

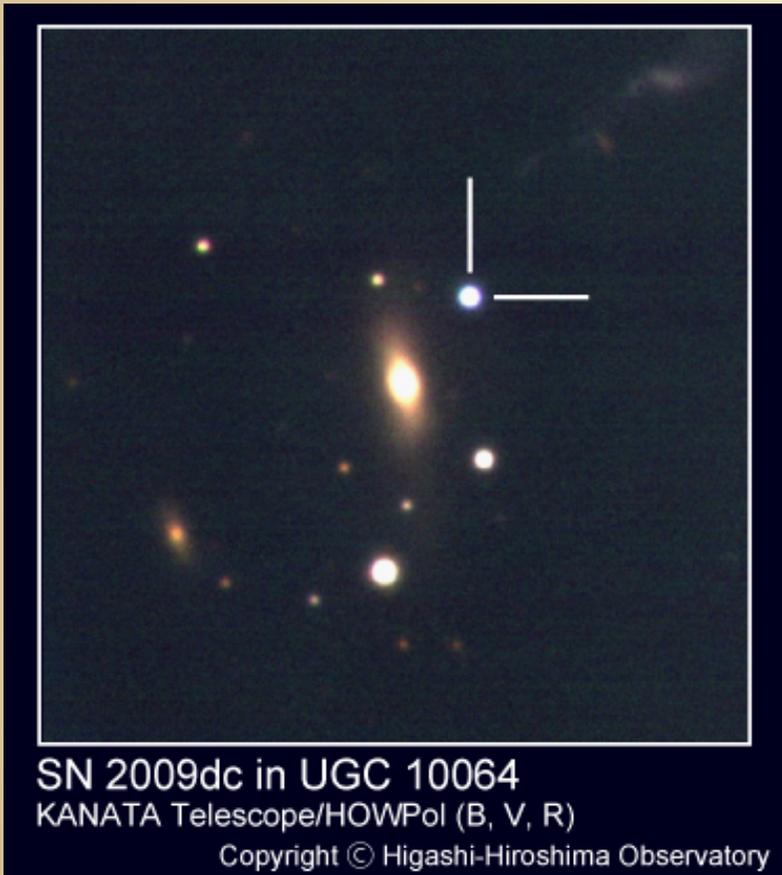
# Observational Study of Extremely Luminous Type Ia Supernova 2009dc

広島大学 宇宙科学センター  
日本学術振興会特別研究員 (PD)

山中 雅之

# 本研究の概要

—史上最も明るいIa型超新星爆発—



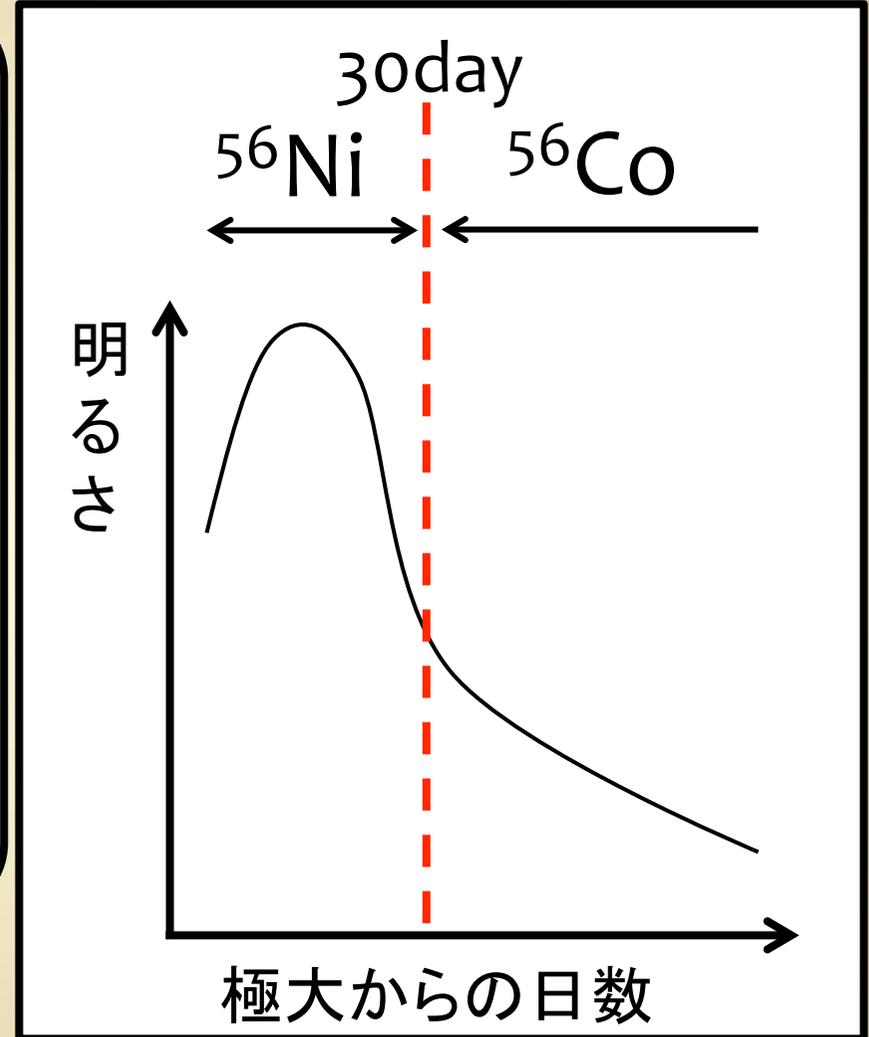
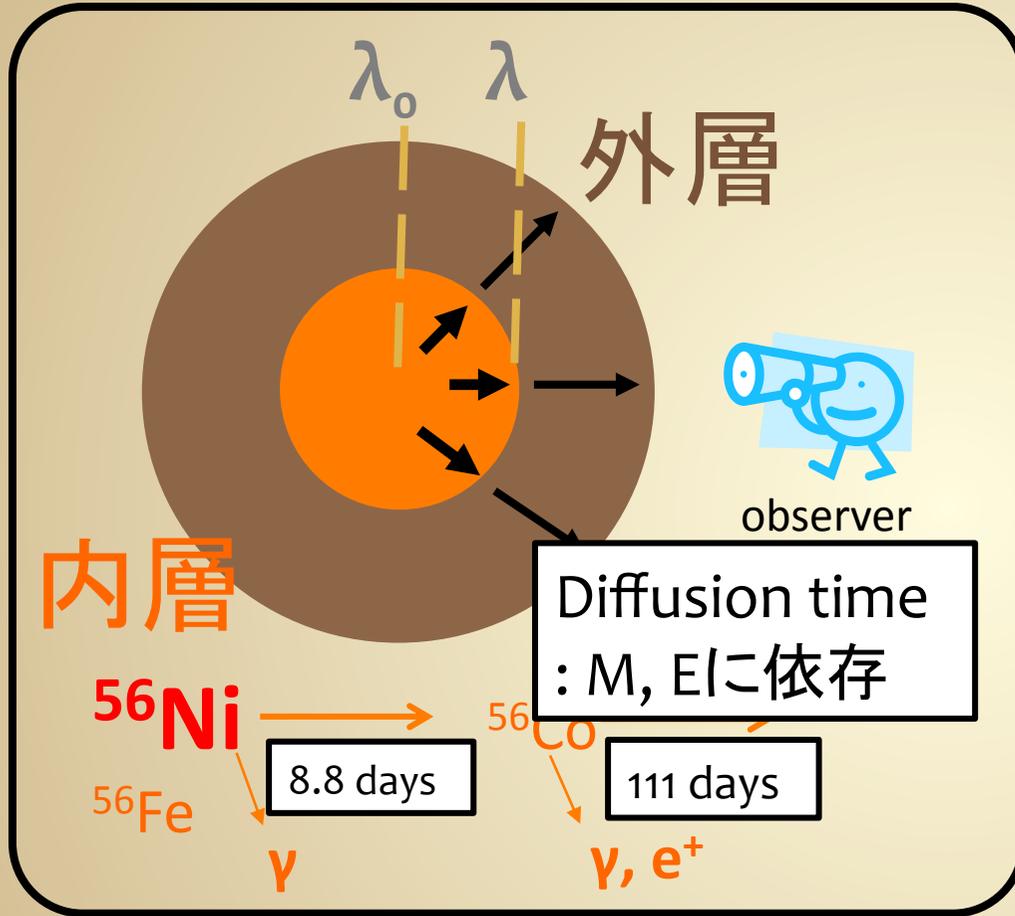
SN 2009dcを可視近赤外で観測  
**3例目のsuper-Chandrasekhar  
超新星**

過去2例より良い精度の観測で  
その正体について制限を与えた。

# 発表の流れ

1. Ia型超新星について
2. 望遠鏡と可視観測
3. 早期観測結果(Yamanaka et al. 2009)
4. 後期観測結果(Yamanaka et al. in prep)
5. Conclusion

# 超新星の可視観測からわかること

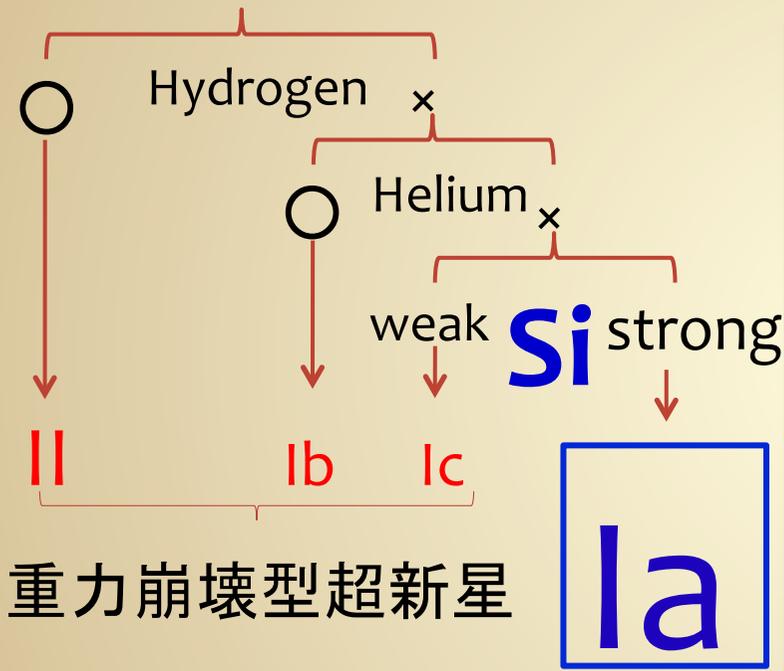


内部のエジェクタとガンマ線が噴出物質と相互作用⇒熱化、**可視域**に放射ピークが来る黒体放射

←→ 光度曲線

# 超新星の観測的特徴と分類

吸収線

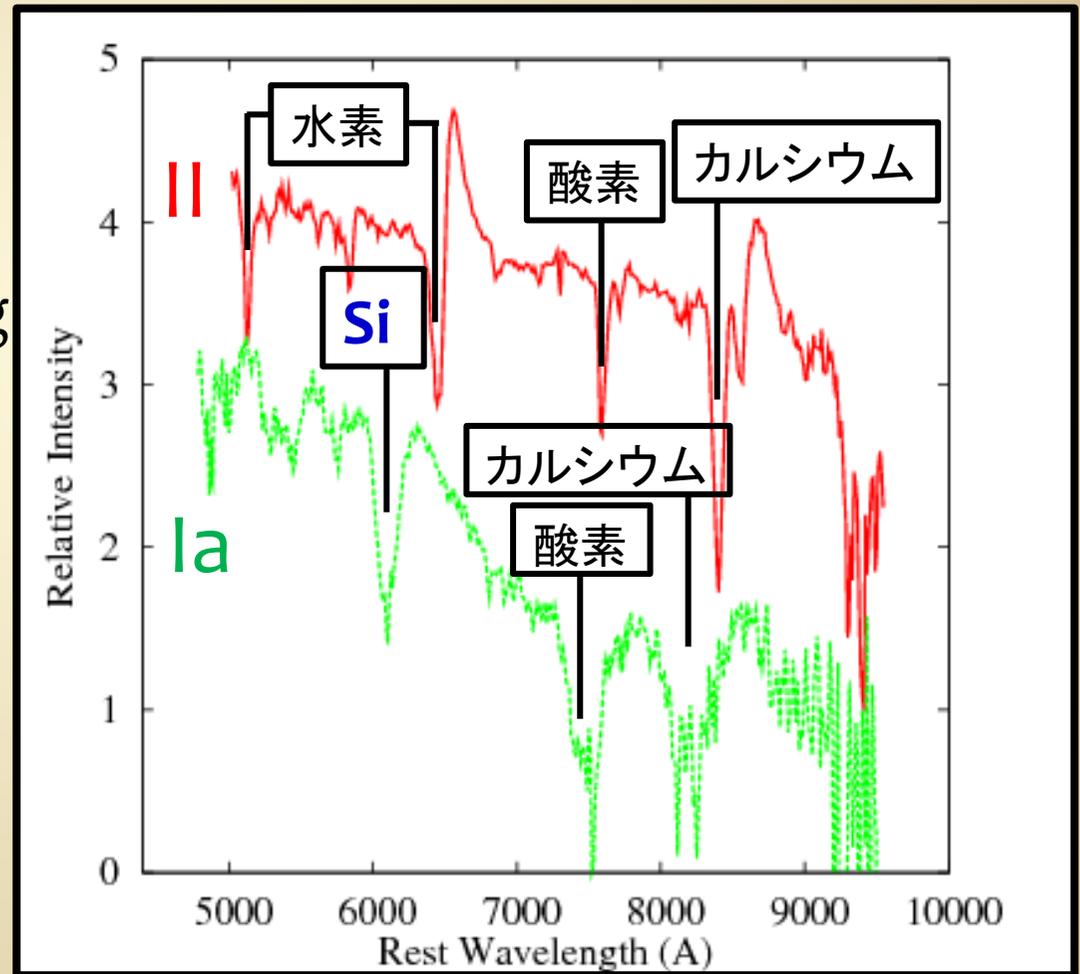


重力崩壊型超新星

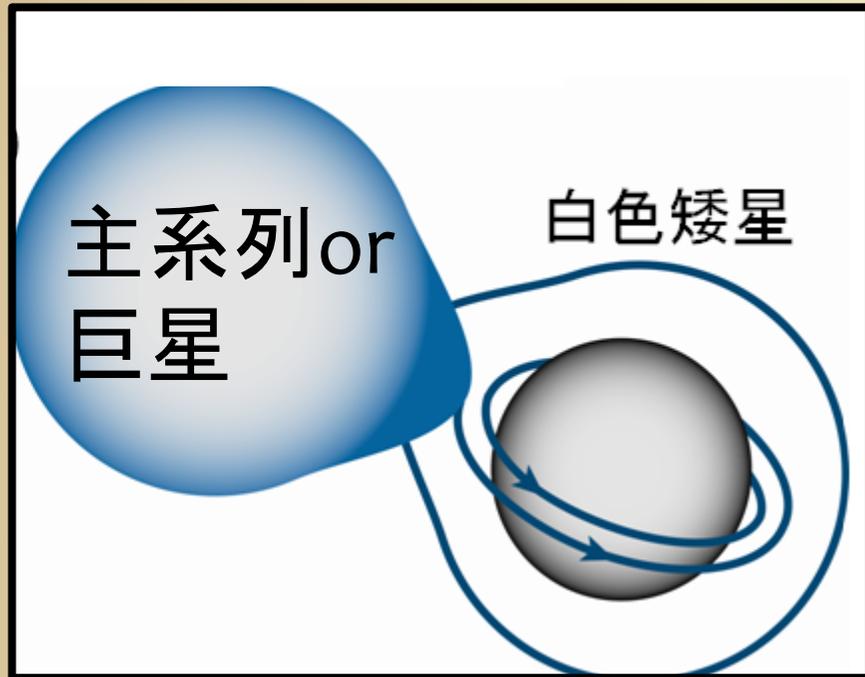
Ia

低質量連星系を成す白色矮星の熱核暴走反応爆発

かなた望遠鏡で取得したスペクトル



# 白色矮星とChandrasekhar限界質量



**白色矮星** (C, Oで形成)  
progenitor候補天体:  
U Sco, RS Ophなど回帰新星?

**未解決問題**

伴星からの降着で  
白色矮星の質量は増加

**Chandrasekhar限界質量**  
~1.4 $M_{\odot}$  (回転なしの白色矮星)

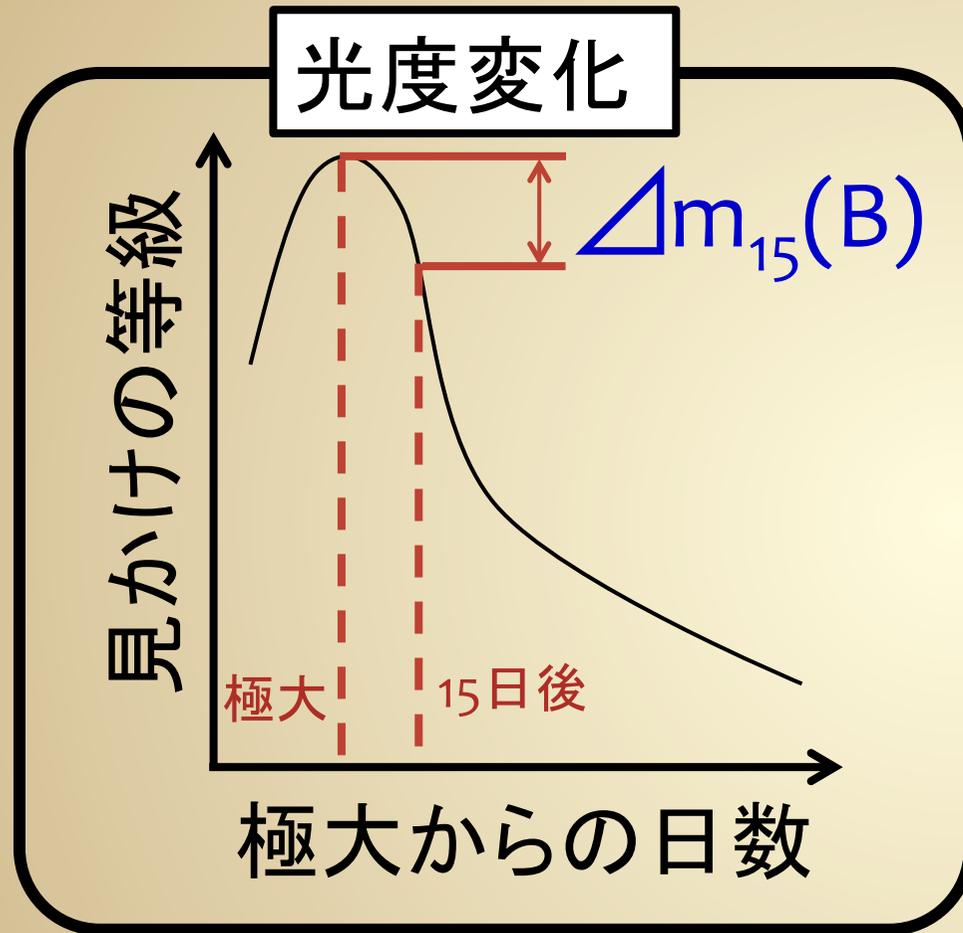
$M_{\odot}$ : 太陽質量



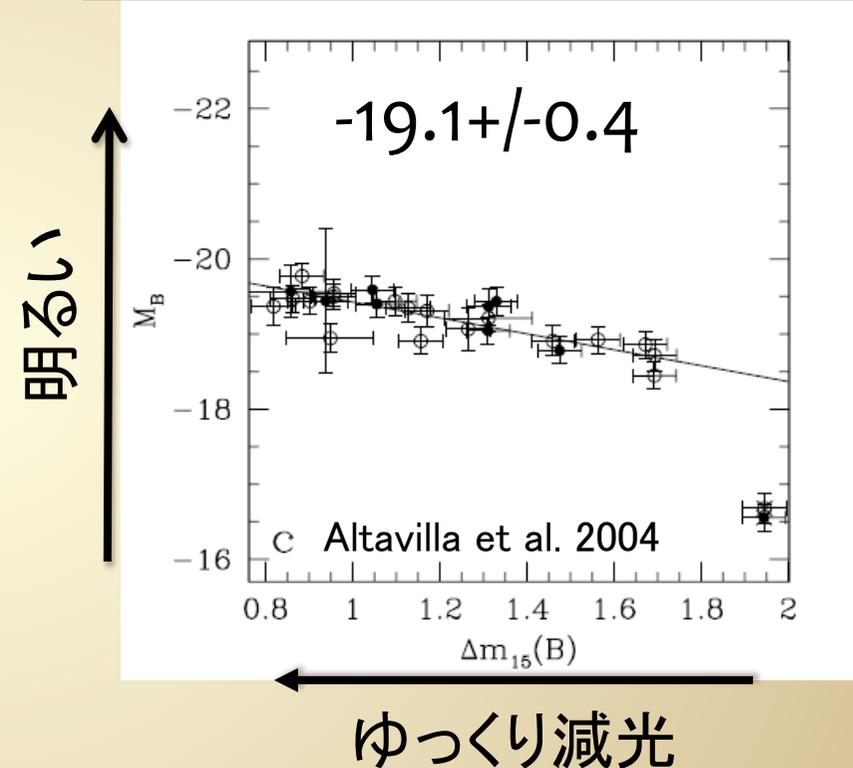
この限界に近づくと白色矮星中心で炭素に点火、熱核暴走反応を引き起こす。

⇒ **Ia型超新星爆発**

# 極大光度と減光率の相関関係



明るさと  $\Delta m_{15}(B)$  の相関関係



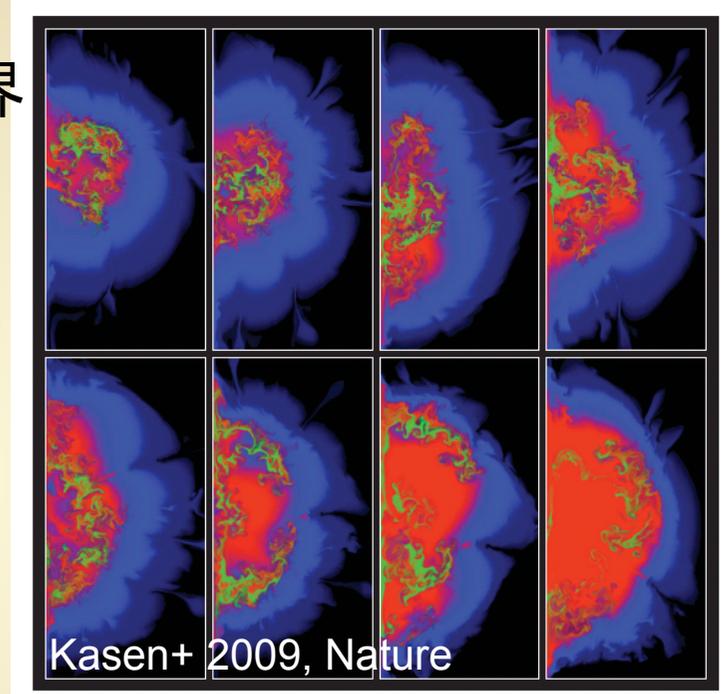
$\Delta m_{15}(B)$ : 減光率  
極大等級と15日後の等級の差  
**明るさと極めて良い相関**

光度変化のみで距離の推定が可能  
⇒ 宇宙論的な距離の決定  
⇒ ダークエネルギーの存在を示唆。

# 爆発メカニズムと観測再現性



外層が臨界密度  
(計算ではパラメータ)



**爆燃波** : 亜音速で燃焼伝播

**遅延爆轟波** : 衝撃波により超音速の燃焼波

- ✓ 暗い光度を予言
- ✓ 全体的に **mixing**

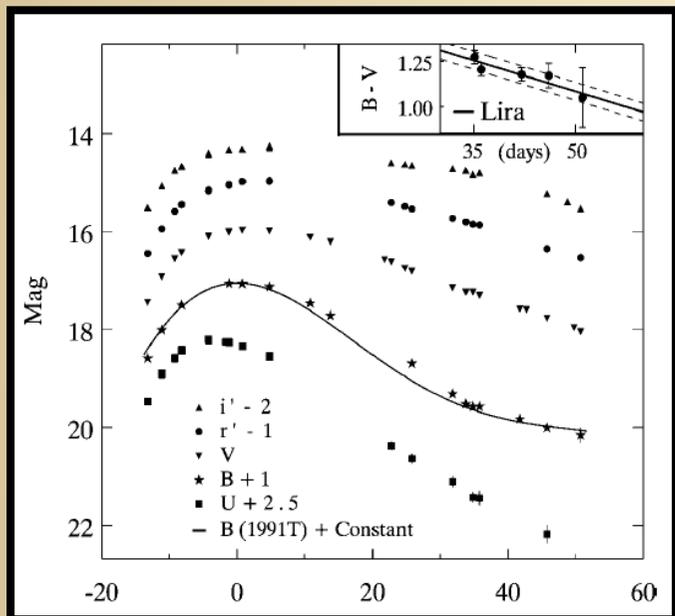
- ✓ 熱源の  **$^{56}\text{Ni}$**  を大量生成
- ✓ **層状** 構造をつくる

# Super-Chandrasekhar SNe candidates

## SN 2003 fg and SN 2006gz

SN 2006gz

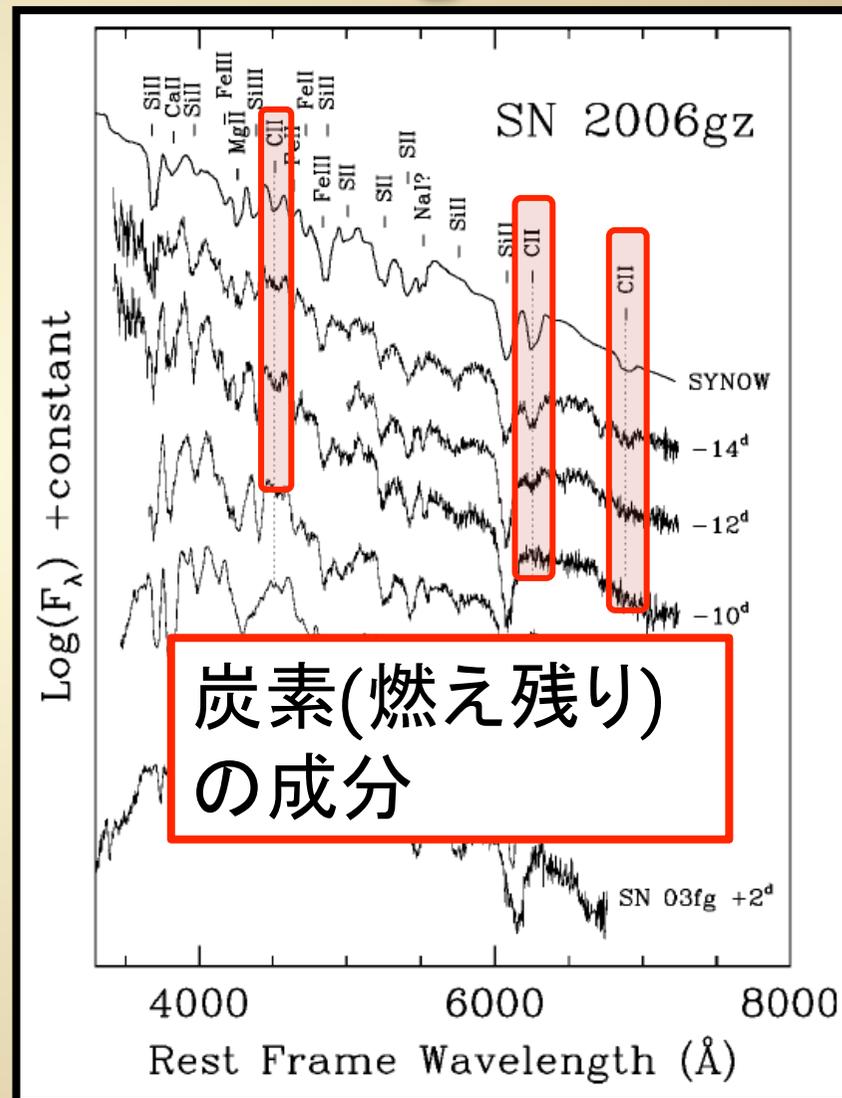
Hicken et al. 2007



$M_{\odot}$ : 太陽質量

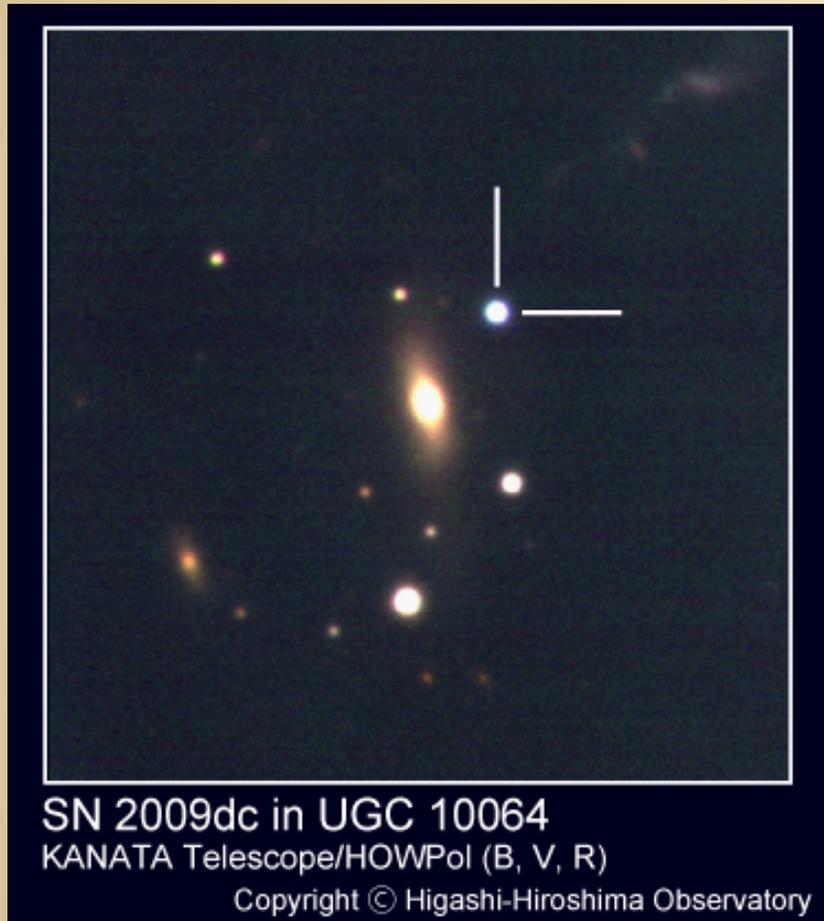
絶対光度明るい :  $^{56}\text{Ni}$  1.2  $M_{\odot}$   
遅い減光、スペクトルに炭素

総噴出質量 > 1.4  $M_{\odot}$



炭素(燃え残り)  
の成分

# SuperNova 2009dc



4月9.31日(UT)、距離 89.3Mpc

**近傍銀河** UGC 10064にて発見。  
16.5等 (CBET 1762)

4月16日分光観測：

**Ia型特有のスペクトル**を示した。

**CIIの吸収**

⇒ **極めて明るい SN 2006gz**に  
よく似ている (CBET 1768)。

**Super-Chandrasekhar SNe**

なら3例目の発見!?

過去2例に比べて**近い**距離の銀河で発生  
⇒ **S/Nの良いデータ**を得られることが期待

# 観測戦略

初期 (爆発後～100日)

1.5m かなた望遠鏡 + HOWPol

(柔軟性機動力・高：時間的に密)

+1.5ぐんま天文台、OAO 1.88m反射望遠鏡、  
OAO 0.5m-MITSuME望遠鏡、鹿児島大学1m望遠鏡



1.5m かなた望遠鏡

後期 (爆発後1年後)

8.2m すばる望遠鏡 + FOCAS

(公募観測、一夜限り、集光力大)



8.2m すばる望遠鏡

大規模かつ多角的な観測により  
SN 2009dcの観測を行う。

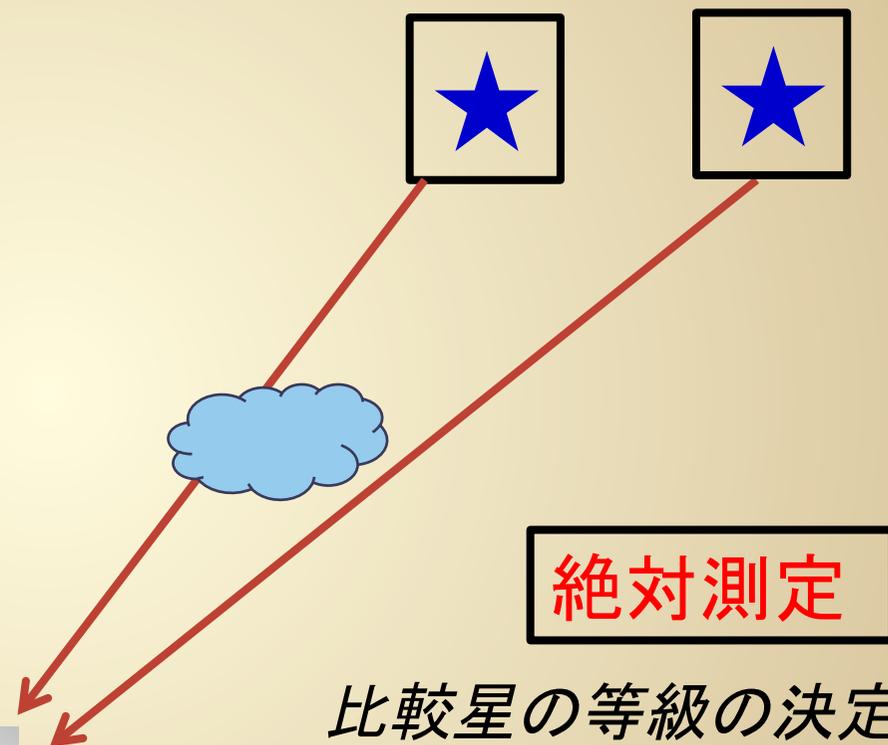
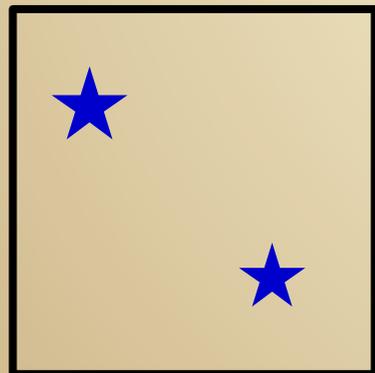
# 可視観測における測光

## 相対測光の強み

比較星の等級差

天空上の狭い領域を同時に撮像  
⇒気候条件をキャンセルできる。  
⇒非常に精度が良い

15' x 15'



## 絶対測定

比較星の等級の決定

全く方向の違う領域を撮る  
⇒天候に左右される  
⇒月一程度の晴天を狙う

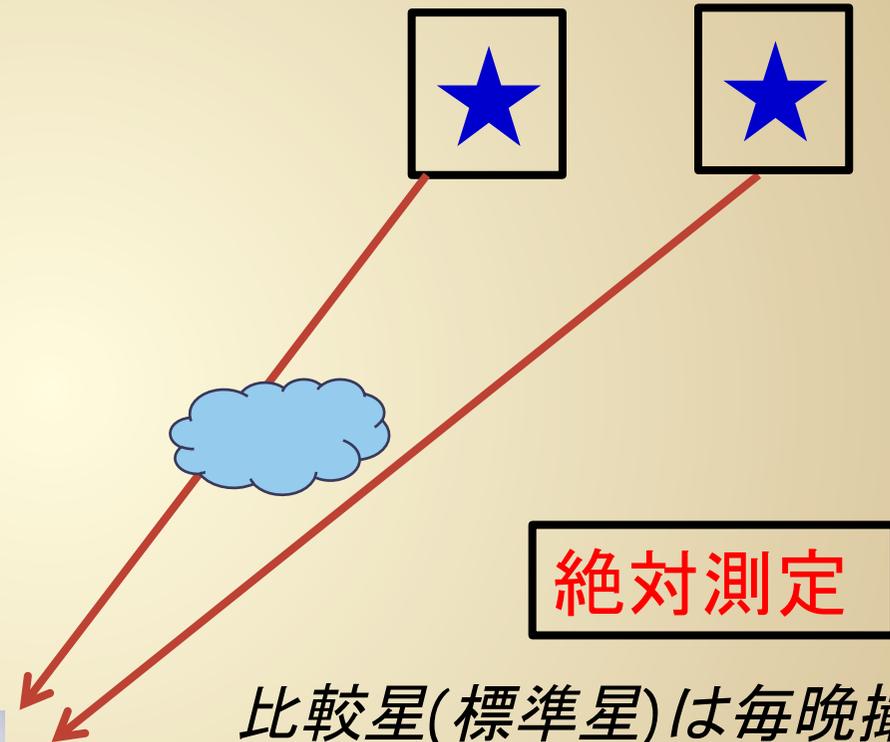
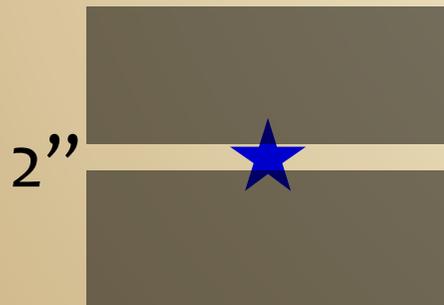
# 可視観測における分光

相対値は精度よし

ラインの強度比、プロファイル

ただし、スリット分光では一露出につき一天体の分光

望遠鏡の追尾によっては天体がスリットから逃げることも



絶対測定

比較星(標準星)は毎晩撮る  
強度比補正には有効  
絶対値補正は厳しい。

# 早期観測の目的

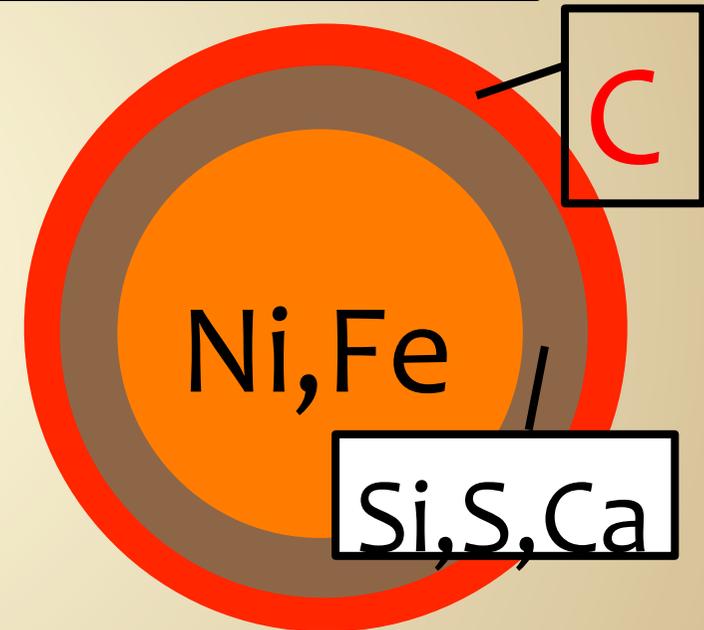
本当に極めて明るいIa型超新星爆発はsuper-Chandrasekhar 超新星と言えるのか？

測光

$^{56}\text{Ni}$  massを求める。  
基本モデル：Mej

分光

炭素の吸収線が  
見られた期間への制限

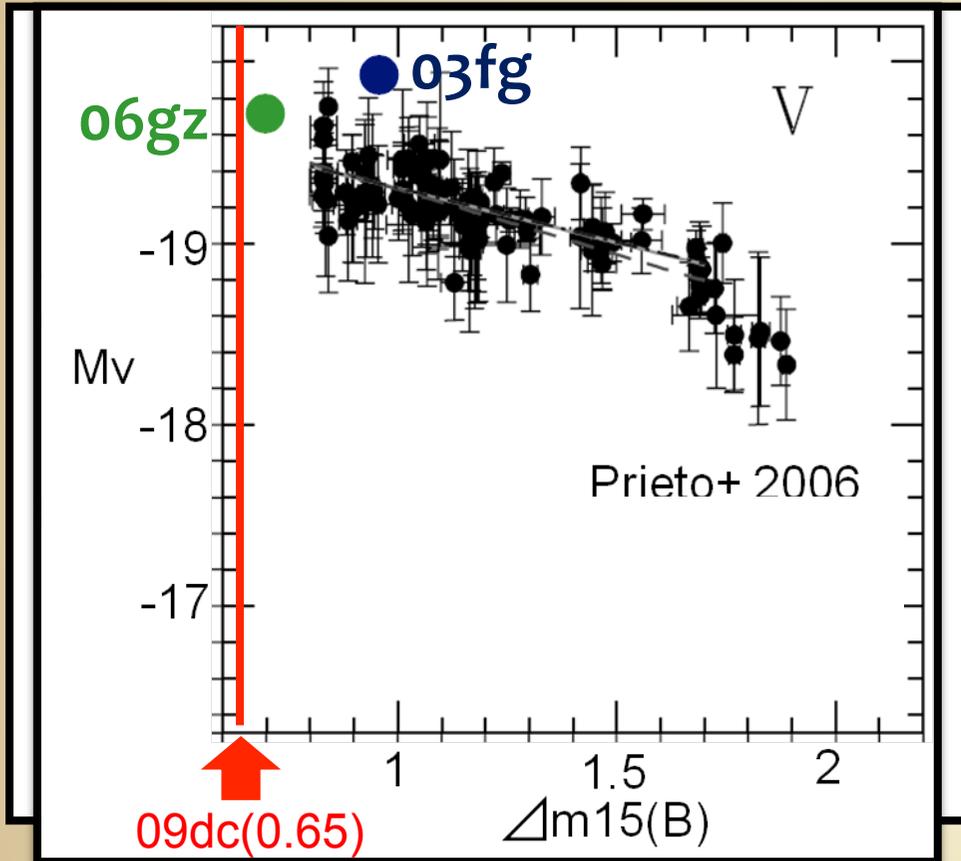


Super-Chandrasekhar SNe の特徴を明らかにし、  
その爆発する描像を再現する。

# 早期觀測結果

Yamanaka et al. 2009, ApJL,

# 可視光の光度曲線



$\Delta m_{15}(B)$ : 極大等級と極大後15日後の等級差

非常に遅い減光を示す。

超新星	$\Delta m_{15}(B)$
SN 2009dc	0.65+/-0.03
SN 2006gz	0.69+/-0.05
sN 2005cf	1.05

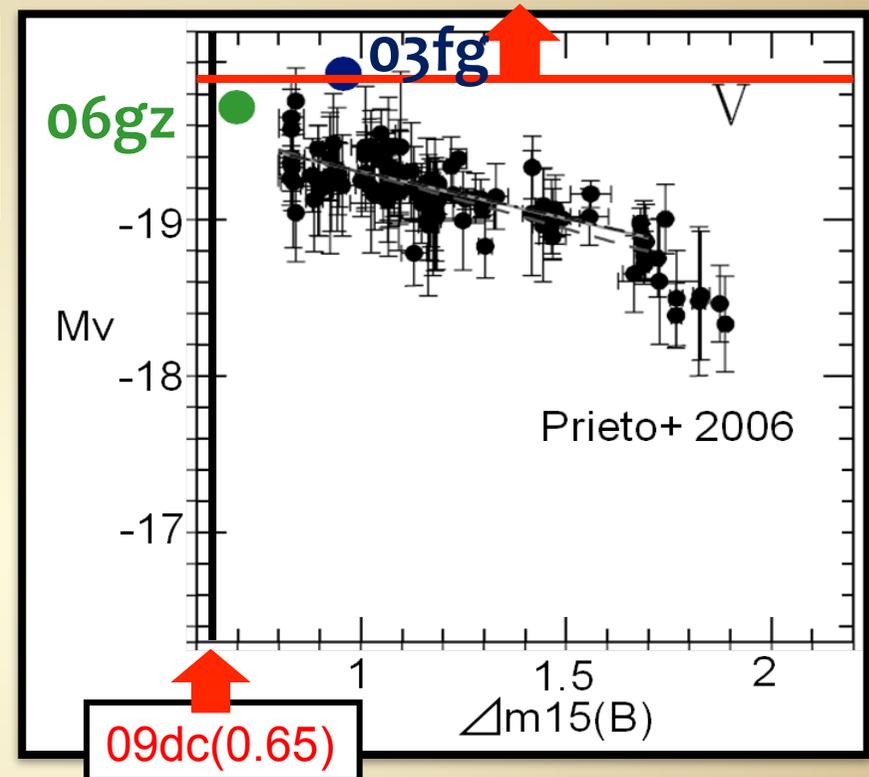
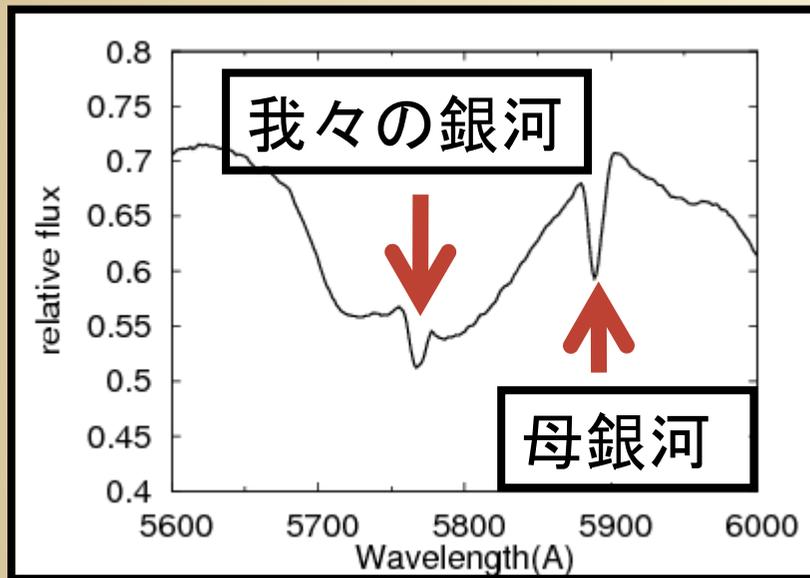


減光率は明るさの指標

⇒ SN 2009dcは本質的に極めて明るいことが期待

# 絶対等級(明るさ)

星間物質による吸収量を補正  
⇒ 真の明るさを見積もる

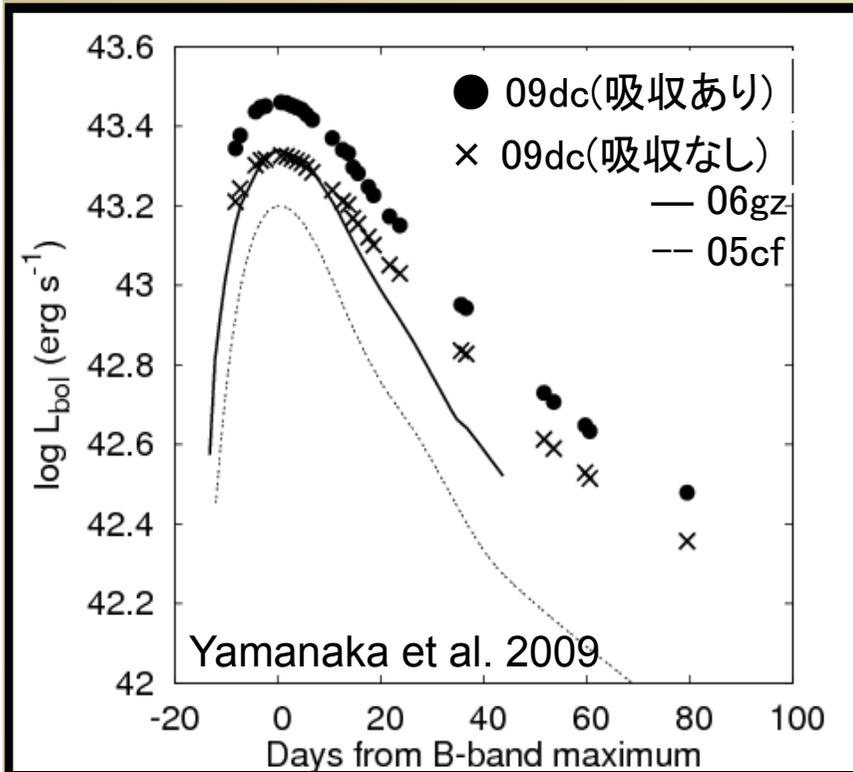


06gz :  $M_v = -19.90 \pm 0.21$

吸収	極大等級
無し	$-19.90 \pm 0.05$
有り	$-20.32 \pm 0.19$

銀河の吸収を無視しても  
SN 2009dcは**史上最も明る**  
**いIa型超新星の一つ**である。

# 総輻射光度と $^{56}\text{Ni}$ mass



**仮定**: 可視光域が総輻射の60%.

(c.f. Stritzinger et al. 2006)

爆発後から極大光度への到達時間:

**23日** (Silverman et al. 2010)

$$L_{\max} = \left( 6.45 e^{\frac{-t}{8.8\text{d}}} + 1.45 e^{\frac{-t}{111.3\text{d}}} \right) \left( \frac{M_{\text{Ni}}}{M_{\odot}} \right) \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}.$$

光度の起源は  $^{56}\text{Ni}$  decay にもなうガンマ線のdeposition

吸収を無視:  $1.3 \pm 0.3 M_{\odot}$  の $^{56}\text{Ni}$ を生成

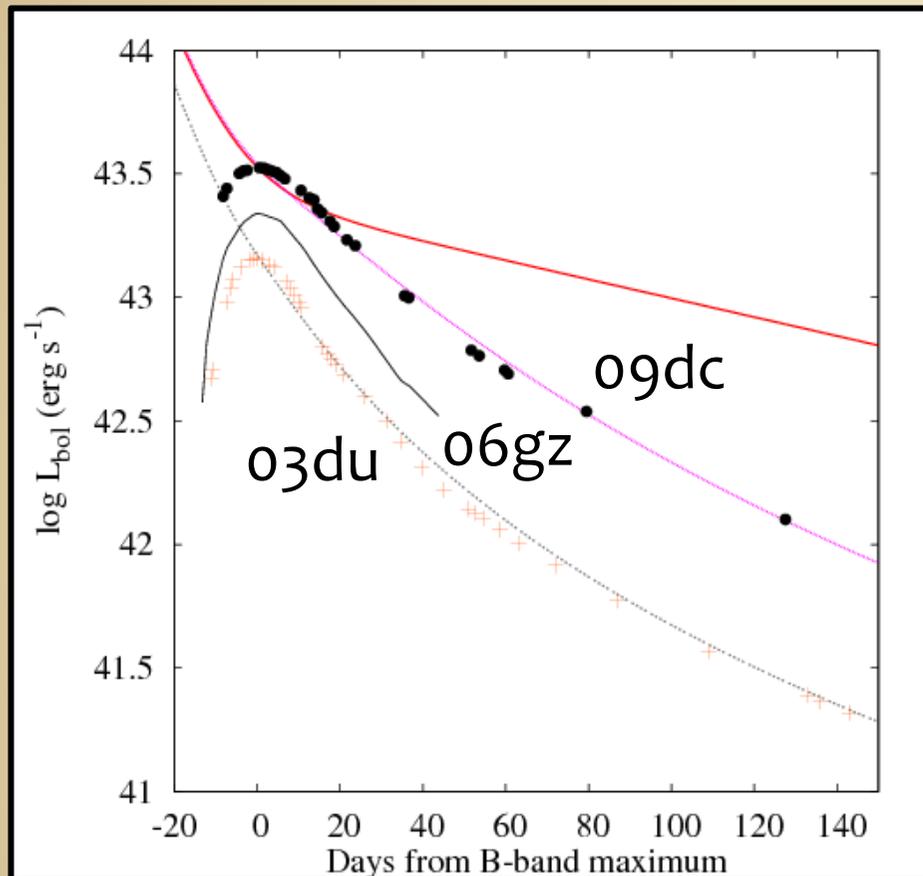
$M_{\odot}$ : 太陽質量

吸収を仮定:  $2.0 \pm 0.5 M_{\odot}$  の $^{56}\text{Ni}$  c.f. 典型的なSN 2005cf:  $0.8 M_{\odot}$

(白色矮星のChandrasekhar限界質量:  $1.4 M_{\odot}$ )

**史上最も多くの $^{56}\text{Ni}$ を作ったIa型超新星**

# 本当に $^{56}\text{Ni}$ 起源か？標準モデルでfitting



## 光度変化を再現

標準モデル ; Arnett (1982)

$$L(t) = M_{56\text{Ni}} \times (S_{56\text{Ni}}(t) + S_{56\text{Co}}(t)) \cdot (1 - e^{-\tau} + 0.035 \times f_p)$$

$$S_{56\text{Ni}} = 3.90 \times 10^{10} e^{-t/t_{56\text{Ni}}}$$

$$S_{56\text{Co}} = 7.01 \times 10^{10} \left( e^{-\frac{t}{t_{56\text{Ni}}}} - e^{-t/t_{56\text{Co}}} \right)$$

$$\tau = 1000 \times \left( M_{\text{ej}}/M_{\odot} \right) E_{51}^{-1} t^{-2}$$

Decay time  $^{56}\text{Ni}$  8.8 day  $^{56}\text{Co}$  113.5 day

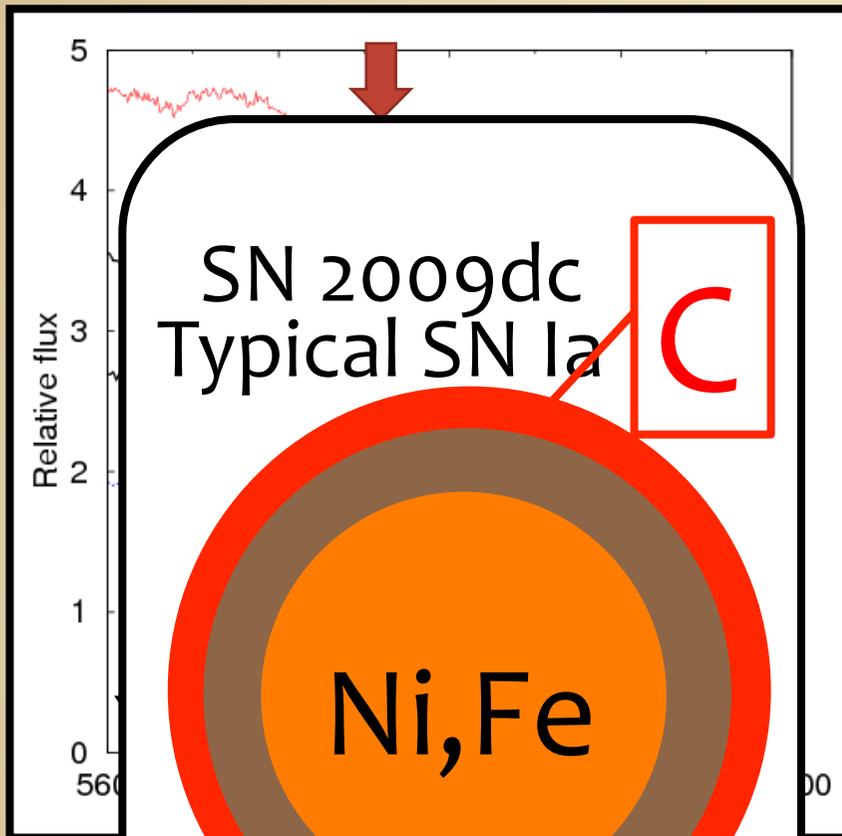
観測に合うように  $M_{\text{ej}}$  と  $E_K$  の組み合わせを探索する。ただし  $M_{\text{ej}} > M_{\text{Ni}}$

SN 2003du でテスト ( $M_{\text{Ni}} = 0.7M_{\odot}$ 、 $M_{\text{ej}} = 1.4M_{\odot}$ 、 $E_K = 1.3E_{51}$  erg)

SN 2009dc ( $M_{\text{Ni}} = 2.0M_{\odot}$ 、 $M_{\text{ej}} = 2.4M_{\odot}$ 、 $E_K = 1.9E_{51}$  erg)

初期の光度は $^{56}\text{Ni}$  decayで説明可能

# スペクトル：炭素の吸収線



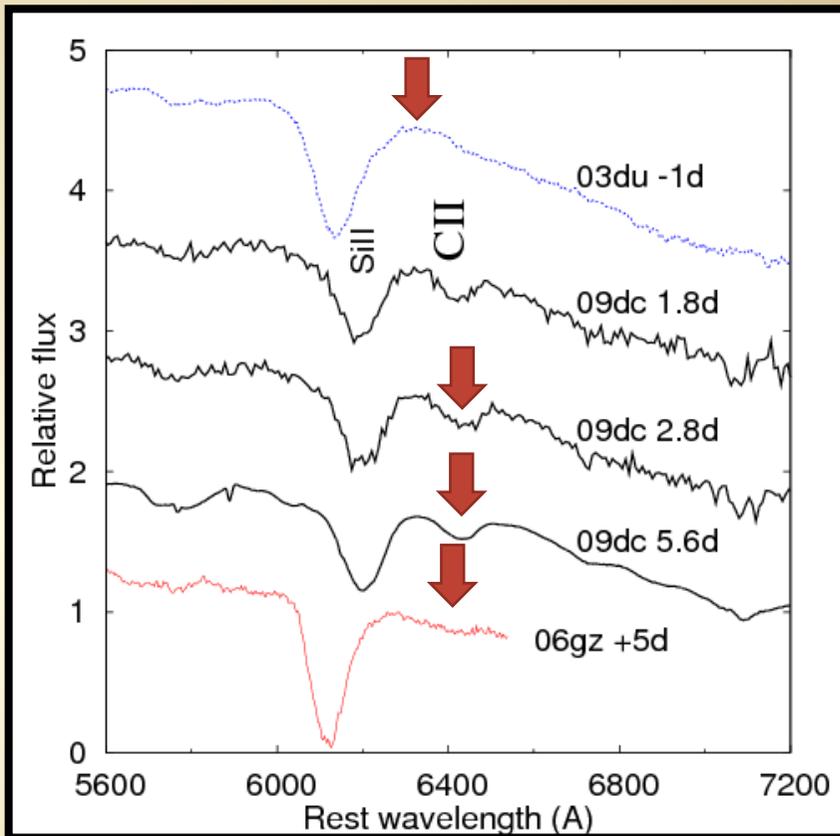
SN 2009dc  
Typical SN Ia

C

Ni, Fe

Si, S, Ca

SN 2003du (typical)



炭素の吸収線

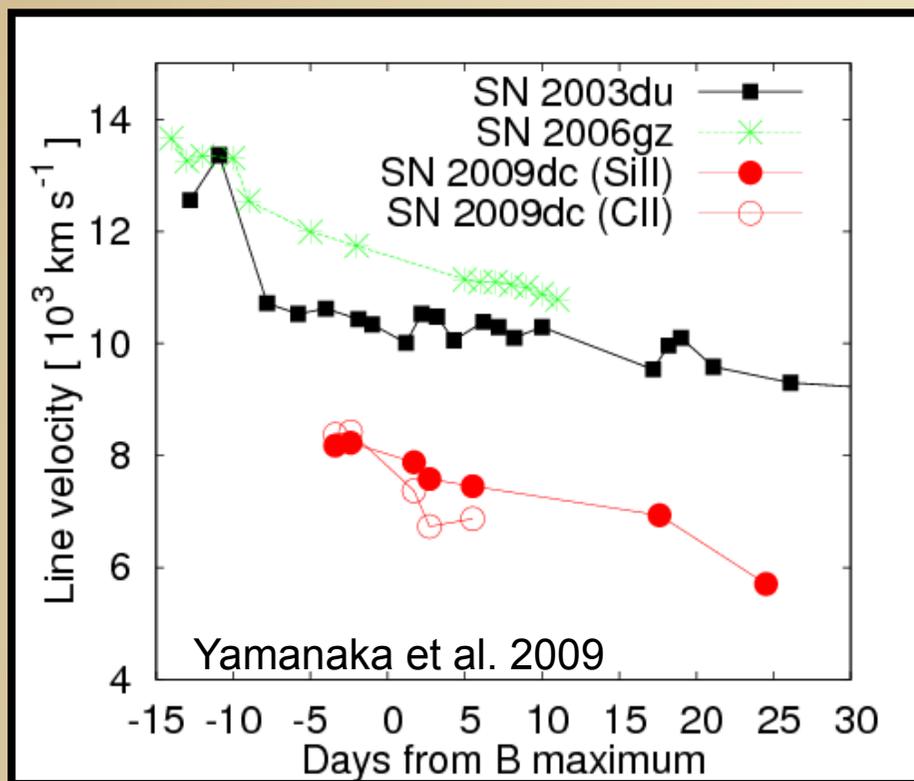
5日後まで

11日前まで

見られない。

炭素が長期間見られた  
⇒非常に厚い炭素層  
炭素：白色矮星起源物質  
⇒非常に重い白色矮星質量を示唆

# Line velocity : 明らかに遅い



06gz : SiII 12000km/s  
09dc : SiII,CII 8000km/s  
(典型的な SN Ia : 10000km/s)

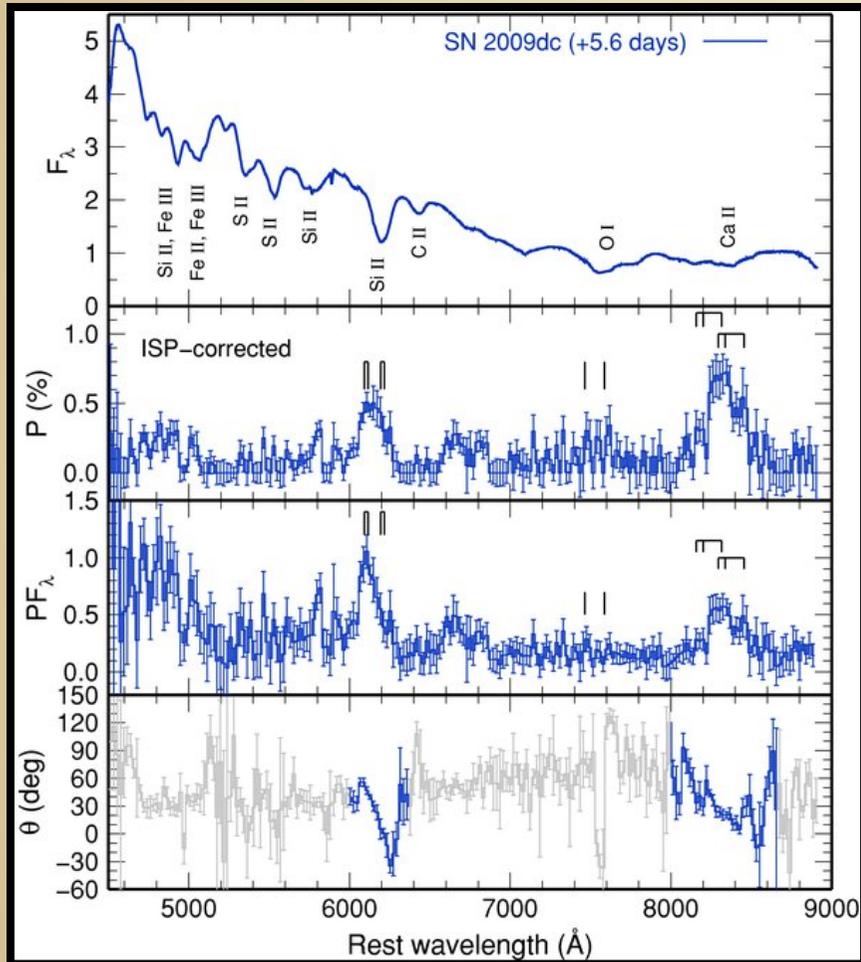


もう一つの極めて明るい  
06gzに比べて、明らかに  
09dcは遅い。

$$E_K = (1/2) \times (M_{ej}) \times (Vel)^2 = (1/2) \times (2.4M_{\odot}) \times (8,000 \times 10^5)^2 \\ = 1.5 \times 10^{51} \text{ erg} \quad (\text{c.f. 標準モデルで求めた } 1.9 \times 10^{51} \text{ erg})$$

さらに、遅い膨張速度はより大きな束縛Eを  
示唆⇒より大きな質量とconsistent

# 偏光分光観測 (Tanaka et al. 2010)



Tanaka, Kawabata, Yamanaka et al. 2010

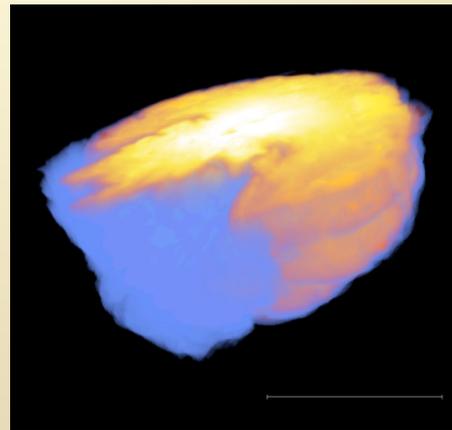
連続光: 熱源である光球

吸収: 外層での吸収物質

連続光で弱い偏光度

( $P < 0.3\%$ )

⇒ 球対称噴出物質を示唆

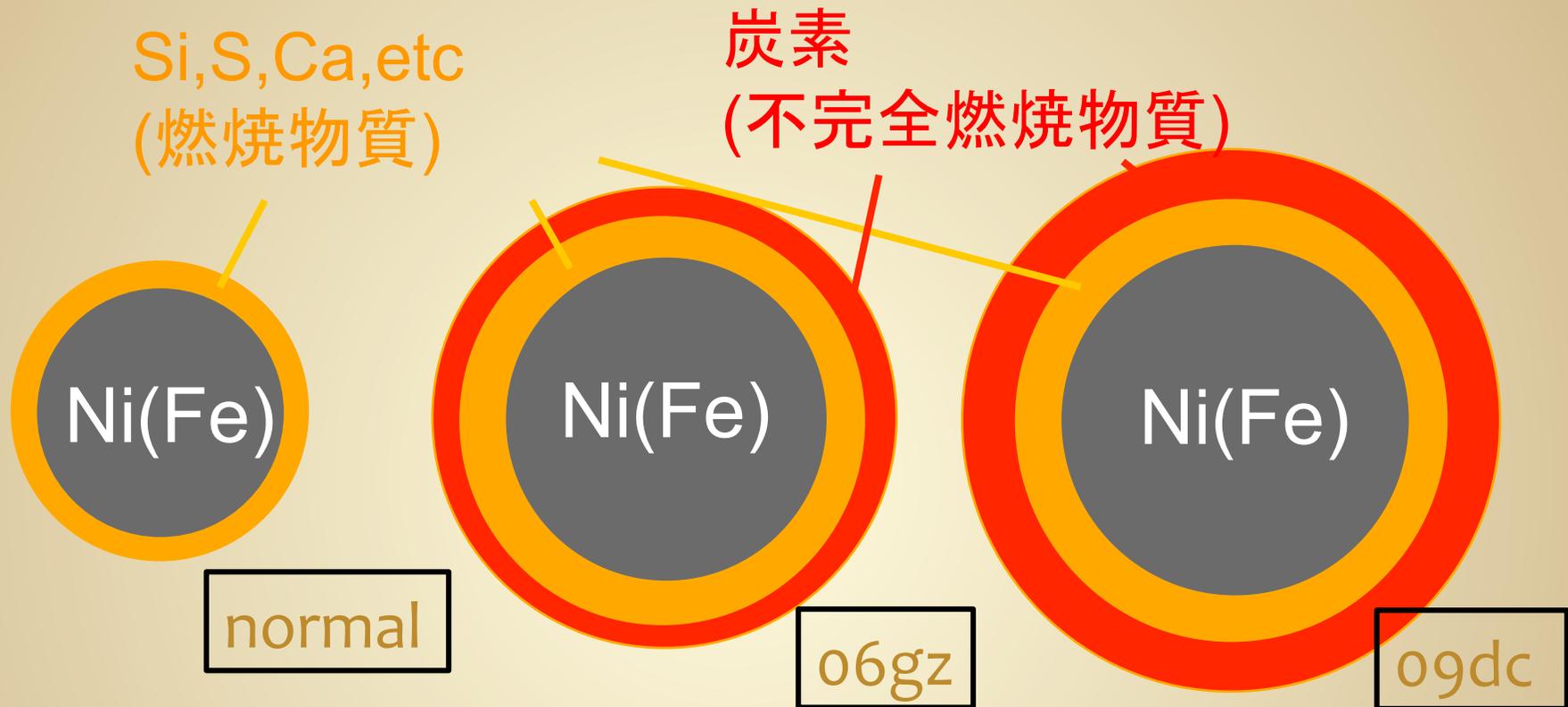


ゆがんだ爆発モデル  
(理論流体モデル)  
 $0.9M_{\odot}$ で $-19.9\text{mag}$ の  
明るいIa型超新星爆発:  
再現可能

弱い偏光度は非  
対称爆発を棄却

Hillebrandt et al. 2007

# 膨張大気の構造



極めて明るい光度、ゆるやかな光度曲線: 豊富な<sup>56</sup>Ni(Fe)層を支持

偏光分光: 弱い偏光度: ほぼ球対称のエジェクタ

極大5日後までの炭素の吸収: 豊富なCO層

⇒元の白色矮星は非常に大きな質量 (c.f.  $2.4M_{\odot}$  in 標準モデル)

⇒SN 2009dcは**Super-Chandrasekhar SN**である。<sup>23</sup>

# 早期観測の結論

- (1) 最もゆるやかな光度曲線を示すIa型超新星の一つ  
( $\Delta m_{15(B)} = 0.65 \pm 0.03$ )
- (2) 最も明るいIa型超新星の一つ  
⇒ 最も多くの $^{56}\text{Ni}$  massを生成したIa型超新星の一つ  
( $> 1.3M_{\odot}$ . もし母銀河の吸収を  $A_v = 0.43$ と仮定:  $2.0M_{\odot}$ .)
- (3) 極大の5日後まで炭素が残っていた。  
(厚い炭素層を示唆する。)
- (4) もう一つの明るい06gzに比べても十分に遅い。
- (5) 連続光における弱い偏光度: 非対称モデルを棄却

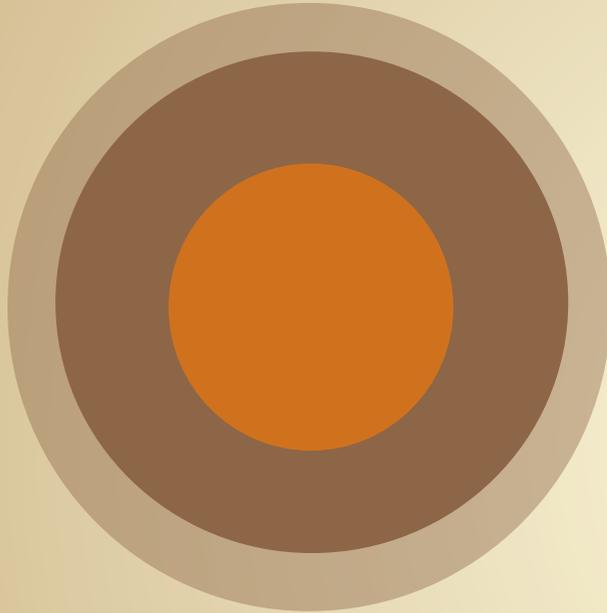


SN 2009dcは3例目のsuper-Chandrasekhar SNである。さらに、過去の2例より強い状況証拠を列挙することができた。

# 後期観測

Yamanaka et al. 2010, in prep

# 後期観測の目的



膨張大気：一年後 薄くなる、  
⇒ エジェクタを見通せる。  
⇒ 輝線が卓越したスペクトル

## 光度曲線

$^{56}\text{Co}$  decay  $\rightarrow$   $^{56}\text{Ni}$  mass

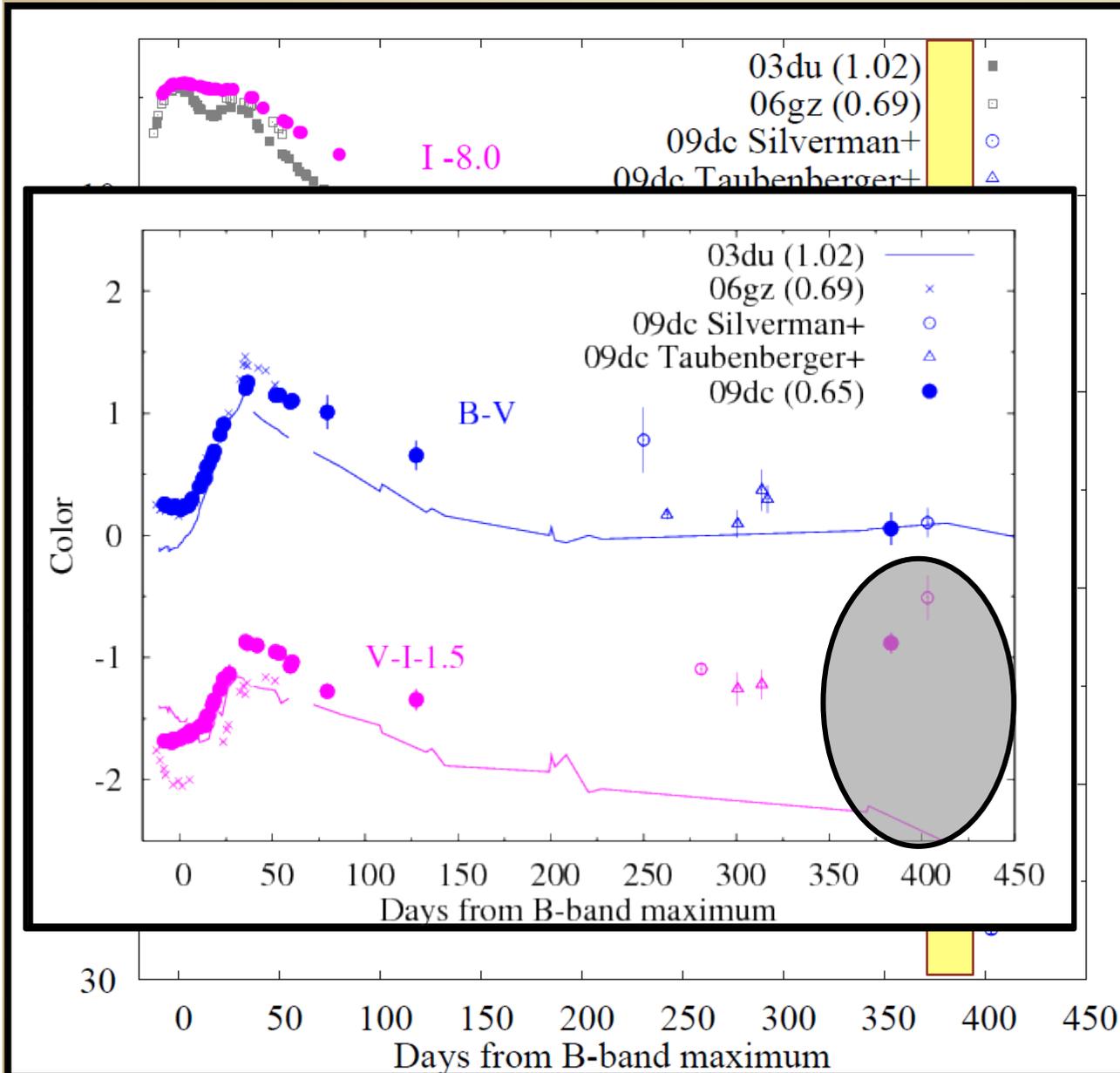
早期と独立に放射源の議論が可

## スペクトル

輝線  $\Rightarrow$  爆発中心が見通せる  
ドップラーシフトから物質分布



# 後期光度曲線

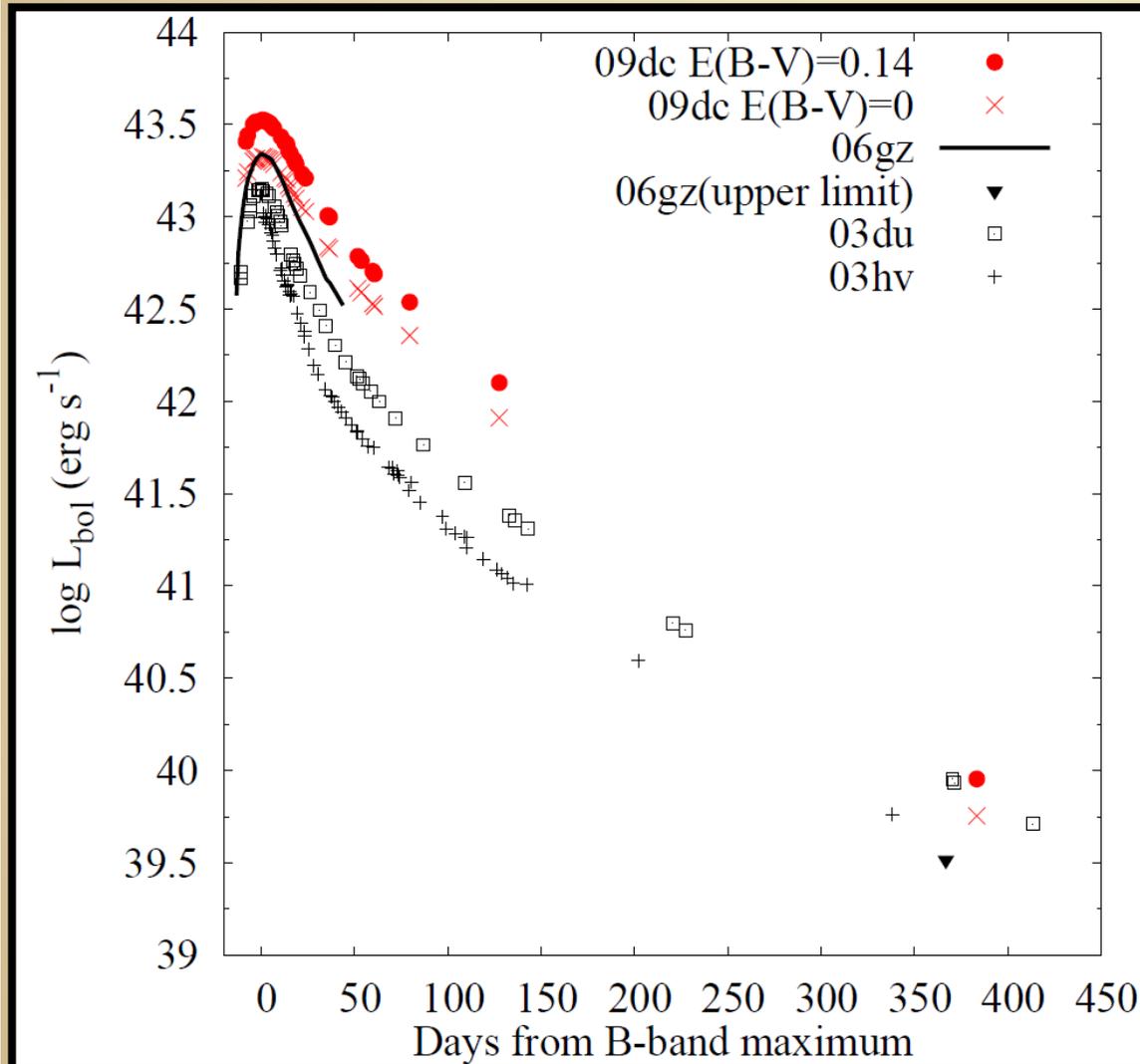


すべてのバンドで  
典型的なIa型超新星  
2003duより  
**速い減光**を示した。

さらに顕著に  
**赤くなった。**

放射波長域が  
**近赤外領域に  
延びた?**

# 後期総輻射光度



SN 2003duとほぼ同じ光度となった。予測されるより明らかに暗い。

## 減光の可能性

### 後期に減光

⇒ dust生成に伴う減光  
(近赤外領域に再放射)  
or 陽電子の完全透過

陽電子透過説では  
合わないことは確か  
めた。

# ダスト(固体微粒子)生成？

初期の光度から予測されるより明らかに**暗い**  
また典型的なSN Iaより**赤くなった**。

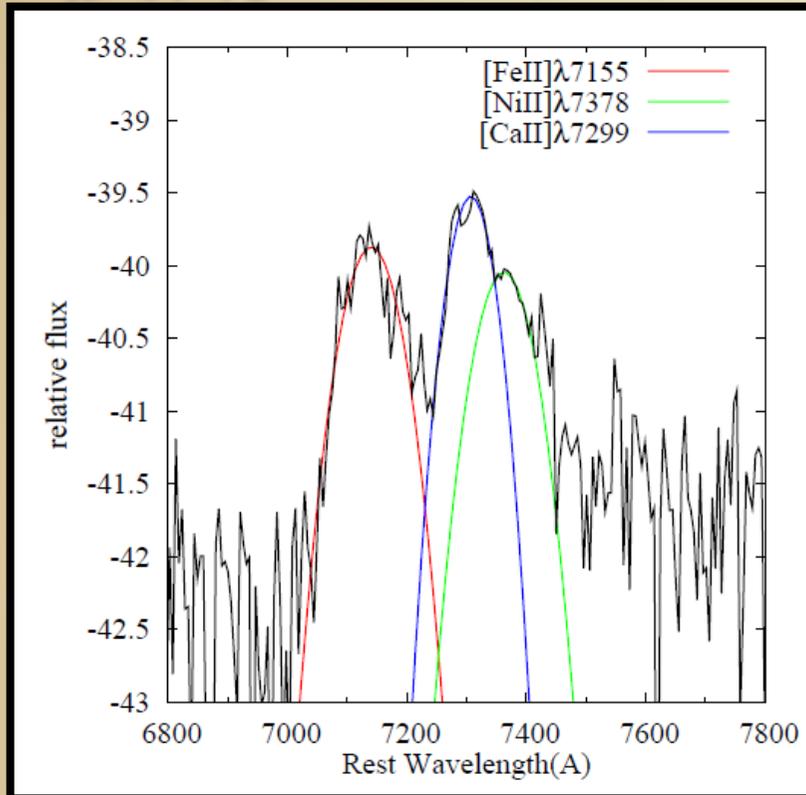
⇒放射波長域が**近赤外波長域へ延びた？**、  
可視光を吸収して**減光**させる＝ダスト？

初期のスペクトルに**強いCarbon**の吸収：

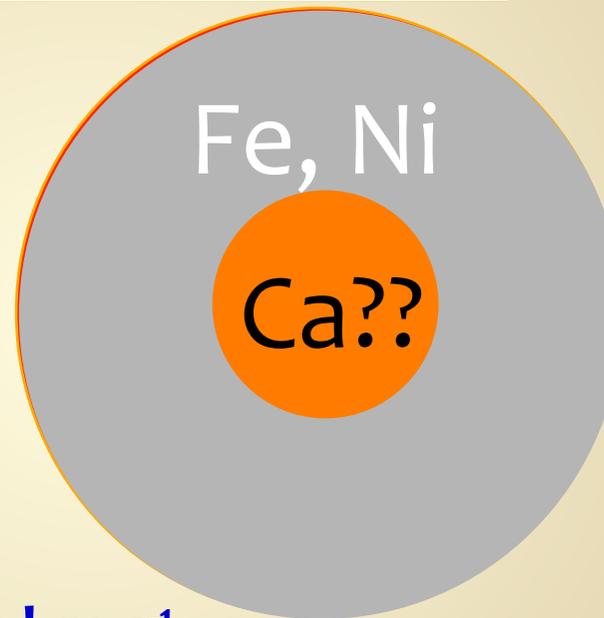
ejecta中に**豊富な炭素**

⇒炭素ダストは宇宙ダストの主成分

# 後期スペクトル：カルシウムの同定



SN 2009dc



内側にカルシウム  
⇒ **強い**  
**mixing**

[Fe II]  $\lambda$  7155、[Ni II]  $\lambda$  7378 :  $-600 \text{ km s}^{-1}$

[Ca II]  $\lambda$  7299  $+300 \text{ km s}^{-1}$

典型的なIa型では見られない

⇒ **CaはむしろFe, Niより内側に分布**

質の悪いSN 2006gzの後期観測データでも可能性が示唆  
⇒ SN 2009dcでは明らかに確認できた

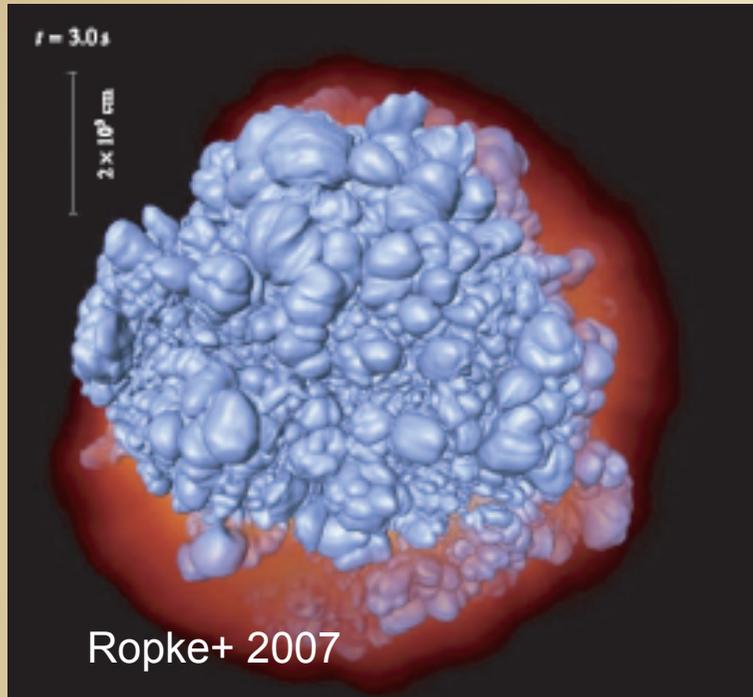
# 後期観測結論

- (1) 初期の明るさから予期されるより**明らかに暗い光度**であることを確かめた。
- (2) 早期スペクトルの炭素、**赤くなった**ことから、後期の減光は**dust生成**によるものかもしれない。
- (3) カルシウムが内部に分布することを確かめた。  
→**強いmixing**を示唆する。



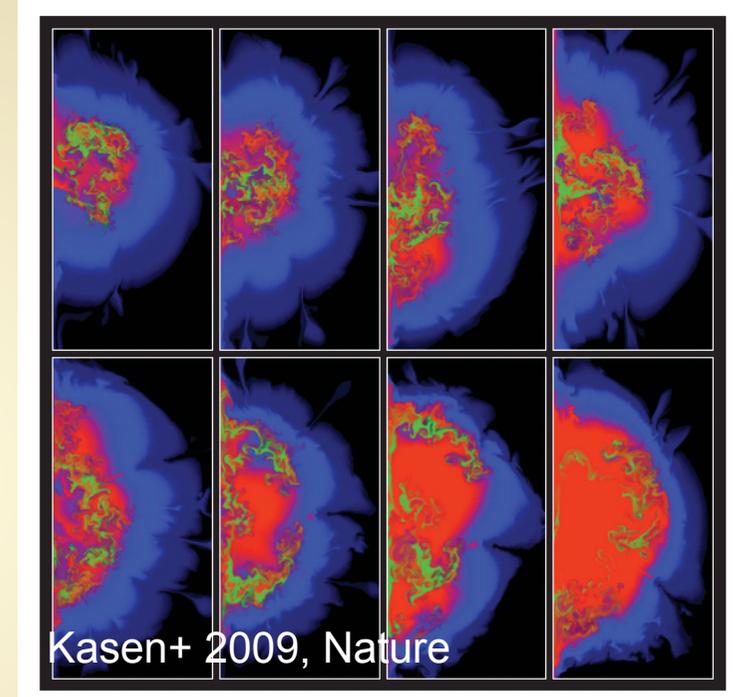
SN 2006gzの観測から示唆された特異性について  
SN 2009dcでは、明確に確認できた。

# Open Question 1. 爆発モデル



爆燃波

- ✓ 暗い光度を予言
- ✓ 全体的にmixing



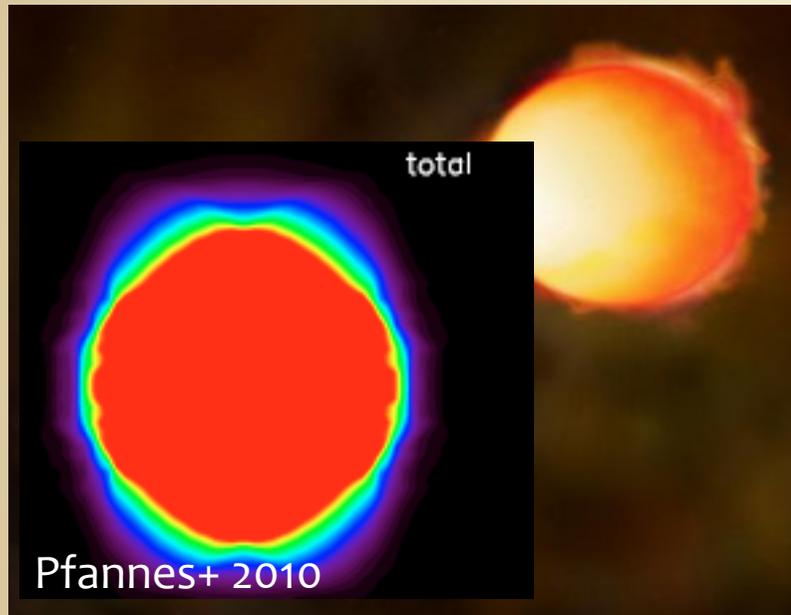
遅延爆轟波

- ✓ 熱源の $^{56}\text{Ni}$ を大量生成
- ✓ 層状構造をつくる

両者の爆発が上手くバランスする？(このような理論モデルは無い。)  
あるいはまったく新しい爆発モデルが必要か。

# Open Question 2. 親星候補

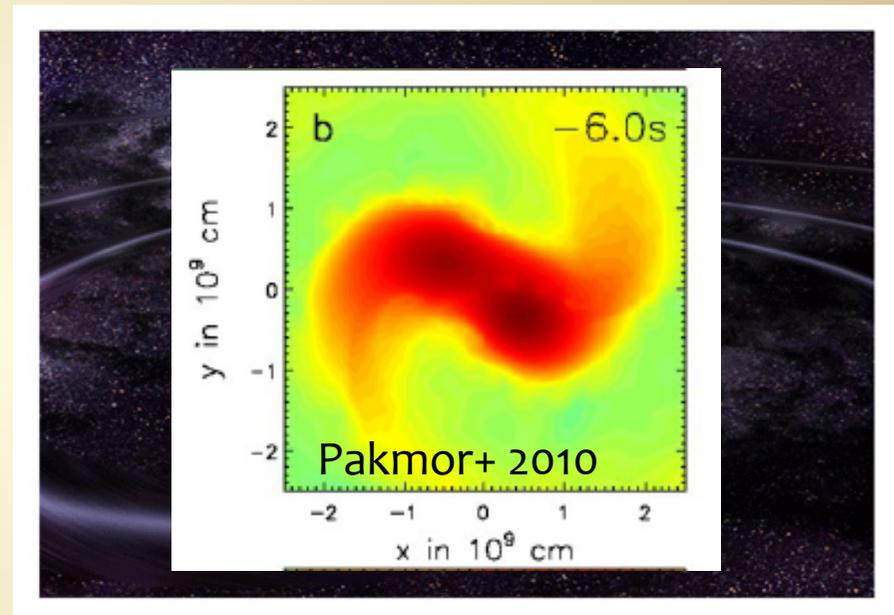
## 高速回転白色矮星



⇒  $^{56}\text{Ni}$  mass  $\sim 1.5M_{\odot}$ 、  
total mass  $\sim 2.1M_{\odot}$

SN 2009dc  
 $^{56}\text{Ni}$  mass  $\sim 2.0M_{\odot}$ ,  $2.4M_{\odot}$

## 白色矮星同士の合体

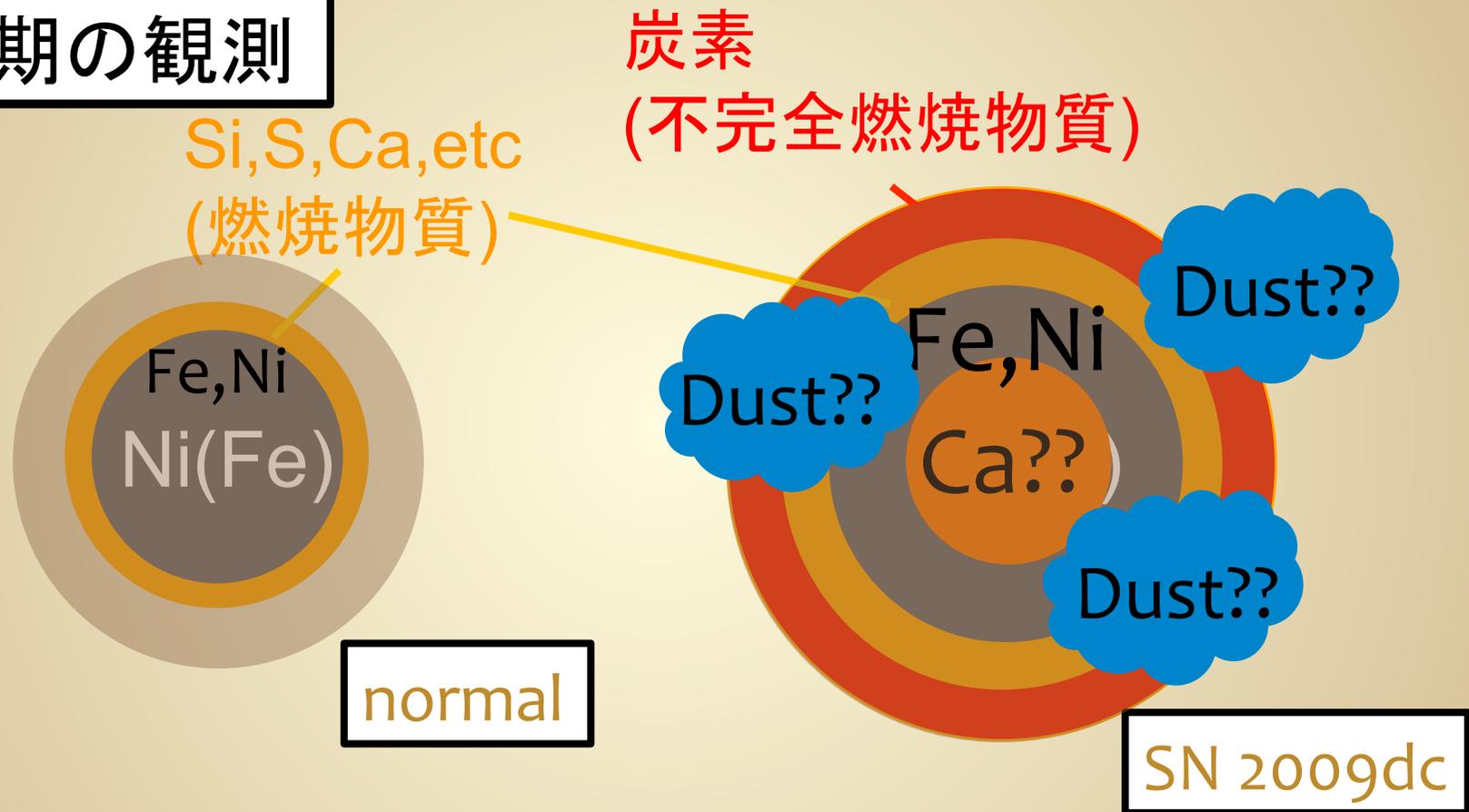


⇒  $^{56}\text{Ni}$  mass  $\sim 0.1M_{\odot}$ 、  
total mass  $\sim 1.9M_{\odot}$

むしろFaint Type SN Iaを  
よく再現する (Pakmor+)

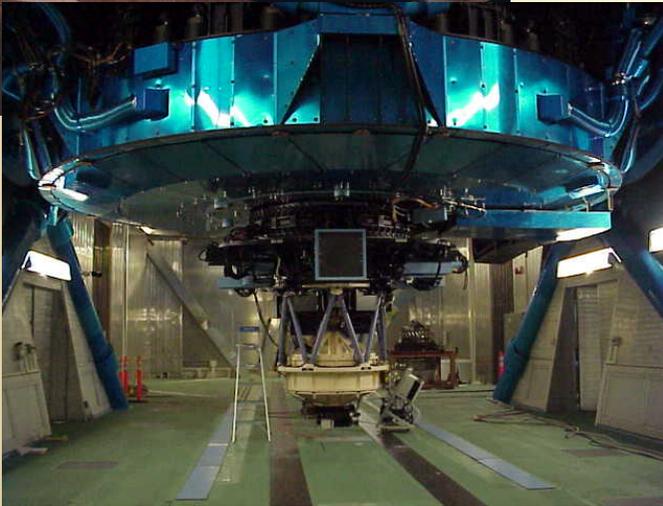
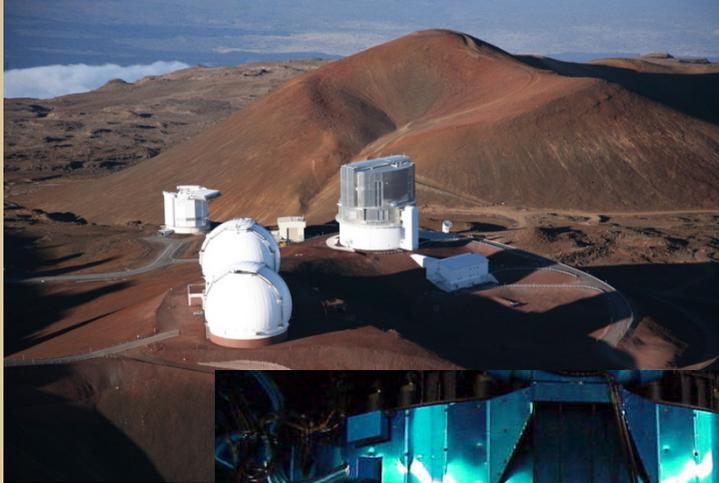
# Summary

## 後期の観測



SN 2009dcは最も大きい質量の親星をもつIa型超新星爆発のモデルでほぼ説明可能である。

# Future work



2011年前半(11A) 4/25 P.I. 山中  
**すばる望遠鏡** 公募観測  
“Exploring the Origin of Extremely  
Luminous Type Ia SN 2009dc”  
(爆発から**2年後**の観測)



ダストの晴れ上がり後の  
**可視光放射**の復帰をターゲット  
(c.f. ダスト新星)として観測

光度復帰が明らかになれば**ダスト生成シナリオ**を支持  
⇒ **Super-Chandrasekhar SN**であることを支持する！

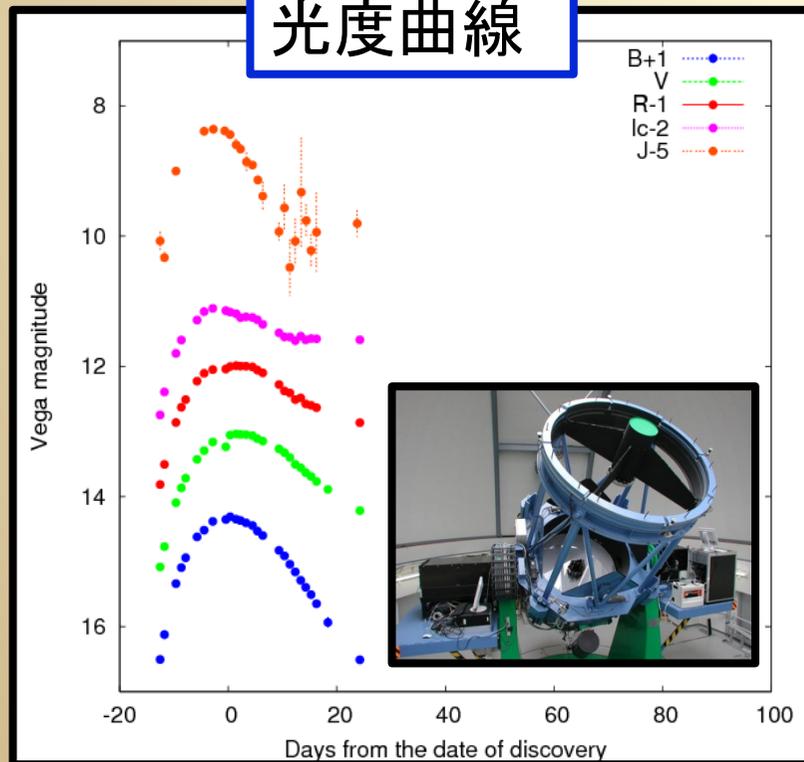


# 今年度 学振DC2 2年目

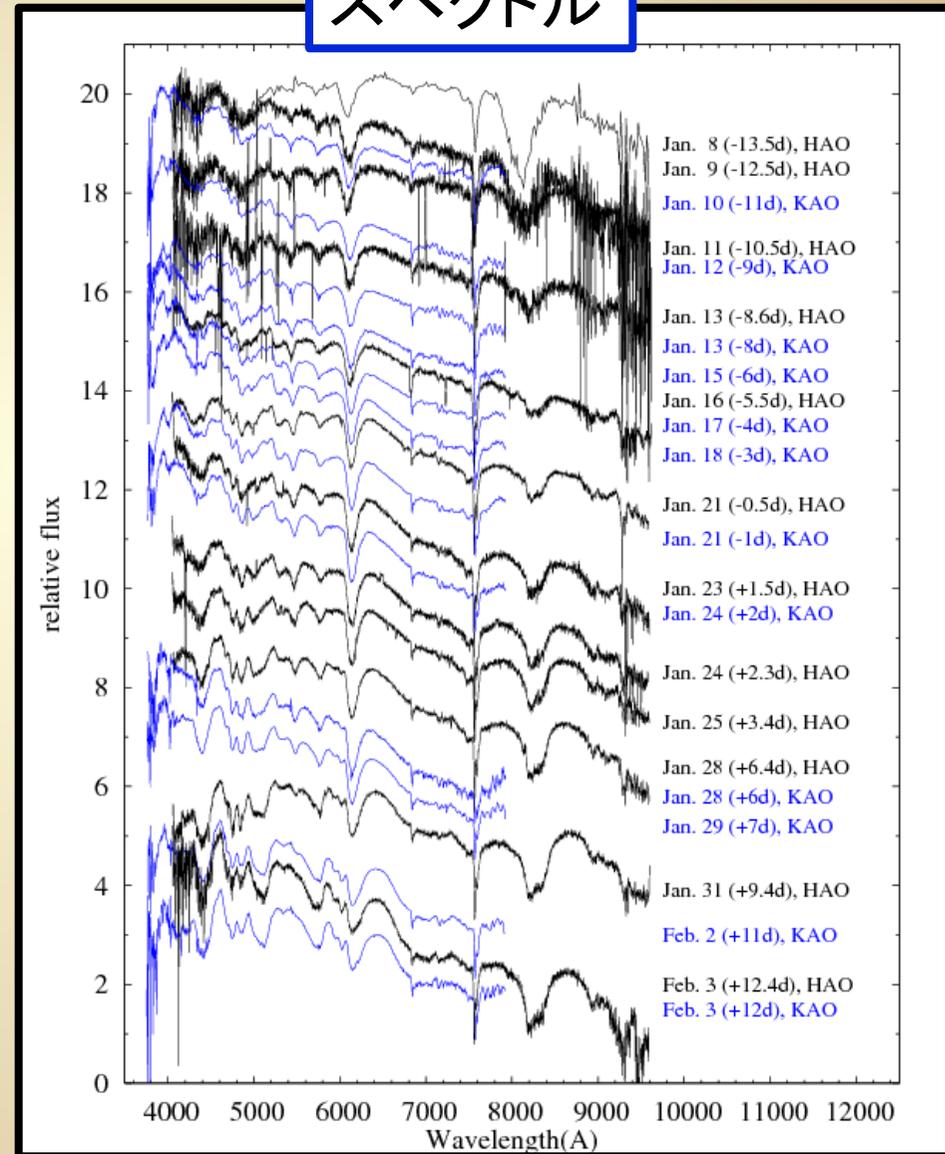
かなた望遠鏡+中口径望遠鏡と連携  
超新星・新星やその他突発天体の観測

例：Ia型超新星SN 2011B (1月7日発見)  
爆発機構に制限を与える

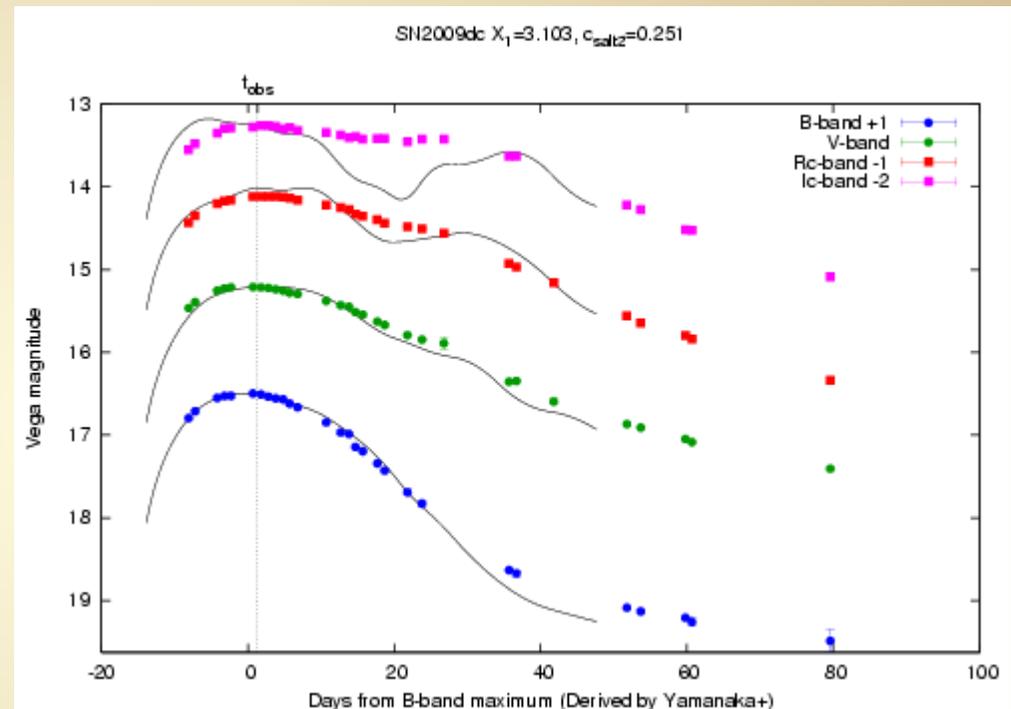
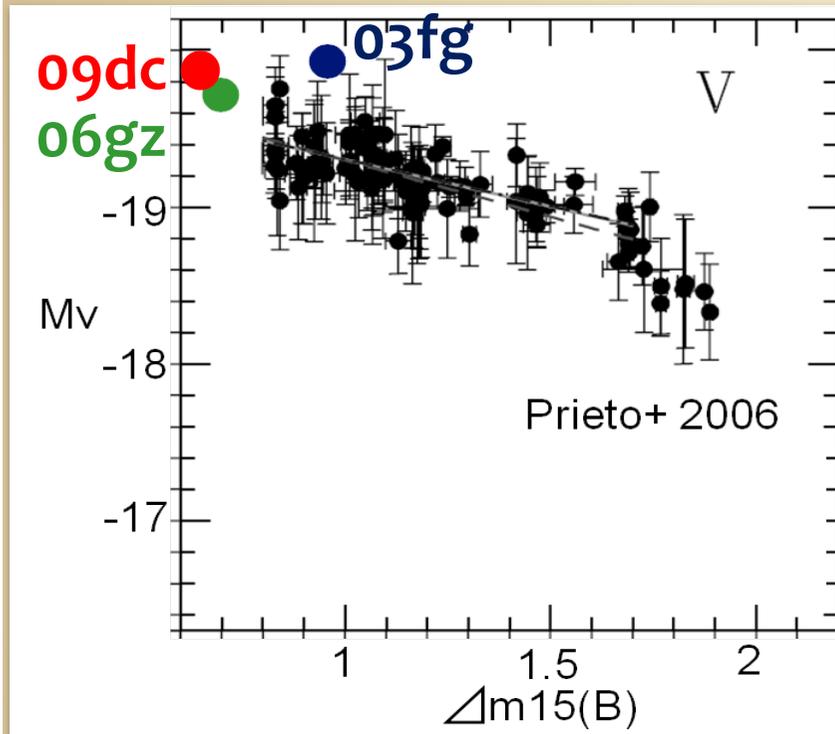
## 光度曲線



## スペクトル



# SN 2009dcは宇宙論パラメータを変える？

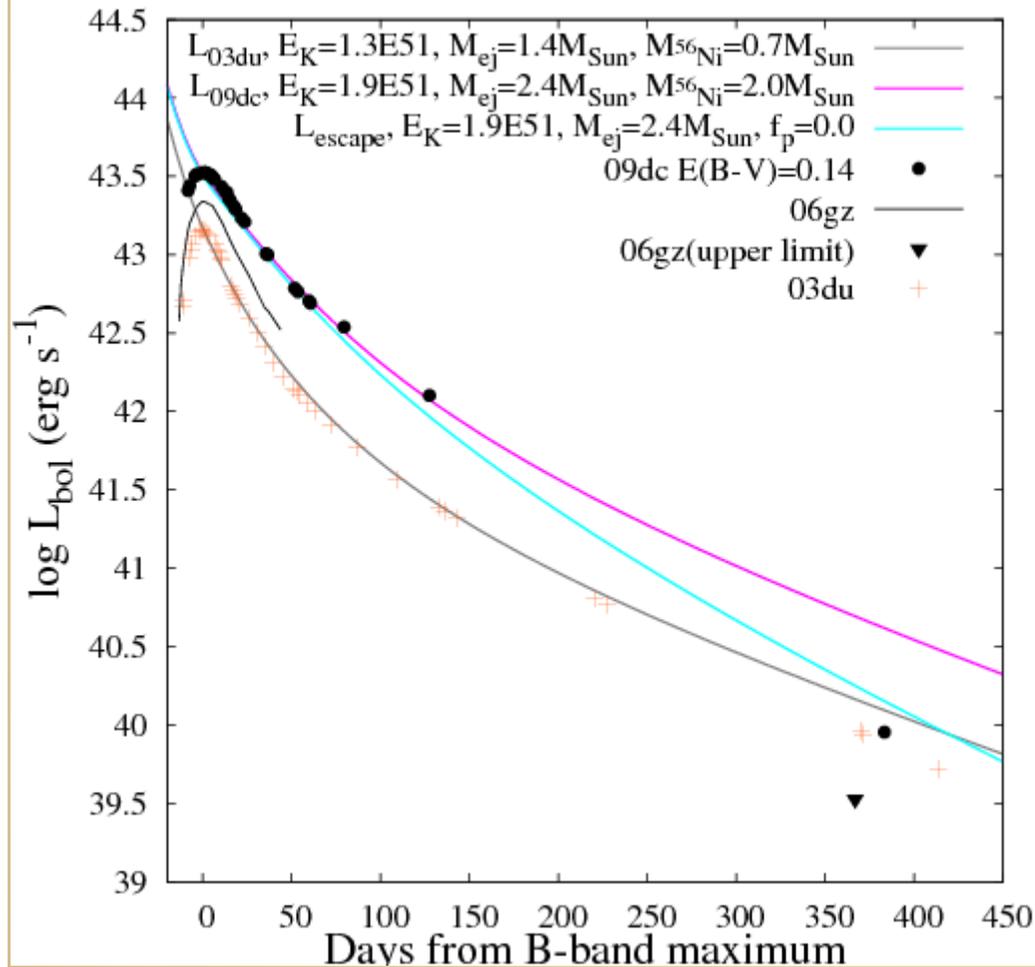


B-band light curveだけなら  
相関に乗りそう

Multi color fittingで  
Rc, Icで明らかに合わない。

単色のLight curveでは除去しきれないが、Multi color or spectra  
があれば宇宙論への適用を避けることができる。

# Positron trapping rate



早期を説明したモデル  
よりも暗い

$^{56}\text{Co}$  decayからのpositron-  
ejecta interaction を完全に  
無視

⇒ 上限値(非現実的物理)

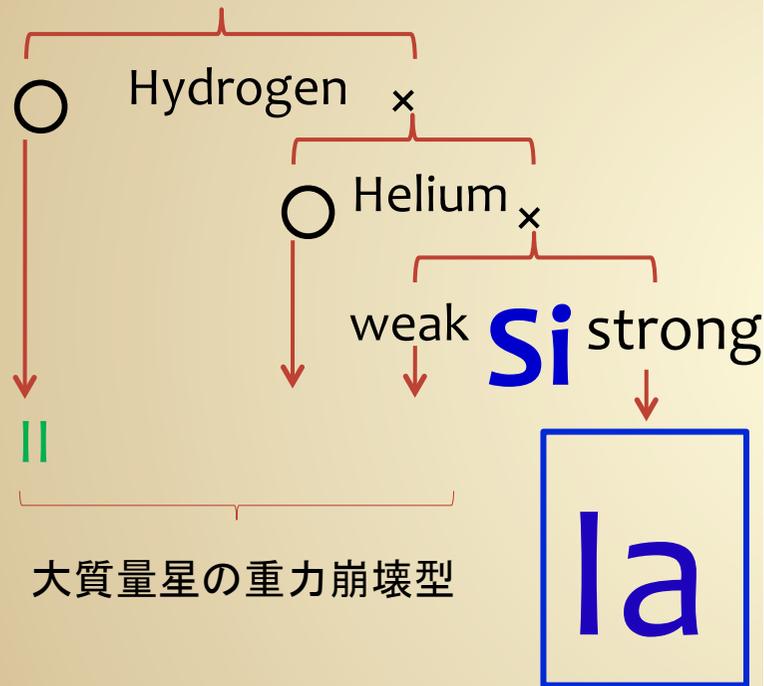
⇒ それよりも観測は暗い

後期の減光は明確に  
positron escape説で  
は合わない。

⇒ dust 生成の可能性

# 超新星の観測的特徴と分類

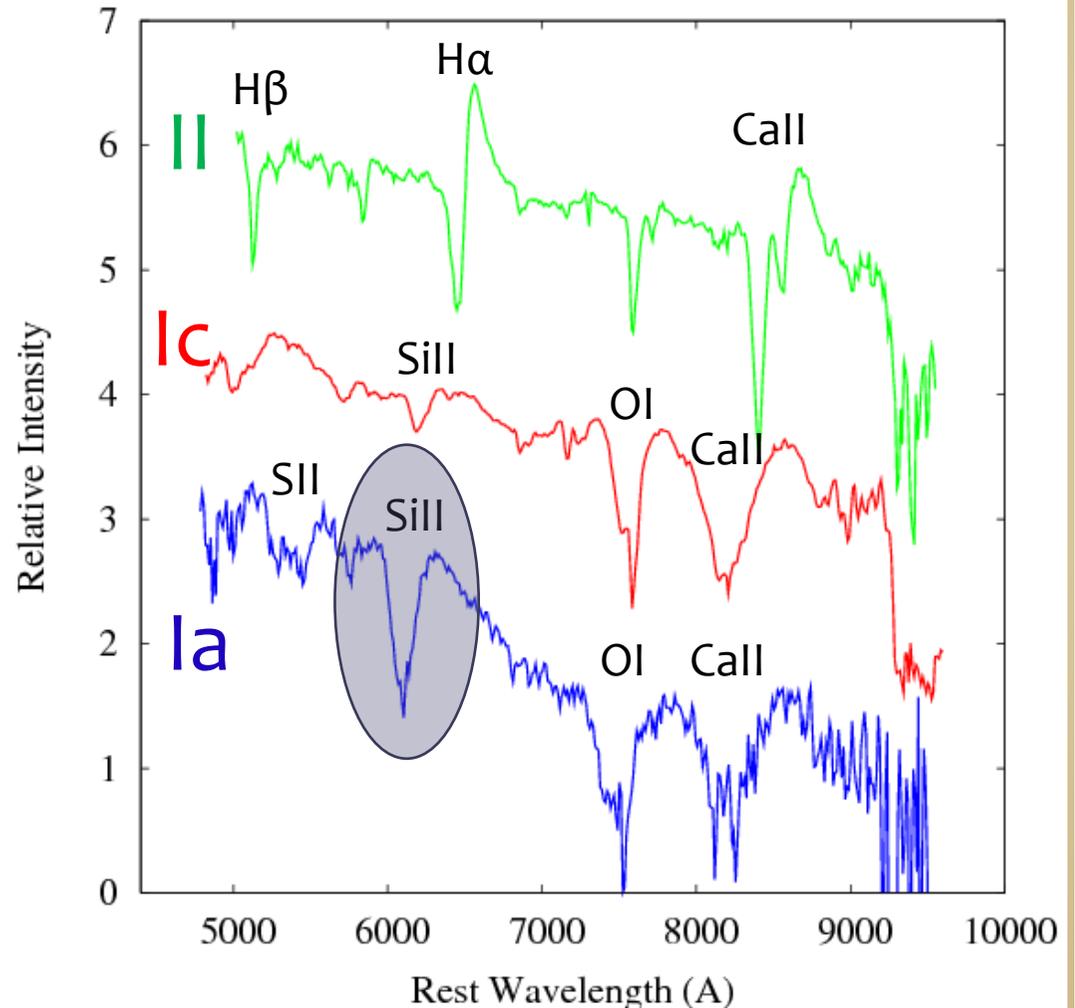
## 吸収線



大質量星の重力崩壊型

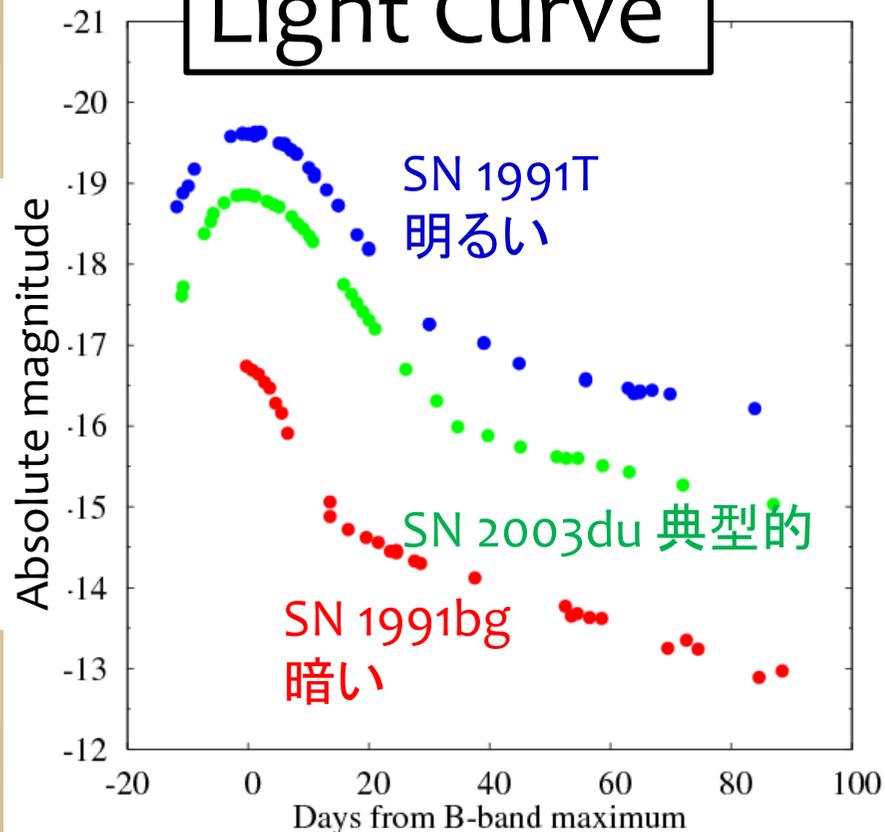
低質量連星系を成す白色矮星の熱核暴走反応爆発

かなた望遠鏡で取得したスペクトル

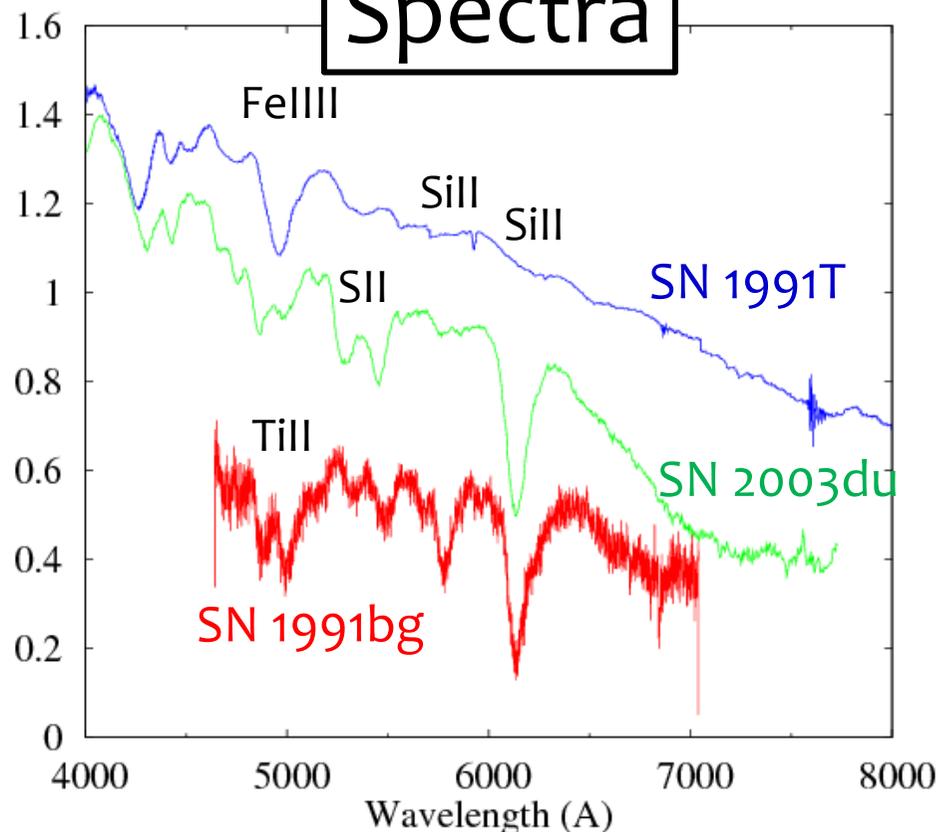


# Ia型超新星の多様性

Light Curve



Spectra



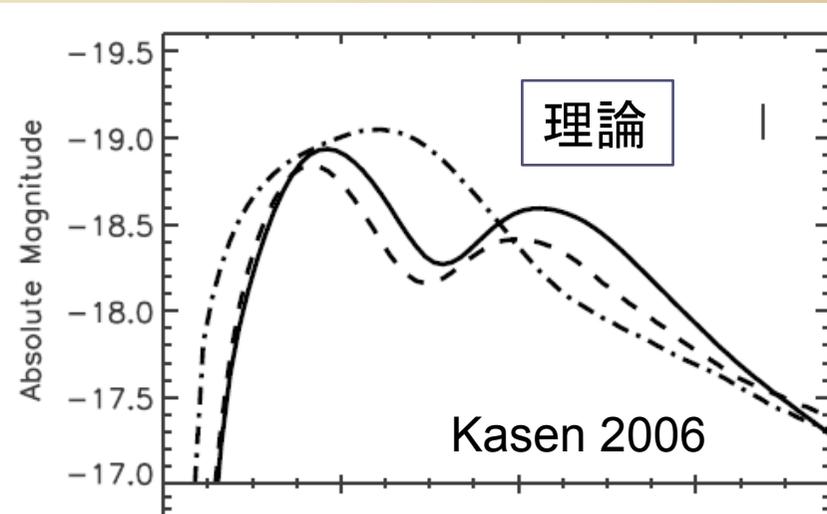
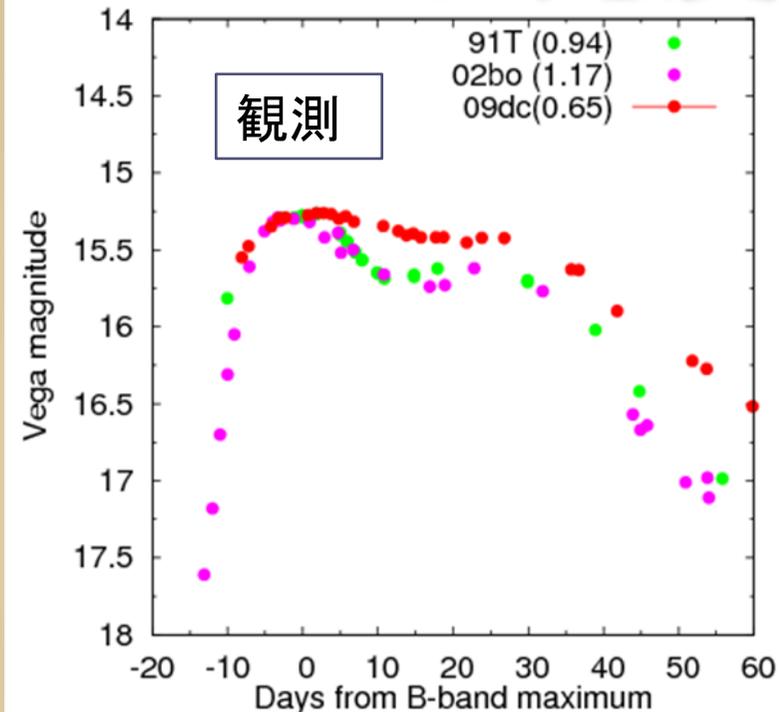
減光する速さ 速い— 中 — 遅い  
 明るさ 暗い— 中 — 明るい

Ni mass <0.1 0.4-0.8 >0.9

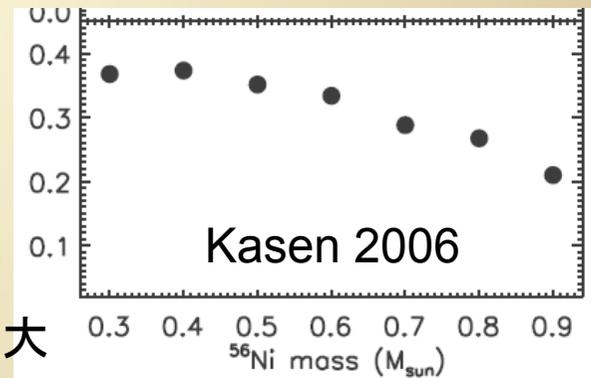
スペクトル中の吸収線：外層物質  
 Ni：明るさの起源（内側に分布）

爆発における元素合成が反映

# バンド光度曲線 第2極大



明るいIa型超新星ほど  
バンド第2極大が明るい  
⇒エジェクタ中の鉄系元素が豊富



第二極大  
が明るい

明るい

のっぺりした光度曲線は  
Mixingを示唆:C、Siの速度が似か  
よっていることを支持

# Summary

## 初期の観測

極めて明るい光度、極めてゆっくりとした減光、極めて稀な強い炭素の吸収、遅い膨張速度などからSuper-Chandrasekhar SNであることを見出した。標準モデルにより光度変化も説明できた。極大光度からNi mass  $\sim 2.0M_{\odot}$ が求められ、親星がチャンドラセカール限界質量を超えていたことが過去2例より強く示唆される。

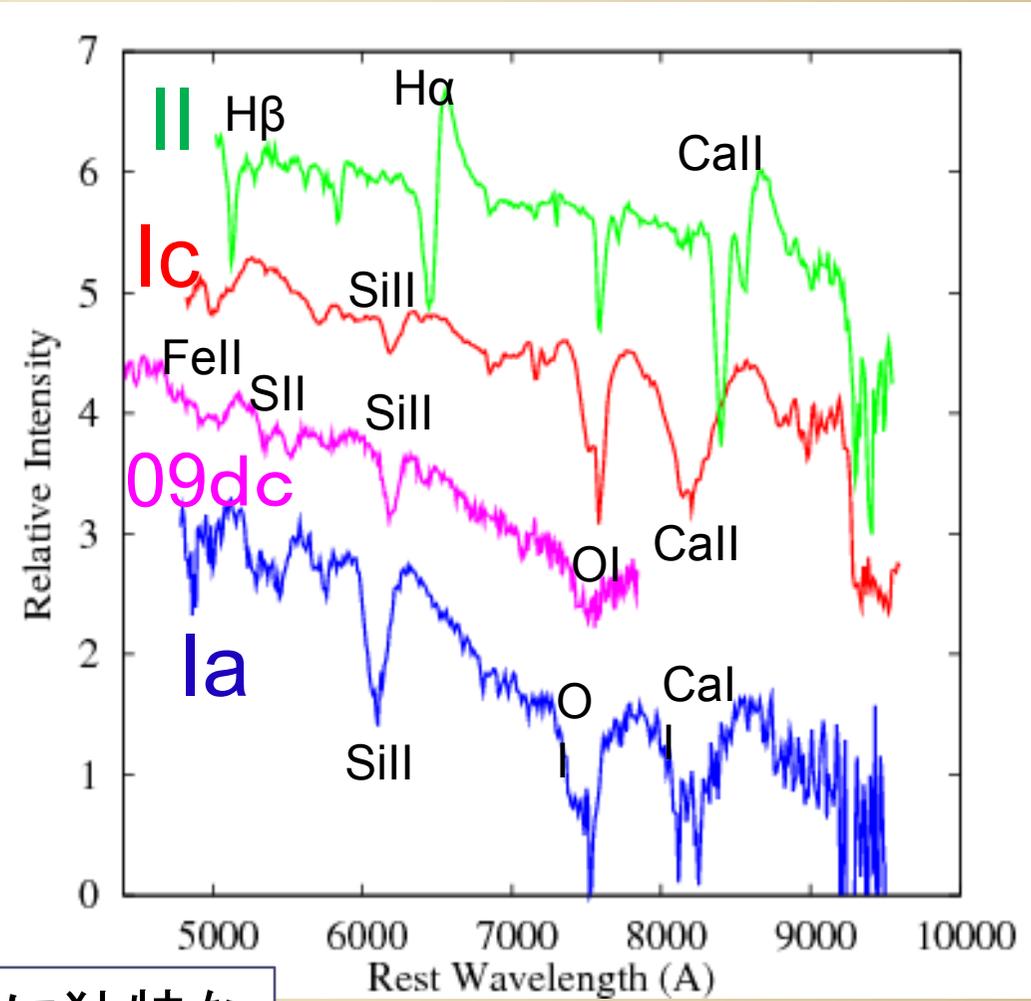
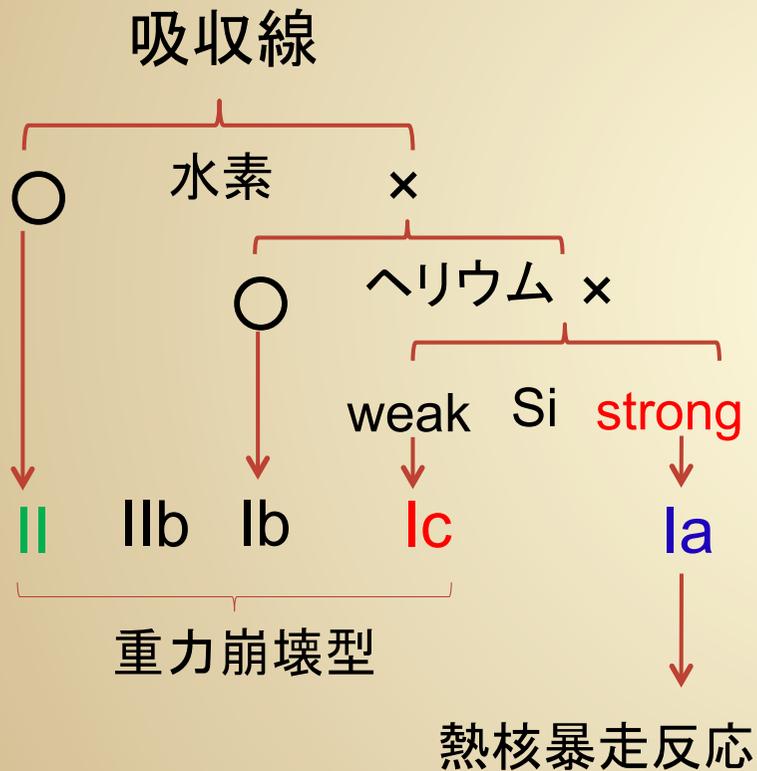
## 後期の観測

初めてSuper-Chandrasekhar SNの爆発中心の構造を明らかにした。初期の光度から予想された光度より暗いことを確かめ、Colorの変化や炭素の存在からダスト生成の可能性が示唆される。速度の遅いカルシウムのラインをこのタイプの超新星で初めて明瞭に確認した。

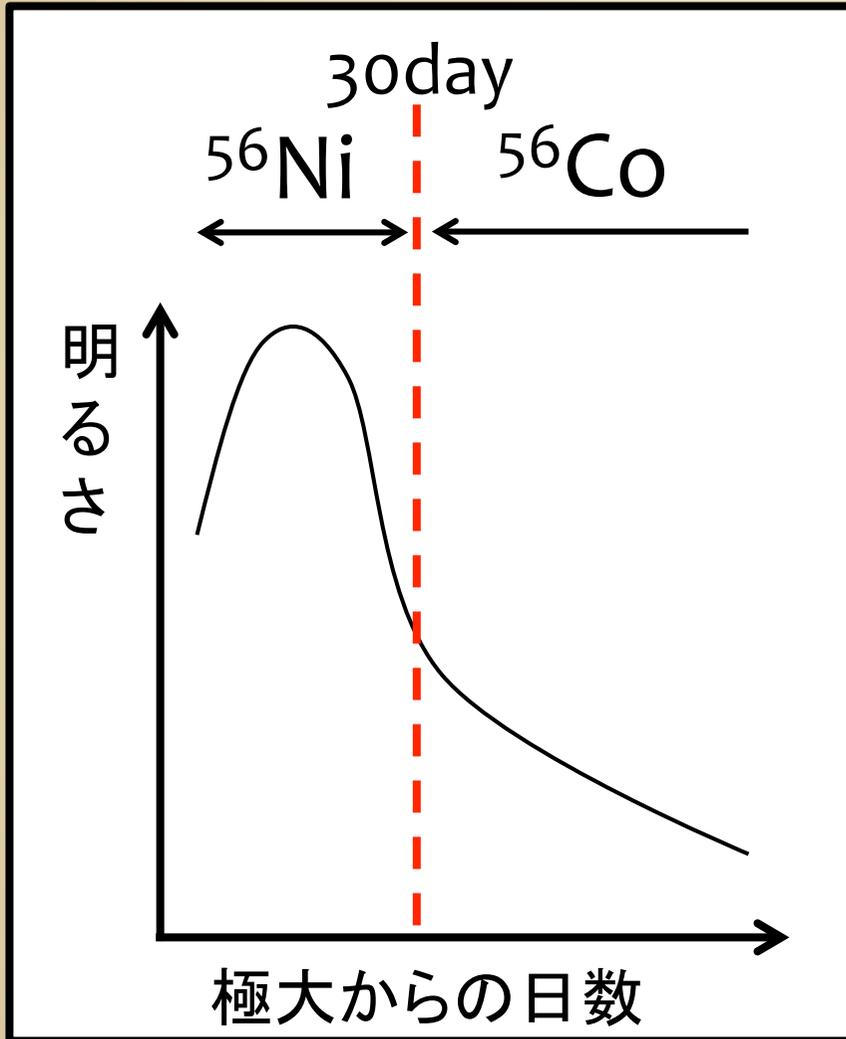
SN 2009dcは最も大きい質量の親星をもつIa型超新星爆発のモデルでほぼ説明可能である。

# そもそも”Ia”型か

“型”はスペクトルにおける吸収線  
 線で同定される。



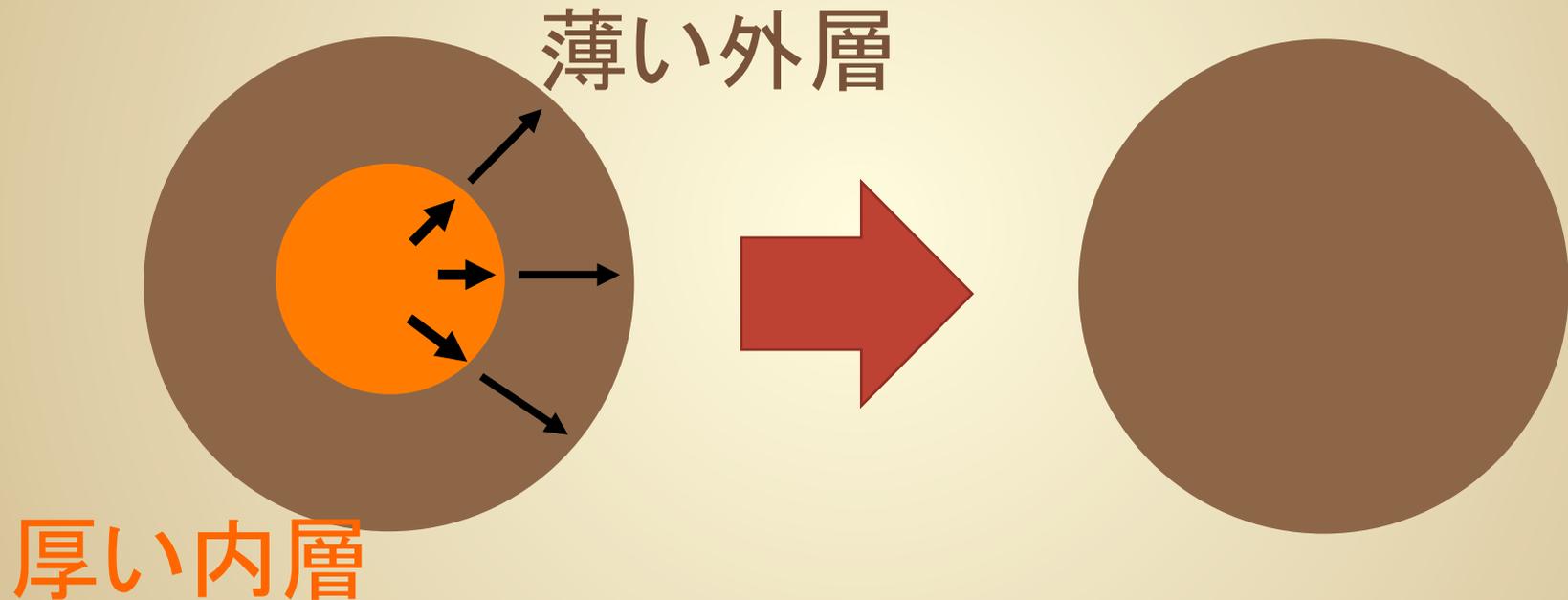
Sill, Call, SIIなどの吸収はIa型に独特な  
 プロファイルを形成: 09dcはIa型超新星



# 膨張大気的时间進化

爆発後～100日後

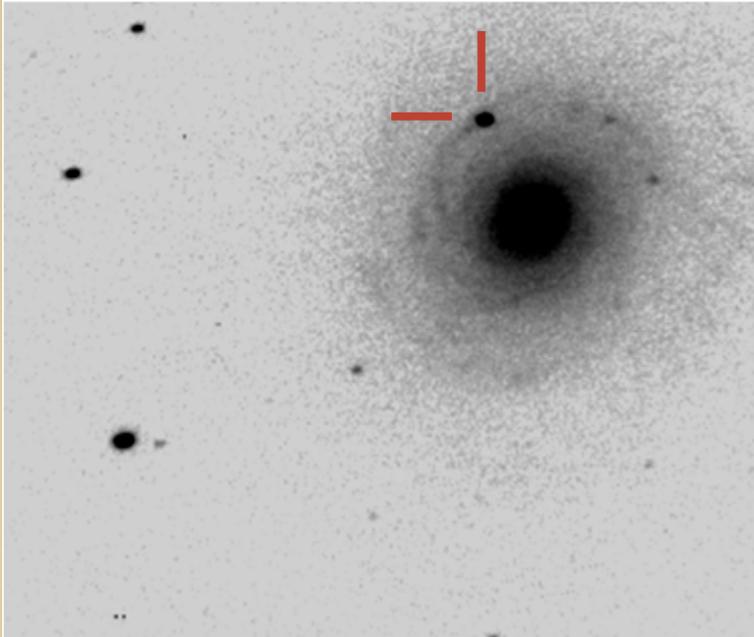
爆発後1年



1.5m かなた+  $\alpha$

8.2m すぎる

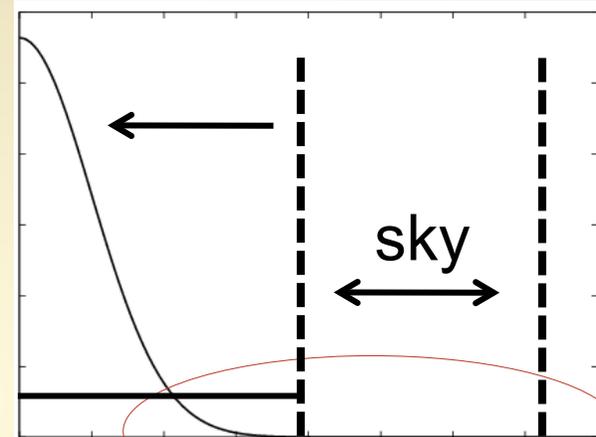
# Reductions



天文解析によく使われるアパーチャ測光: 銀河の影響無視できない。

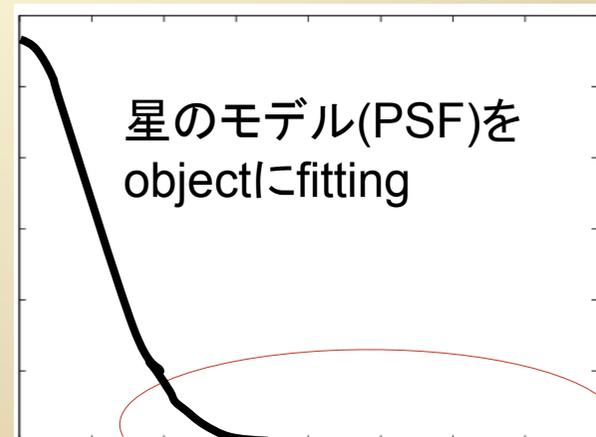
PSF測光で銀河のバックグラウンドによるコンタミネーションを除去。

アパーチャ測光(開口測定)



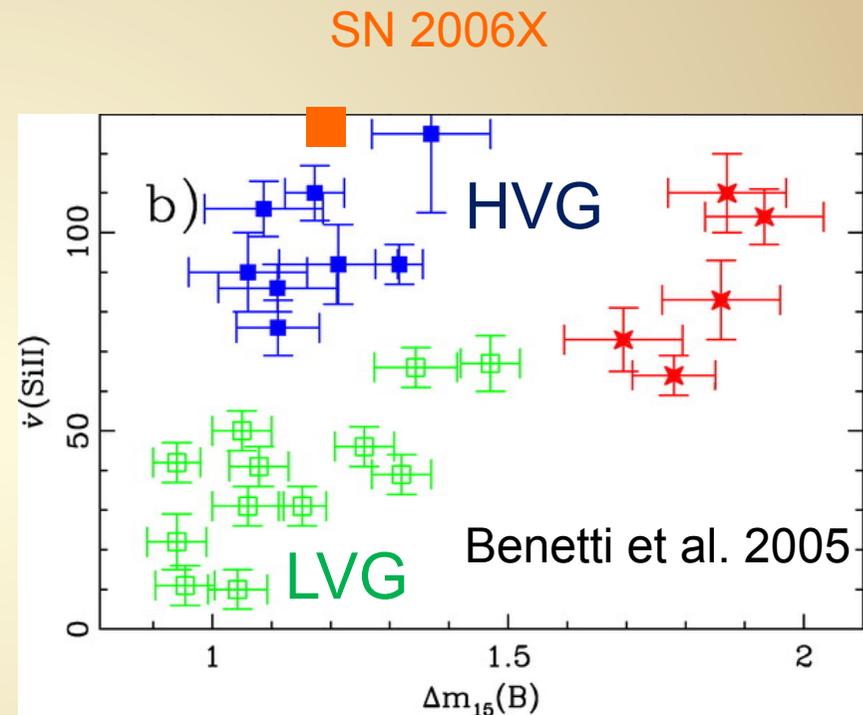
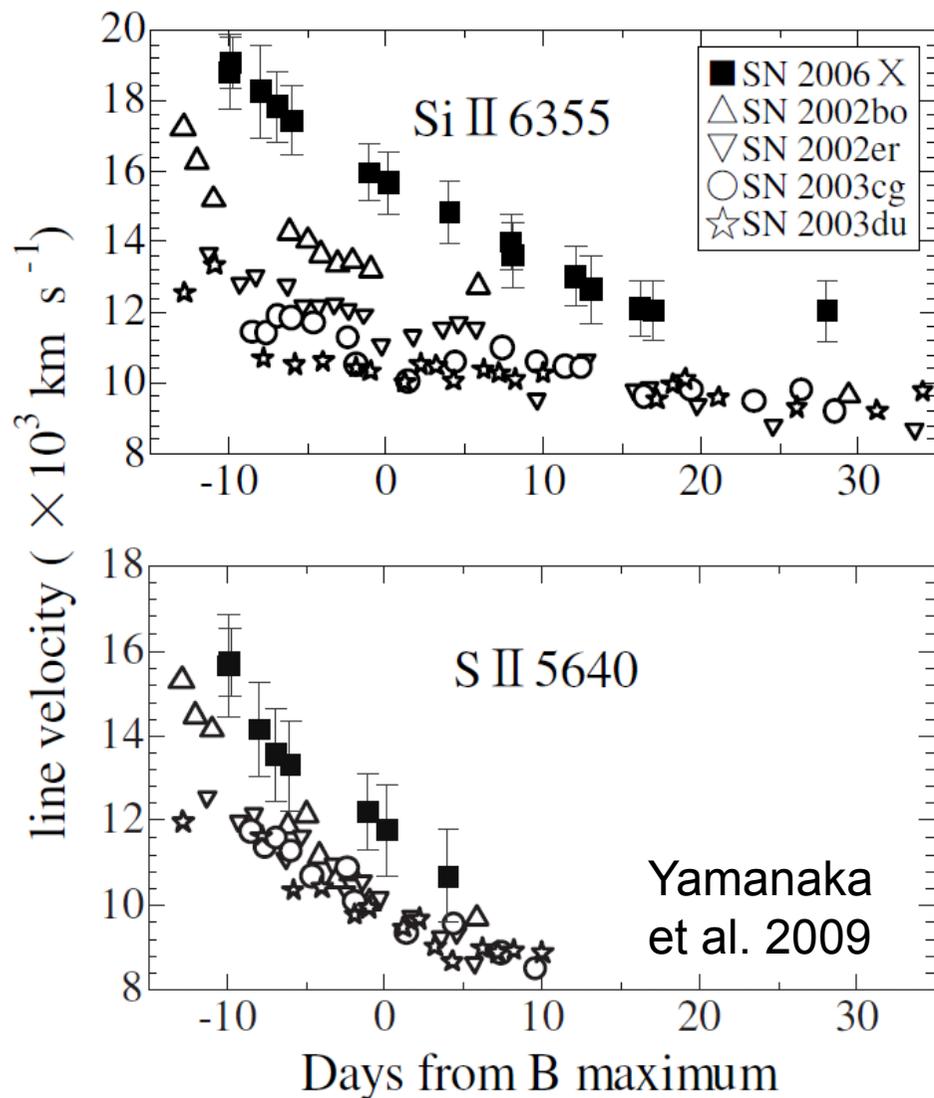
銀河成分

PSF (Point Spread Function) fitting



銀河成分

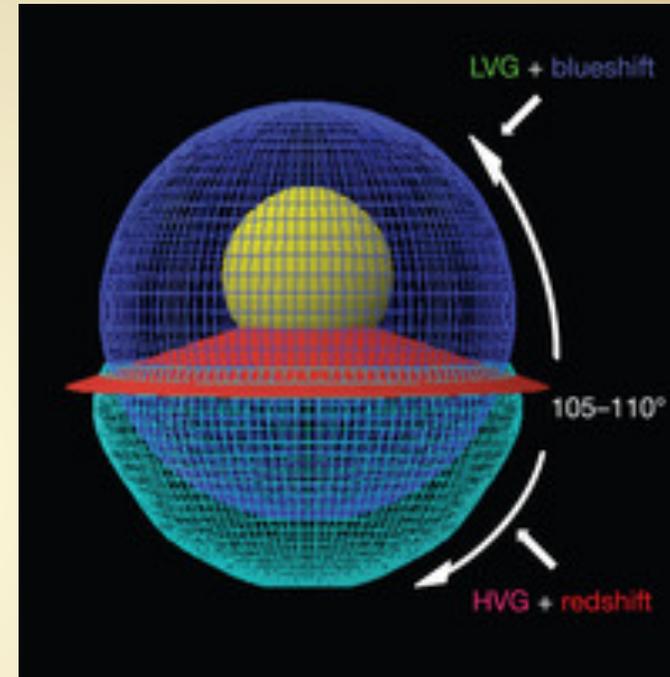
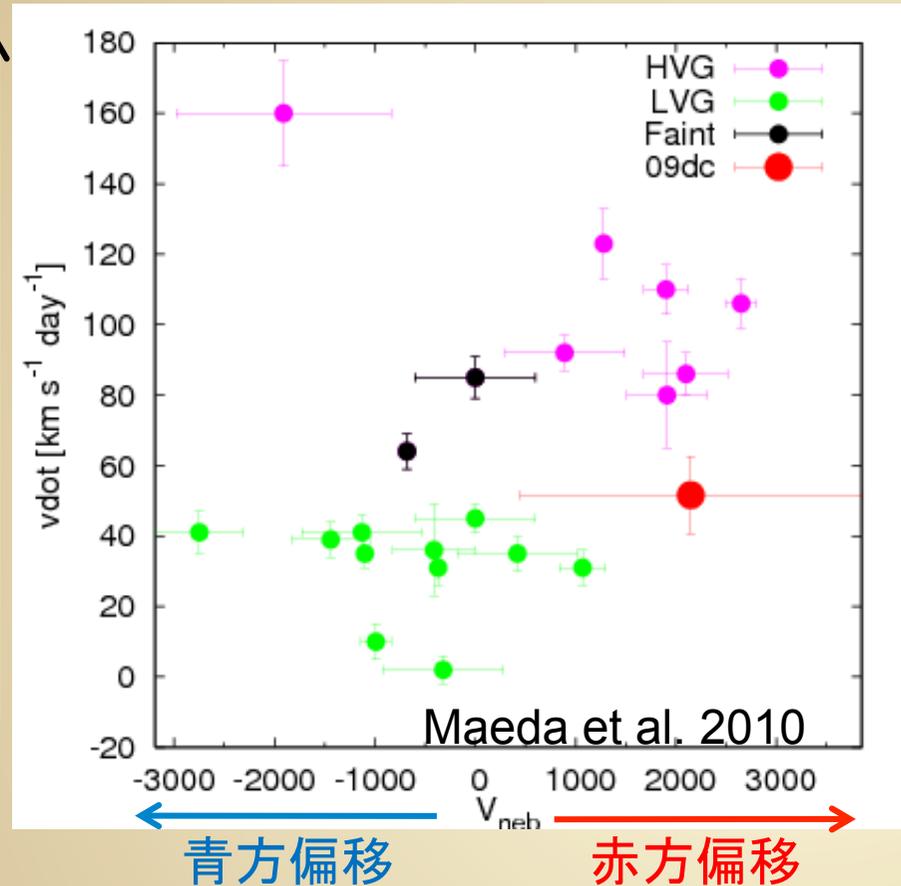
# 膨張速度の多様性：異なる起源を示唆?



修士論文においては、極めて膨張速度の大きな超新星SN 2006Xを測光分光観測によってその特異性を明らかにした。

# Off center explosion model

速度勾配大きい



早期分光観測による分類(LVG,HVG,Faint)が後期スペクトルの輝線の速度に対応している。(Maeda et al. 2010, Nature)

SN 2009dcはLVGかつ赤方偏移の特徴を持つIa型超新星  
⇒新しいサブグループであることをより支持する。

Si,S,Ca,etc  
(burnt material)

Carbon  
(unburnt material)



normal



09dc

# Instruments (測光)



広島大学 東広島天文台  
**1.5m かなた望遠鏡**  
広視野可視カメラ : HOWPol  
撮像 : BVRI 30夜  
(**可視光**:0.4-0.8 $\mu$ m)



国立天文台岡山観測所  
**1.88m 望遠鏡**  
赤外カメラ : ISLE  
測光 : JHKs  
(**近赤外**:0.8-2.5 $\mu$ m)



国立天文台ハワイ観測所  
**8.2m すばる望遠鏡**  
多天体微光分光撮像装置  
FOCAS 測光 : BVRI  
(**可視光**:0.4-0.8 $\mu$ m)

その他、可視測光に岡山観測所 **0.5m-MITSuME望遠鏡**  
近赤外測光観測に鹿児島大学 **1.0m-望遠鏡**を使用

# Instruments (分光)



ぐんま天文台  
1.5m 望遠鏡  
GLOWS  
分光: 分解能~  
850km/s  
波長範囲  
4000-8000Å



国立天文台ハワイ観測所  
8.2m すばる望遠鏡  
FOCAS  
分光: 分解能 ~ 700km/s  
波長範囲 4000-9000Å

# 超新星爆発

✓ GRBに次ぐ宇宙最大規模の爆発現象

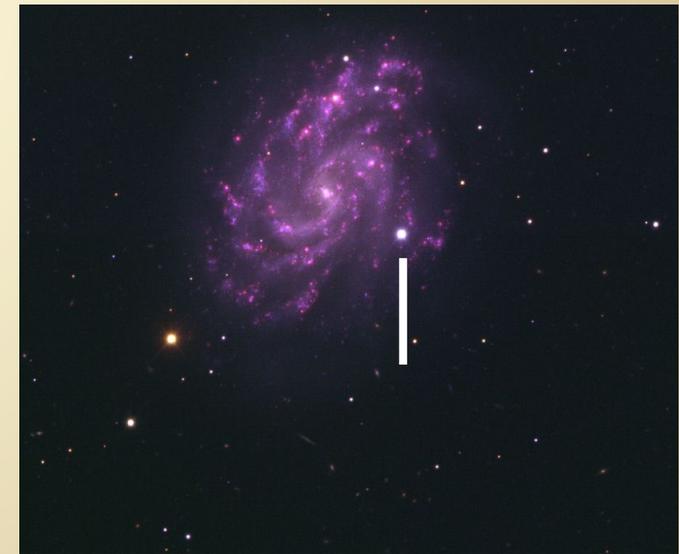
$$\begin{aligned} E &= (0.5) \times M \times V^2 && \text{爆発のエネルギー} \\ &= 0.5 \times (2.0 \times 10^{33} \text{ kg}) \times (10000 \text{ km s}^{-1})^2 \\ &= 0.5 \times 10^{51} \text{ erg} \quad (1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}) \end{aligned}$$

✓ 観測対象は系外銀河に出現

(→ 点源で観測)

$N \sim 300\text{-}600 \text{ yr}^{-1}$

我々の銀河では400年間、  
未発見



The Spiral Galaxy NGC 5584 and SN 2007af

ESO Press Photo 16/07 (27 March 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

