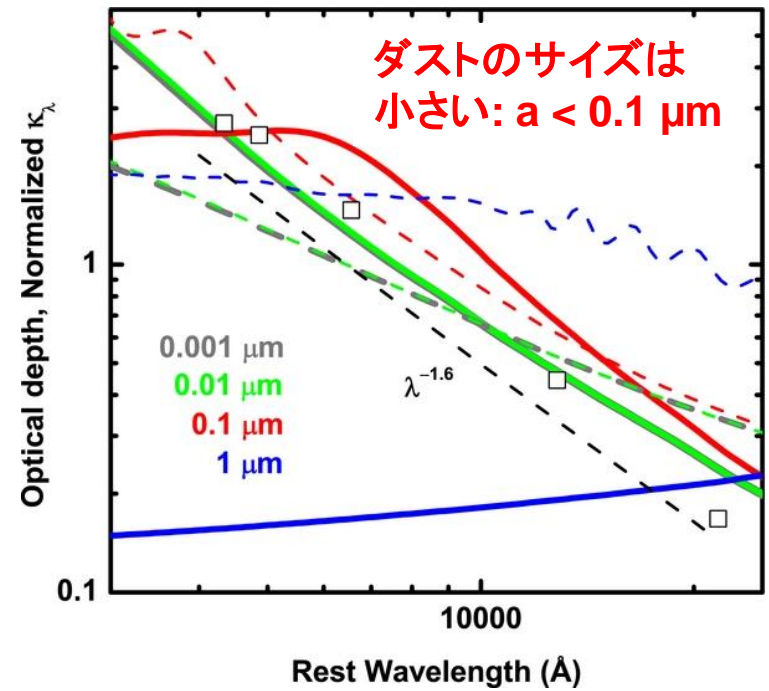
2-4. Size of dust formed in Type IIn SN 2010jl

水素輝線のblueshift

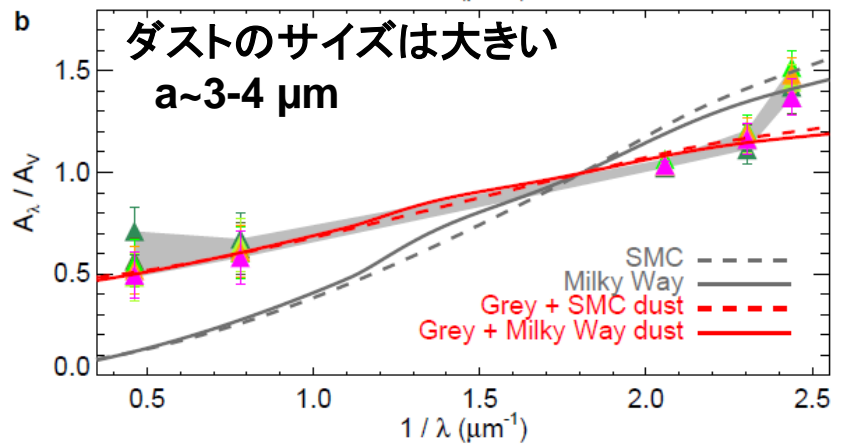


Maeda, TN, et al. (2013)

可視-近赤外線の減光曲線



Gall+2014



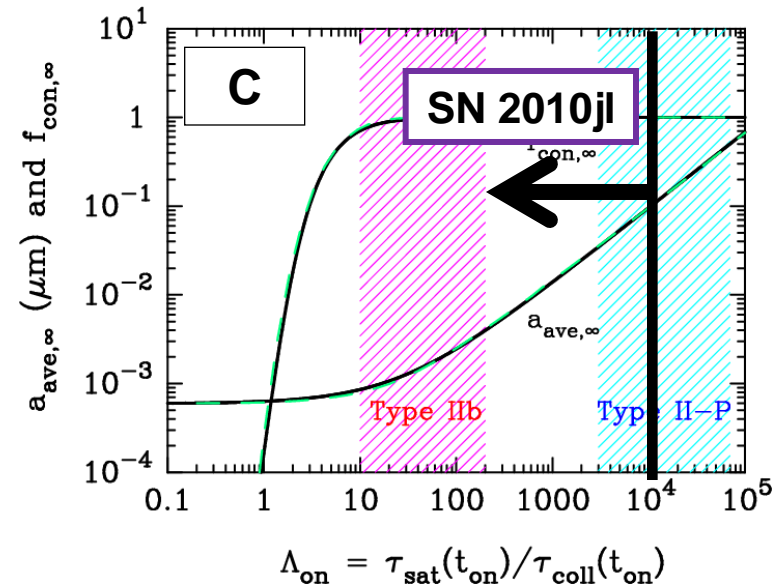
2-5. Observations of Type II In SNe with TAO

○ TAO/SWIMSによるII In型超新星のダスト観測

- 近傍の系外銀河であれば、明るいII In型超新星で形成されたダストからの熱放射を近赤外線で検出することができる
- 理論的によくわかっていないcool dense shellsでのダスト形成過程の理解に重要な示唆
- 水素輝線の減光から形成されたダスト半径を見積もることが可能



星周ガス密度(親星の質量放出率)
に強い制限を与えることができる



$$\Lambda_{\text{on}} = T_{\text{sat}} / T_{\text{coll}} \propto T_{\text{cool}} n_{\text{gas}}$$

Nozawa & Kozasa (2013)

3. Infrared mapping observations of luminous blue variables

3-1. LBVs: Luminous Blue Variables

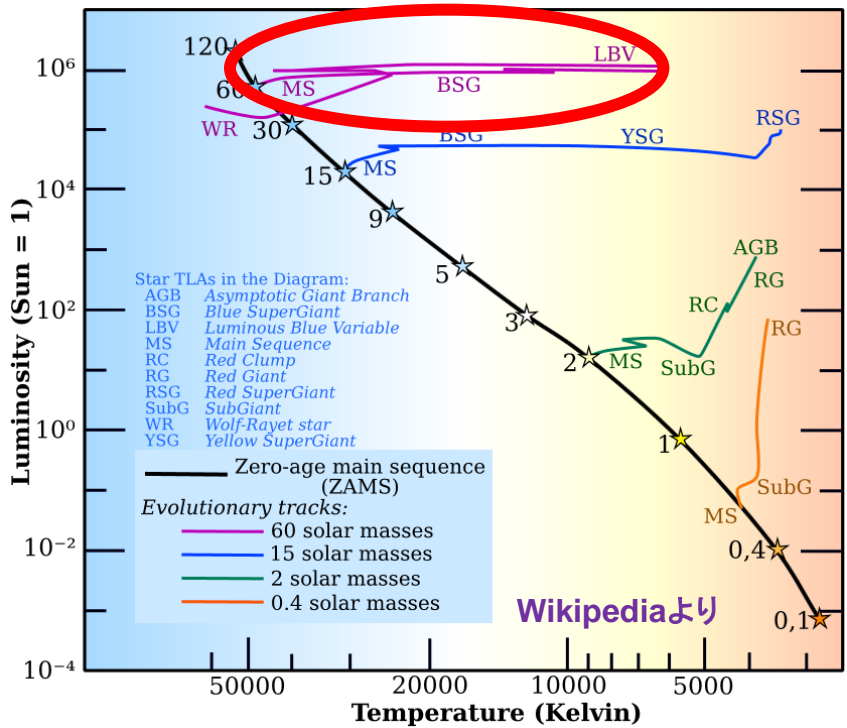
○ LBVs (高光度青色変光星)

- $\log_{10}(L / L_{\text{sun}}) = 5.5\text{--}6.5$
- $\log_{10}(T_{\text{eff}} / \text{K}) = 3.8\text{--}4.6$
- $M_{\text{star}} = 40\text{--}150 M_{\text{sun}}$

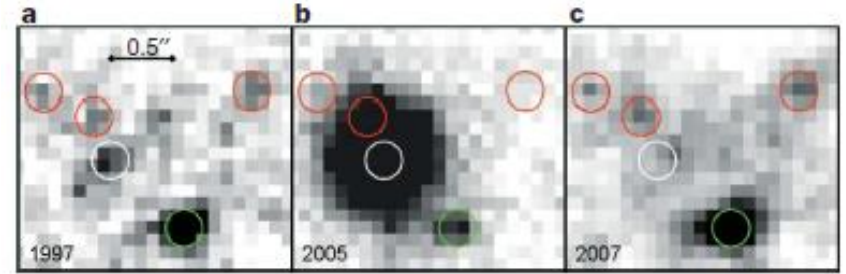


イータ・カリーナ星

17 LBVs in our Galaxy (2016年3月現在)



○ II型超新星SN 2005glはLBVから爆発した?

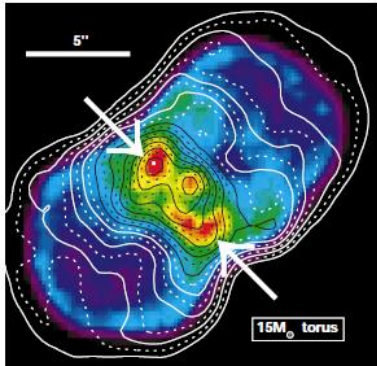


Gal-Yam & Leonard 2007, 2009

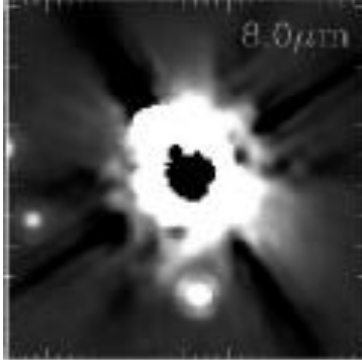
→ 恒星進化理論に重大な問題提起

3-2. Dusty envelopes around LBVs

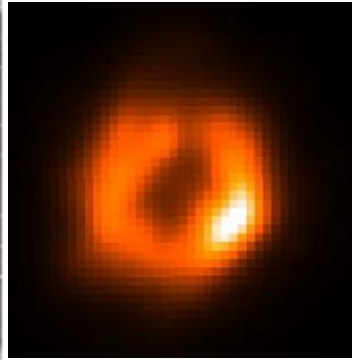
Eta Carina
TIMMI 17 μm
Morris+1999



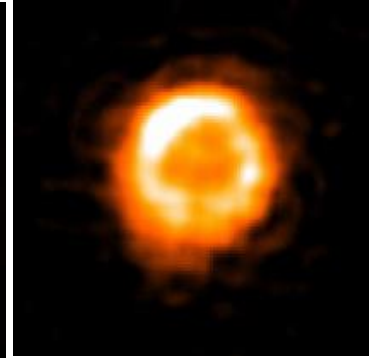
HR Car
Spitzer 8 μm
Umana+2009



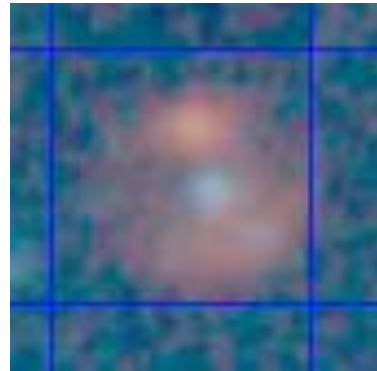
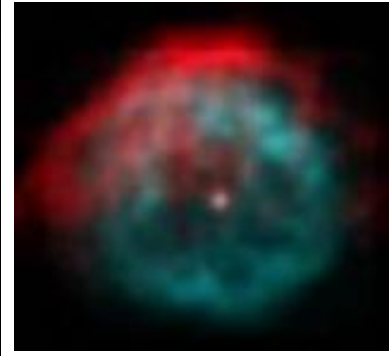
AG Car
Herschel 70 μm
Vamvatira-Nakou+2015



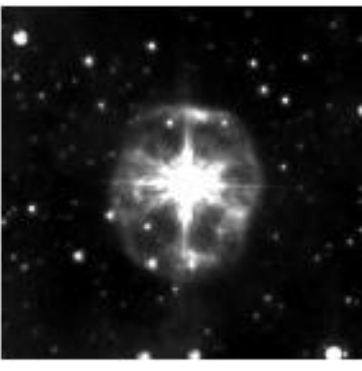
Wray15-751
Herschel 70 μm
Vamvatira-Nakou+2013



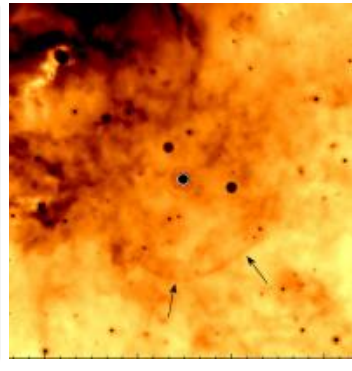
AFGL2298
VISIR 17.65 μm
Buemi+2010



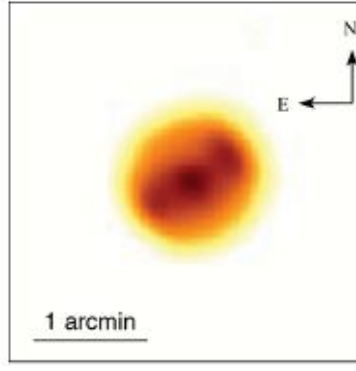
G24.73
MSX 7-25 μm
Clark+2003



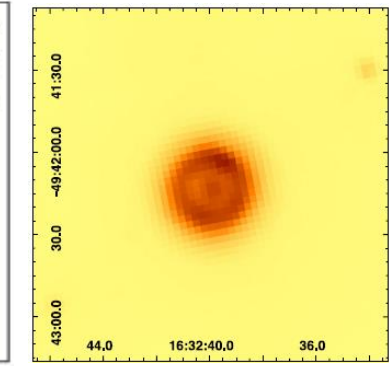
MWC 930
WISE 22 μm
Cerrigone+2014



Wray16-137
Spitzer 24 μm
Gvaramadze+2014



WS1
WISE 22 μm
Gvaramadze+2012



MN44
Spitzer 24 μm
Gvaramadze+2015

LBVsの70%は、厚い星周ダストに覆われている
→ 大規模な質量放出ガス中におけるダスト形成

3-3. Dust formation in mass-loss winds of LBVs

○ LBVsにおけるダスト形成の二つの障害

① 速いwind velocity (~100-300 km/s) → 低い質量放出ガス密度

$$\rho_{\text{gas}} = \dot{M} / (4 \pi r^2 v_{\text{wind}})$$

cf. $v_{\text{wind}} = 10\text{-}30$ km/s for AGB stars

② 中心星の高い有効温度 → UV輻射によるダストの蒸発が効率的

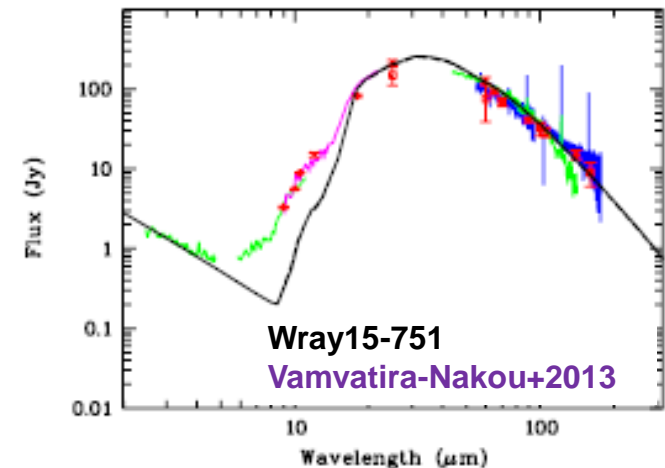
LBVsでのダスト形成過程の研究は極めてchallenging !

○ どうやってダストは形成したのか？

- dense clumps中でのダストの形成??
→ 高いガス密度、UV輻射の遮蔽

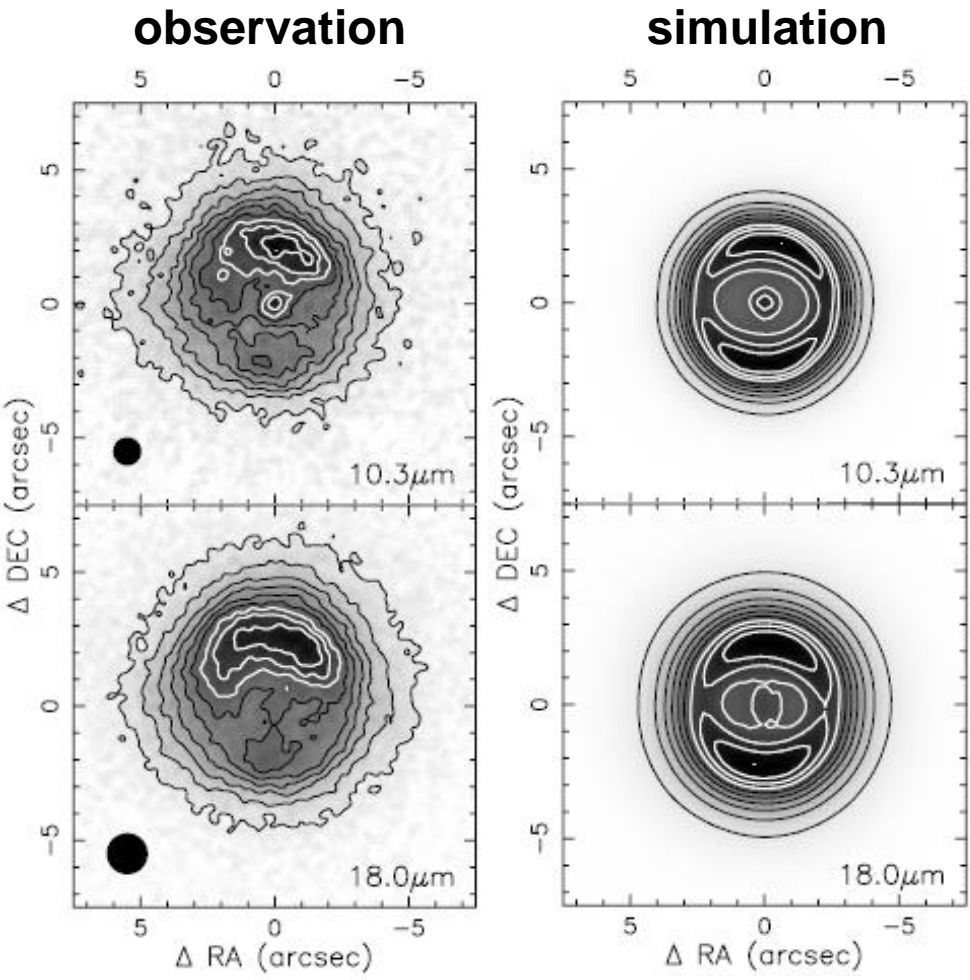
星周ダストの空間分布を知りたい！

→ TAOによる高空間分解の近・中間赤外線マッピング観測



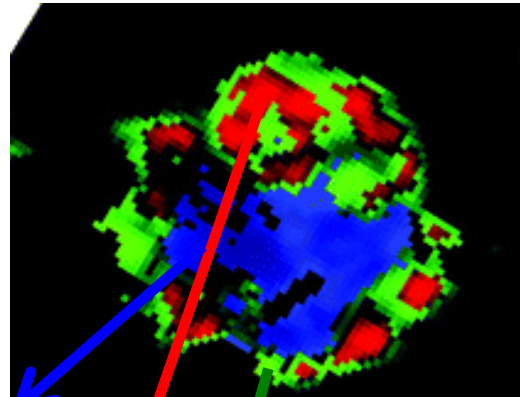
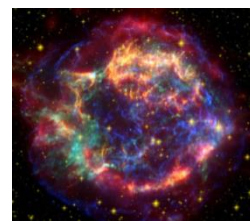
3-4. Example of IR mapping of dusty nebulae

LBV AFGL 2298

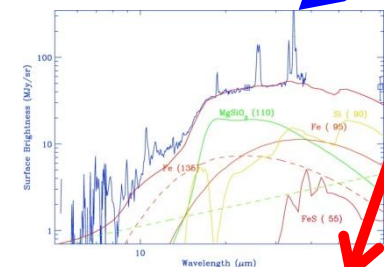


Ueta+2001

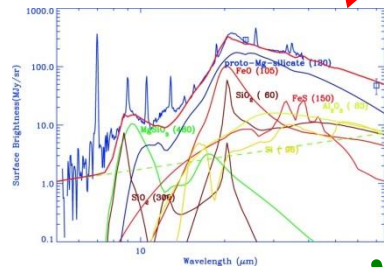
Cas A SNR



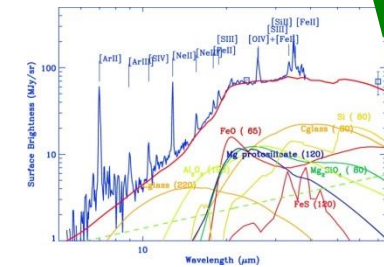
Rho+2008



- MgSiO₃
- Fe, FeS, Si



- Mg-silicate
- FeO, SiO₂

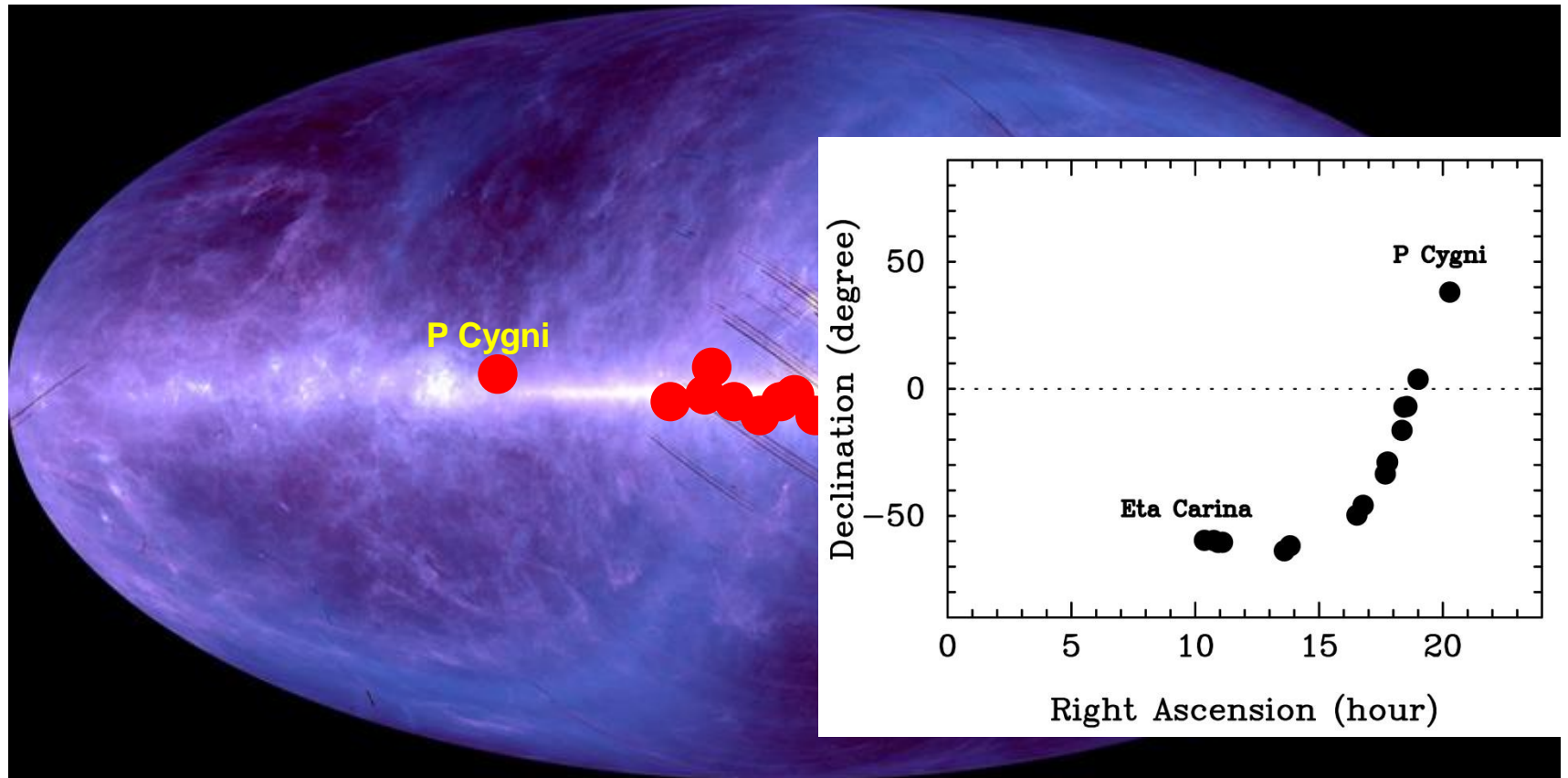


- glassy carbon
- FeO, Al₂O₃

3-5. Why are LBVs?

○ LBVsは南天に多い！

- 17天体中、16天体は南半球からのみ観測可能
→ TAOで観測する絶好のターゲット！！



3-6. Significance of studying LBVs

○ LBVsに関連した重要なサイエンス

- 極限的な環境下でのダスト形成過程
→ 宇宙でのダスト凝縮を探る最適な実験場
- (突発的)質量放出メカニズム
→ 質量放出率、放出ガスの対称性
- IIIn型超新星との関連性
→ LBVsはIIIn型超新星の親星か？
- 大質量星連星系の理解
→ LBVsの多くは連星系

TAOによるLBVs観測 →

ダスト形成理論
恒星進化理論

への重要な知見

Summary: Dust formation science with TAO

(1) MW/LMC/SMCで起こった超新星のhigh cadence観測

- イジェクタでのダスト形成史の解明
- 超新星ダスト形成の大問題の一つを完全解決

(2) 近傍の銀河で起こったII型超新星の近赤外線観測

- cool dense shellでのダスト形成メカニズム
- ダストサイズの見積もり → 星周ガス密度に制限

(3) Galactic LBVs (candidates)の赤外線マッピング観測

- LBVsの多くは南天に存在 → TAOの独占市場
- 過酷な環境下でのダスト形成過程
- 質量放出、恒星進化理論、連星系進化への洞察