

2020年代の光赤外線天文学 「恒星物理・超新星・晩期型星」 サイエンス

- 「恒星物理・超新星・晩期型星」検討班

発表者：野沢 貴也 (NAOJ)

松永 典之 (東大・本郷)

班長：田中 雅臣 (NAOJ)

メンバー (15名)

- 青木 和光 (銀河系・局所銀河:星(星団)班 班長)
- 板 由房
- 植田 稔也
- 大仲 圭一
- 左近 樹 (銀河系・局所銀河:星間物質班 班長)
- 須田 拓馬
- 田中 雅臣 (班長)
- 富永 望
- 野沢 貴也 (銀河系・局所銀河:星間物質班 兼任)
- 橋本 修 (編集委員)
- 松永 典之 (銀河系・局所銀河:星(星団)班 兼任)
- 森谷 友由希
- 守屋 堯
- 諸隈 智貴 (クエーサー AGN班 兼任)
- 山口 正輝

2014年3月以降に
加わったメンバー

活動の報告

- 2014/3/18: 第1回 face-to-faceミーティング
 - 8名参加
 - 各分野の「未解決問題」の同定
- 2014/3/21: 光赤天連総会
- 2014/4: プロジェクトのサマリースライド
- 2014/6/16-18: 第2回 face-to-faceミーティング(検討会)
 - 12名参加 (+周辺分野より5名) #うち海外から3名
 - 実際のサイエンスケースの提案、恒星分野を貫く問題の議論
- 2014/9/8-10: 光赤天連シンポジウム(今日)

恒星の各進化段階はどう繋がっていて 宇宙に何をもたらすのか

「恒星物理」の三本柱

質量放出の理解

(*ダスト形成を含む)

元素の起源の理解

(*ダストの起源を含む)

連星進化の理解



具体的な観測提案(一部)

AGB星の高空間分解分光
RSGの直接撮像
超新星親星のモニタリング

質量放出の理解

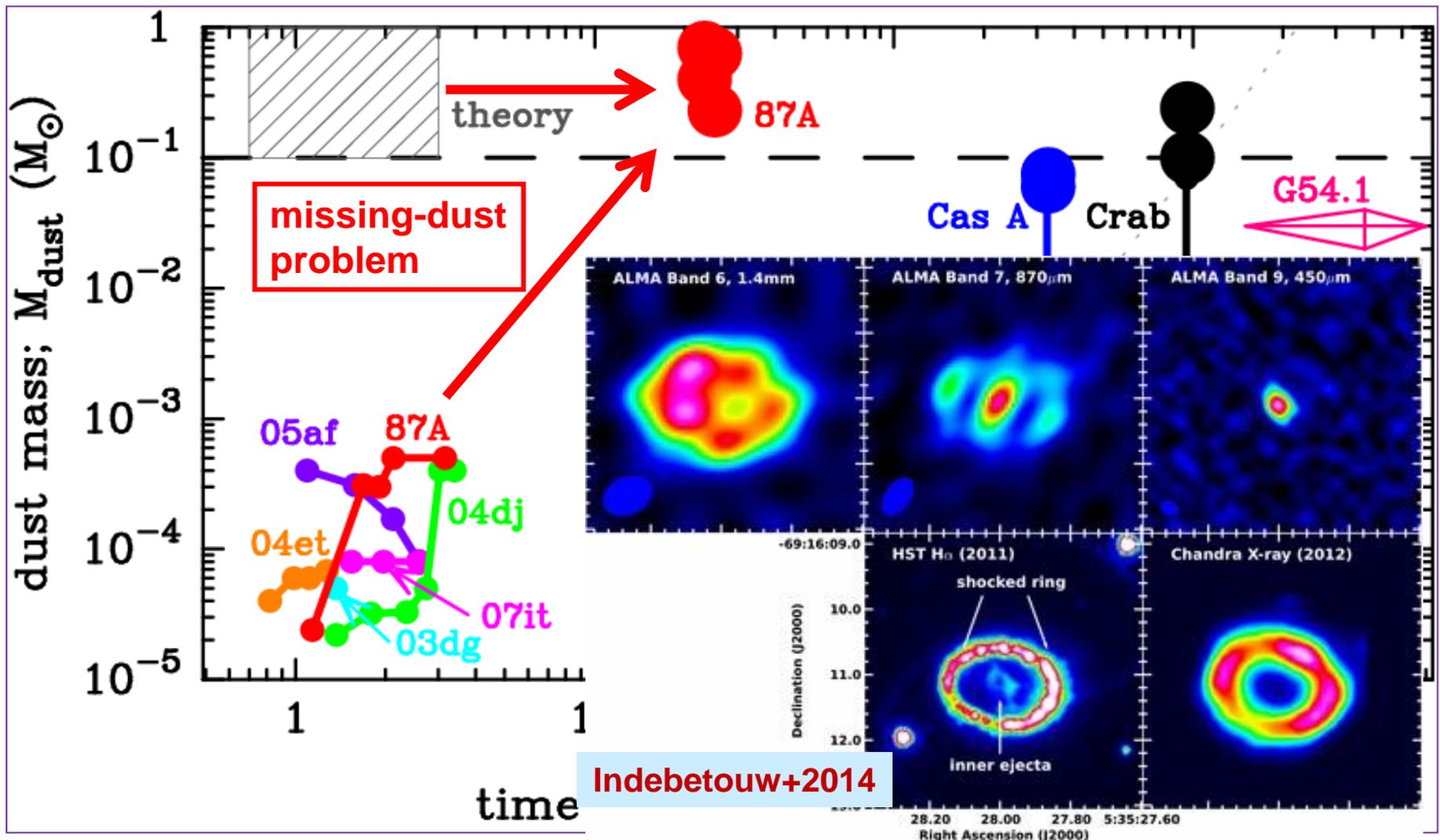
元素の起源の理解

金属欠乏星を見つける
NS mergerを見つける
超新星ダストの観測

連星進化の理解

X線連星、Be星ガス円盤
TZO? (Thorne-Zyktow obj.)
Ia型超新星の起源

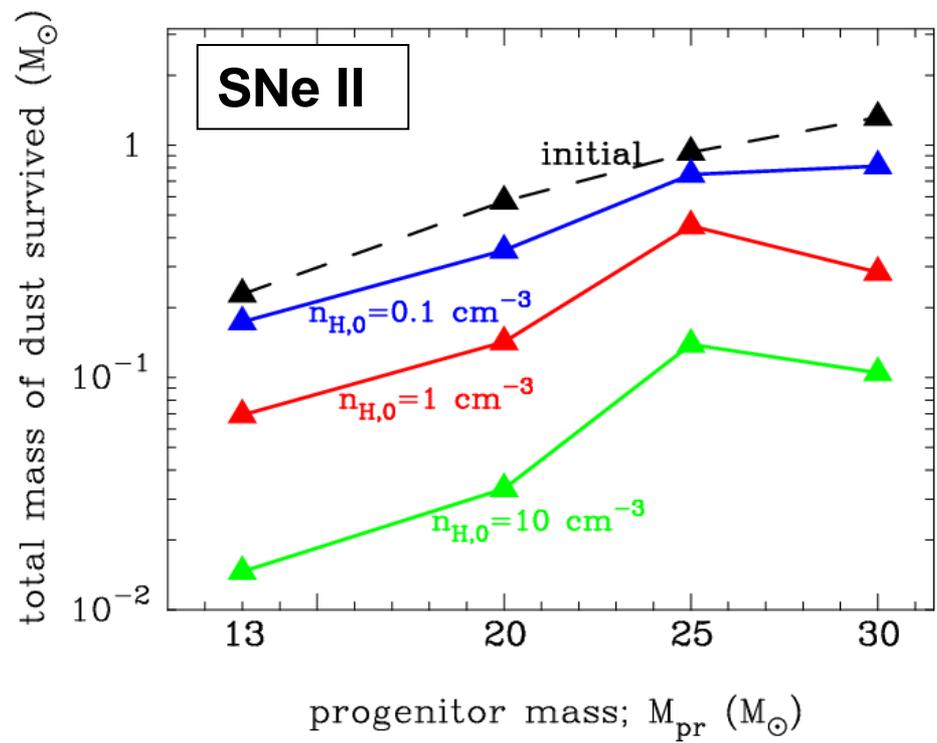
1-1. Summary of observed dust mass in CCSNe



Far-IR to sub-mm observations revealed that $\sim 0.1 M_{\text{sun}}$ of dust grains can be produced in the ejecta of SNe

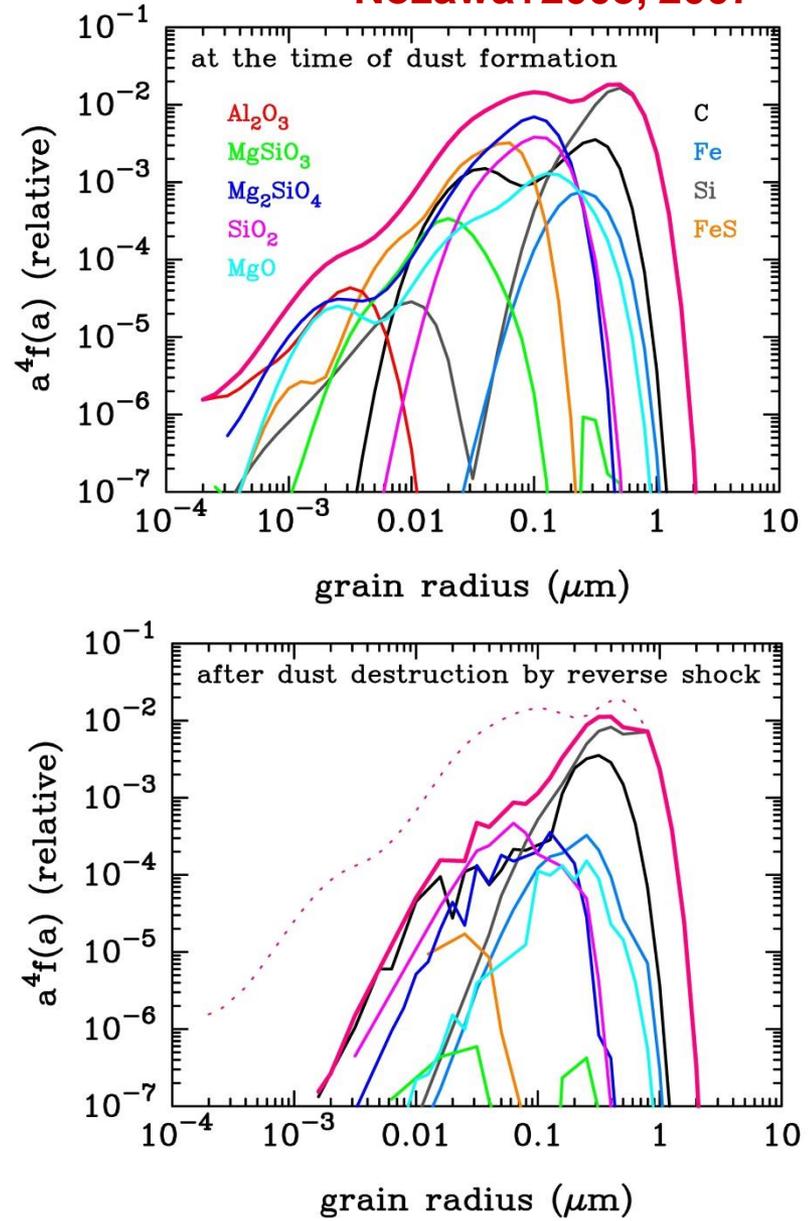
1-2. Dust mass and size ejected from SNe II

- 形成されるダストの組成・サイズは？
 (形成されたダストがリバースショックによってどれだけ破壊されるかに重要)



超新星で形成されるダストのサイズは比較的大きい ($>0.1 \mu\text{m}$) だろう

Nozawa+2003, 2007



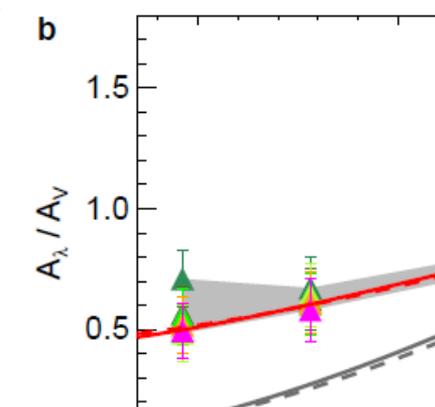
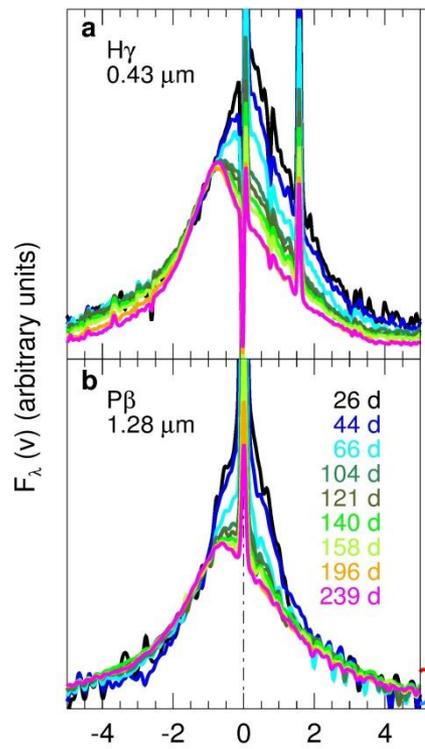
1-3. Dust formation in Type IIn SN 2010jl

doi:10.1038/nature13558

Rapid formation of large dust grains in the luminous supernova 2010jl

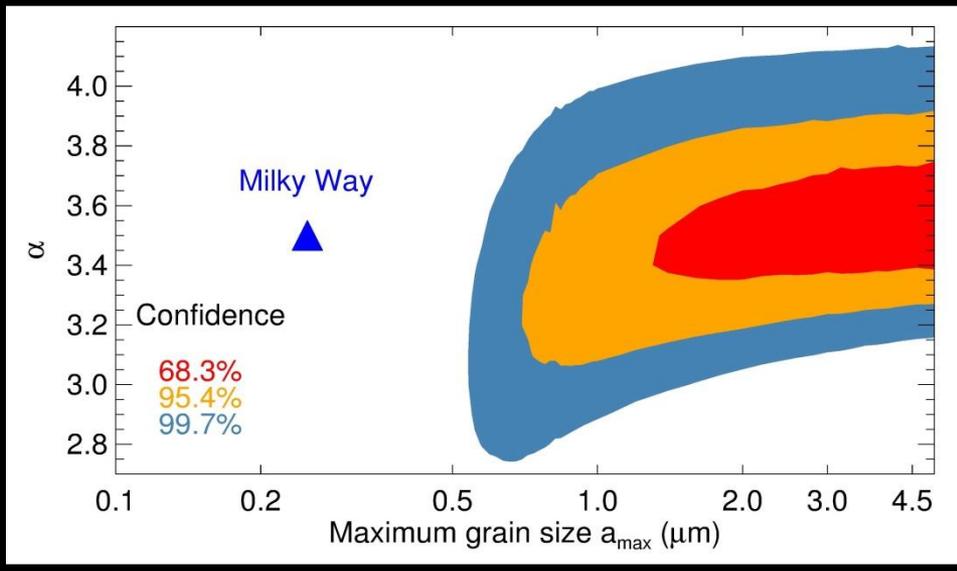
→ ejectaで形成されるダストの話ではない

Christa Gall^{1,2,3}, Jens Hjorth², Darach Watson², Eli Dwek³, Justyn R. Maund^{2,4}, Ori Fox⁵, Giorgos Leloudas^{2,6}, Daniele Malesani² & Avril C. Day-Jones⁷



Power-law size distribution

- $\alpha : \sim 3.5$
- maximum radius : $\sim 3-4 \mu\text{m} (>0.5 \mu\text{m})$



Gall+2014, Nature

1-4. Dust properties in Type II_n SN 2010jl

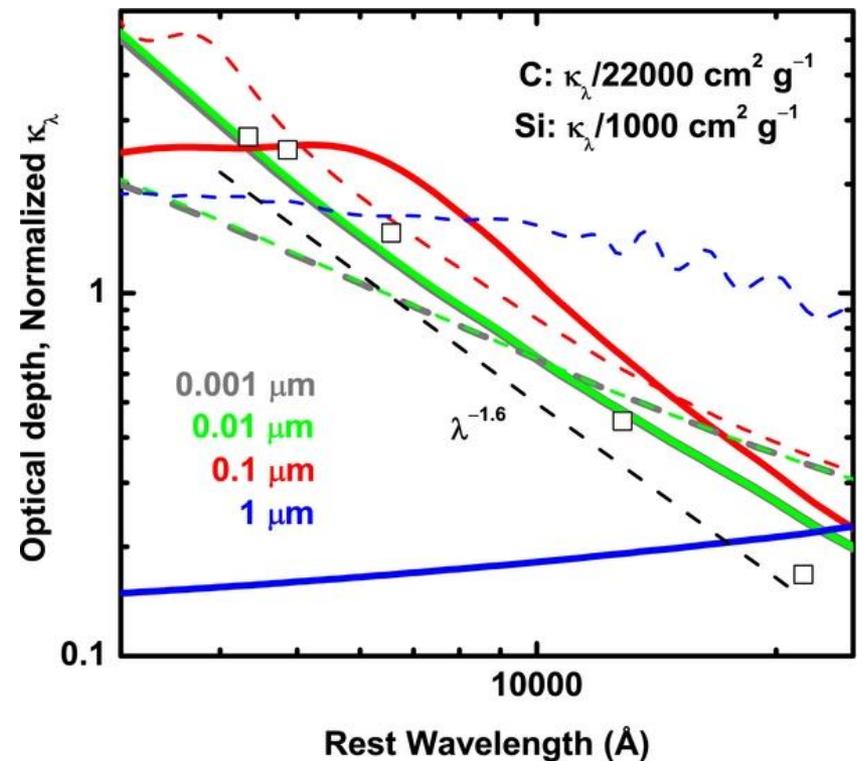
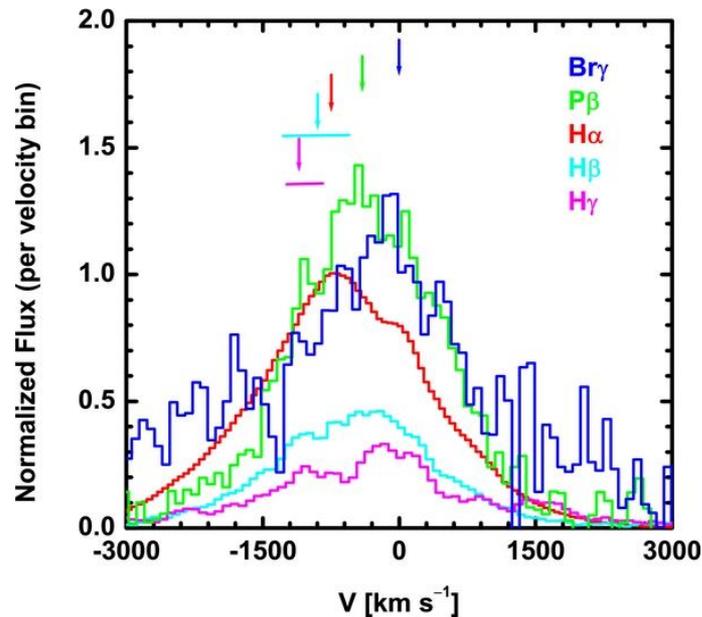
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 776:5 (16pp), 2013 October 10

doi:10.1088/0004-637X/776/1/5

© 2013. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

PROPERTIES OF NEWLY FORMED DUST GRAINS IN THE LUMINOUS TYPE II_n SUPERNOVA 2010jl*

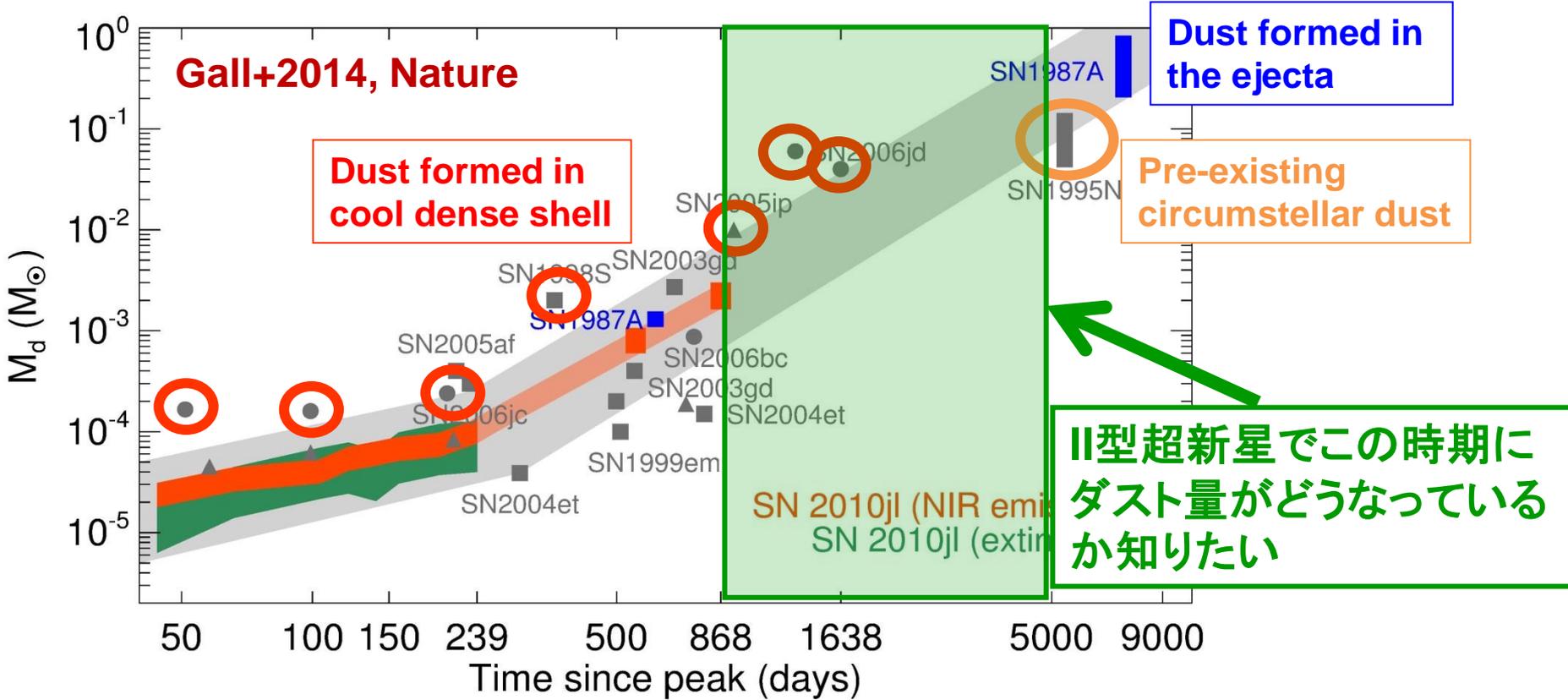
K. MAEDA¹, T. NOZAWA¹, D. K. SAHU², Y. MINOWA³, K. MOTOHARA⁴, I. UENO⁵, G. FOLATELLI¹,
T.-S. PYO³, Y. KITAGAWA⁴, K. S. KAWABATA⁵, G. C. ANUPAMA², T. KOZASA⁶,
T. J. MORIYA^{1,7,8}, M. YAMANAKA^{5,9,10}, K. NOMOTO¹, M. BERSTEN¹, R. QUIMBY¹, AND M. IYE¹¹



SN 2010jlで形成されるダストのサイズは小さい (< 0.1 μm)

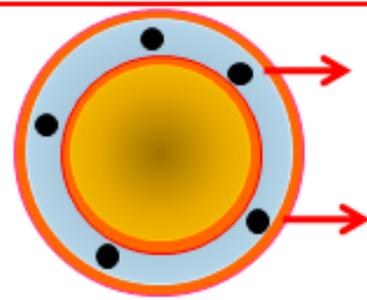
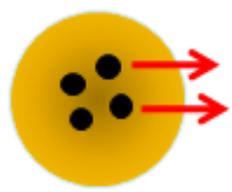
Maeda, TN et al. (2013)

1-5. Caveats on Gall et al. (2014) paper



Dust formation in the ejecta

Dust formation in dense shell



超新星ejectaで形成されるダストとcool dense shellで形成されるダストを一緒にくたにして、ダスト質量の進化を議論すべきではない

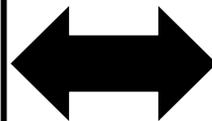
2-1. Why stellar mass-loss is important?

- 質量放出はなぜ重要か？
 - 星の進化(特に後期段階)を決める、元素合成にも影響
 - ダストの主要な形成場所
 - 星間空間中での(特に重元素)ガスとダストの循環
 - 長年の問題 → 質量放出の駆動機構がわかっていない
 - pulsation? → pulsationがない星もmass lossしている
 - line-driven? → LBVsやWR starsでは重要でありそう
 - 回転、磁場、表面对流、連星相互作用、、、
 - dust-driven? → C-rich星(carbon dust)ではうまく説明できる
→ O-rich星(silicate dust)ではうまく作用しない
- 鶏卵問題(質量放出が先かダスト形成が先か?)

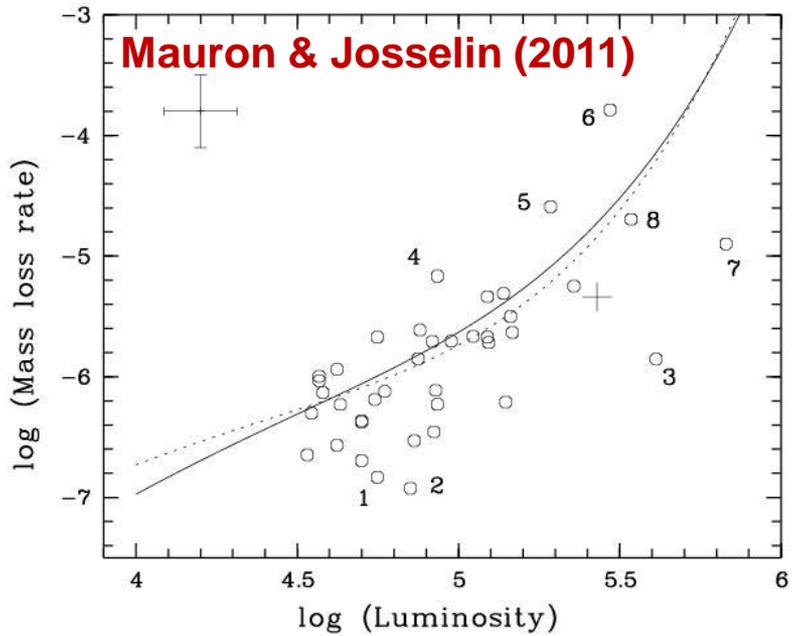
2-2. Chicken and egg argument on mass loss

Dust-driven windについての鶏卵問題

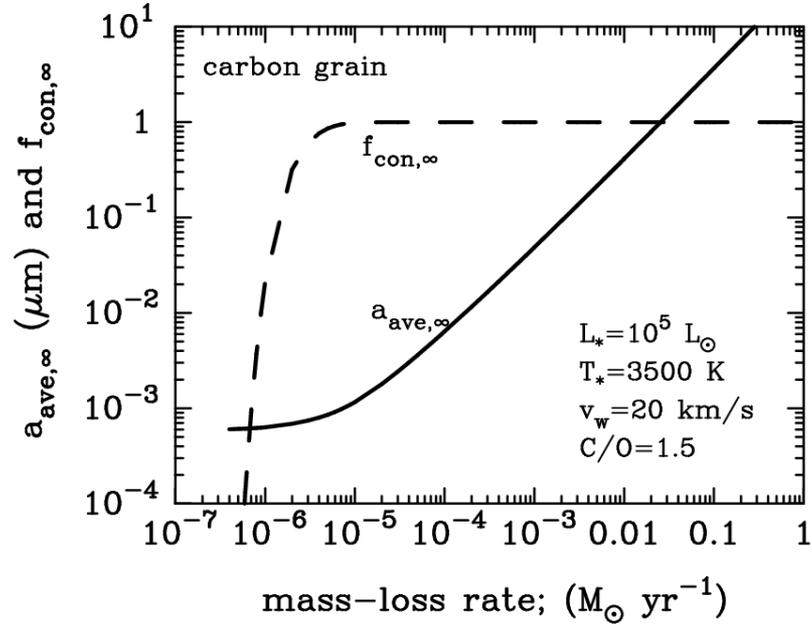
ダストが形成されれば、ダストが
うける輻射圧によりガスは加速
される(質量放出率は高くなる)



ガスが星表面から放出されな
ければ(質量放出率が高くな
ければ)ダストは形成されない



x-axis: 60 μm-flux based
dust-to-gas mass ratio=200



$$\rho(r) = \frac{\dot{M}}{4\pi r^2 v_w} = \rho_* \left(\frac{r}{R_*}\right)^{-2}$$

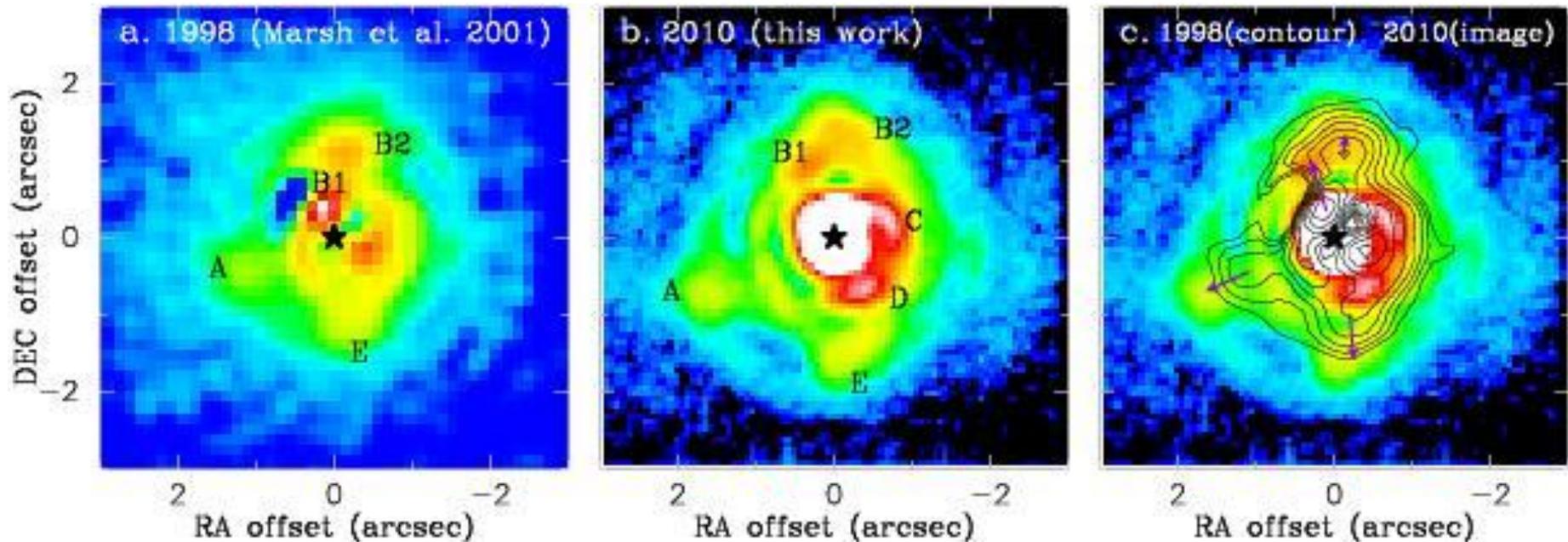
2-3. Resolving chicken and egg argument

- ダストは星からどれくらいの距離で形成され始めるか？
- ダストに働く輻射圧によって本当にガスは加速されるのか？
- 最終的にどのようにガスとダストは星間空間に放出されるか？

→ 可視光/赤外線の高分散分光・高空間分解能の観測が必要不可欠

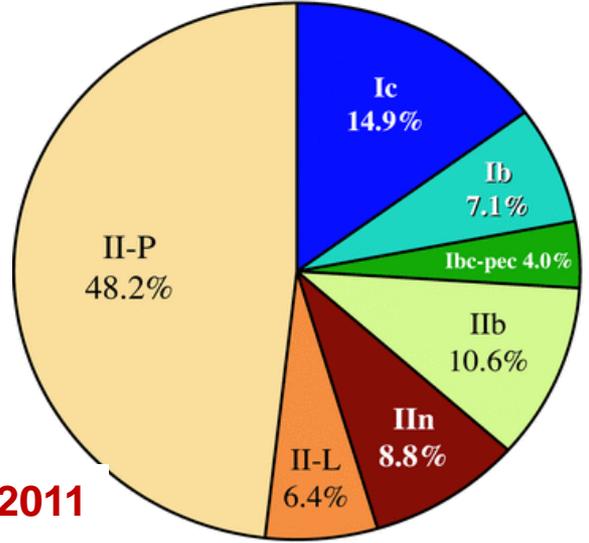
mid-infrared (17.7 μm) image of a red supergiant Antares with the VLT (VISIR, spatial resolution of ~ 0.5 arcsec)

Ohnaka 2014



3-1. Variety of core-collapse supernovae

観測された超新星のタイプの割合



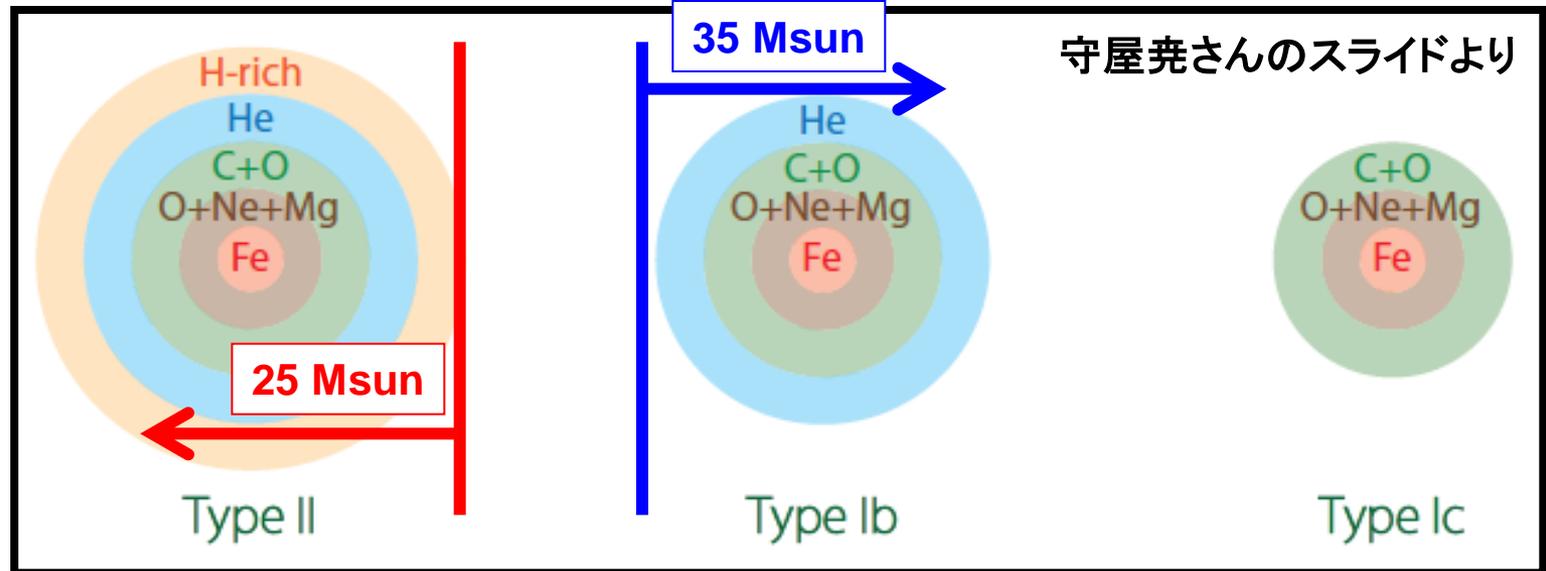
Smith+2011

重力崩壊型超新星の多様性は、爆発時の外層の有無に起因する
 → 爆発直前の質量放出史に依存する

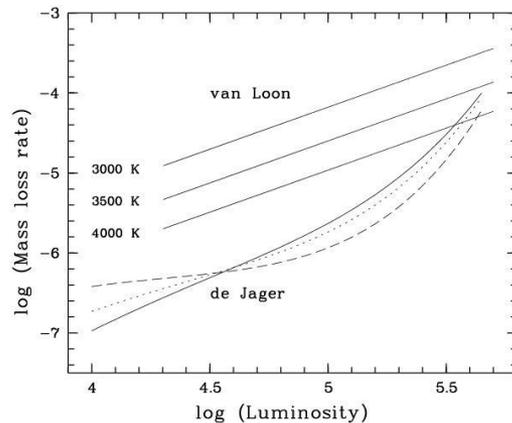
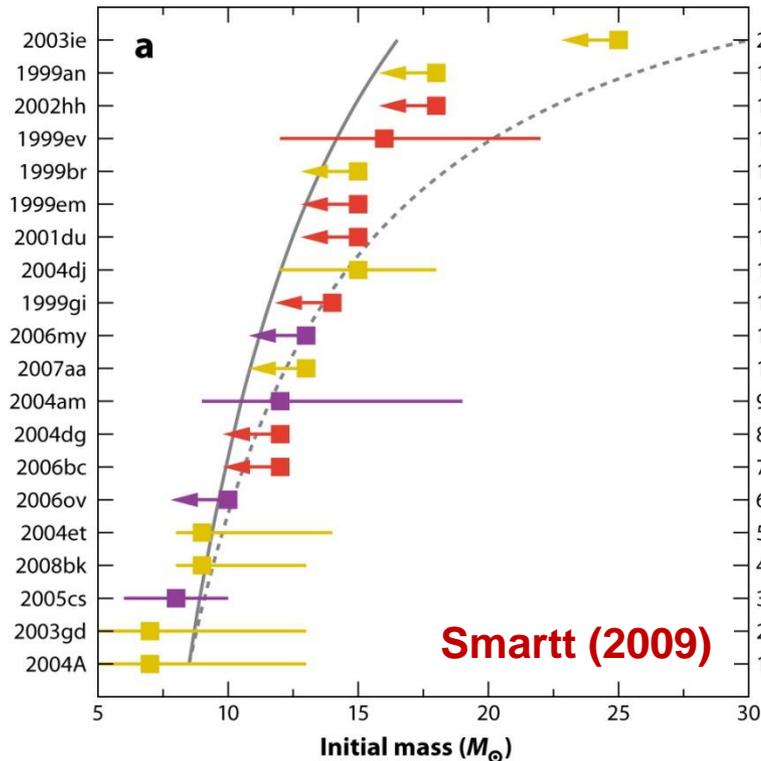
大質量星の(古典的)進化理論では、

- Type II-P: MZAMS = 8-25 Msun
- Type IIb/IIc: MZAMS = 25-35 Msun
- Type Ib/Ic SNe : MZAMS > 35 Msun

Core-Collapse SN Fractions



3-2. Red-supergiant problem



Mauron & Josselin 2011

爆発前の画像から同定されたII-P型超新星の親星は、その質量の上限が**~18 M_{sun}** (**25 M_{sun} より小さい**)と見積もられる

→ **~18 M_{sun} より重い星は、水素外層をまとった赤色超巨星として爆発しない**

理論は質量放出率を過少評価している？

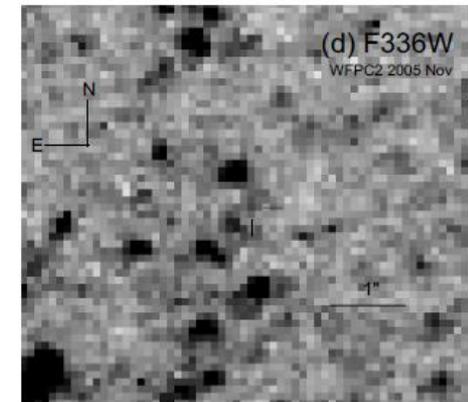
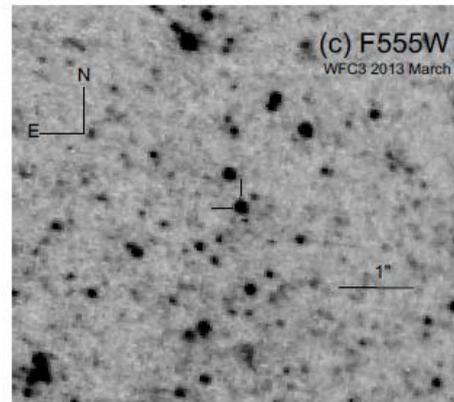
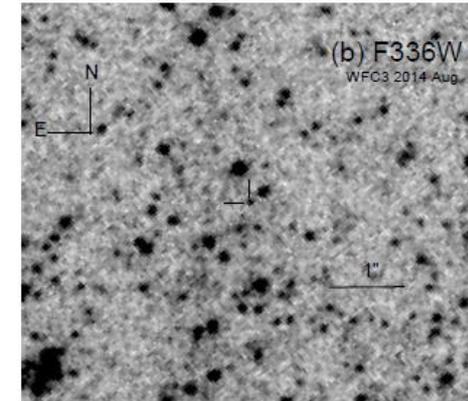
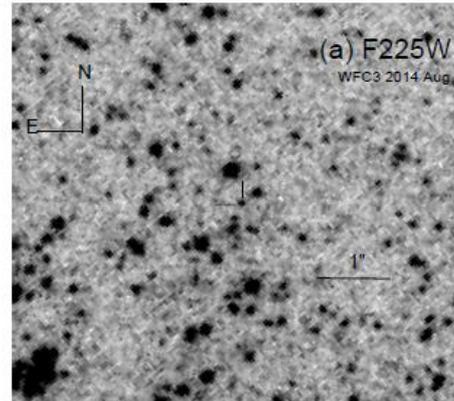
- 従来よりも一桁程度高い質量放出率を適用しても、超新星の多様性(親星質量との関係)を説明することはできなさそう
(Chieffi & Limongi 2012)

- 厚い外層を持たないType IIL/Ilb/Ib/Ic SNeは、連星の相互作用によって外層を失うのではないか？

3-3. Progenitor(s) of Type IIb SN 2011dh

○ SN 2011dh (Type IIb)

- 爆発時の質量： $\sim 15 \pm 3 M_{\text{sun}}$
(Bersten+2012)
 - 親星はYSG (爆発前の画像)
(Maund+2011, van Dyl+2011)
 - モデル計算 \rightarrow progenitor(s) は $16 M_{\text{sun}} + 10 M_{\text{sun}}$ の連星系
(Benvenuto+2013)
 - 爆発の1160日後にHST(UV)で観測したところ、SN 2011dhの位置に、B型星と思しき天体を発見 (Folatelli+2014)
- \rightarrow SN 2011dhは、連星系であったことがほぼ確定



Folatelli+2014

SN 2011dhは、連星系のcompanionが発見されたType IIb SNeの2例目 (1例目はSN 1993J)

\rightarrow Type IIbが連星系である確率：2/2

3-4. Resolving red-supergiant problem

- 爆発しそうな大質量星のモニター観測
 - 系内だけでなく多くの銀河中のRSGs、LBVs、WRsをできるだけ頻繁に(月1?年1?)
 - 4m(8m)望遠鏡もモニター観測で使用するようになるかも
- その他の課題(重力崩壊型超新星の多様性について)
 - 電子捕獲超新星 ($M_{ZAMS} = 8-10 M_{\text{sun}}$)
 - 暗い? 厚いダストをまとっている (**super-AGB stars**) ?
 - Type II_n SNe (全重力崩壊型超新星の10%)
 - 爆発の直前に大規模な質量放出
 - LBVs, WRからの超新星爆発
 - 超高輝度超新星 (super-luminous SNe) の起源

具体的な観測提案(一部)

AGB星の高空間分解分光
RSGの直接撮像
超新星親星のモニタリング

Dust-driven windsの
鶏卵問題

質量放出の理解

missing-dust problem
in Type II supernovae

赤色超巨星問題

元素の起源の理解

metal-poor starを見つける
NS mergerを見つける
超新星ダストの観測

連星進化の理解

X線連星、Be星ガス円盤
TZO? (Thorne-Zyktow obj.)
Ia型超新星の起源

将来プロジェクトへの要請

- 30m級望遠鏡を使った高分散分光観測
 - $R > 10000$? (~1 km/sのガスの運動を分解したい)
 - 空間情報も一緒に
 - 高分散分光＋偏光 (ダストの運動)
- 中小口径望遠鏡を使ったモニター観測 (撮像も分光も)
 - 2020年代には8m望遠鏡も「中口径」(4mも)
- 明るい天体 (の周辺環境) を見たい
 - コロナグラフ (WFIRST)、極小口径望遠鏡
- 赤外線高分散分光 $R \sim 2000$ (10")
- 地上で一番長い波長にも期待 (TAO ~40 um)