



# せいめい・かなた・ OISTERによる特異な Ia型超新星の観測的研究

**山中雅之（京都大学）**

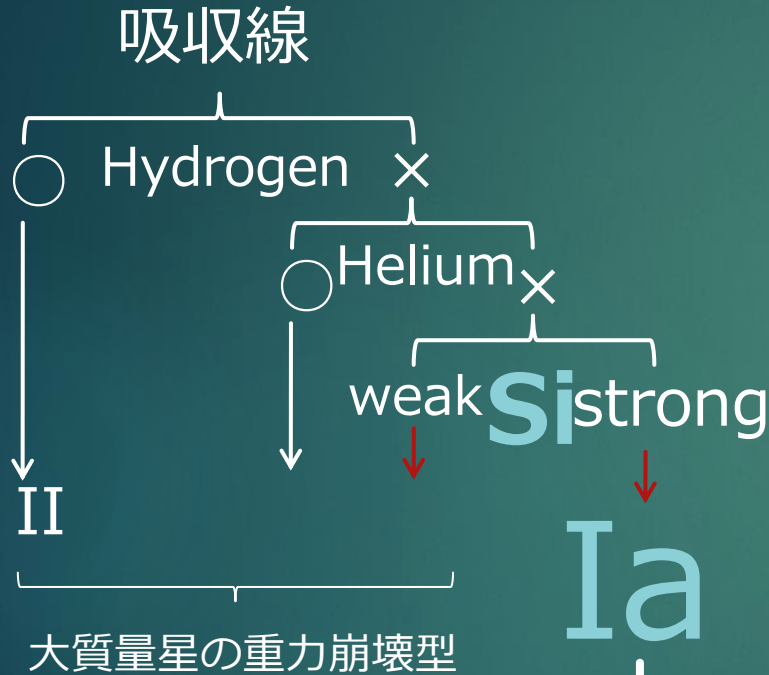
共同研究者：前田啓一、川端美穂、田口健太、中岡竜也（広島大学）、  
光赤外線天文学大学間連携、京都大学せいめいグループ  
広島大学かなたグループ、他

※ 2022/03まで大学間連携雇用  
（新技術光赤外線望遠鏡講座特定准教授）  
-> 4月より前田科研費（基盤A）研究員。  
主な仕事は TriCCS開発・保守・運用

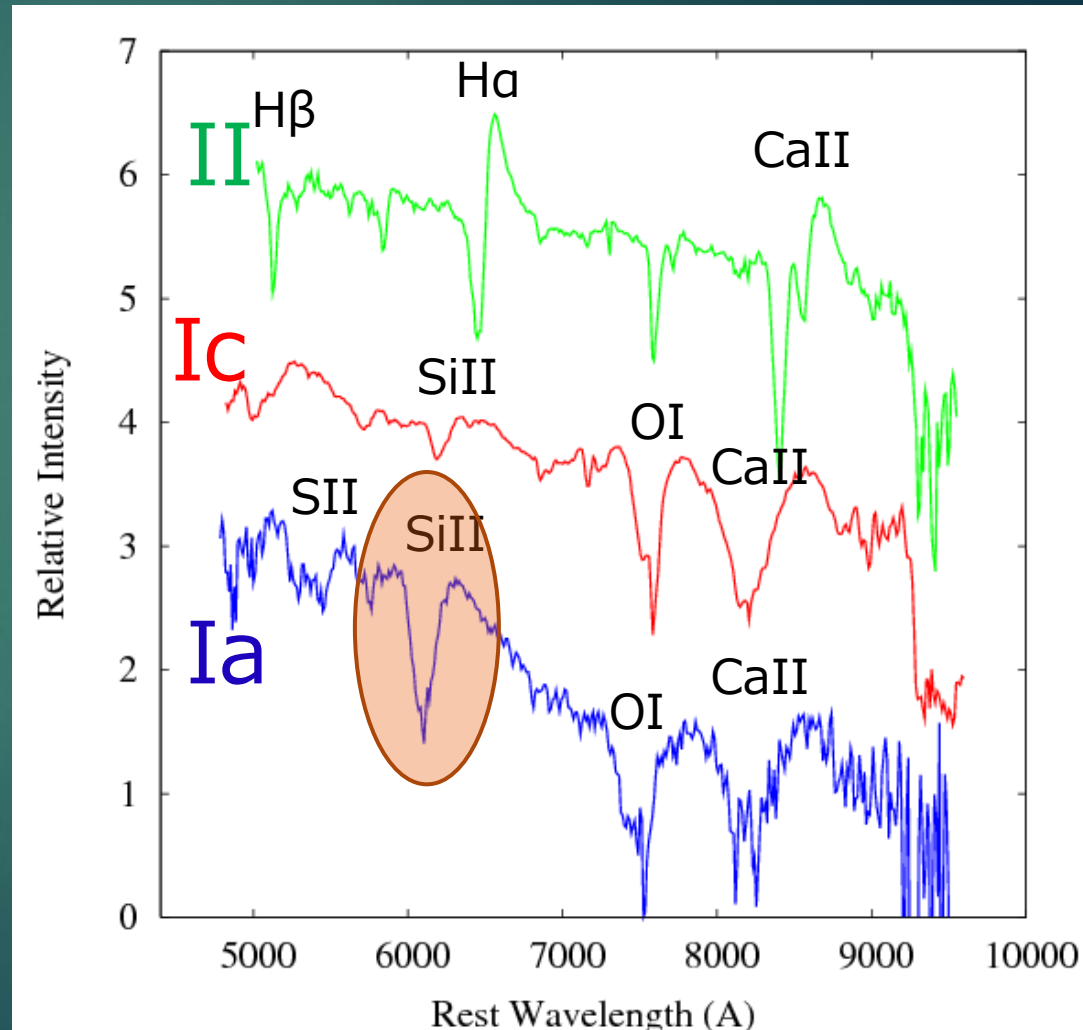
# 超新星の分類と起源：Ia型とは

実際はスペクトル全体で特徴を比較してタイプ同定

かなた望遠鏡/TRISPECで取得したスペクトル(R~150)

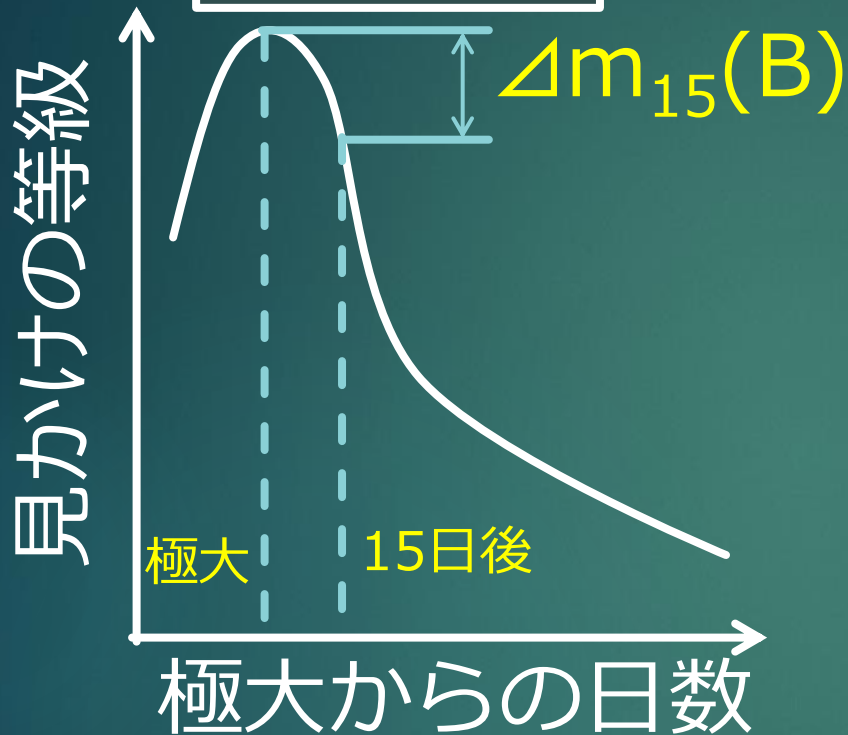


低質量連星系を成す白色矮星の熱核暴走反応爆発

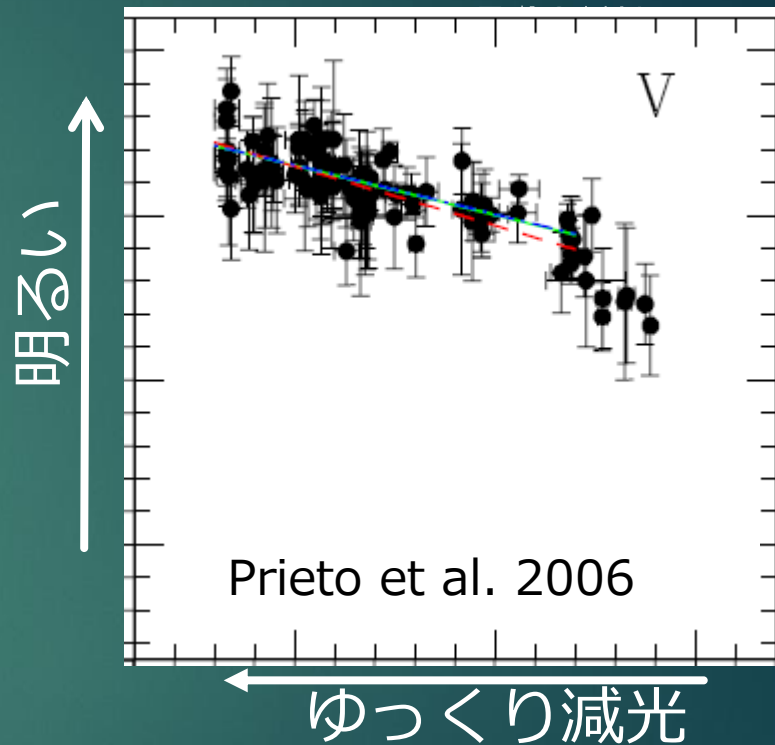


# Ia型: 極大光度と減光率の相関関係

光度変化



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

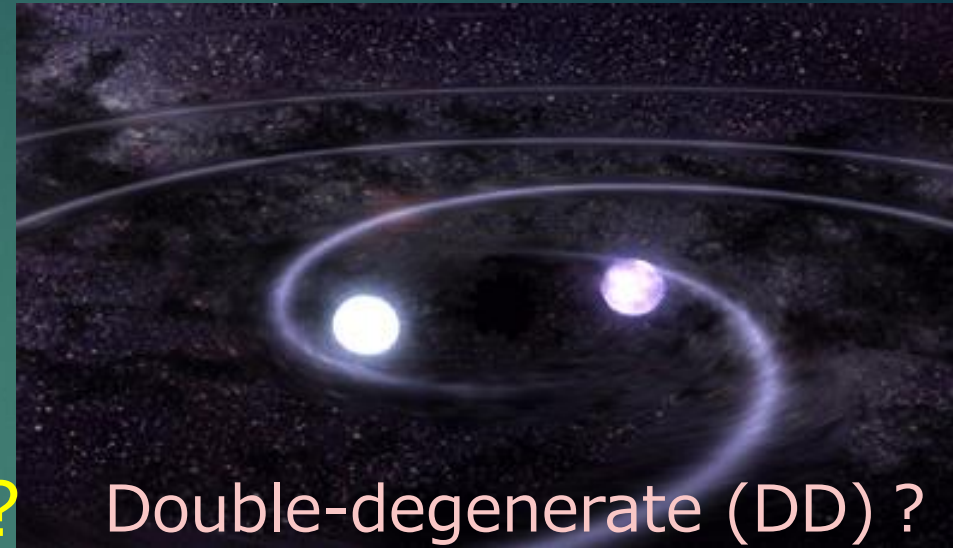
光度変化のみで距離の推定が可能  
⇒宇宙論的な距離の決定  
⇒ダークエネルギーの存在を示唆

# 親星 SD v.s. DD



## Single-degenerate (SD) ?

伴星からの降着で徐々に質量が増加  
-> Chandrasekhar-limiting mass  
一様性を説明しやすい



## Double-degenerate (DD) ?

合体衝突に至るまでの時間 > 宇宙年齢

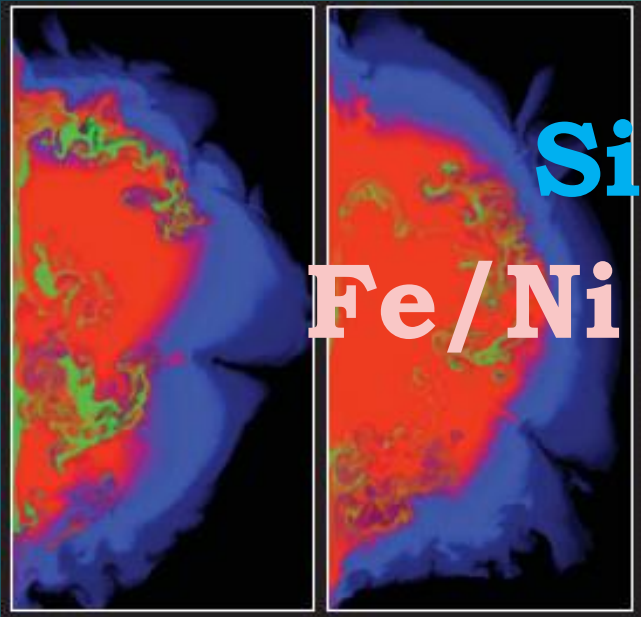
合体後の核暴走反応モデル  
Subluminous/normal SN Ia は説明  
あまり多くの $^{56}\text{Ni}$  mass は作らない  
(Pakmor et al. 2010, 2021)

Single-degenerate シナリオ:  
連星系からの星風による濃い星周環境が期待  
Double degenerate: 非常にクリーンな環境

# 爆発モデル: 未決着

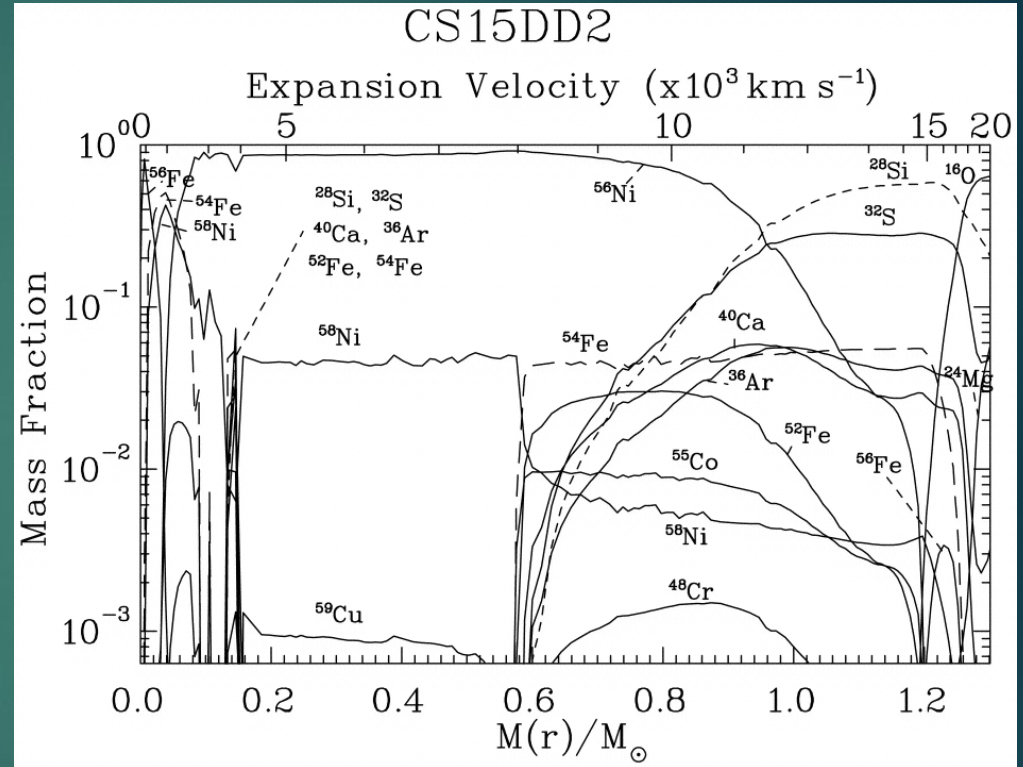
例) Delayed detonation モデル

流体計算に基づく合成された  
元素の分布



Kasen 2009, Nature

より詳細な元素合成計算



Iwamoto et al. (1999)

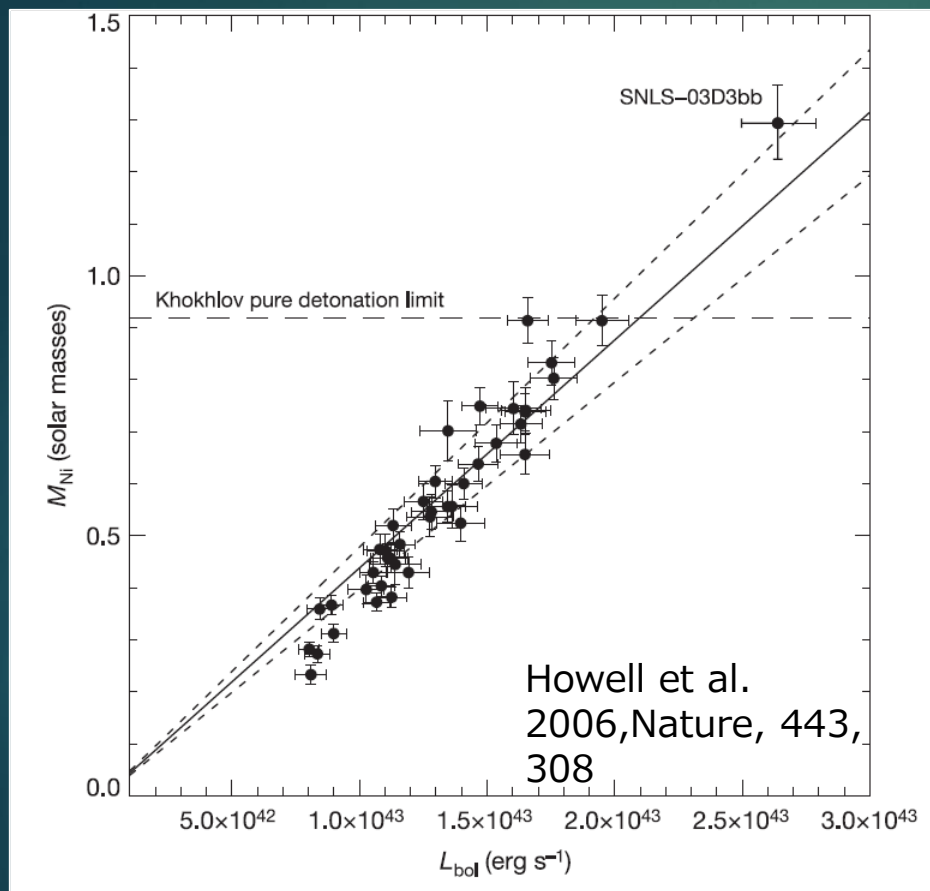
より外側

爆発モデルへの制限:

高速領域 (=より外側) でどのような元素合成がなされるかが鍵

->より早期の分光により、エジェクタ組成の速度を測定することが肝要

# スーパーチャンドラセカール超新星



チャンドラセカール限界質量白色  
矮星からの熱核暴走反応の限界  
ニッケル質量 $\sim 0.9\text{-}1.0$ 太陽質量



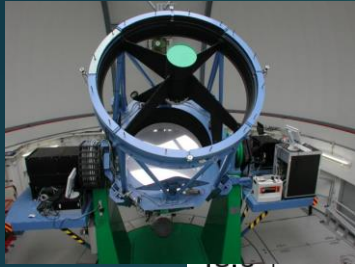
SNLS-03D3bb(SN 2003fg)

$M_{\text{Ni56}} \sim 1.3M_{\odot}$

Delayed detonation モデルを  
仮定すると  $1.4M_{\odot}$  WD で  
説明できない



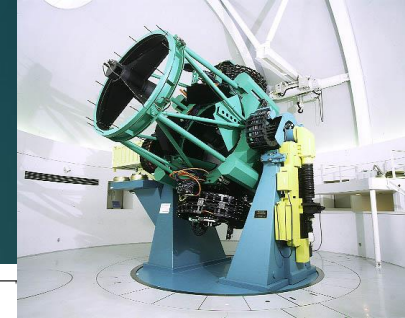
# プロトタイプ : SN 2009dc



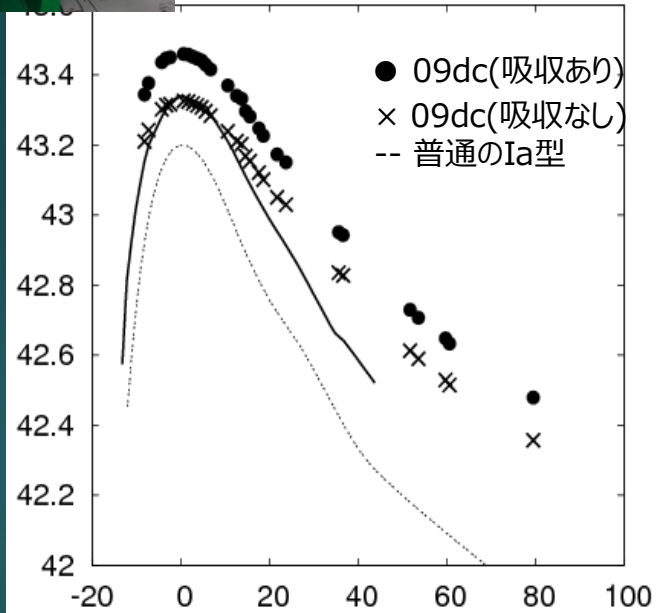
広島1.5m  
かなた

当時「3例目」

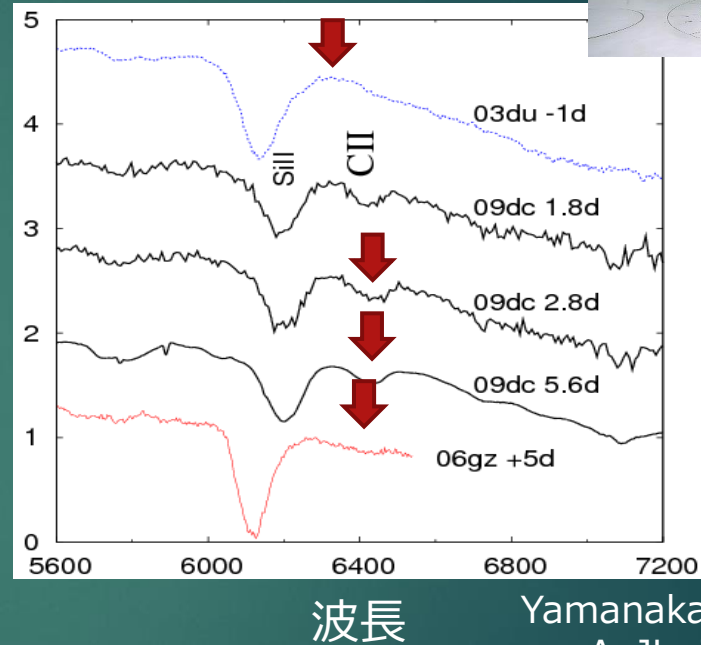
ぐんま  
1.5m



明るさ



明るい 極大光度からの日数  
ゆるやかな減光



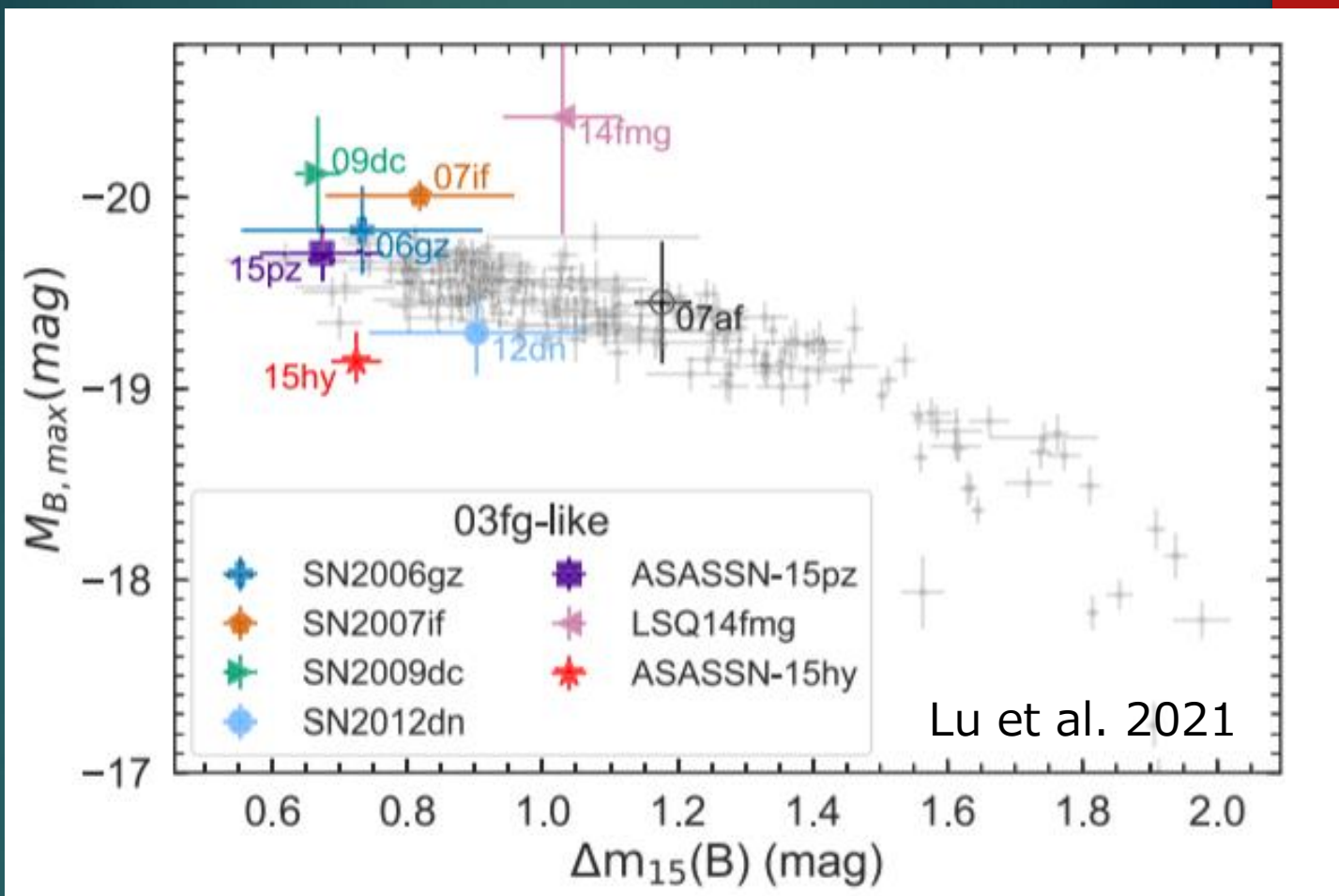
強い炭素の吸収  
遅い膨張速度  $\sim 8000\text{km/s}$

Yamanaka et al. 2009, ApJL, 707, 118

回転のない白色矮星の  
爆発では説明不可

$M_{\text{Ni56}} \sim 1.8M_{\odot}$ 、 $M_{\text{ej}} \sim 2.4M_{\odot}$   
(Silverman et al. 2011, Taubenberger et al. 2011)

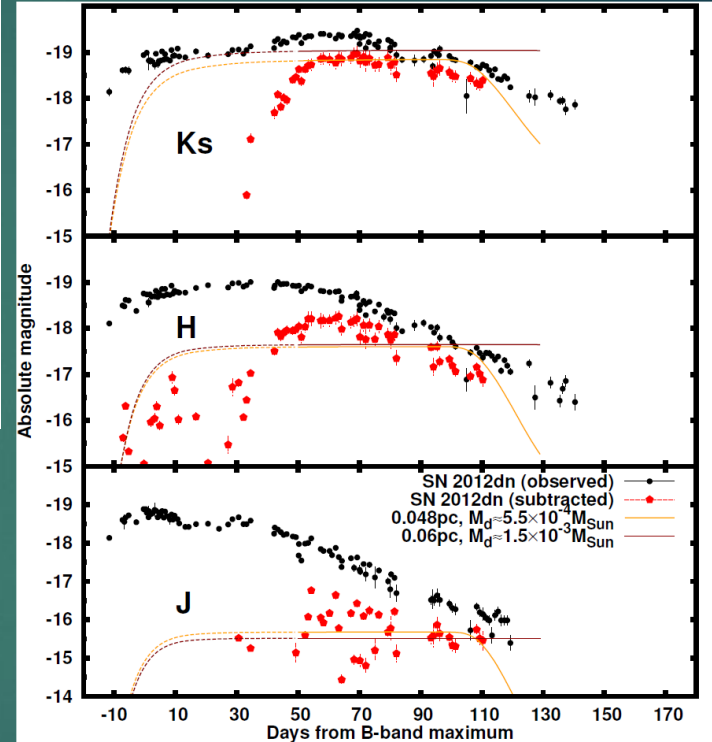
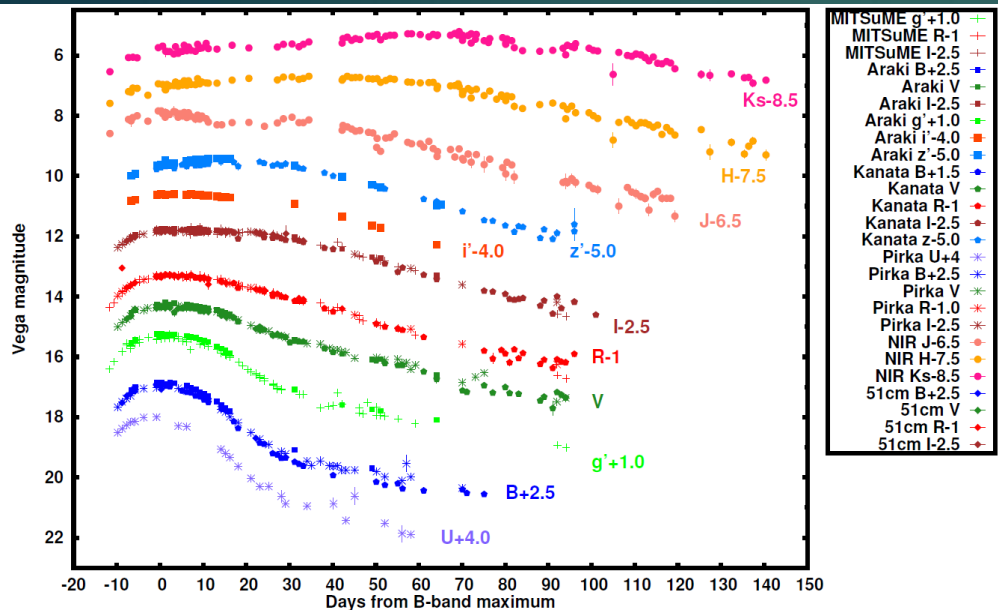
# 最近 Luminosity に多様性が見えてきた



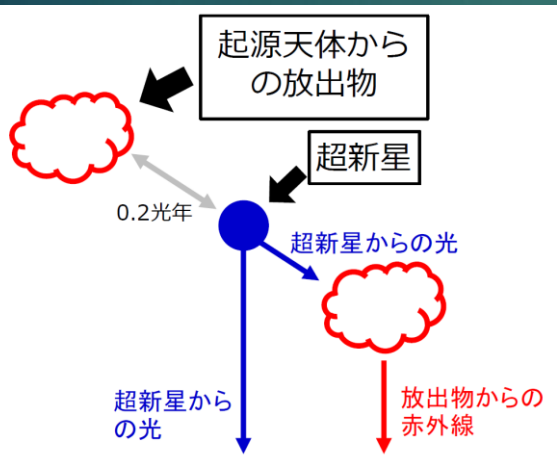
Normal SN Ia より暗いものも



# 星周物質の兆候が見られた例も



## OISTERによる SN 2012dn の観測



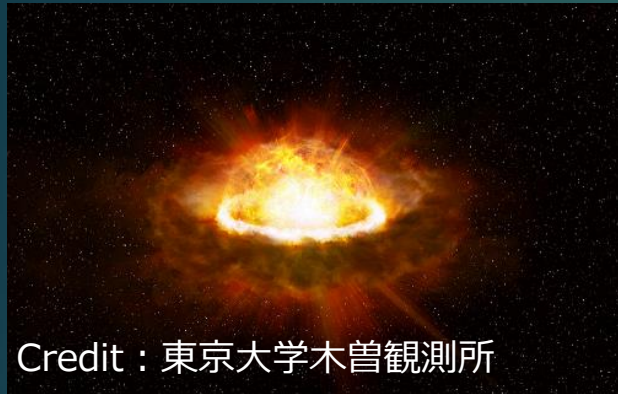
Mass loss rate  
( $10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ )  
~ SDシナリオに一致

SC超新星  
=SD由来か?

NIR echo の検出：親星時代に  
噴出した物質の証左

Yamanaka et al. 2016, PASJ, 68, 68  
(University Collaboration in Optical/Infrared  
and VLBI Observations)

# SN 2020hvf: fast emission を検出



非常に massive な ( $0.01M_{\odot}$ )  
星周物質の存在を示唆

-> double (He) detonation  
シナリオを示唆?

SN 2020hvf

測光分光による分類の研究

(Kawabata et al. 2022, in prep)

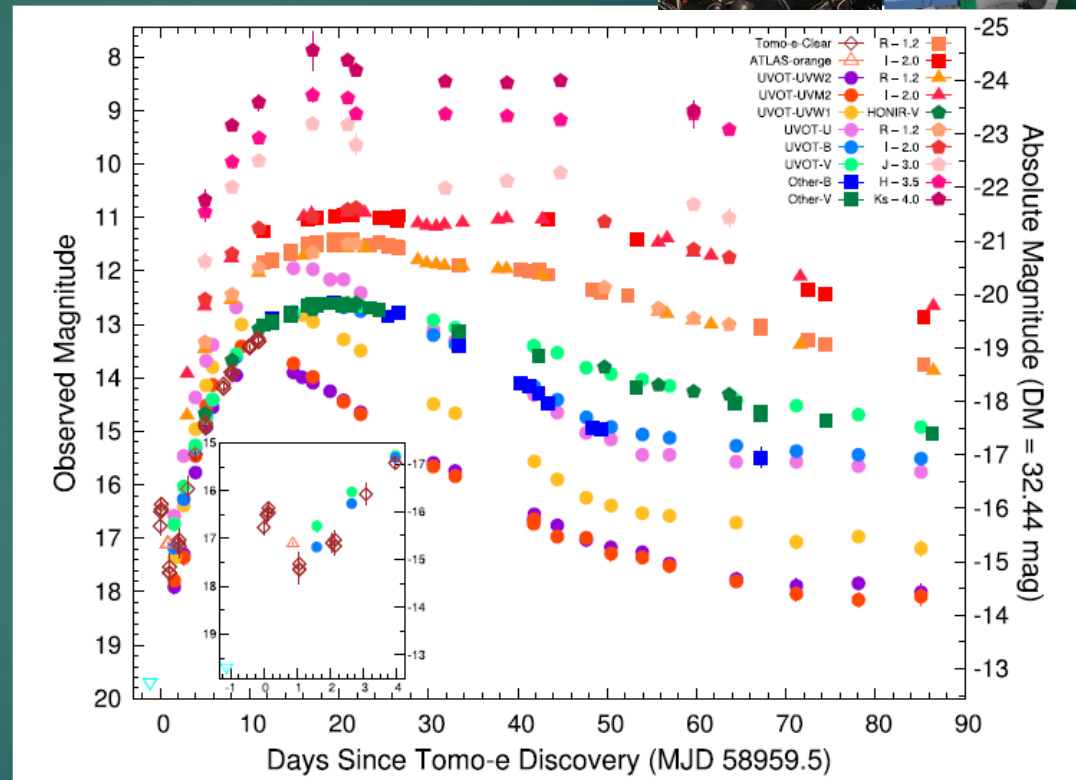
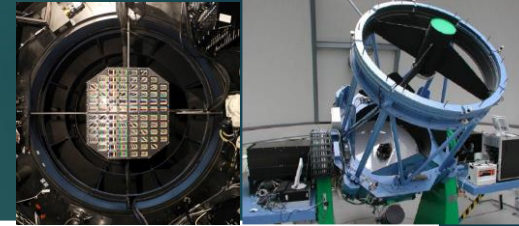
初期

Slow light curve

膨張速度の大きな吸収線

後期

Normal + Ia-SC な特徴



Jiang, Maeda, Kawabata et al. 2021, ApJL

Progenitor に関する状況は混とんと。

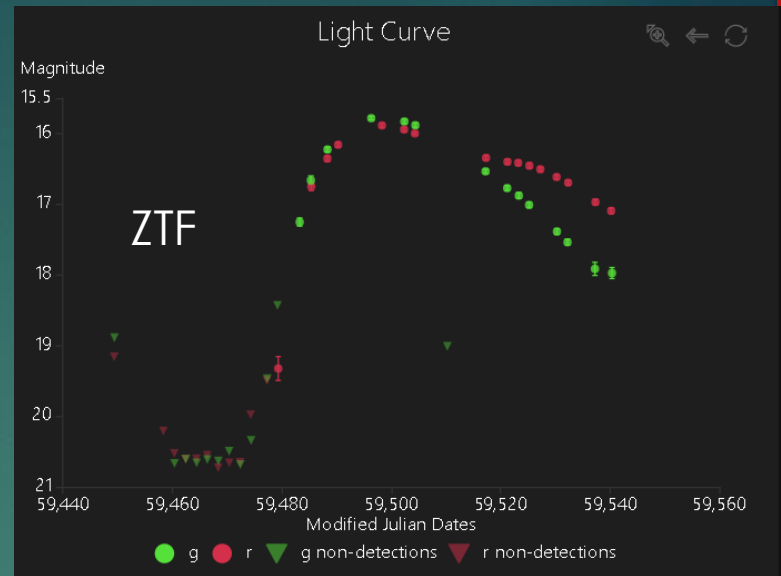
# SN 2021zny

## SN 2021zny

RA/DEC (2000)      Type      Redshift  
02:03:35.800 +15:44:33.36    SN Ia-SC    0.0266  
30.899167 +15.7426

[Discovery Report](#)    [Classification Report](#)

Reporting Group	Discovering Data	Discovery Date	TNS AT	Public
ZTF	Source ZTF	2021-09-22 08:48:28.800	Y	Y
		Discovery Mag 19.33	Filter r-ZTF	



<https://alerce.online/object/ZTF21acdmwae>

<https://www.wis-tns.org/object/2021zny>

## Early detection by international survey

### MASTER

2021-09-28 23:30:13	16.4	Clear-
2021-09-28 22:53:43	16.3	Clear-
2020-12-15 18:25:35	>19.7	Clear-

### PS1

2021-10-31 07:40:48	16.52w-PS1
2021-09-29 13:39:22	16.47w-PS1

### ATLAS

2021-09-28 10:16:19	16.977	orange-ATLAS
2021-09-18 12:17:17	>17.59	orange-ATLAS



赤方偏移 $Z=0.026$ 、やや近傍  
ピークで16magに到達



# せいめい・かなた・OISTER を使った観測

撮像



Kanata

+

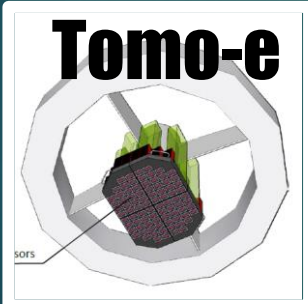
OISTER



可視+近赤外 測光  
分光

明るさ

Follow-up



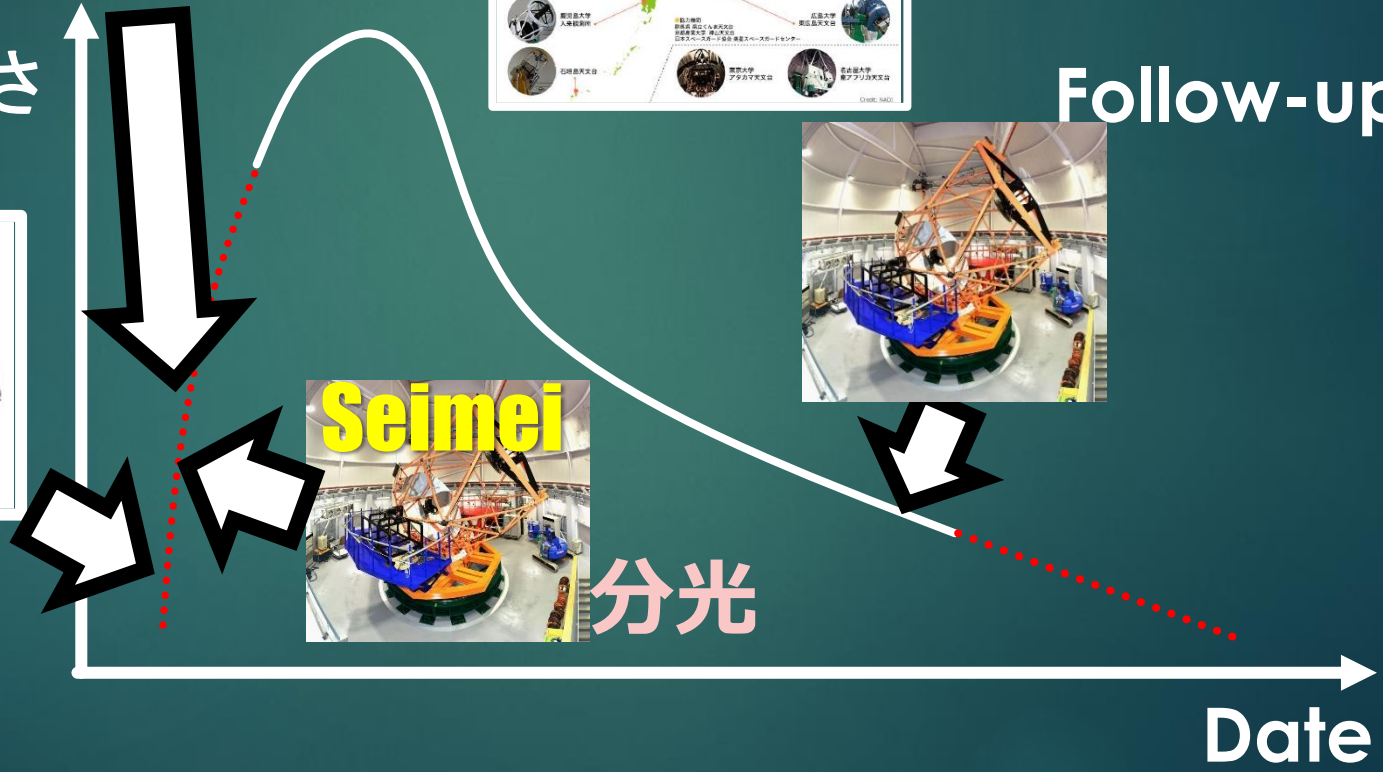
Tomo-e

発見  
(ZTF, ATLAS,  
アマチュア)



Seimei

分光



Date

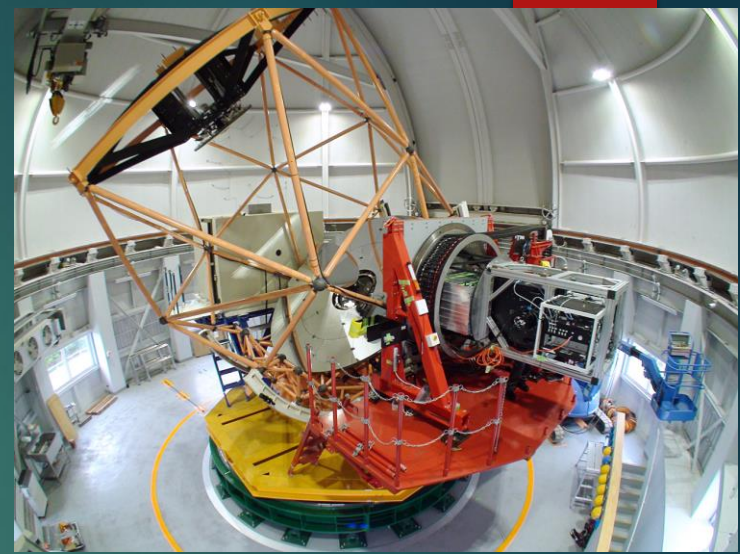
# 最近のせいめい望遠鏡

(詳しくは see せいめいUM)

安定運用中

**KOOLS-IFU** (面分光装置) 2019A-  
**TriCCS** (CMOS/g+r+i(z)同時撮像分光) 2021B-

**GAOES-RV**(高分散分光装置)、  
**赤外偏光撮像装置**、  
**近赤外高コントラストカメラ**など開発中

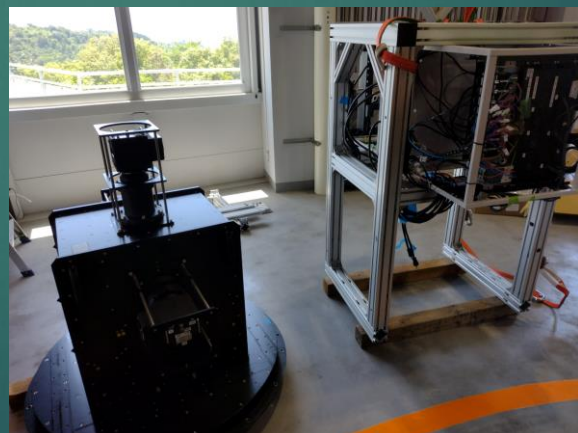
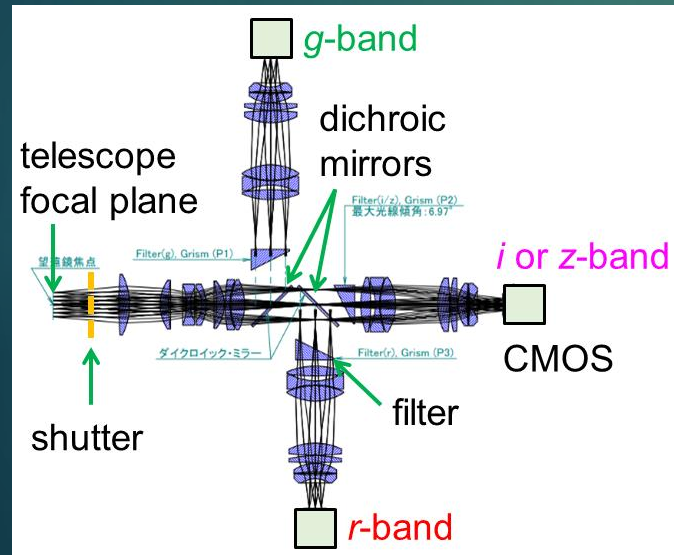


## TriCCS: Tricolor Cmos Camera and Spectrograph

98fps でg'/r'/i' 3色同時撮像が可能

7月11-19日

TriCCS/赤外偏光撮像装置の同架試験



昨年 TriCCS 分光モード実装  
-> 2023Bからの運用開始を目指す



# SN 2021zny

vey

SN 20

RA/DE

02:03:

30.899

@ Disc

Report

ZTF

https://

Magnitude

15.5

16

17

18

19

20

http

21

59,440

59,460

59,480

59,500

59,520

59,540

59,560

Modified Julian Dates

● g ● r ▼ g non-detections ▼ r non-detections

## Spectra

Observed Wavelength(Å)

3080

4106

5133

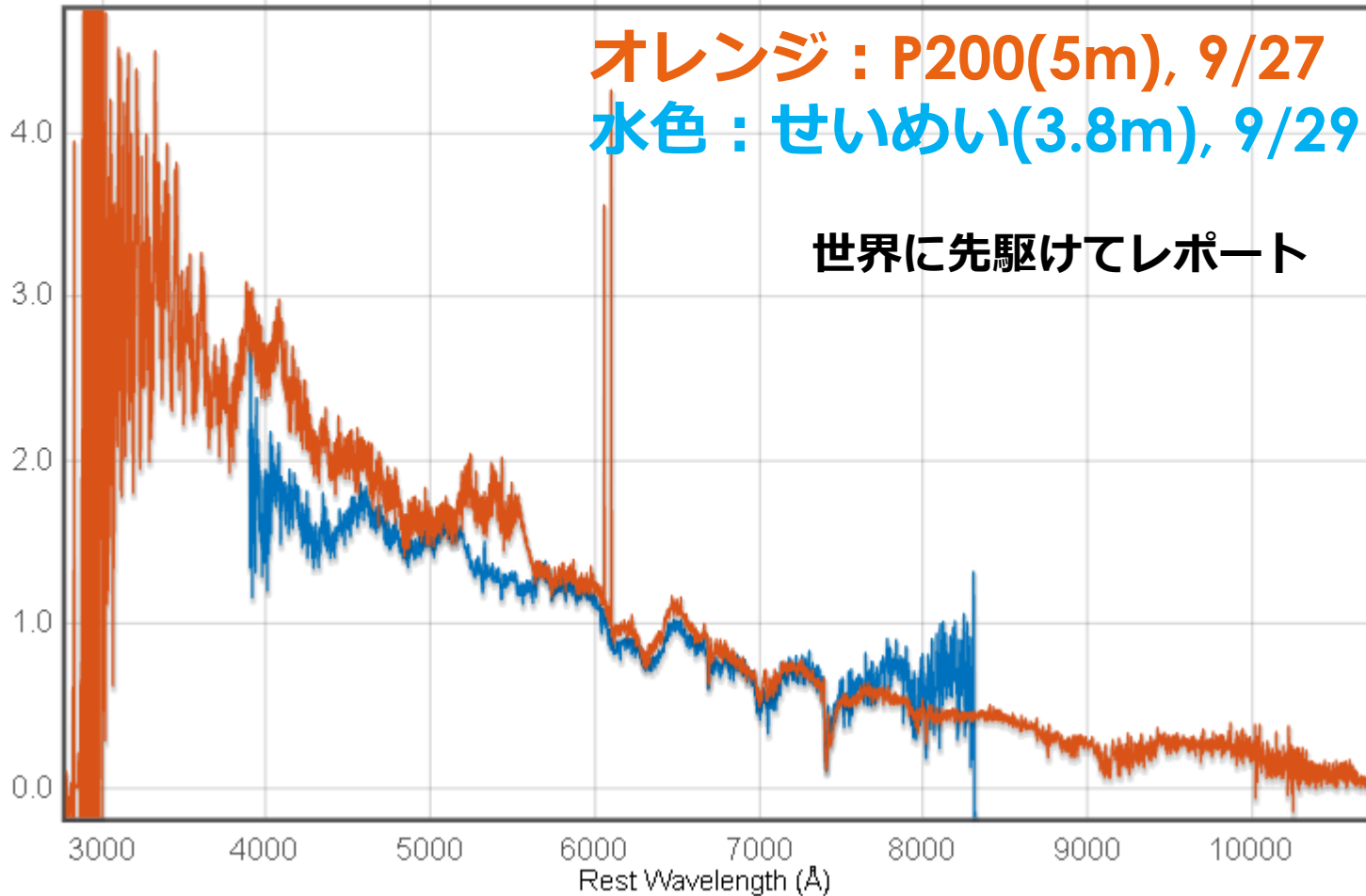
6160

7186

8213

9239

10266



e-ATLAS  
e-ATLAS

# OISTERによる多バンド観測

MY+ 2022a in prep



ライトカーブ  
緩やかな進化  
のっぺりとしたバンド  
-> Ia-SC によく似た特徴

スペクトル  
初期に浅いケイ素、  
強い炭素吸収線

# SN 2021zny: quasi-bolometric light curve

(※ BVRI-band light curve  
の積分: 全放射の60%と仮定  
(Stritzinger et al. 2006))  
 $L(t) = M_2/E * \exp(t)$  でフィット  
ト (Maeda et al. 2003)

->

$$M(56\text{Ni}) = 1.0 M_{\odot},$$

$$\mathbf{Mej} = \mathbf{2.0 M_{\odot}},$$

$$E_k = 1.7 \times 10^{51} \text{ erg}$$

# 極大・極大1週間後 スペクトル比較

## 極大光度付近

SII 6355は遅く、  
CII も強いまま (09dcより深い)

## 極大光度1週間後

CII 吸収線: (SIIとの比で) 09dc  
と比較して強い  
-> 厚い carbon layer を示唆

☑ エジェクタ中の豊富な炭素  
-> **Super-Chandra** に  
consistent

# Sill line velocity

SN Ia (core normal) と同じような進化  
極大付近で10000 km/s

(Ia-SCは多様性を示すことが知られており、無矛盾)



# 結論 : SN 2021zny は 豊富な炭素を持つIa-SC

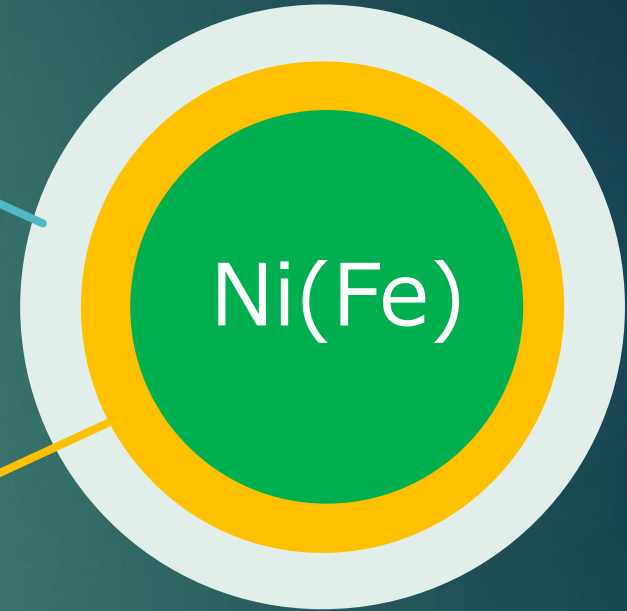
Normal Ia



Silicon, etc  
(burnt material)

Carbon  
(unburnt material)

Ia-SC



	11fe(norm)	09dc (SC)	21zny (SC)
$M(^{56}\text{Ni})$	$0.8M_{\odot}$	$1.8M_{\odot}$	$1.0M_{\odot}$
$M_{\text{ej}}$	$1.4M_{\odot}$	$2.4M_{\odot}$	$2.0M_{\odot}$

# 新たな多様性

## SN 2009dc との類似性

	2003fg	2006gz	2007if	2009dc	2012dn	91T-like	Ia norm
High peak luminosity	✓	!✓"	✓	✓	✗	!✓"	✗
Slow light-curve decline	✓	✓	✓	✓	!✓"	!✓"	✗
No second <i>I</i> -band maximum	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Sudden light-curve drop	?	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Low ejecta velocities	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗
Strong and persistent C II lines	!✓"	!✓"	✓	✓	✓	✗	✗
High early-time UV flux	?	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Weak early-time Ca II lines	?	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Low ionisation in nebular spectra	?	✓	✓	✓	✓	✗	✗
09dc-likeness	(90%)	78%	89%	100%	72%	44%	0%

21zny



Taubenberger et al. 2019

SN 2006gz / SN 2012dn に類似？

SN 2012dn で見られたような赤外超過は見られなかった

SN 2009dc が規格外に特異？

# Ia-SC の親星

~~無回転白色矮星  
+  
伴星~~

**降着**

明るさを説明  
できない！

**高速**回転白色矮星

白色矮星同士の合体

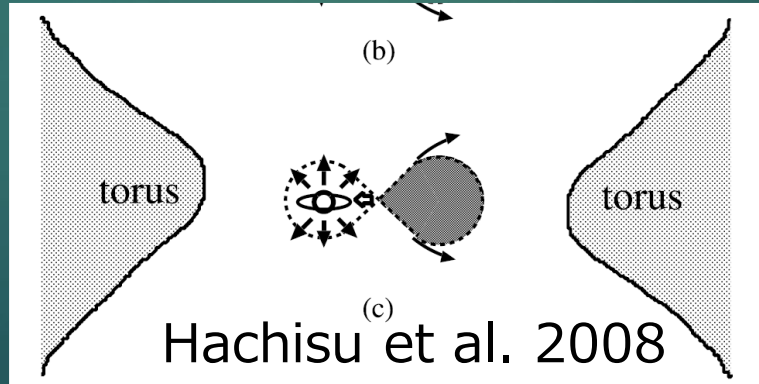
**合体**



※ 星周物質の存在を説明  
しなければならない



**降着**



# まとめ

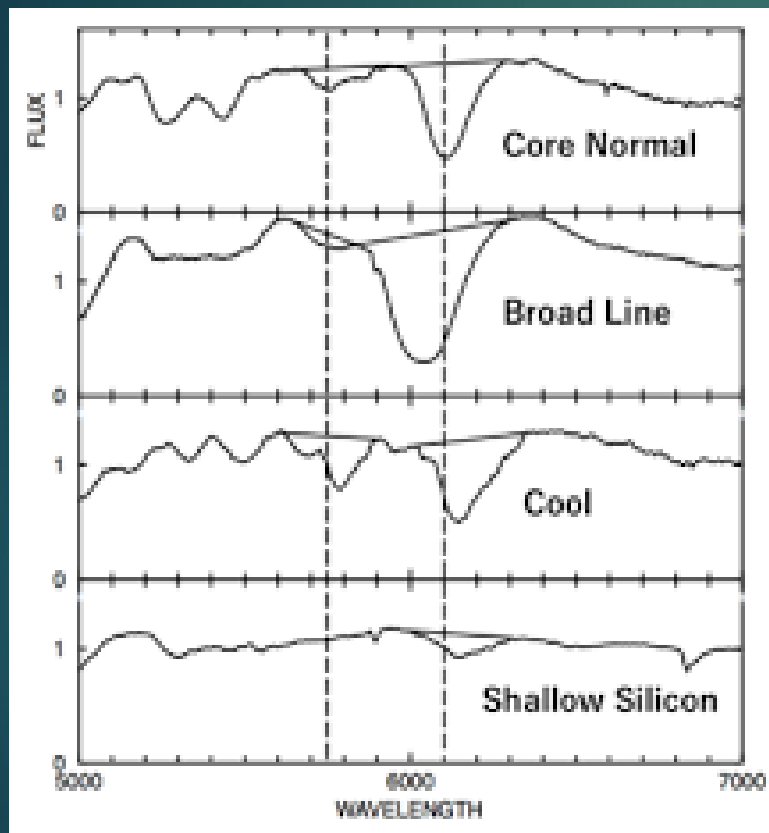
- ・近年のサーベイ観測の急発展で、超新星が暗く増光する段階から発見されるように
- ・ SN 2021zny: 強い炭素の吸収線を持つスーパーチャンドラセカール超新星
- (・ SN 2020qxp: 多面性 (HV+faint) を持つIa型超新星。)
- ・ 高頻度広視野サーベイがもたらす2つの利点
  - 低い頻度の現象・新たな多様性の発見
  - 超早期観測から親星・爆発モデルへの制限

# バックアップスライド

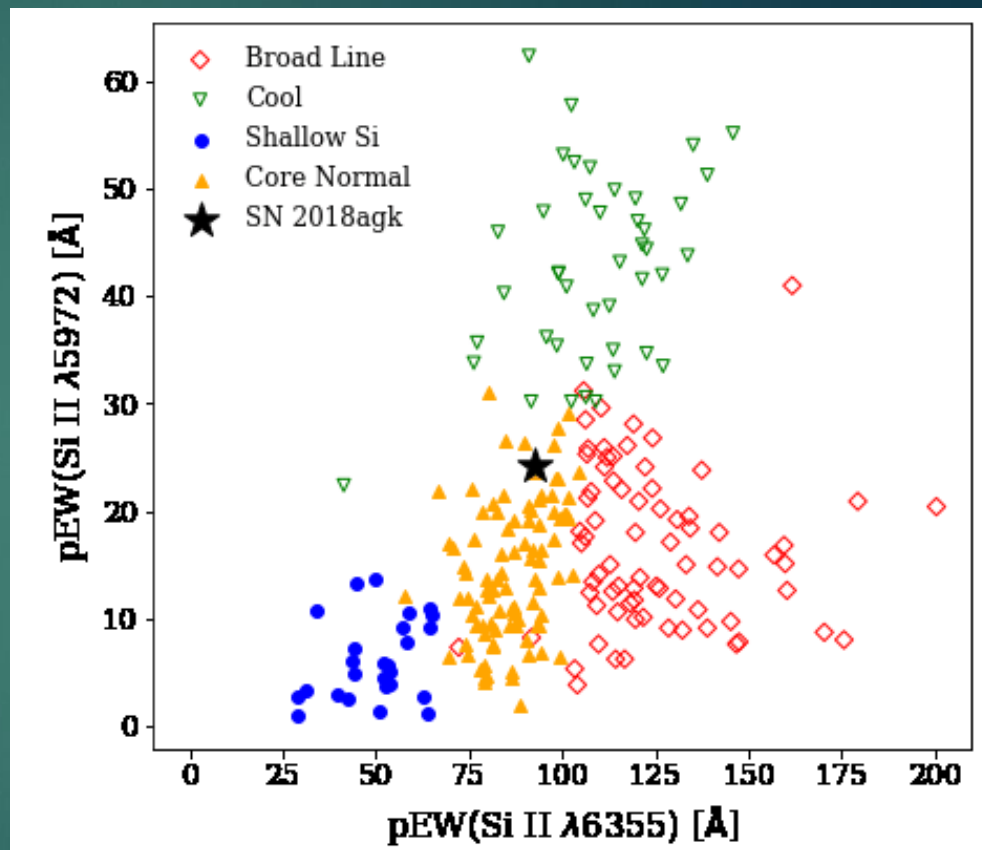


# Type Ia SNe: スペクトルによるサブクラス分類

SiII5972 SiII6355



Equivalent width のプロット



Branch et al. 2006, 2007, 2008

Wang, Q. et al. 2021

# SN 2020qxp: 近傍銀河に出現した subluminous SN Ia?



# スペクトル：暗いIa型超新星に一致

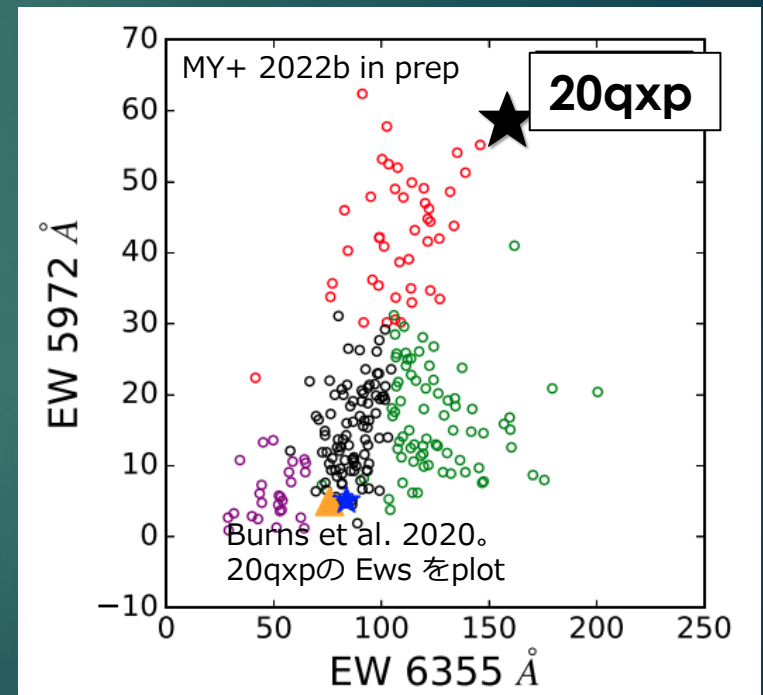
SII5972 の強い吸収線  
-> とても暗いIa型を示唆  
SII 6355 も強い  
-> 膨張速度の大きいIa型

他にも

OI 7774 強い

MgII 4560A 強い

-> consistent with the faint (cool) subclass



# 光度、減光速度：中間的

MY+ 2022b in prep

光度曲線：  
やや暗いピーク光度  
減光速度もやや暗いIa型に一致

多面性を持つIa型超新星