

2011/10/12 院生雑誌会

The Yellow Supergiant Progenitor of the Type II Supernova  
2011dh in M51 (arXiv:1106.2565v1)

J.R. Maund, M. Fraser & their collaborator

P48 non-detection | May 31.275

A. Riou | May 31.893

June 1.000

P48 | June 1.191

C18 | June 1.776

T. Griga | June 1.897

S.L. Bailey | June 2.036

M2 高山正輝

## 本日の論点

” SN2011dhのprogenitor候補について ”  
～progenitor探索の難しさ～

### Abstract

- 5/31～6/1のどこかでM51にて超新星イベント”SN2011dh”が発生
- イベント発生後から数週間にわたる photometry の観測からこの超新星はType II b型SNと結論
- 2005年にHSTによりSN2011dhと同じ領域の撮像観測がされていた
- HSTのデータのSED fitから、爆発を起こしたのは $T_{\text{eff}}=6000(\text{K})$ 程度のYellow supergiantと推定
- 星の進化計算との比較から progenitor の initial mass (ZAMS mass) は $\sim 13M_{\text{sun}}$

# BackGround

## 超新星

**Type I**  
光度の極大期に  
水素線なし

### Ia型

- ケイ素の吸収線が顕著なもの
- WD&WD合体orWD&normal star合体
- 距離のstandard candle(今年のノーベル賞)

### Ib&Ic型

- Siが顕著とは言えないもの
- 重力崩壊型
- He吸収線あり→Ib型
- He吸収線なし→Ic型

### IIb型

- 極大直後からH線弱まる。スペクトルがType II b型に似ている
- 重力崩壊型

**Type II**  
光度の極大期に  
水素線あり

### II P型

- 光度曲線にプラトー(光度変化のない平らな状態)を持つ
- 爆発の際、中心から光球面(6000K)までの距離が一定なため、プラトーとなる

### II L型

- 光度がlinearに減少していく

●この他にもIc型やII n型などがある

## 爆発寸前のcore状態は？

### ～爆発までのメカニズム～

#### •Ia型：

C,O coreを持つWDに何らかの星(物質)が降着。Coreがチャンドラセカール限界を超えた時点でCの急激な燃焼により爆発。中性子星等の残骸を作らない。

#### •重力崩壊型(～9Msun)：

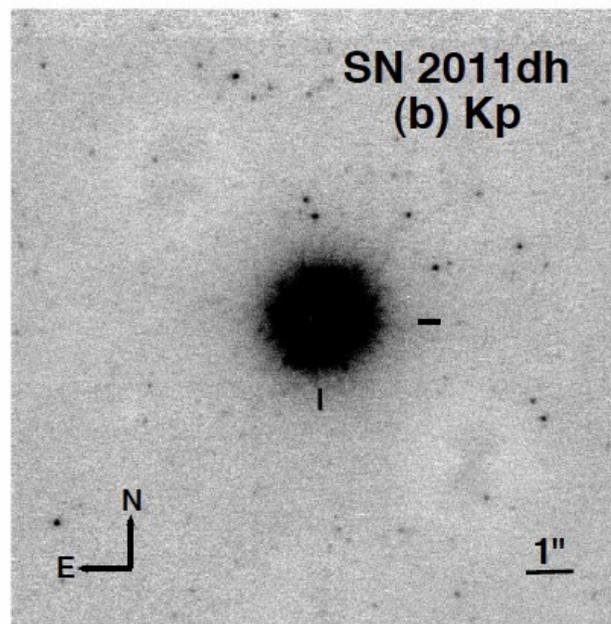
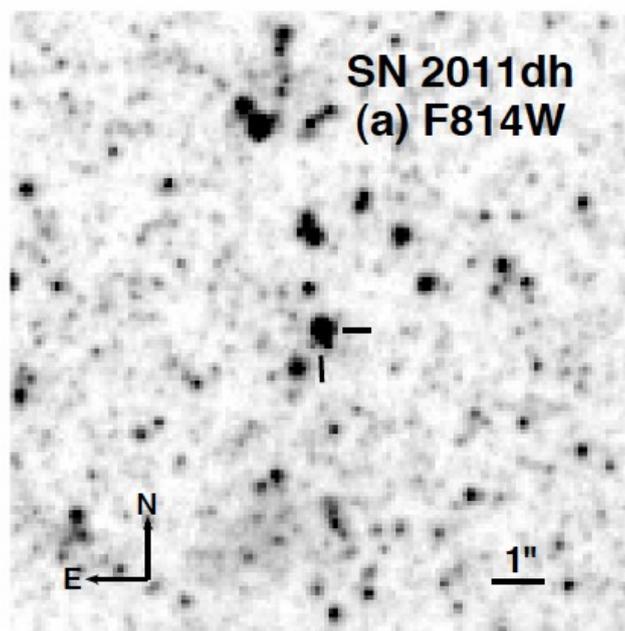
coreの核反応がFeまで行くほど高温ではない場合。O+Ne+Mg coreが徐々に質量を増していき、やがて電子捕獲反応(Mgが電子を捕獲しNaになる)が生じる。そのため、電子の縮退圧が小さくなり、coreはつぶれる。

#### •重力崩壊型(>10Msun)：

coreは縮退しておらず、核反応はFeまで進む。やがてcoreが太っていき、十分高温になるとFeの光分解(高エネルギー光子がFeを破壊)が生じ、FeはHeへと分解される。最も安定なFeからエネルギーの高いHeを生成する反応なので、これは吸熱反応。coreの温度が下がり、圧力が小さくなるため重力崩壊を起こす。

# ここから本題

- 2011/5/31.954、M51にて超新星爆発イベントSN2011dhを観測
- Silverman等のグループがこのイベントがType II b型超新星であると断定
- 位置の座標は  
( $\alpha$  J2000,  $\delta$  J2000)=(13h30m05s.12, +47°10'11")



(左):HST ACS(Advanced Camera for Survey)によって2005/1/20-21に得られたSN2011dh近傍領域のF814W filter( $\rightarrow$ I bandに相等)による撮像

(右):Keck II NIRC2によって2011/6/6に得られた同じ領域のKp-band(中心波長 $2.124\mu\text{m}$ , バンド幅 $0.351\mu\text{m}$ )による撮像 (S.D. Van Dyk et al. 2011)

# 目指すべきゴールと到達までの行程

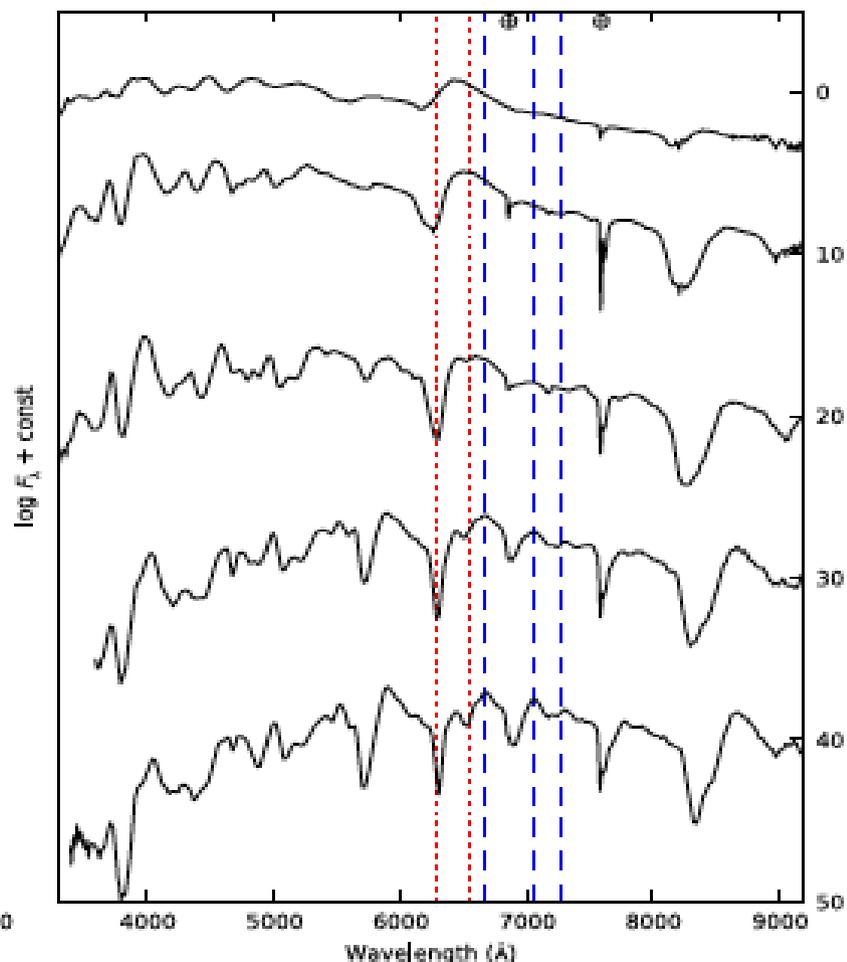
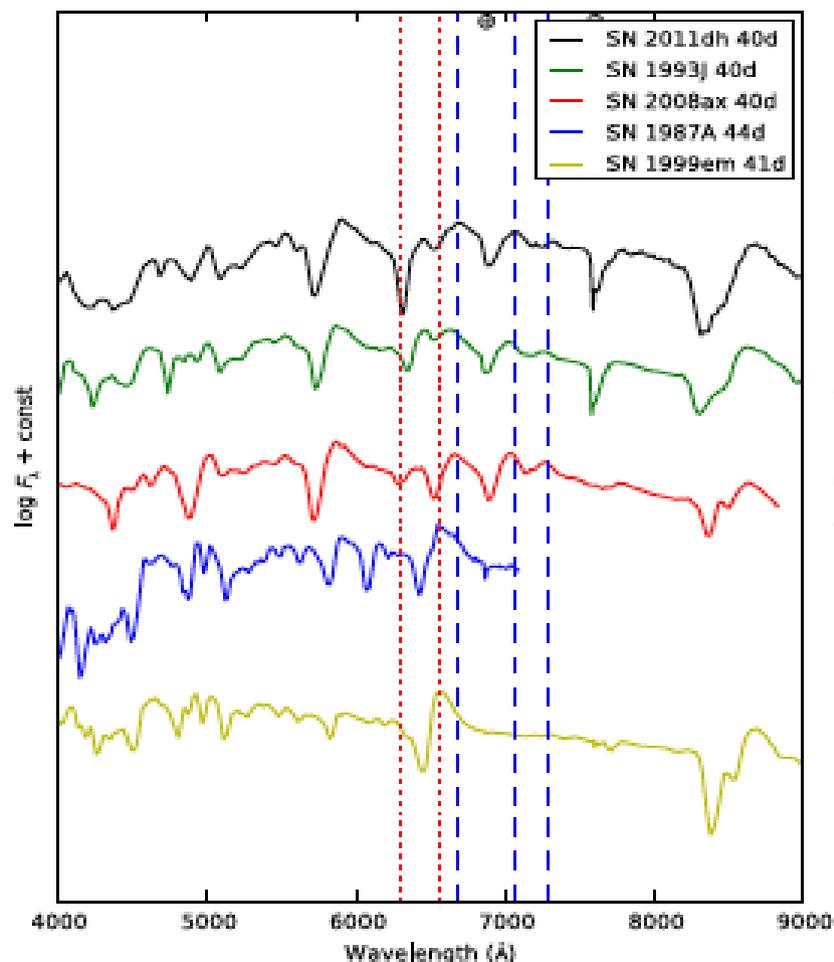
## ゴール：

SN2011dhのprogenitorの物理的性質(mass, luminosity, stellar type,,etc)を明らかにし、SNについての理解を深める。

## Method：

- 爆発後のlight curve, スペクトルの時間変化等からSNの理論に基づき progenitorの物理量を算出
- 上とは独立に、爆発以前の観測データの中からprogenitorを探す。SN2011dhの位置に爆発前にも存在した天体がないか解析
- progenitorだと思っていたものが実は星団だった、というオチはないか？PSFから判断
- 多色の撮像で得られたprogenitorの光度からSED(spectral energy distribution)を導出。model SEDとのfittingによりprogenitorの表面温度を決定。
- 適当なbolometric correctionを用いてprogenitorのbolometric luminosityを算出。すでに求めた有効温度と併せ、HR図を用いて星の進化モデルと比較。Progenitor massを推定
- 上記2つの方法でそれぞれ得られたprogenitorの物理量を比較。この系の状態について議論する。

# SN2011dhのlight curveおよびspectroscopyからprogenitorを探る



爆発から~40日後のSN2011dhといくつかのSNのspectralの比較。赤点線はH $\alpha$ 、青点線はHe Iのlineの位置。SN2011dhはSN1993J, SN2008ax (共にType II b型)と似ている。

SN2011dhの爆発から40日後までに取られたspectral。H $\alpha$ 線が弱まり、次第にHe I線が強くなって行く。これはType II c型SNの特徴でもある。

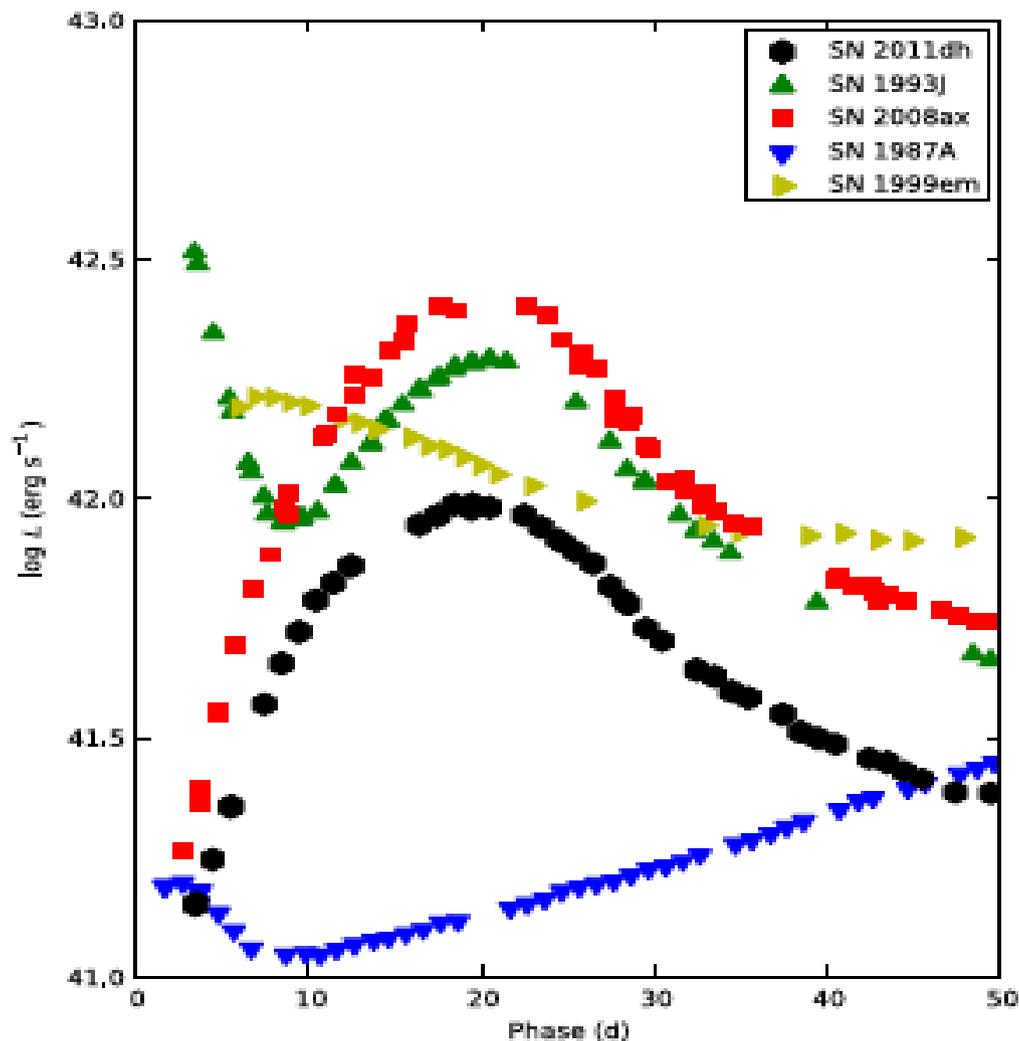
# SN2011dhのlight curveおよび spectroscopy から progenitor を探る

- SN2011dhのlight curve(黒)は既知のtype II b型SN、SN1993J(緑)とSN2008ax(赤)、に類似。

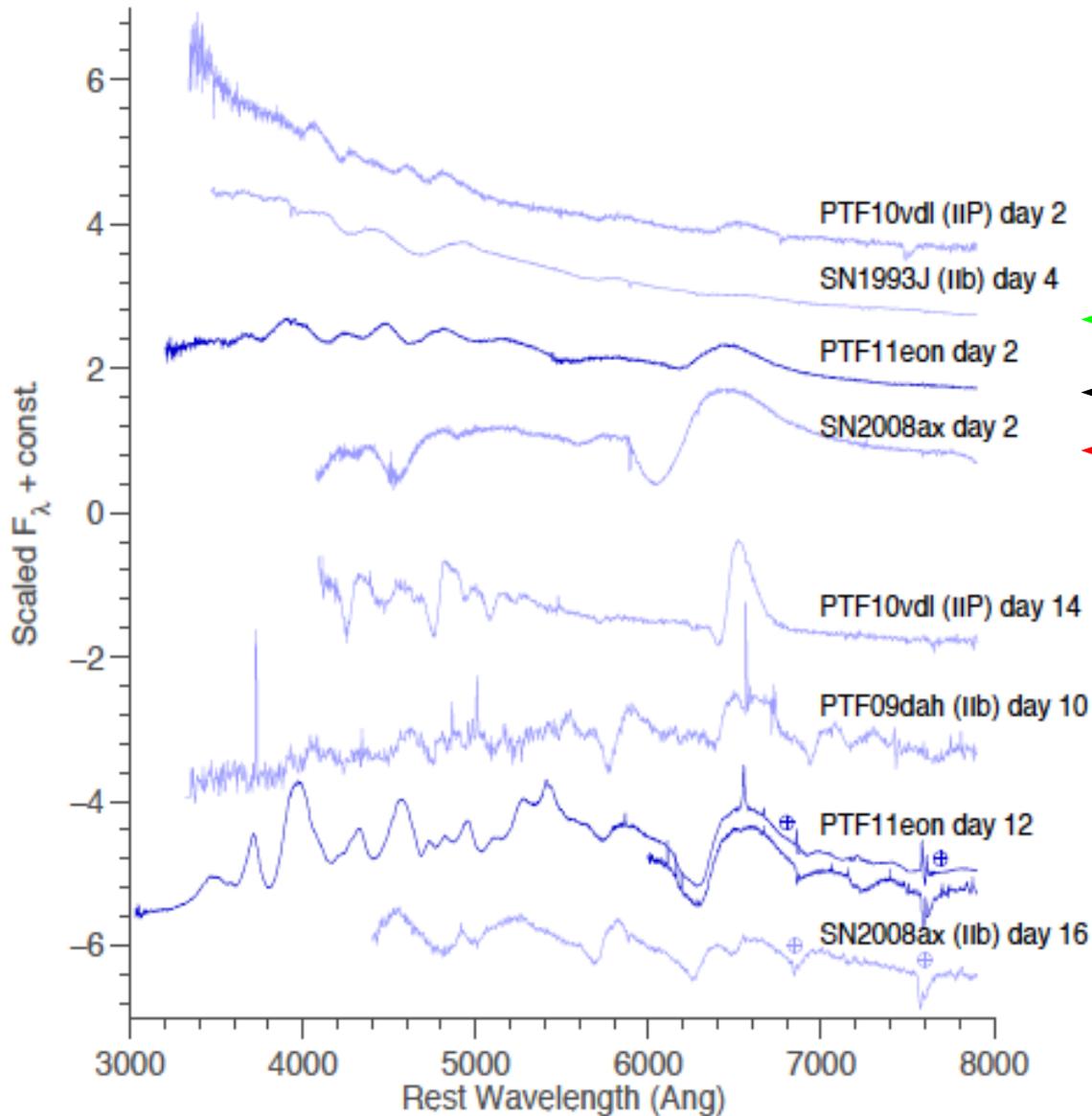
- 超新星爆発の際、まず衝撃波が星内部から外側に向かって伝わる。表面に達したときをshock breakout (SB)とよび、明るさが極大をむかえる(SNの数時間後)。SB後は星が膨張するため一気に暗くなる(明るさの極小)。その後核反応生成物(Ni56など)の崩壊により明るさは再度極大をむかえる。

- 従ってSNからSBまでに要した時間は星の中を衝撃波が通過する時間であり、星の半径の情報を含む。

- decayの様子はSN2008axに酷似している。SN2008axのprogenitorはcompactな天体( $10^{11}$ cm, W-R star?)なので、SN2011dhも同様に、progenitorは $10^{11}$ cm程度か？



# SN2008ax と SN2011dh の類似性



SNの数日後のspectral  
I. Arcavi et al.(2011)より

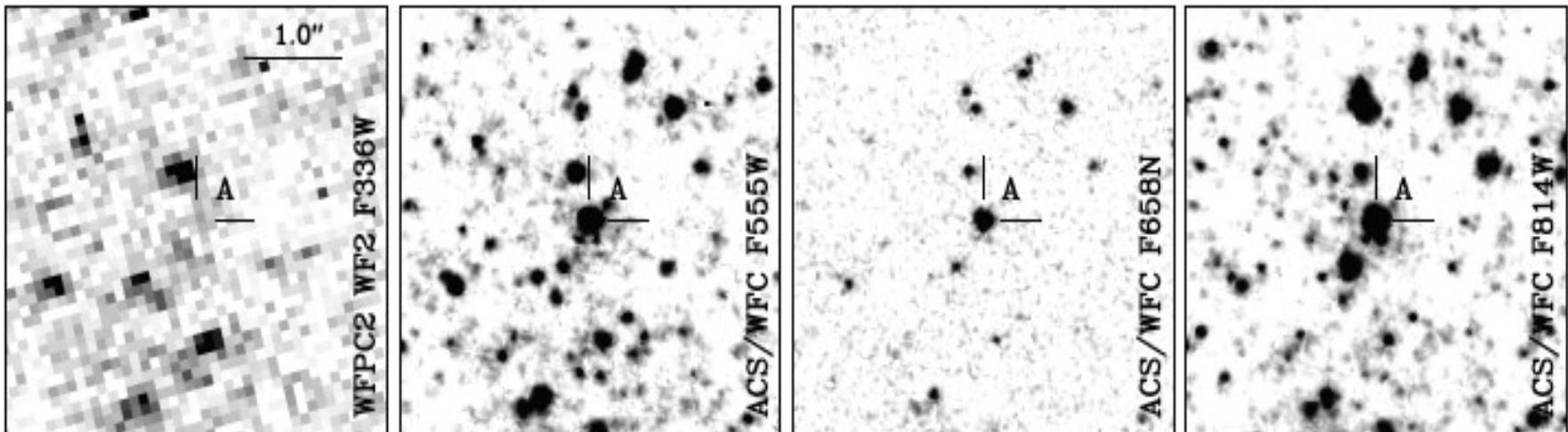
SN2011dhは  
SN1993J(pro-genitor半径  
 $R \gg 10^{11}\text{cm}$ )よりも、むしろ  
SN2008ax( $R \sim 10^{11}\text{cm}$ )に似ている。  
従って、爆発後の情報からは  
SN2011dhのprogenitor radiusは  
 $10^{11}\text{cm}$ 程度、と結論

# Light curve, spectralの解析でわかったこと ～考察・まとめ～

- Light curveの様子からSN2011dhはType II b型超新星と断定
- 既知のsuper novaイベントの中では、SN2008axにlight curve, spectralが酷似。
- よって、SN2011dhのprogenitorの物理量はSN2008axのそれと近いと思われ、今回のゴールであるSN2011dhのprogenitorについて、その半径は $\sim 10^{11}\text{cm}$ 程度と予想される。
- これは超新星爆発を起こすsingle starにしては小さすぎる。従って、連星系と予想される。

# progenitor探査

- 爆発から数日後(2011/6/6)にGemini North Telescope(GNT)のK-band filter(with NIRI&ALTAIR AO)を用いて撮像観測
- M51内の適当な天体18個を取り出し、HSTとGNTの座標のズレを修正(IRAFまかせ)
- GNTのデータから予想されたHSTの座標より3masズレたところにprogenitorと思われる天体sourceAを発見
- ちなみにGNT座標からHST座標への変換時に予想されるerrorは23mas
- SourceAのPSFからpoint like objectと断定。clusterではないようだ



These figures are HST's images of nearby region of SN2011dh

# Source A's color & SED fitting

(左)  $F336W$  ( $U$  bandへ変換),  $F435W$  ( $\rightarrow B$ ),  $F555W$  ( $\rightarrow V$ ),  $F814W$  ( $\rightarrow I$ )を用いてccdを作成。同時にM33のW-R星とSN1993Jをplot  
 (右) HSTによるsource Aの撮像データ(5波長域、 $F336W$ ,  $F435W$ ,  $F555W$ ,  $F658N$ ,  $F814W$ )とmodel SEDとの比較

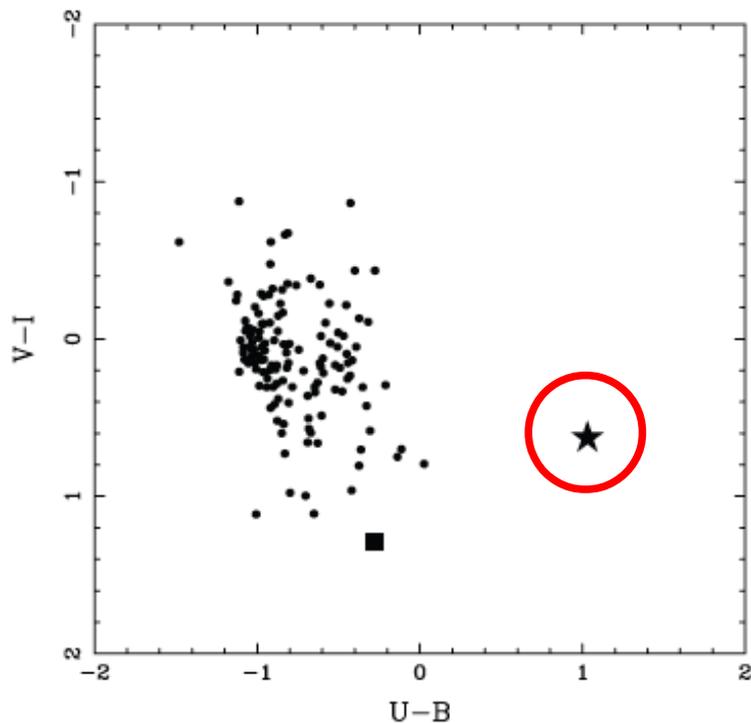


Figure 3. Observed  $U-B$  and  $V-I$  colors of Source A (the progenitor candidate for SN 2011dh;  $\star$ ) and the progenitor of SN 1993J ( $\blacksquare$ ), compared with the colors of W-R stars ( $\bullet$ ) in M33 (Massey et al. 2006). All colors have been corrected for foreground reddening.

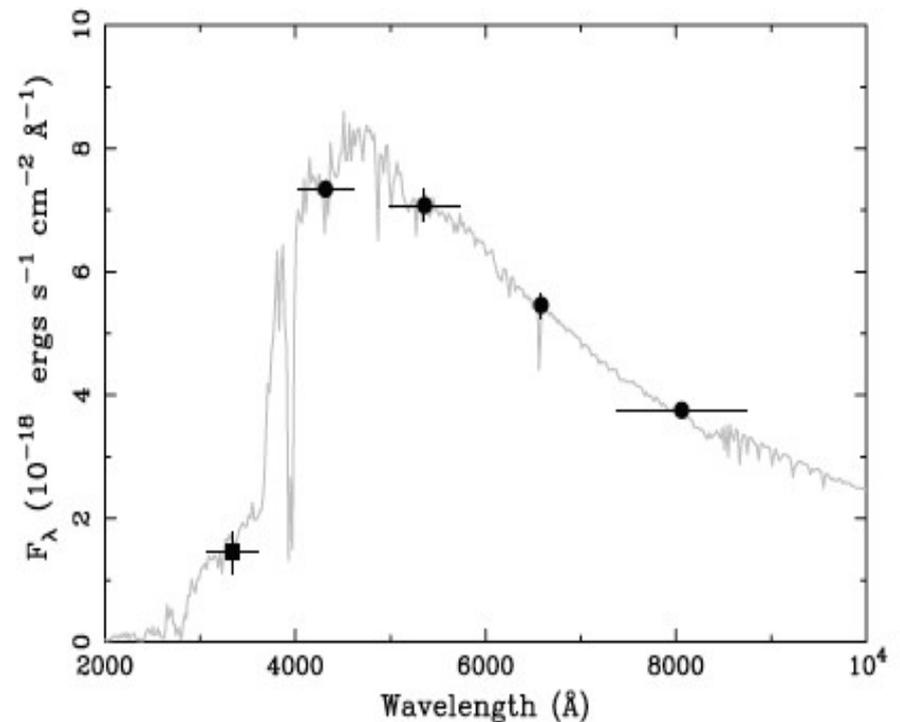


Figure 2. Observed SED of Source A, as measured from pre-explosion *HST* WFPC2 ( $\blacksquare$ ) and ACS/WFC ( $\bullet$ ) images. An ATLAS synthetic spectrum for a star with  $T_{\text{eff}} = 6000$  K and  $\log(g) = 1.0$  is shown in gray.

Color-color diagramによるSource AとWolf-Rayet星の比較。

Source AはW-R星ではない

HSTで得られたsource Aのfluxと、それを再現するmodel SED

$T_{\text{eff}} = 6000 \pm 280$  (K)が適当

# Source A luminosity & Comparison with stellar evolution track

M51のdistance( $7.1 \pm 1.2$ Mpc)を採用し、

$M_{F555W} = -7.54 \pm 0.37$ (mag)を得る。Bolometric correctionを用いて、

$\log(L/L_{\odot}) = 4.92 \pm 0.20$ を得た。

HR図上の位置と星の進化trackとの比較から、source Aのinitial massは、

~~$M = 18 M_{\odot}$~~

**$M_{\text{initial}} = 13 \pm 3 M_{\odot}$  !**

Single starの進化trackの終端(coreの進化が終了するところ)とsource Aのluminosityを延ばして行った所の交点に相当するmassがsource Aのinitial mass!

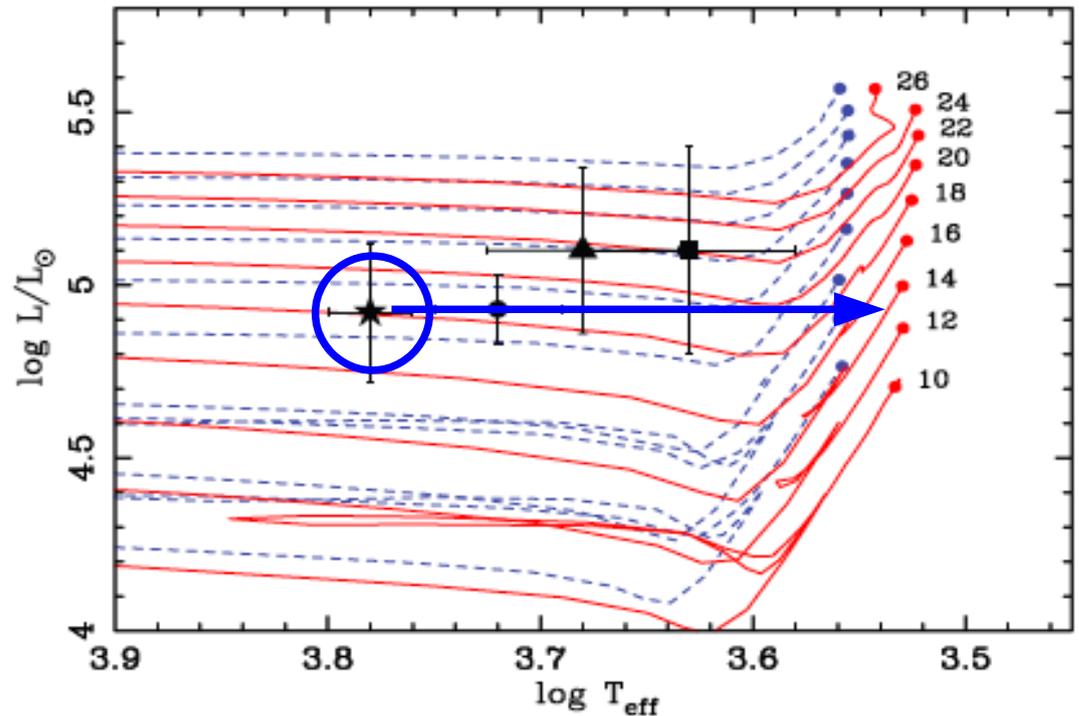


Figure 4. Hertzsprung–Russell diagram showing the luminosities and temperatures of the progenitors of SNe 2011dh (Source A;  $\star$ ), 1993J ( $\blacksquare$ ; Maund et al. 2004; Aldering et al. 1994), 2008cn ( $\bullet$ ; Elias-Rosa et al. 2009), and 2009kr ( $\blacktriangle$ ; Fraser et al. 2010; Elias-Rosa et al. 2010). Overlaid are STARS stellar evolution tracks for solar (red solid) and LMC (blue dashed) metallicities. The initial mass for the progenitor candidate is estimated through comparison with the luminosities of the *end points* of these tracks.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

# Source Aの解析でわかったこと ～考察・まとめ～

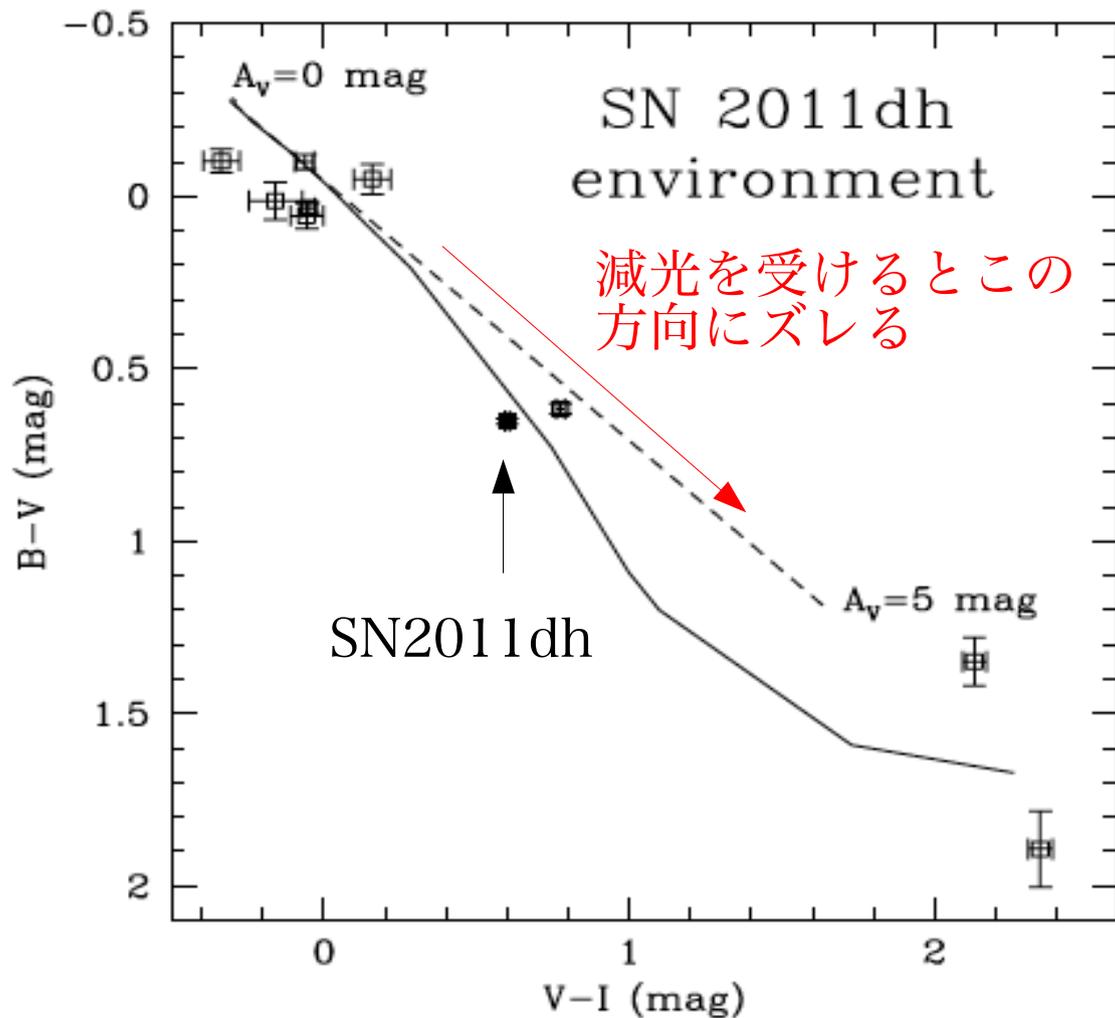
- Source AはF8 supergiant star。表面温度はおよそ $T \sim 6000(K)$
  - Luminosityと表面温度からsource Aの半径は $R \sim 10^{13}cm$ 。ちなみに太陽は $R_{\odot} \sim 7 \times 10^{10}cm$
  - Source AはWolf-Rayet星ではない
- Source Aがprogenitorだと考えると、single starの進化計算との比較からinitial massは $M \sim 13M_{\odot}$
- Source Aがprogenitorだと考えると、single starが爆発するべき表面温度よりかなり高温である。これは、source Aが連星をなしていて、伴星に水素の外層をはがされたため、と考えられる。
  - Source Aがprogenitorだと考えると、coreのC burningが終了した時点で爆発した

# Conclusion & discussion

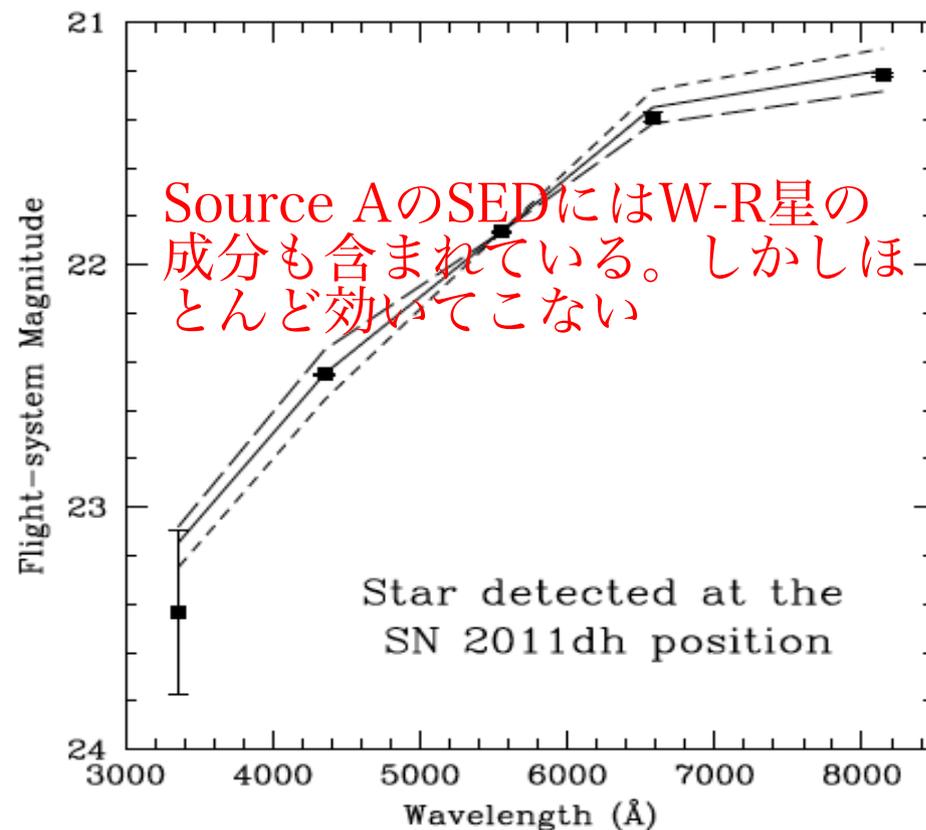
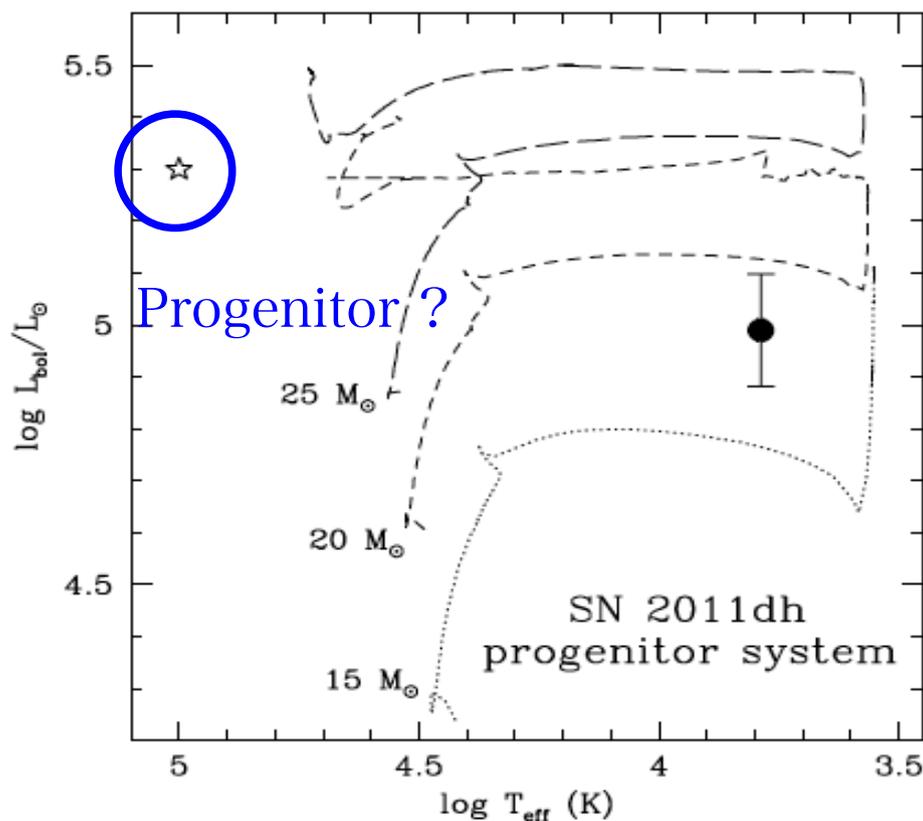
- SN2011dhはType II b型SN
- spectralの形からSN2008axに酷似。従ってprogenitor radiusは $10^{11}$ cm程度
- 一方HSTの観測データからprogenitorとおぼしき天体source Aを発見。
- Source Aは表面温度6000(K)、initial massが13Msun、半径 $10^{13}$ cmのF8 supergiantで連星系を組んでいると思われる。
- 表面温度が高い状態で爆発したのは伴星との相互作用(例えばmass transfer)によりsingle starとは半径がズレているため。
- しかし連星説を裏付けるような、mass lossに伴うダストからのNaI D(reddeningに寄与する)が受かったという報告は未だされていない。
- progenitor半径の不一致と併せて、今後の追観測に期待する。

# おまけ

- Color-color diagramから見る、SN2011dhとその近傍のreddeningの様子
- プロットされているのはsource Aとその近傍のsupergiant。
- 実線は減光(reddening)がない場合のsupergiantが乗るべき理論曲線
- 点線は減光を受けた際に理論曲線から、どの方向に、どれだけズレるか、を表した”reddening vector”
- これを見るとsource Aはreddeningの影響をほとんど受けていないことがわかる



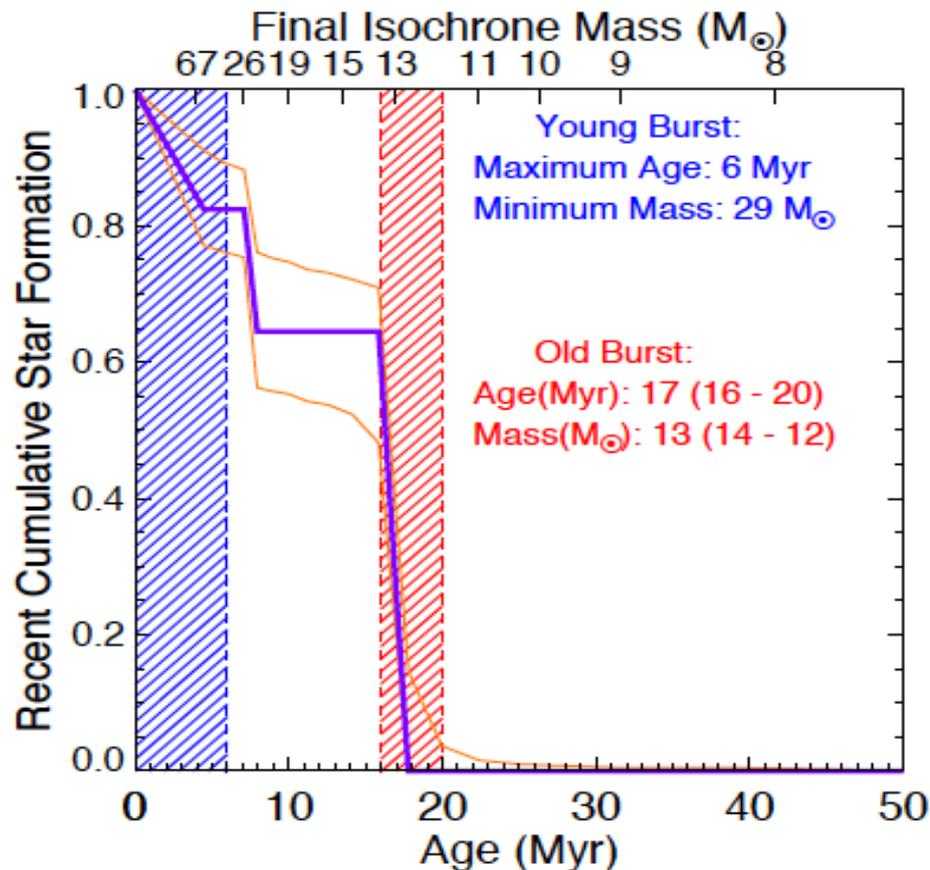
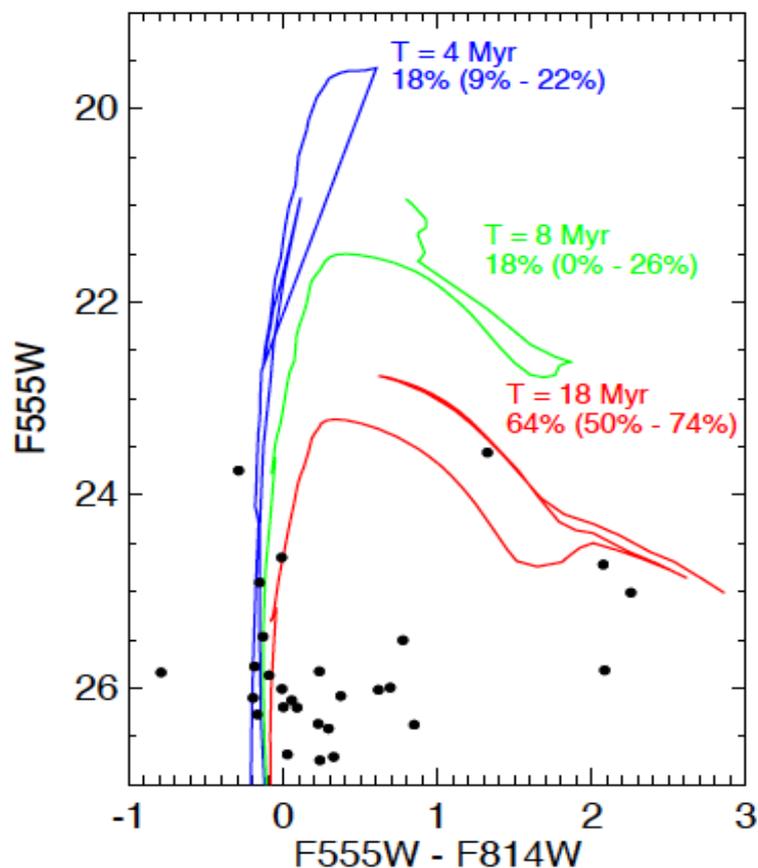
# こんな主張もある①



- S.D. Van Dyk et al. 2011 v2 (小室君が発表してくれたのはver 1)
- 彼らは、source Aはprogenitorではないと結論。  
真のprogenitorは伴星の方。SNから予想されるprogenitorの半径を信頼して予想すると、表面温度 $T \sim 10^5$ (K)、nitrogen rich( $\rightarrow$ H envelopeがはぎ取られている)、 $\log(L/L_{\odot}) \sim 5.3$ 、 $M_v \sim -2.1$ mag、source Aよりずっとコンパクト( $R \sim 10^{11}$ cm)なWolf-Rayet星。
- この星は高温すぎてU bandより長波長側のSEDには効いてこない。

## こんな主張もある②

J.W.Murphy et al. (2011)  
M51のstar formation historyからの  
SN2011dhのprogenitor massに  
対する要請



•SN2011dhの近傍(~50pc以内)の星の  
CMD(color magnitude diagram)を調べた結果、  
二つの時代でstar burstが起きていたことがわ  
かった。

•古いものは17Myr前。このとき生まれた星のう  
ち、現在寿命を迎えるのは13 $M_{\odot}$ の星(Maundの  
結果に一致)

•新しいものは6Myr前~現在まで。このとき生ま  
れた星のうち、現在寿命を迎えるのは>29 $M_{\odot}$ の  
星(Wolf-Rayet星の質量に一致)