

大学・アマチュア連携 による近傍超新星の フォローアップ観測

山中雅之 (鹿児島大学)

Yamanaka, Fujii, & Nagayama 2023, PASJ (Letters) を中心に

新天体搜索者会議 @ 倉敷科学センター、2024年11月16-17日

鹿児島大学 入来観測所



VERA 20m



1m

鹿児島大学 1 m
光赤外線望遠鏡

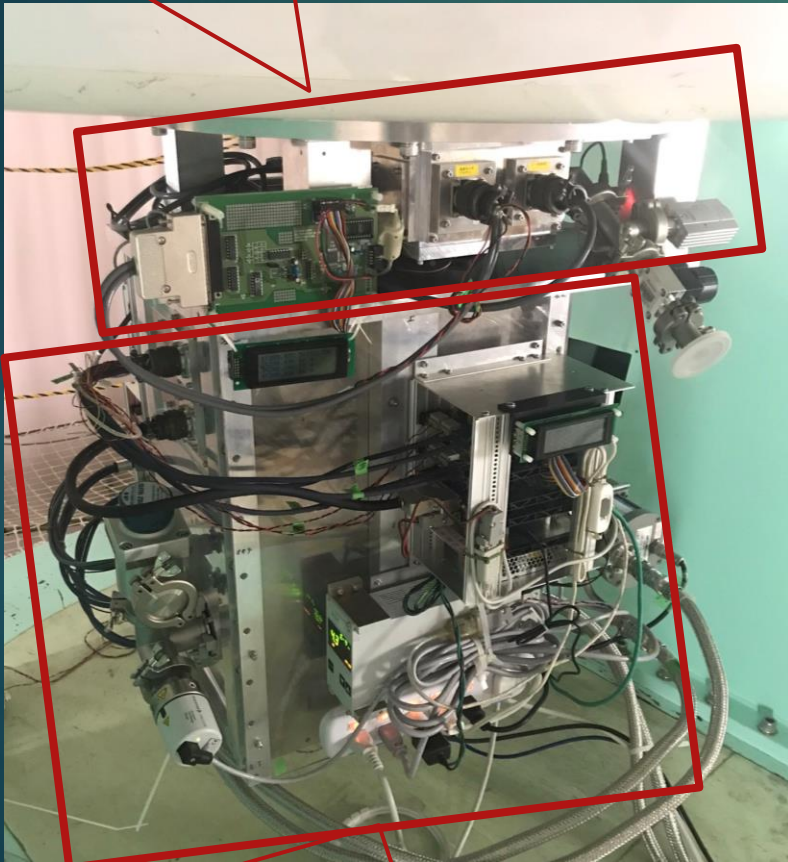


車で40分

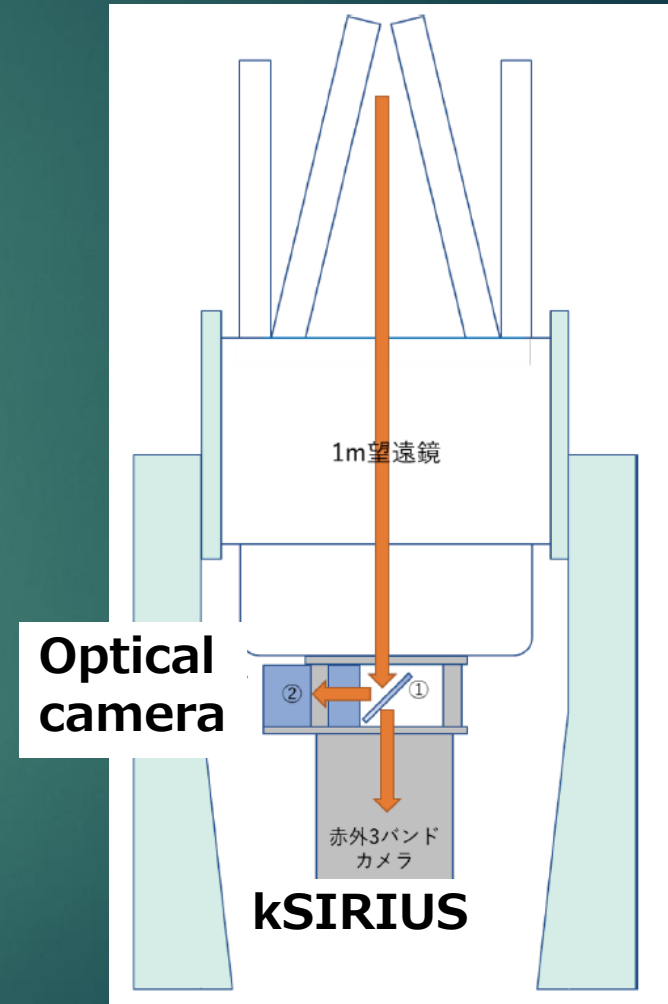
観測：
学生による
当番制

新開発 5 バンド同時撮像システム

Optical 2-band camera

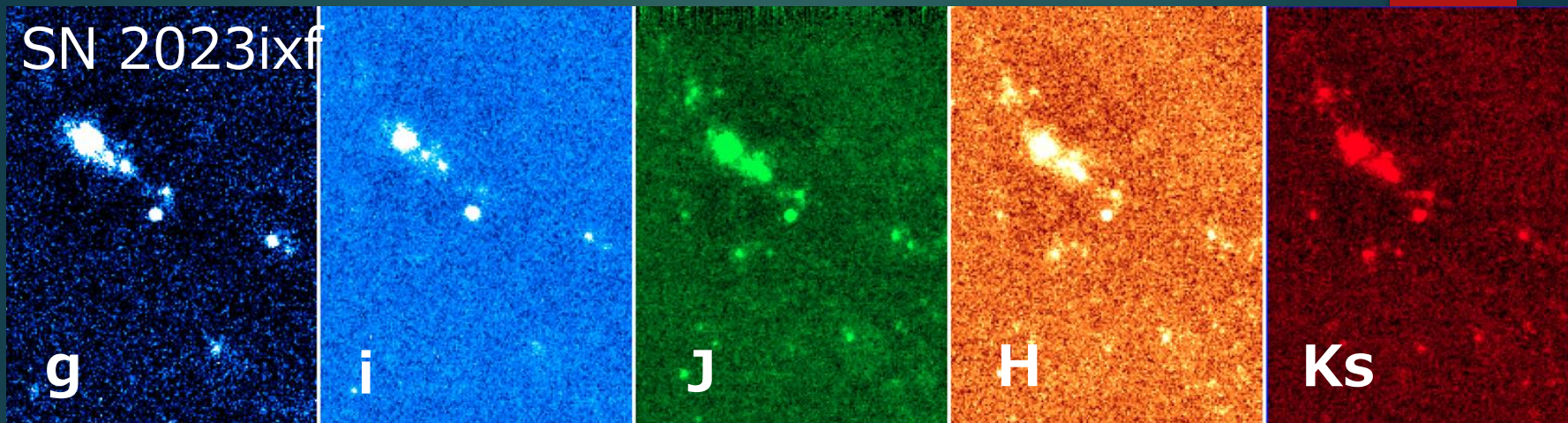


kSIRIUS: NIR 3-band camera



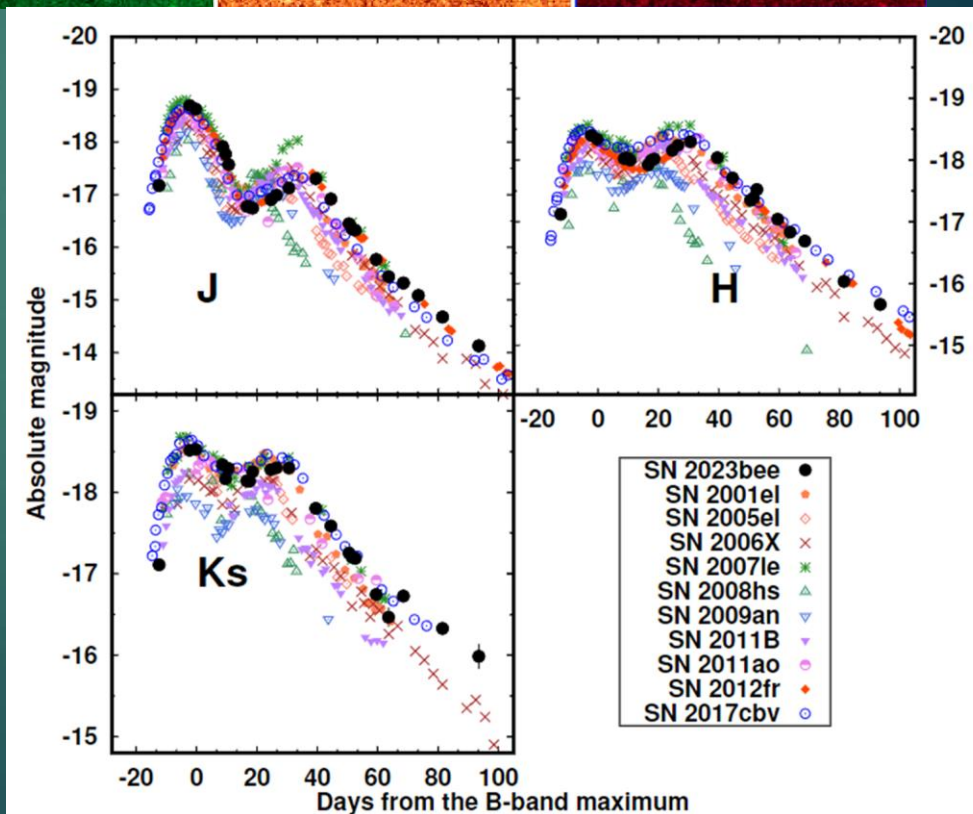
学部生・大学院生が開発

5バンド同時撮像



今年1月24日に5バンド
同時撮像モードで観測

去年2月～5月に取得した
Ia型超新星 SN2023bee
J, H, Ks 3バンド光度曲線



前原さんからの依頼内容（抜粋）



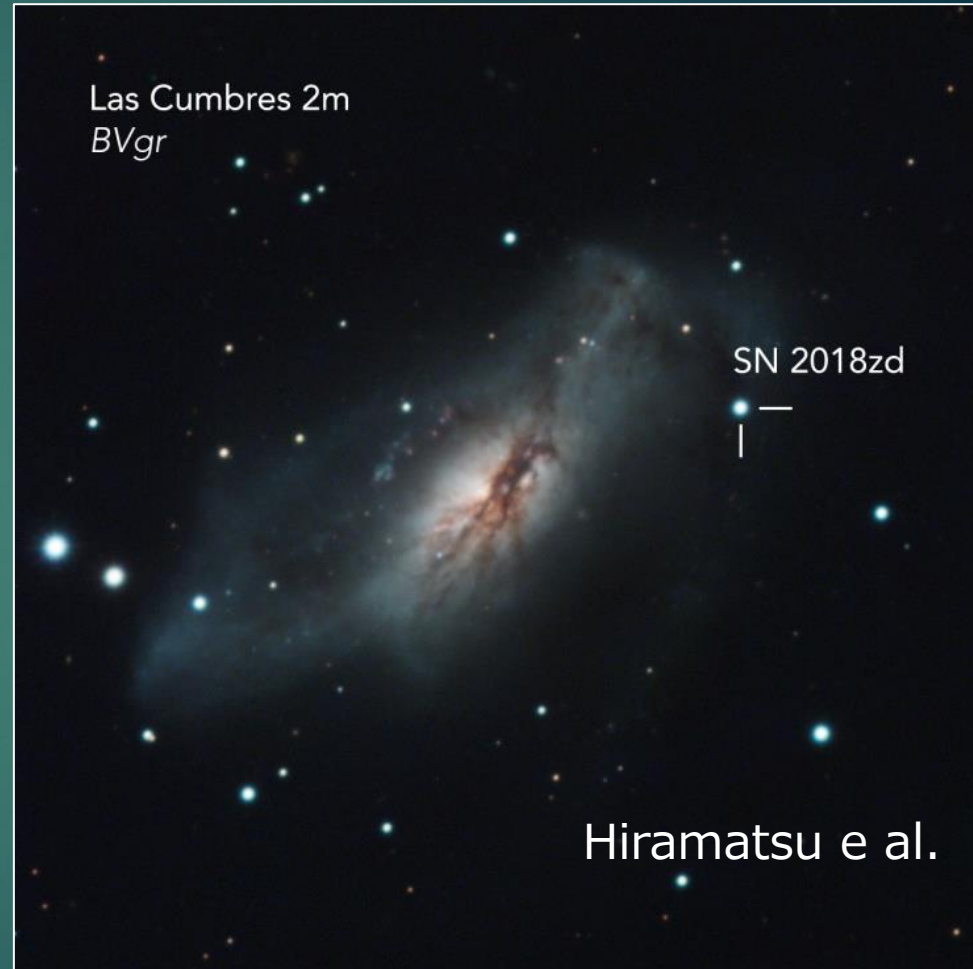
- ▶ この会議は、新天体の搜索に興味のある**アマチュア**天文家と、各分野の**研究者**との**交流の場**となることを目的
- ▶ 新天体の観測的研究から**どのような新しい科学的知見**が得られるのか
- ▶ **SN 2023ixfの早期分光**の結果(Yamanaka+2023)
- ▶ **超新星**の早期分光によるサイエンスや
- ▶ 新天体の搜索や追跡観測に興味にある**アマチュアに期待すること**

超新星とは

- ・ 星が進化し一生の最期に起こす大爆発現象 (鉄コア崩壊 or 白色矮星熱核暴走)

- ・ 銀河1つに匹敵する程明るく、空に新しく星が現れたように見える

- ・ 典型的な超新星では 10^{51} erg 程度の爆発エネルギーで膨張



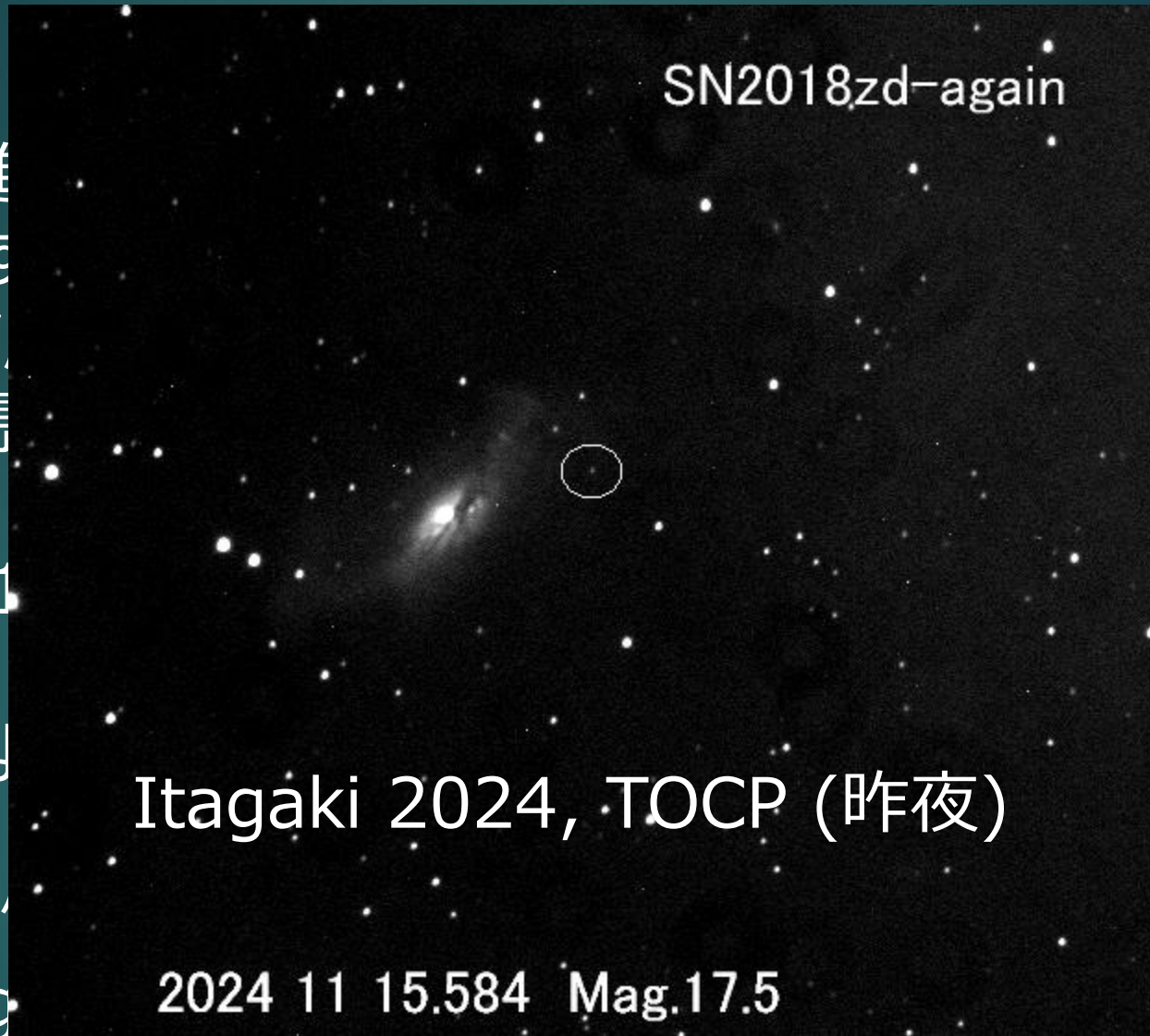
超新星とは

- ・ 星が進化の最終段階で起こる爆発 (鉄コアの崩壊による星熱核暴走)

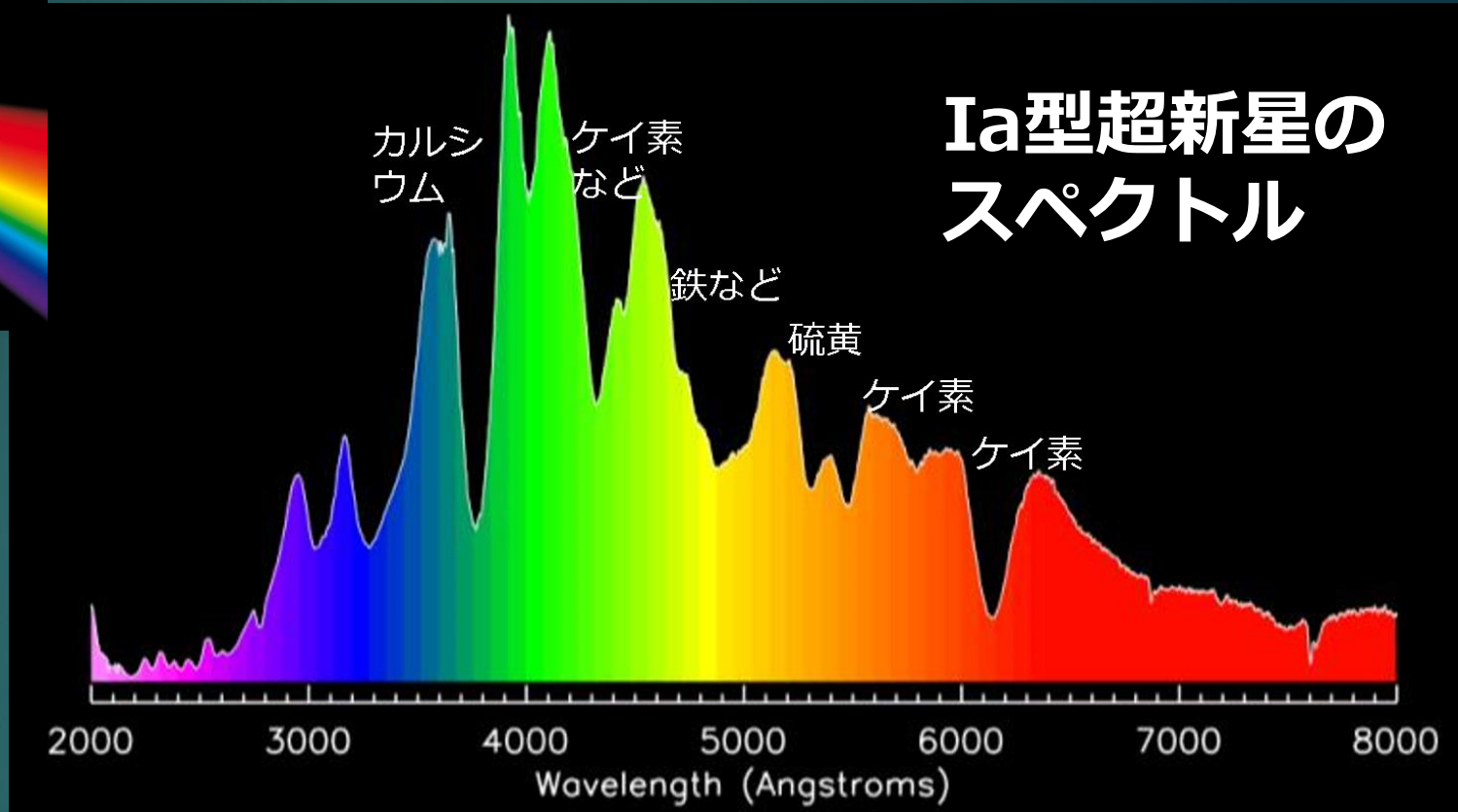
- ・ 銀河100個分に1個程度明るく、現れた。

- ・ 典型的なエネルギー 10^{51} erg

ルギーで膨張



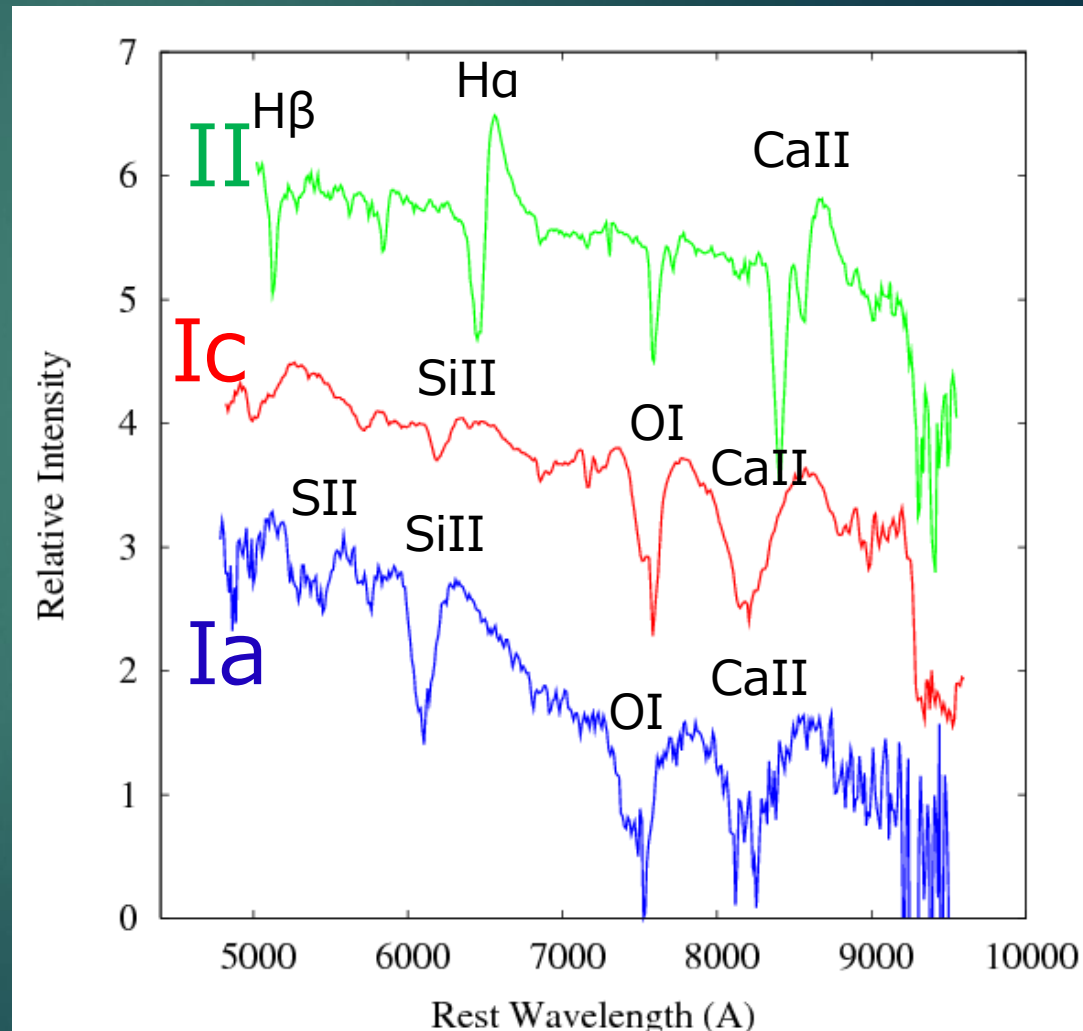
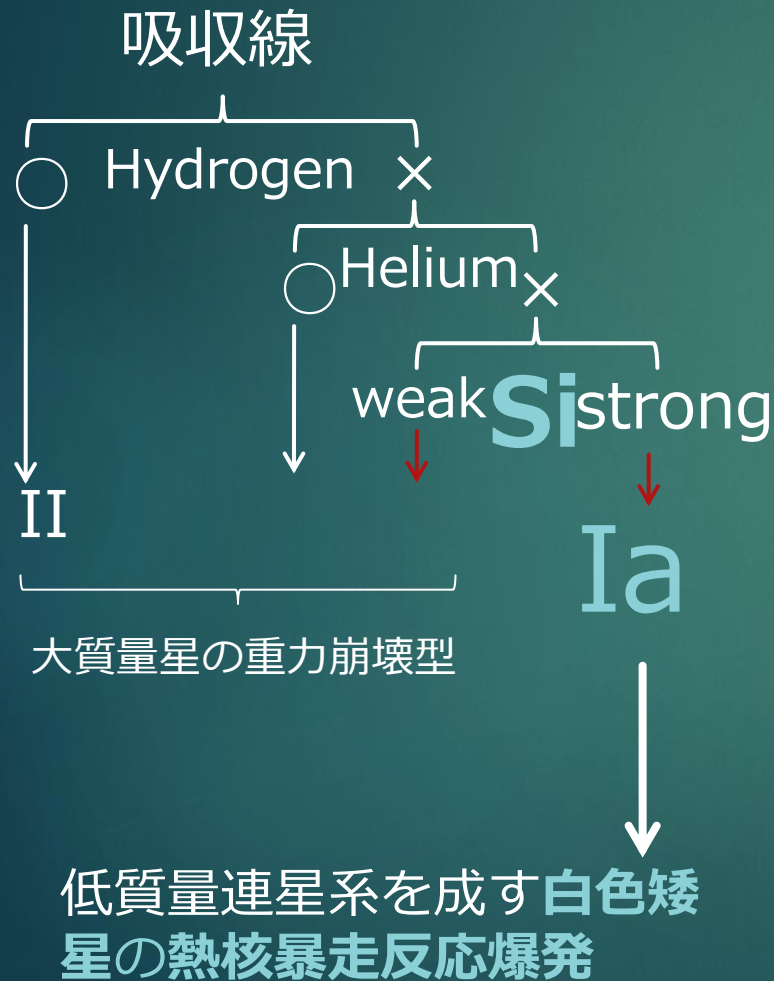
分光データ（スペクトル）で診断



超新星の分類と爆発メカニズム

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)

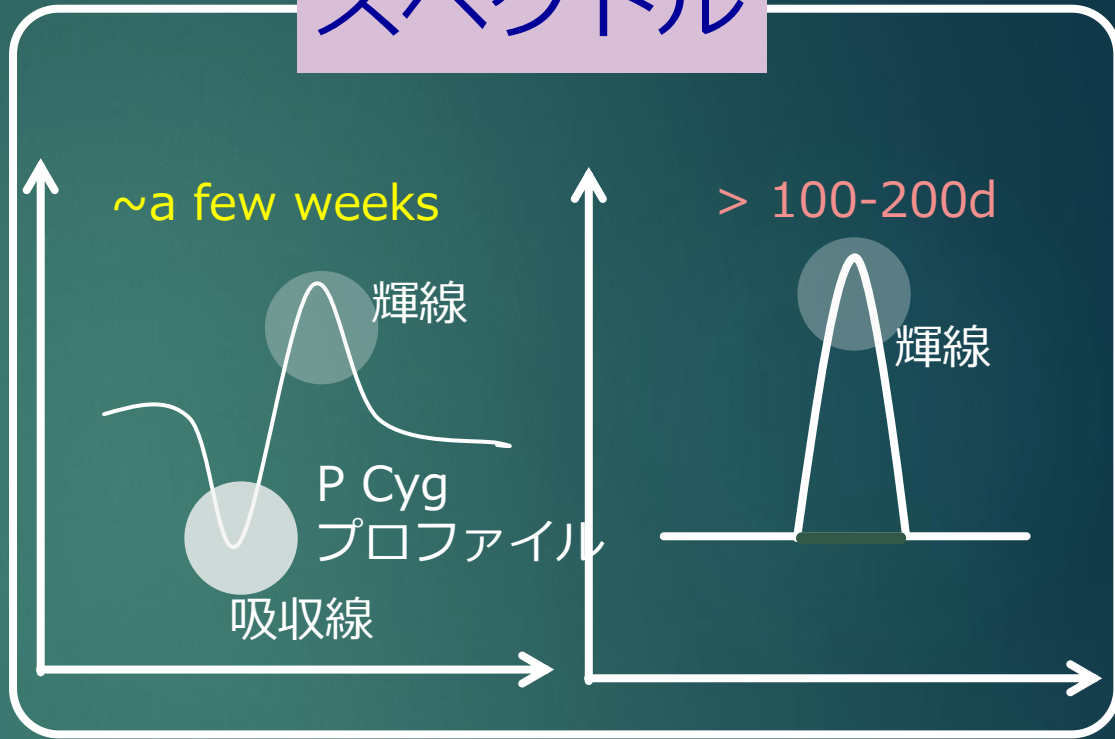


スペクトルから膨張速度を推定する

スペクトル

光学的に薄い

光学的に
厚い



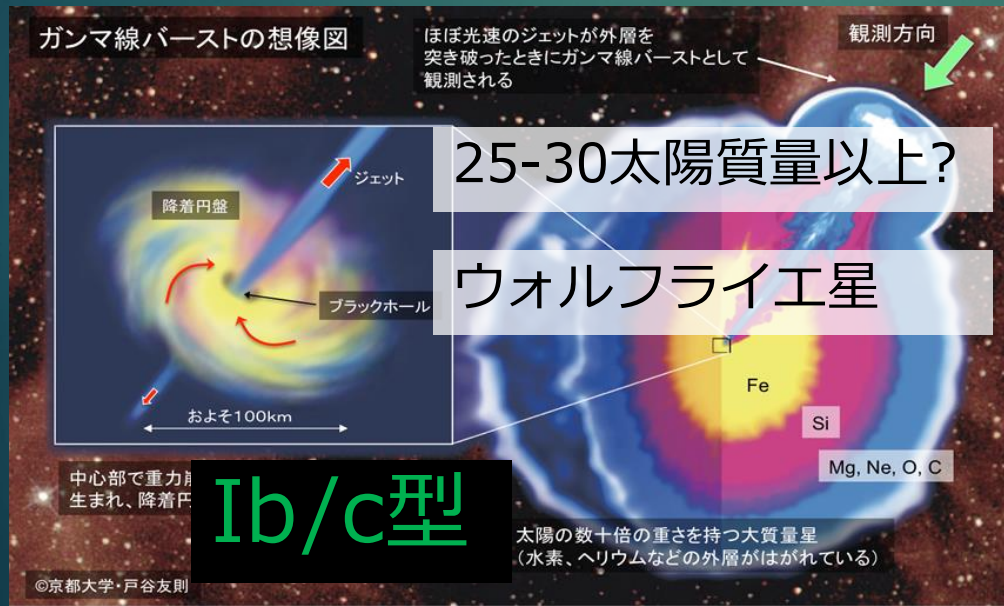
ガス膨張 -> 時々刻々と内部構造が見える
各々の層での速度や組成を調査
⇒ 爆発構造への制限

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

超新星の多様性は親星を反映



直接証拠アリ



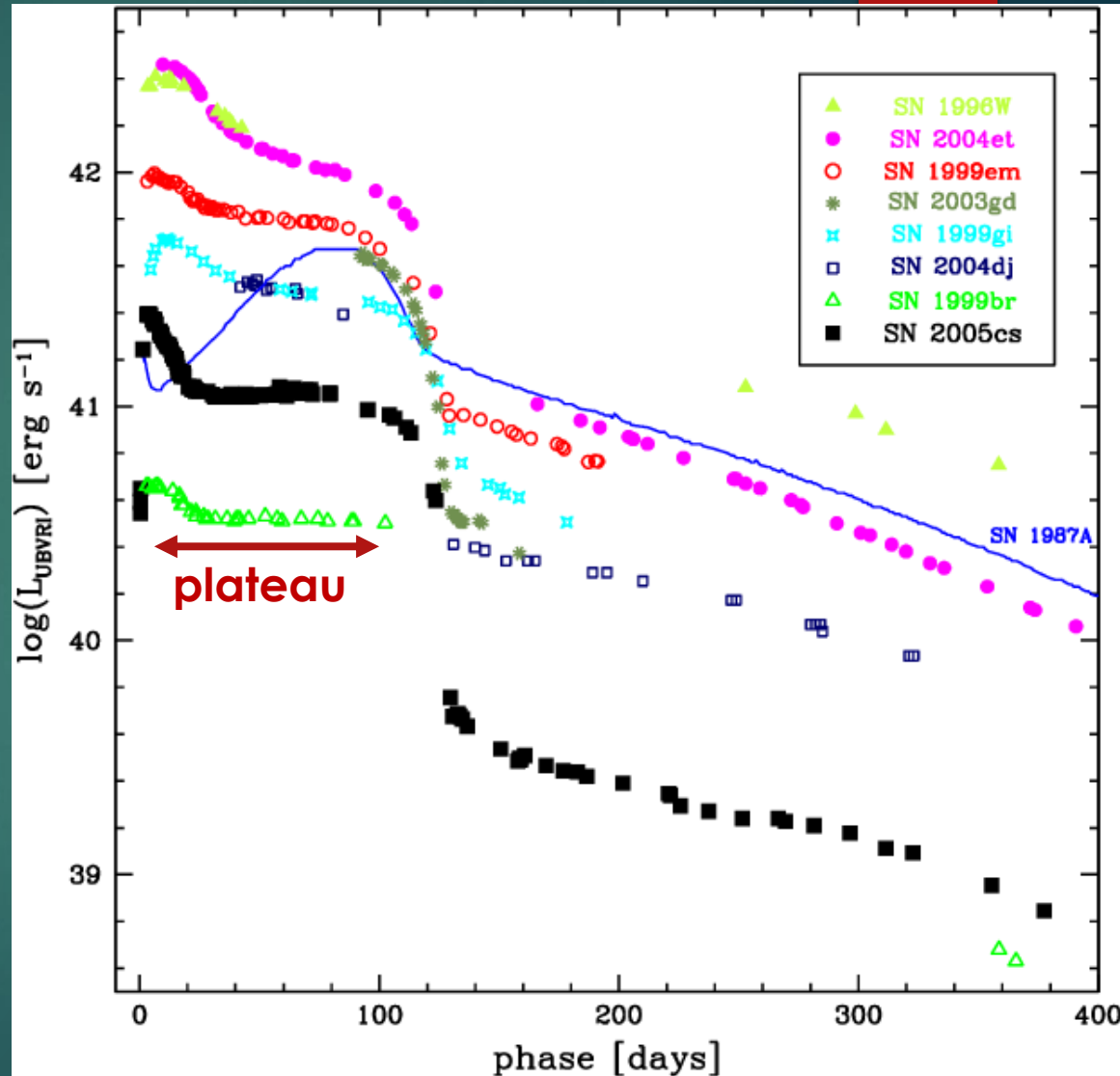
状況証拠のみ



(想像図) 状況証拠のみ

IIP/IIIL 型超新星

- ・スペクトルの上で、水素の吸収線を示す
- ・親星は赤色超巨星とよくわかっている（後述）
- ・"P"はplateauの頭文字。光度が平坦な時期が80-120日程度続く
- ・重力崩壊型のうち6割を占める（Li et al. 2011）
- ・光度の大きな天体である程、プラトー期の傾きが大きいことが知られている（Anderson et al. 2014）

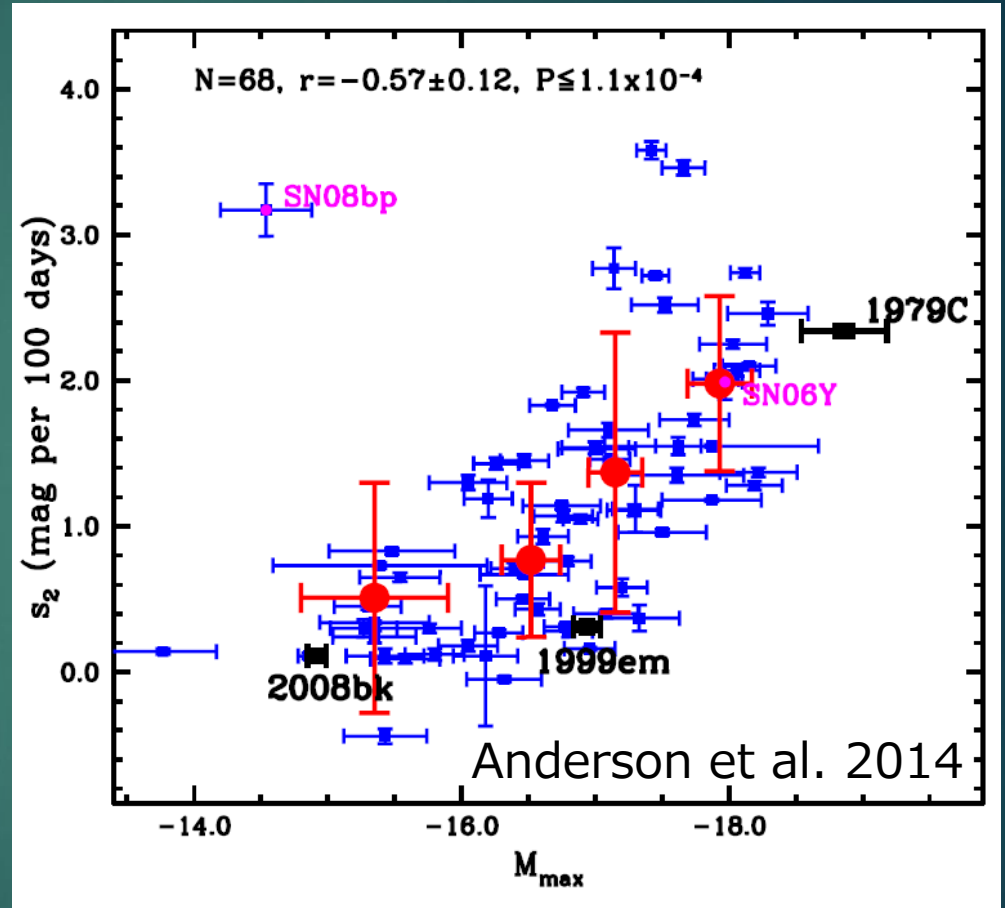


Pastorello et al. 2009

IIP/II L 型超新星

- ・スペクトルの上で、水素の吸収線を示す
- ・親星は赤色超巨星とよくわかっている（後述）
- ・"P"はplateauの頭文字。光度が平坦な時期が80-120日程度続く
- ・重力崩壊型のうち6割を占める（Li et al. 2011）
- ・光度の大きな天体である程、プラトー期の傾きが大きいことが知られている（Anderson et al. 2014）

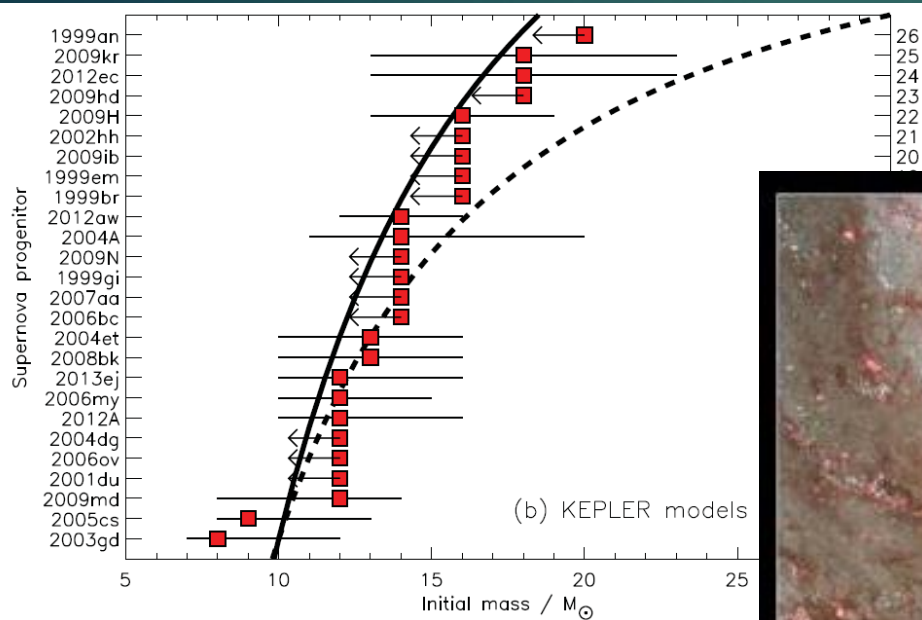
プラトー期の傾き



極大絶対等級

親星：赤色超巨星とよく知られている

★ 親星：爆発する元の星



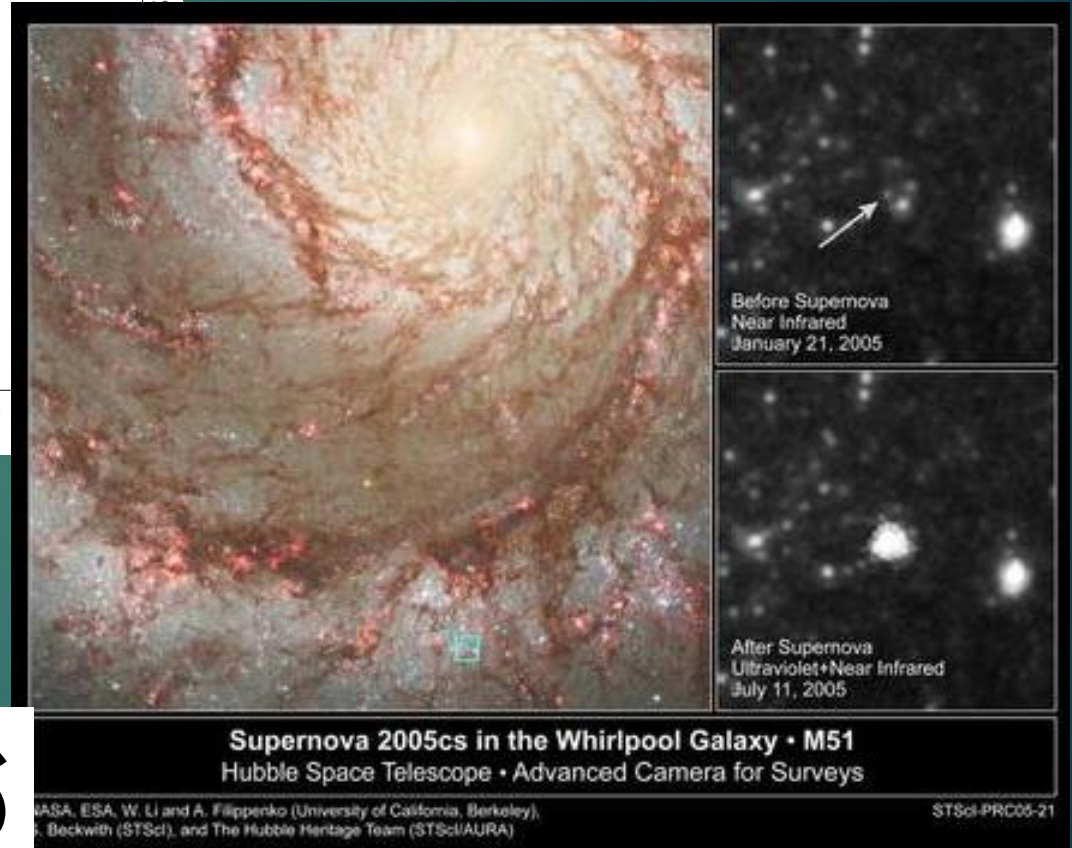
II型超新星

質量8-20太陽質量

Smartt et al. 2015

未解決問題

⇒ 20 $M_{\odot}$ 以上の星、
どこへ？(別の話題)

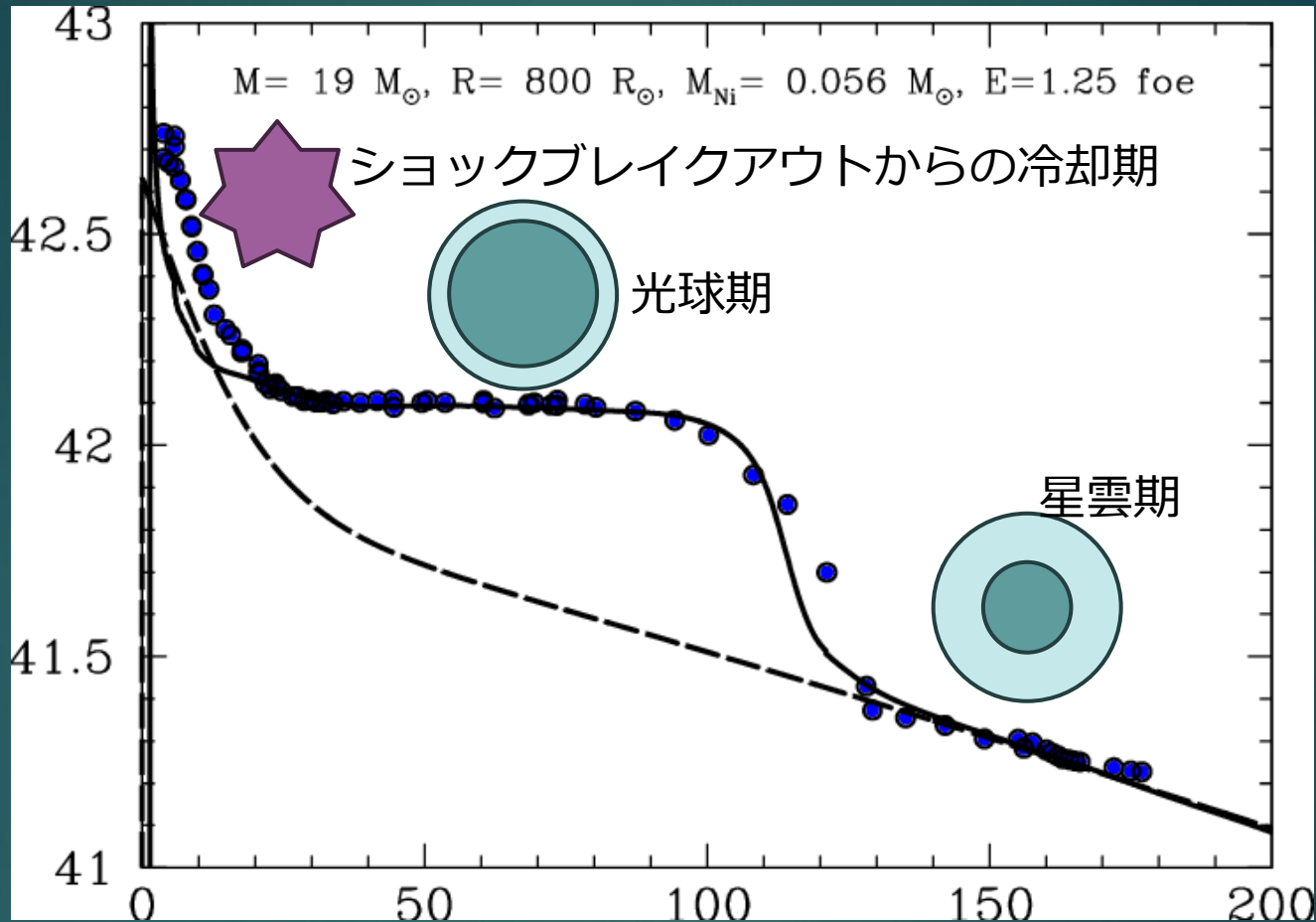


ハッブル宇宙望遠鏡による近傍銀河アーカイブ
データで見つかった

IIP型超新星の光度曲線からわかる物理量

総輻射光度 (明るさ)

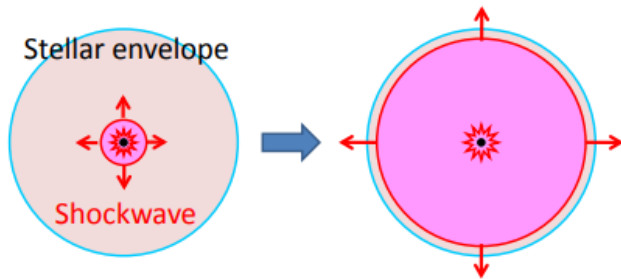
$\text{Log}10(L_{\text{bol}}) \text{ (erg/s)}$



推定爆発日からの日数

ショックブレイクアウトとは

Shock breakoutとは？



超新星爆発内部で形成された衝撃波は星表面から現れる際に軟X線や紫外線で光を放射する。この現象を“**shock breakout**”と呼ぶ。

国立天文台 富永さんスライドより

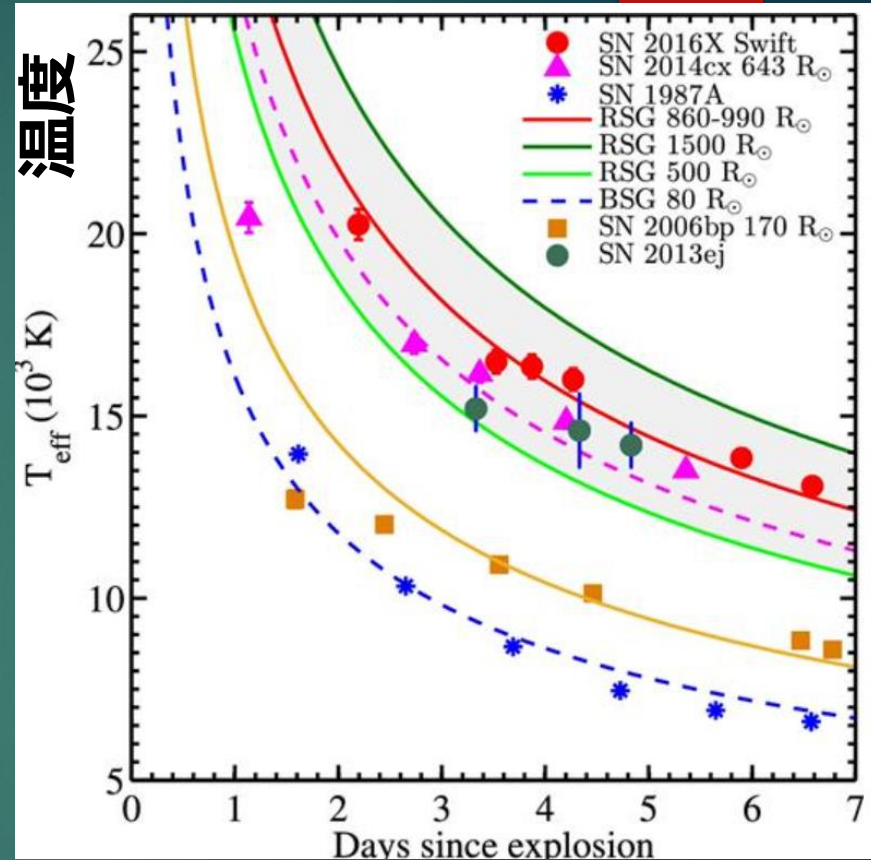
Tips

軟X線 可視光の100倍程度のエネルギー

紫外線 可視光の数～10倍程度のエネルギー

現状、時間スケールが速すぎて
有意な観測例はほとんどない
-> なので、冷却期の可視光データから推定することがよくある

未解決問題



$$T_{\text{ph}}(t) = 1.6 f_{\rho}^{-0.037} \frac{E_{51}^{0.027} R_{*,13}^{1/4}}{(M/M_{\odot})^{0.054} \kappa_{0.34}^{0.28}} t_5^{-0.45} \text{ eV},$$

Huang et al. 2018

未解決問題：爆発直前の活動性

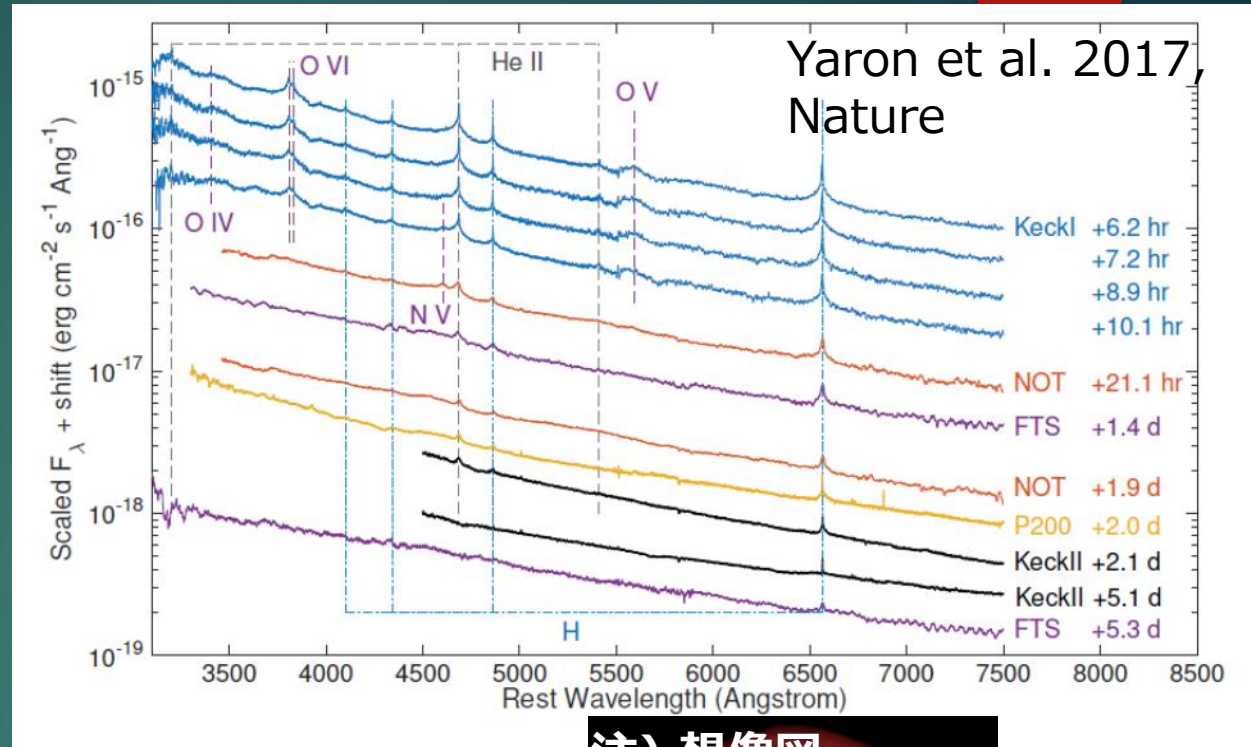
近年、ごく初期の分光観測から超新星の周りに豊富な星周ガスの存在が明らかに (Yaron et al. 2017, Nature)



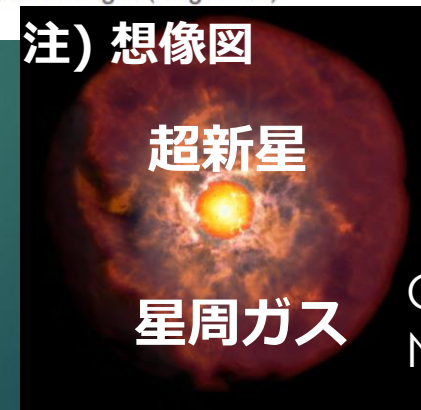
星からのガス噴出の直後に超新星爆発？



爆発直前の星の進化理論に影響



注) 想像図



Moriya+
Credit:
NAOJ

これまで、このような初期の分光観測では4-8メートルの大口径望遠鏡が活躍：観測時間が限られ迅速な観測はまだ少ない。

SN 2023ixf in M101

今年5月19日にアマチュアの板垣公一氏が発見

5月24日に10.8等まで増光
(Fowler et al.)

一方、我々鹿児島大学は岡山のアマチュア天文家藤井貢さんとタッグを組み、共同体制で観測を開始

見かけの等級では**21世紀以降で最も明るい重力崩壊型超新星(Ia型2011fe が10.0等)**

Credit: International Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA

SN 2023ixf

- ・ 2023年5月19日に板垣公一氏によって発見
- ・ マルチメッセンジャー・多波長・大規模サーベイ時代に出現した10等台に到達した超近傍超新星。
- ・ この1年半で46編（+数編受理・投稿済文献）もの査読論文が出版。電波、赤外、可視、紫外、X線、ガンマ線など幅広い波長や重力波やニュートリノなどで追観測・追検証がなされ、多様な物理現象に制限が与えられた。
- ・ 親星時代の周期的光度変動が近赤外線アーカイブデータから検出。ただし爆発的噴出現象は見つかっていない（Jencson et al. 他）
- ・ 親星の初期質量は未決着（10-20太陽質量の幅広い範囲; Ferrari et al., L Pledger & Shara, Kilpatrick et al., Soraisam et al.他）。ただし最終質量は10-13太陽質量程度。より重いシナリオなら爆発直前の活動で外層のかなりの部分を失った？（Hiramatsu et al., Bersten et al. 他）
- ・ 短期間での非常に大きな質量損失を経験？（ 10^{-4} - $10^{-2} M_{\odot}$ ）
- ・ 偏光観測から極めて複雑な星周構造が示唆（Singh et al. 他）
- ・ 連星進化？

全ての文献はADSで検索お願いします

有名な“超”近傍超新星



NAOJ/むりかぶし
Credit:NAOJ

Credits: KPNO, NSF's NOIRLab, AURA, Alyssa Pagan (STScI)

SN	タイプ	母銀河	距離
SN 1987A	II-pec	大マゼラン	50kpc
SN 1993J	IIb	M81	3.7Mpc
SN 2004et	IIP	NGC 6946	7.7Mpc
SN 2011fe	Ia	M101	6.4Mpc
SN 2014J	Ia	M82	3.7Mpc
SN 2017eaw	IIP	NGC 6946	7.7Mpc
SN 2023ixf	IIP/IIL	M101	6.4Mpc

SN 2023ixf のフォローアップ観測

鹿児島大学
1m望遠鏡/kSIRIUS

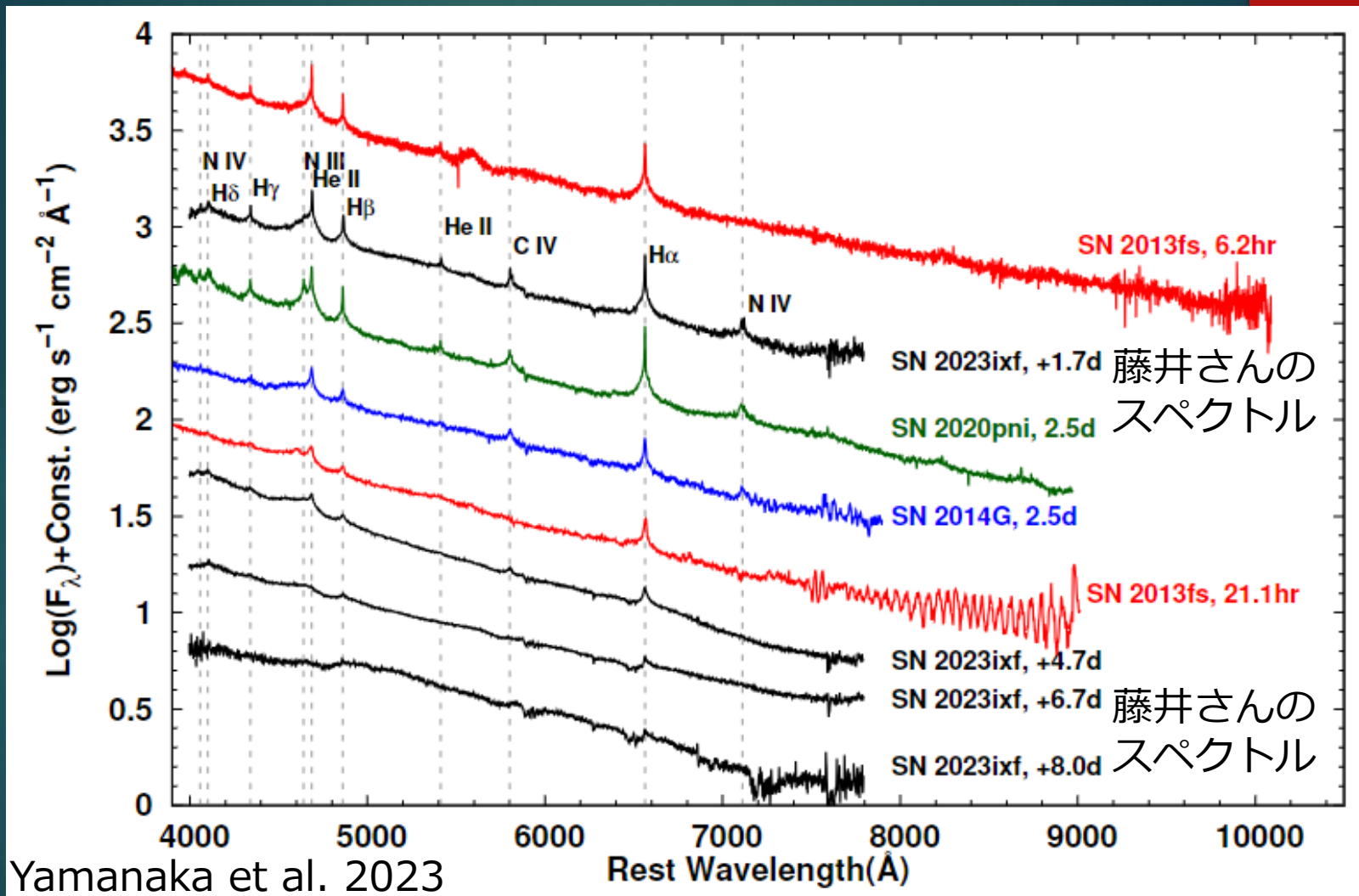


藤井黒崎観測所（岡山）
40cm+手作り分光器



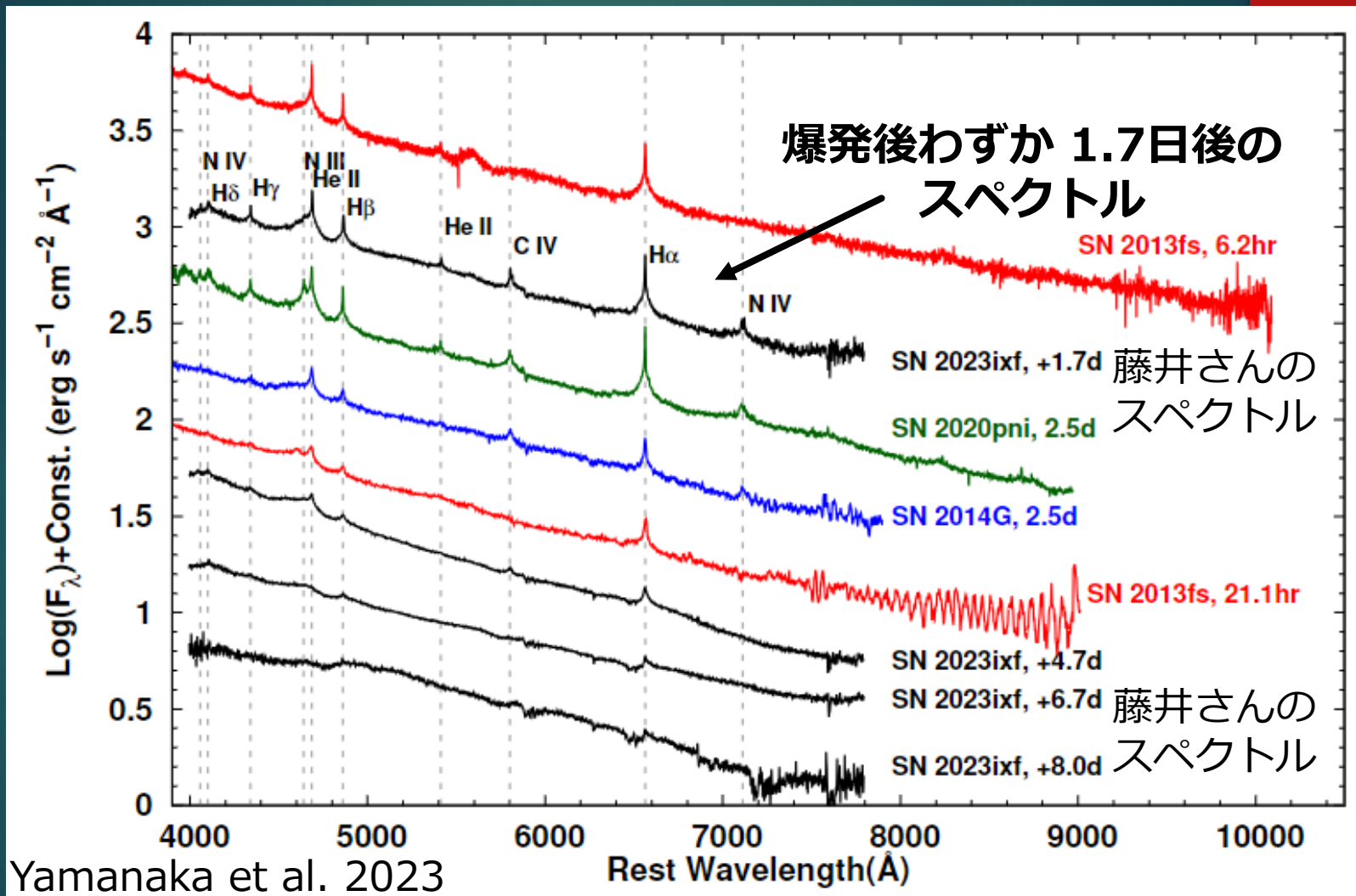
1m: JHKs band 撮像4夜
40cm: 分光観測 4夜

早期スペクトル進化と比較



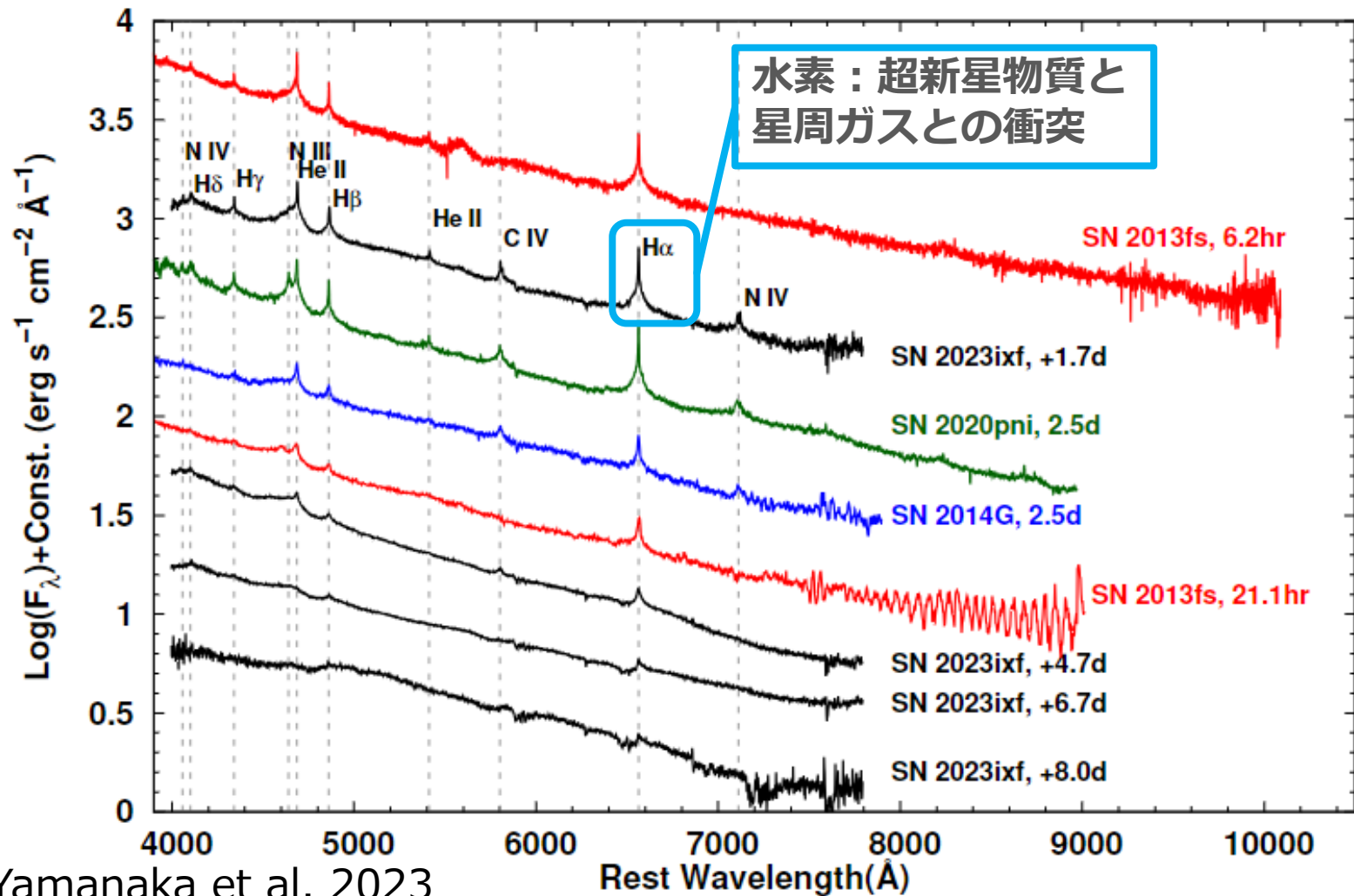
SN 2013fs (Keck, Yaron et al. 2017), SN 2020pni (Keck, Terreran et al. 2022), SN 2014G (1.22m, Terreran et al. 2016)

早期スペクトル進化と比較



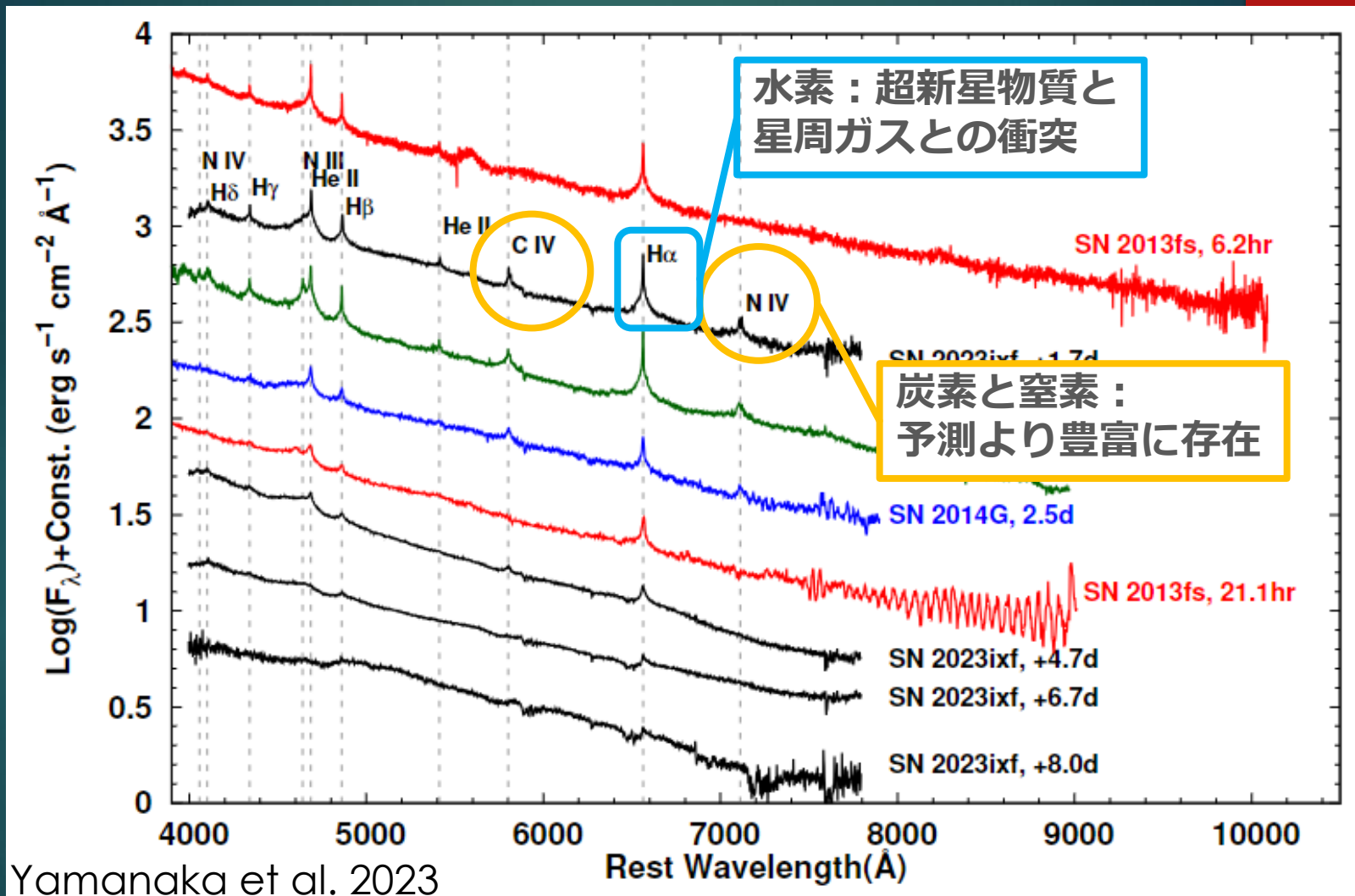
SN 2013fs (Keck, Yaron et al. 2017), SN 2020pni (Keck, Terreran et al. 2022), SN 2014G (1.22m, Terreran et al. 2016)

早期スペクトル進化と比較



Yamanaka et al. 2023

早期スペクトル進化と比較



超近傍超新星の早期観測で
小口径望遠鏡でも8mクラスのサイエンスを実現

衝突加熱 (shock) と 輻射電離 (flash)

噴出物質と星周ガス
の衝突加熱

星周
ガス

外層

光球

≧ 数日 ?

エジェクタと星周物質の直接衝突
-> 水素輝線

Shock breakout
からの強い輻射

星周
ガス

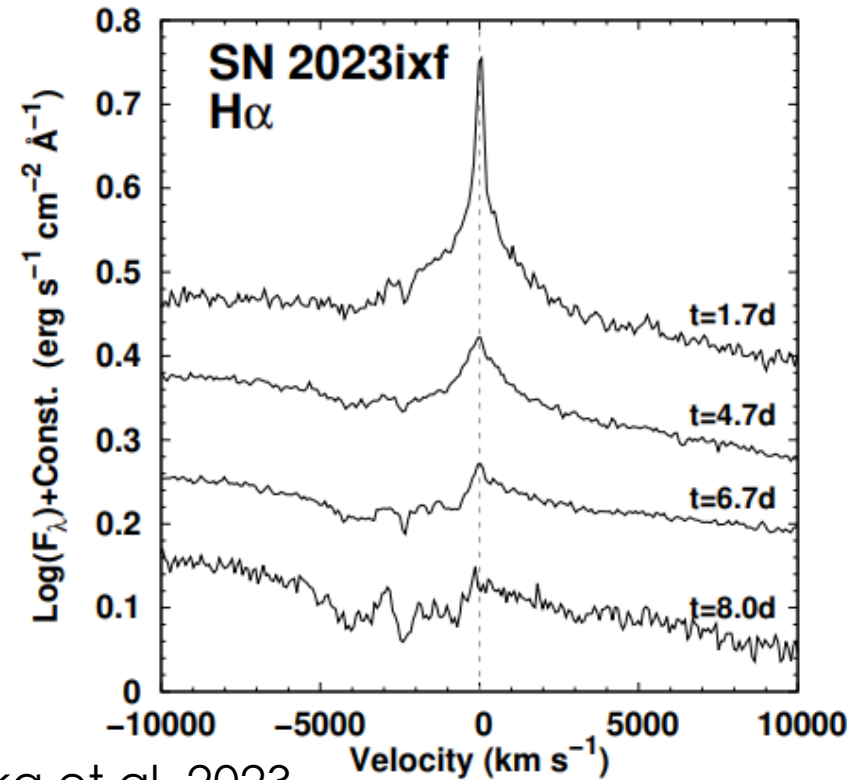
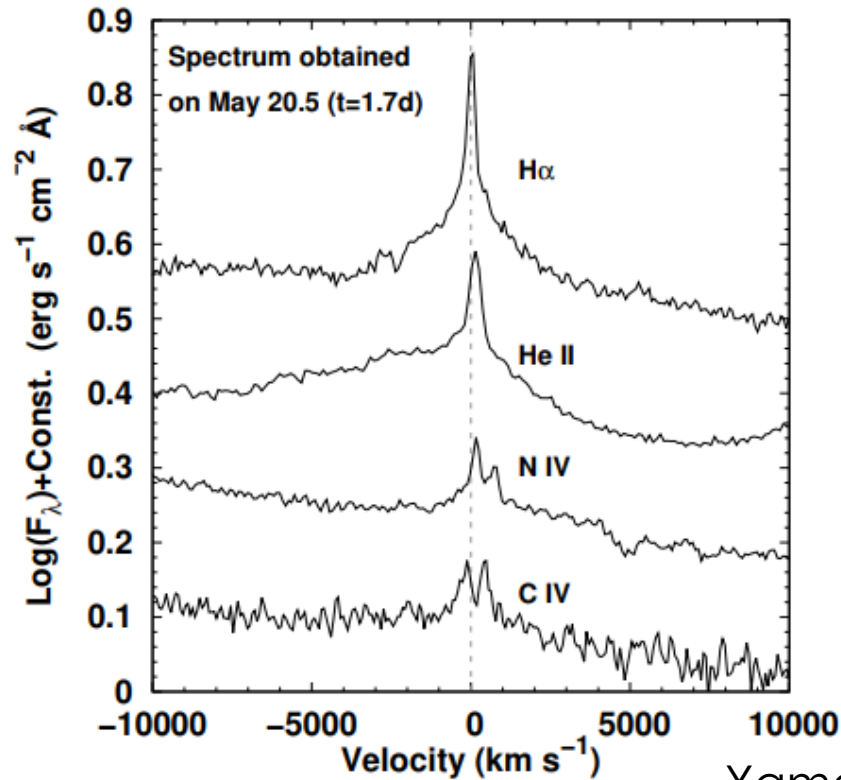
電離

〜数時間

超新星放射によるガスの電離
-> 水素・ヘリウム + 電離度の高い輝線

実際は、濃い星周環境では両者が起こることがしばしばあり、
Flash feature は数時間のtimescaleでdecay する一方でejecta-CSM
相互作用は長期間続く

ラインプロファイル拡大



Yamanaka et al. 2023

推定爆発から1.7日後

- Hアルファ：
narrow(<300km/s)+broad(~2200km/s)
- HeII, NIV, CIV はnarrow な成分のみ

Hアルファの進化

初期に強いemissionだったが後に弱くなり 8日後には見えなくなる？
Blue shift した複雑な吸収線は見える

注目すべき結果：CIVとNIVの輝線

星周ガス

超新星

Credit:
NAOJ

炭素と窒素：星周ガスに豊富に存在->どこから？

赤色超巨星時代に噴出

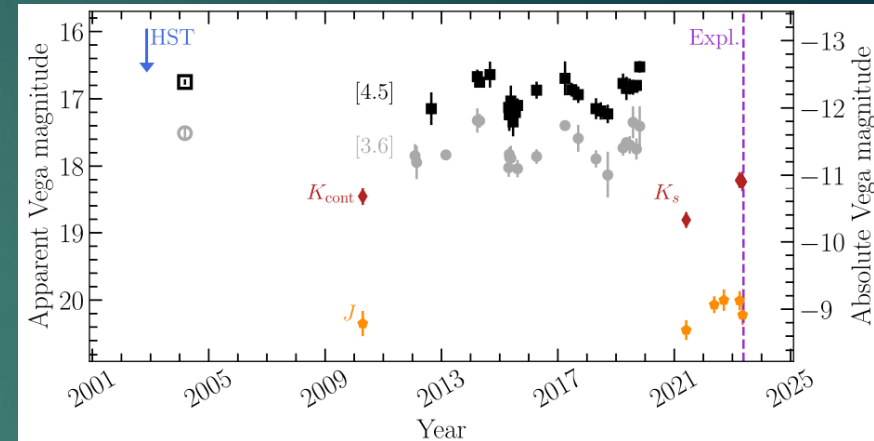
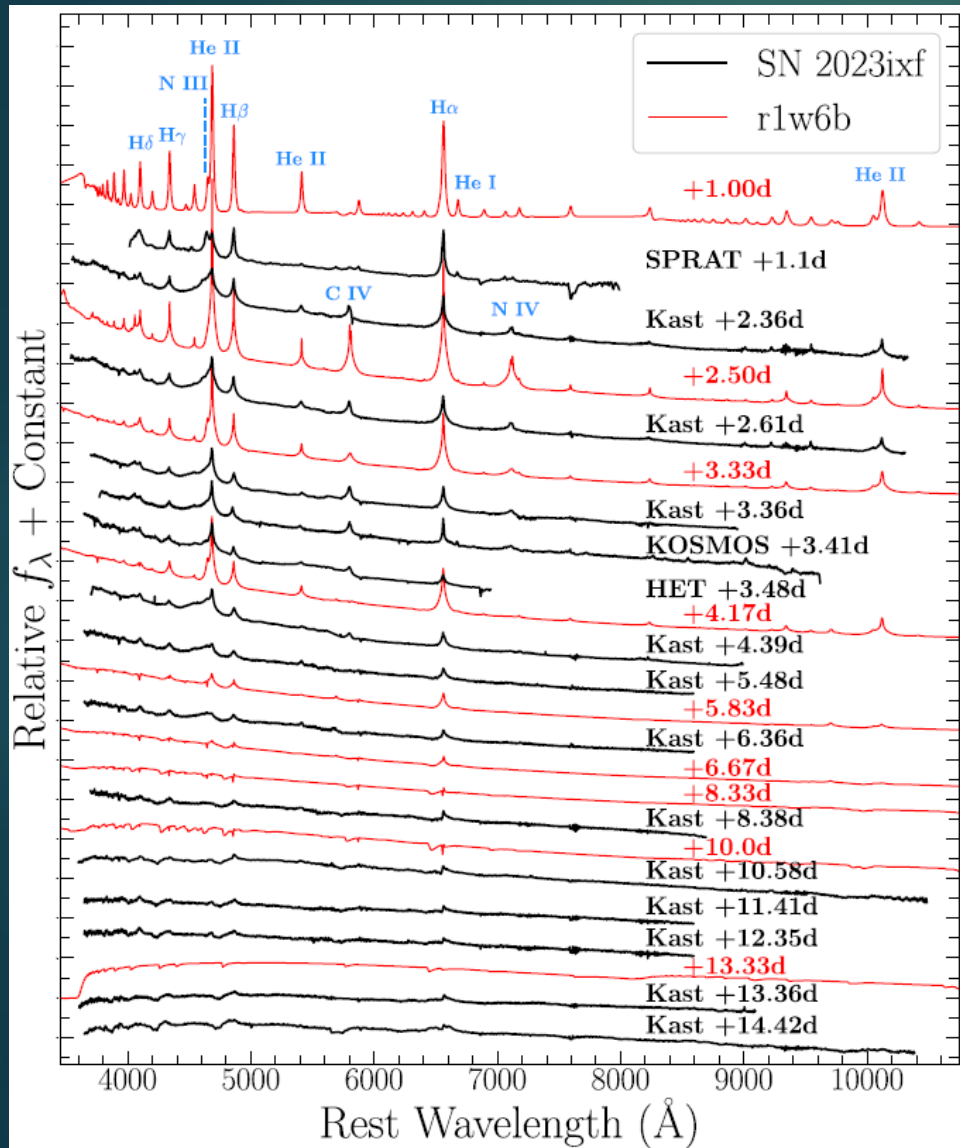
見られるものと見られないもの：
多様性？



私たちの近赤外線観測：
炭素と窒素がみられる超新星
(Terreran et al. 2022) と比較->光度が類似
共通の性質である可能性

世界に先駆けて論文を投稿/arXivに公開、その後受理
(Yamanaka, Fujii, & Nagayama 2023, PASJ)

比較的大質量の(??諸説あり)RSGが一時的な大質量損失イベントを経験？



$$M_{\text{init}} = 17 \pm 4 M_{\odot}$$

Spitzer IR photometry
(Jencson et al. 2023)

$$\dot{M} = 10^{-2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$R_{\text{CSM}} = 8 \times 10^{14} \text{ cm}$$

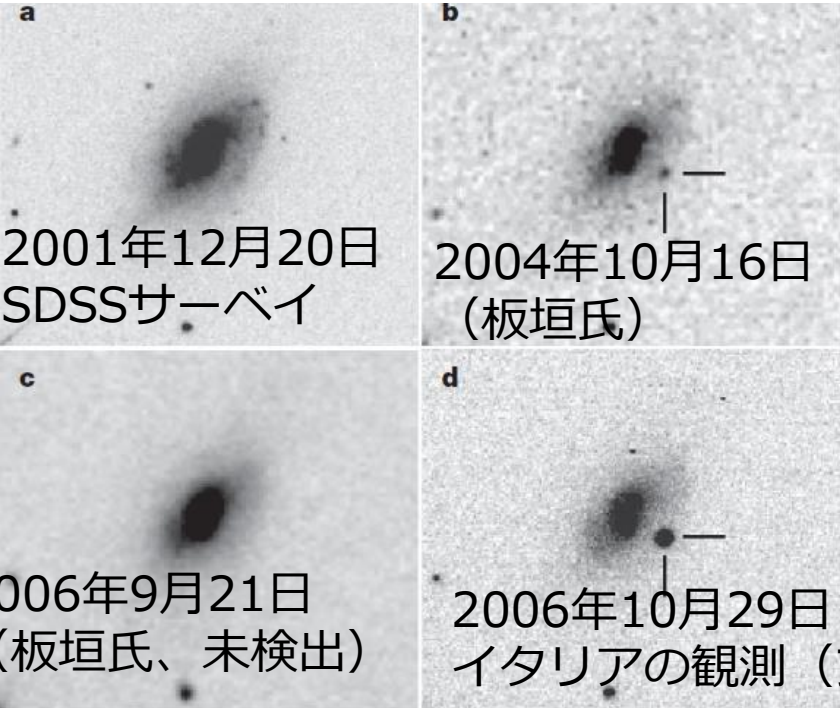
これまでで最も科学的インパクトのある板垣氏の発見

Vol 447 | 14 June 2007 | doi:10.1038/nature05825 nature

Ibn型 SN 2006jc LETTERS

A giant outburst two years before the core-collapse of a massive star

A. Pastorello¹, S. J. Smartt¹, S. Mattila¹, J. J. Eldridge¹, D. Young¹, K. Itagaki², H. Yamaoka³, H. Navasardyan⁴, S. Valenti^{5,6}, F. Patat⁵, I. Agnoletto^{4,7}, T. Augusteijn⁸, S. Benetti⁴, E. Cappellaro⁴, T. Boles⁹, J.-M. Bonnet-Bidaud¹⁰, M. T. Botticella¹¹, F. Bufano^{4,7}, C. Cao¹², J. Deng^{12,13}, M. Dennefeld¹⁴, N. Elias-Rosa^{4,15}, A. Harutyunyan^{4,7}, F. P. Keenan¹, T. Iijima¹⁶, V. Lorenzi¹⁷, P. A. Mazzali^{18,19}, X. Meng¹², S. Nakano²⁰, T. B. Nielsen⁸, J. V. Smoker¹, V. Stanishev²¹, M. Turatto⁴, D. Xu¹² & L. Zampieri⁴



- ・ 2007年6月発行のNature誌
- ・ 爆発の2年前に偶然に同じ位置に天体（当時は誤報扱いとされ、一時幻に）
- ・ 2年後リベンジの思いで超新星を発見
- ・ 水素が無く、ヘリウムの輝線が支配的なスペクトル（当時史上初）
- ・ 理論的には全く未解明なヘリウムガスの超新星前噴出（2024年現在未だ未解明）

Pastorello et al. 2007, Nature

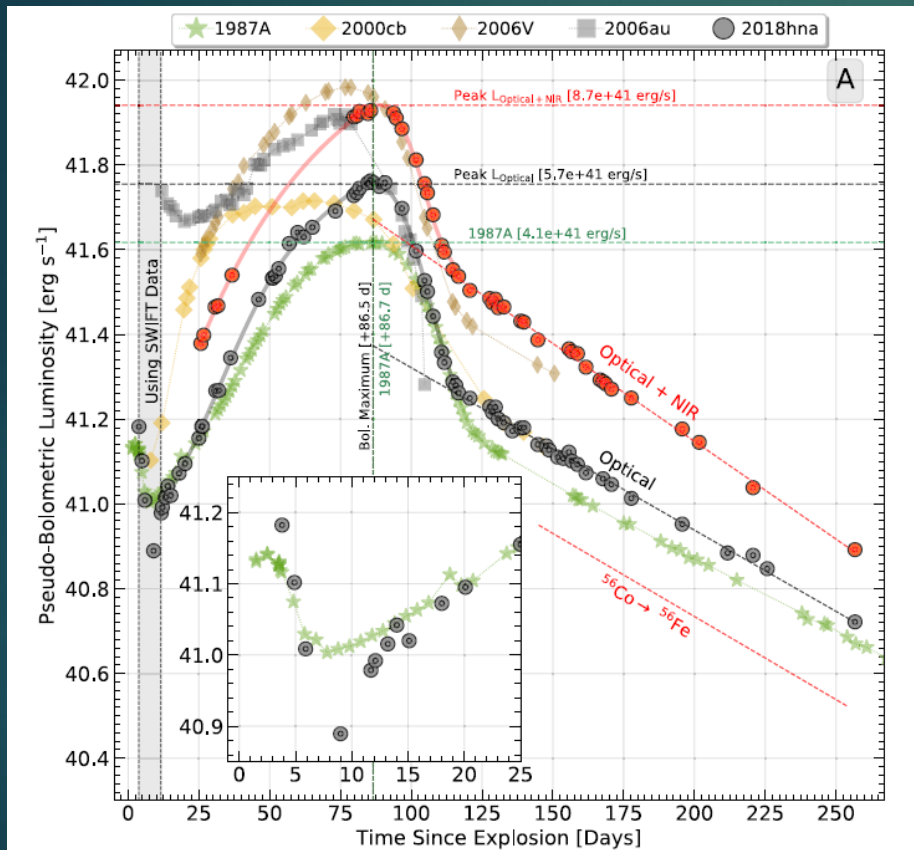
アマチュア天文家の方たちに 期待すること

- ・ ZTFやATLASといった全天サーベイグループが新天体発見に革命をもたらした
- ・ これにより、数時間スケールでの急激な増光が発見され、親星/爆発モデル/星周環境などに強い制限が与えられるようになった。
- ・ 同時に、増光曲線にも多様性が認められつつある
- ・ ある時刻の測光点の価値が高まっている。過去に取得した超新星の画像などは決して捨てないようにお願いします。
- ・ やはり、**より早期段階での発見**を！

まとめ

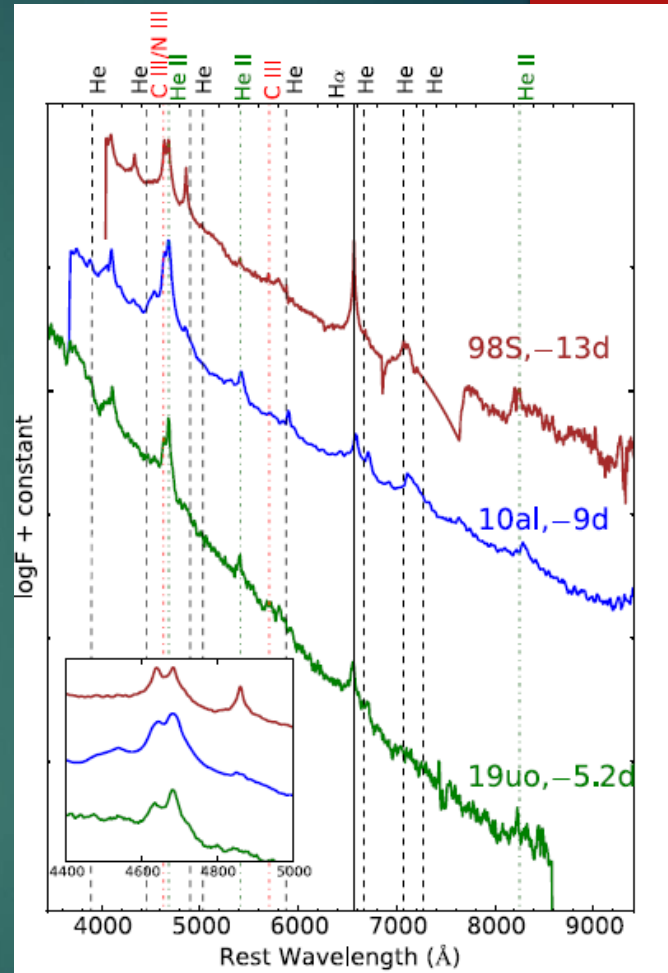
- ▶ スペクトルによる分類：親星の多様性を反映
- ▶ 近年 IIP型超新星のごく初期に星周ガスの兆候
- ▶ SN 2023ixf: 10年に1度クラスと言える明るさ
- ▶ 藤井貢氏が爆発1.7日後のスペクトルの取得に成功。星周ガスと超新星エジェクタの相互作用の結果と見られる輝線と青いcontinuumを捉えた。
- ▶ 炭素と窒素の輝線を同定。豊富な窒素・ヘリウムを持つ
- ▶ 非常に大きなガス噴出を経験した、大きな初期質量を持つ赤色超巨星由来のII型超新星
- ▶ 早期段階での振る舞いが重要。早期発見求む。

超初期段階における重要な現象



Singh et al. 2019

ショックブレイクアウト (からの冷却期)



Gangopadhyay et al. 2020

星周物質との相互作用 (Flash ionized feature)

超初期段階における重要な現象

ショックブレイクアウト

- 全放射エネルギー分布(SED)の時間進化
- 温度進化：親星サイズに制限

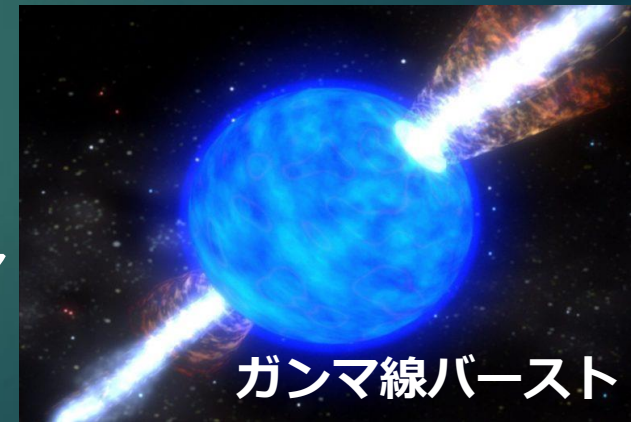
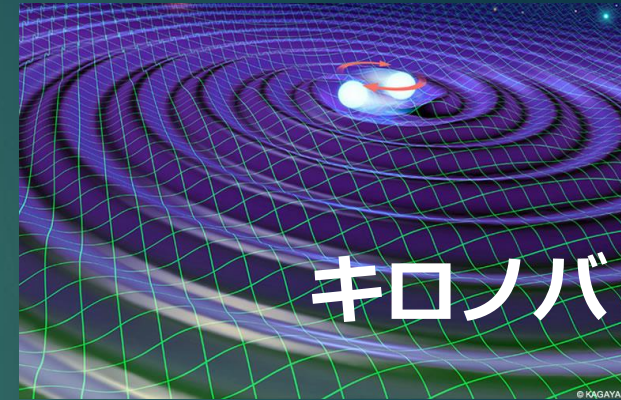
星周物質との相互作用（今日の講演）

- 星周ガス密度の推定（強い輝線：濃いガス）
- 組成の多様性
- 親星のガス放出史：親星進化との関連？

突発的天体爆発現象(transient)とは？

- ▶ 「新天体」：ある日突然明るくなる
- ▶ 古来、客星・新星などと命名
 - > 今では天体の爆発的増光と理解
- ▶ 近年、重力波やニュートリノに付随して爆発的増光天体が発見
- ▶ 可視光大規模サーベイによる寄与
- ▶ 「マルチメッセンジャー天文学」、
「時間領域天文学」が急発展

従来の超新星、古典新星、矮新星、ガンマ線バーストに加えて、キロノバなど多様な突発現象の発見。



突発天体多様性 2024

- ・ “古典的” 超新星

Ia型：白色矮星熱核暴走（連星系を成す白色矮星）

II・Ibc・IIIn型：重力崩壊型（初期質量 $10M_{\odot}$ 以上の星）

- ・ 標準的親星/爆発シナリオで説明不可

→ もはや超新星ではない??

Ca-rich transient, Luminous red nova (LRN), Fast Blue Optical Transient (FBOT), Superluminous supernova (SLSN-I, II)...

本質としては吹き飛ぶガス：星全体 or 部分的

-> 爆発エネルギー($>10^{50}$ erg ?)の問題

超新星の（天体物理学的）研究に おける重要な観測

- 1.より早く観測
- 2.より密に観測
- 3.より多波長で観測
- 4.より暗い時期まで観測

早期発見はプロとアマチュアの両者、それぞれが同じ目標・目的を共有しており、互いに
win-winの関係となる

超新星 SN 2012ht in 銀河 NGC 3447

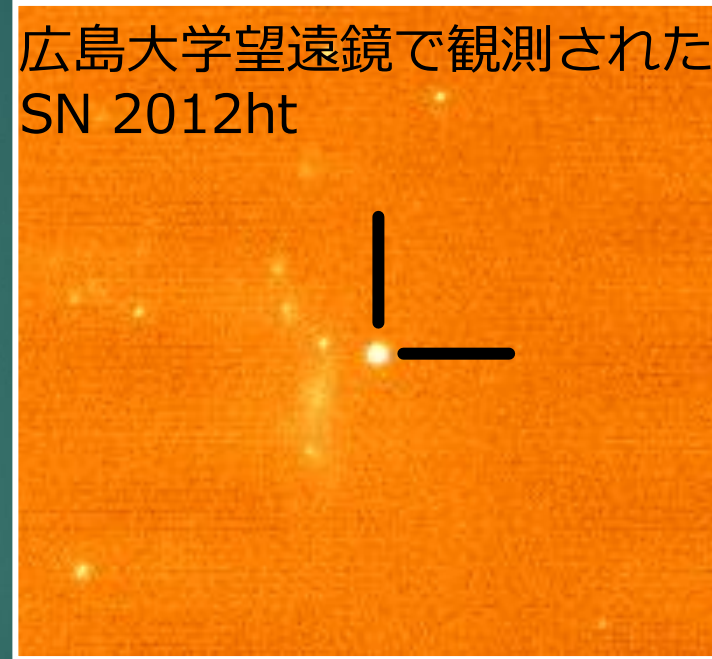
発見の経緯が凄い

2012年12月16日 限界等級（未発見）
（18.6等）
by 板垣さん (CBET 3349)

2012年12月18日 18.3等で発見
2012年12月19日 16等に！
by 西山さん & 花島さん (2012)
-> 両名は活動的な新星ハンター

2012年12月20日 広島大学観測開始

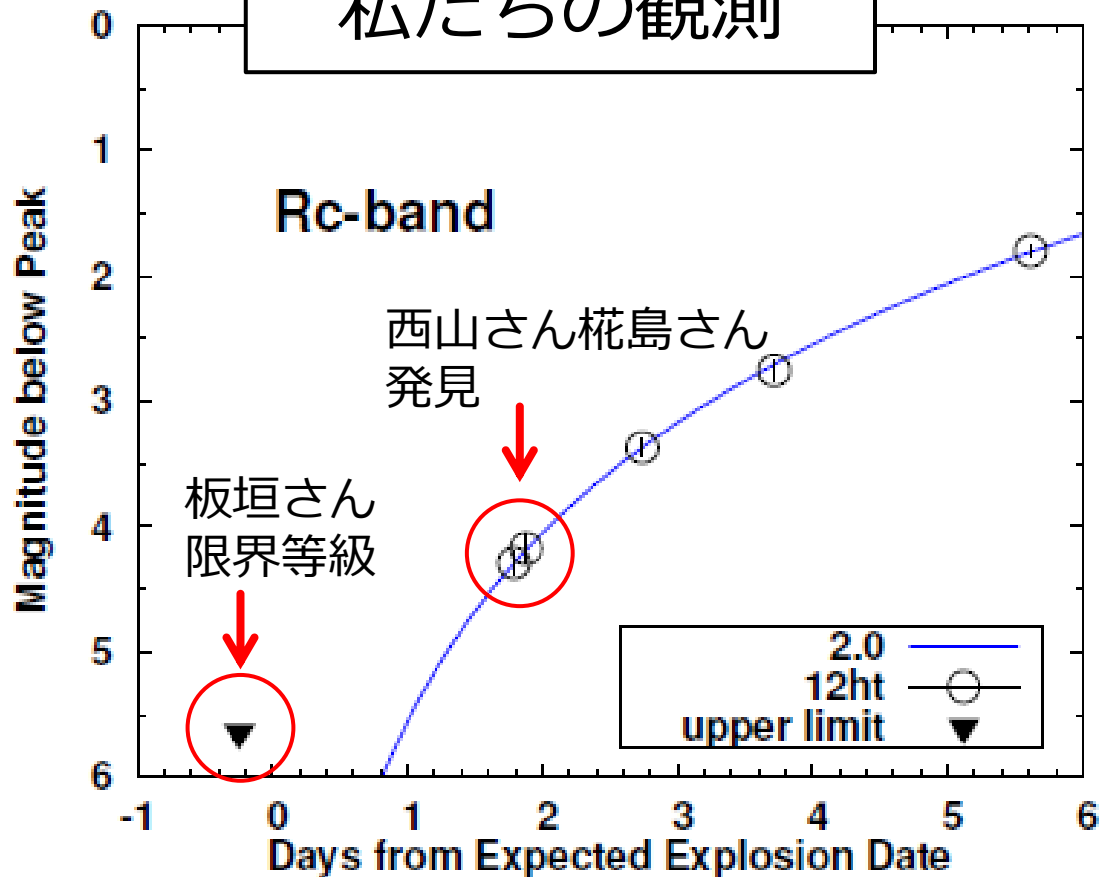
広島大学望遠鏡で観測された
SN 2012ht



増光率から、**爆発間もない**可能性が高い。
国内望遠鏡による可視測光分光の追観測を実施。

SN 2012ht: アマチュア天文家+プロのデータから爆発日の推定に成功！

私たちの観測



爆発後2.0日以内から連続的な測光観測
-> 当時5例目
滑らかな増光
-> 爆発日を0.5日程度の不定性で決定

板垣氏、西山氏、梶島氏の弛まない努力による成果

研究者と天文愛好家連携の意義

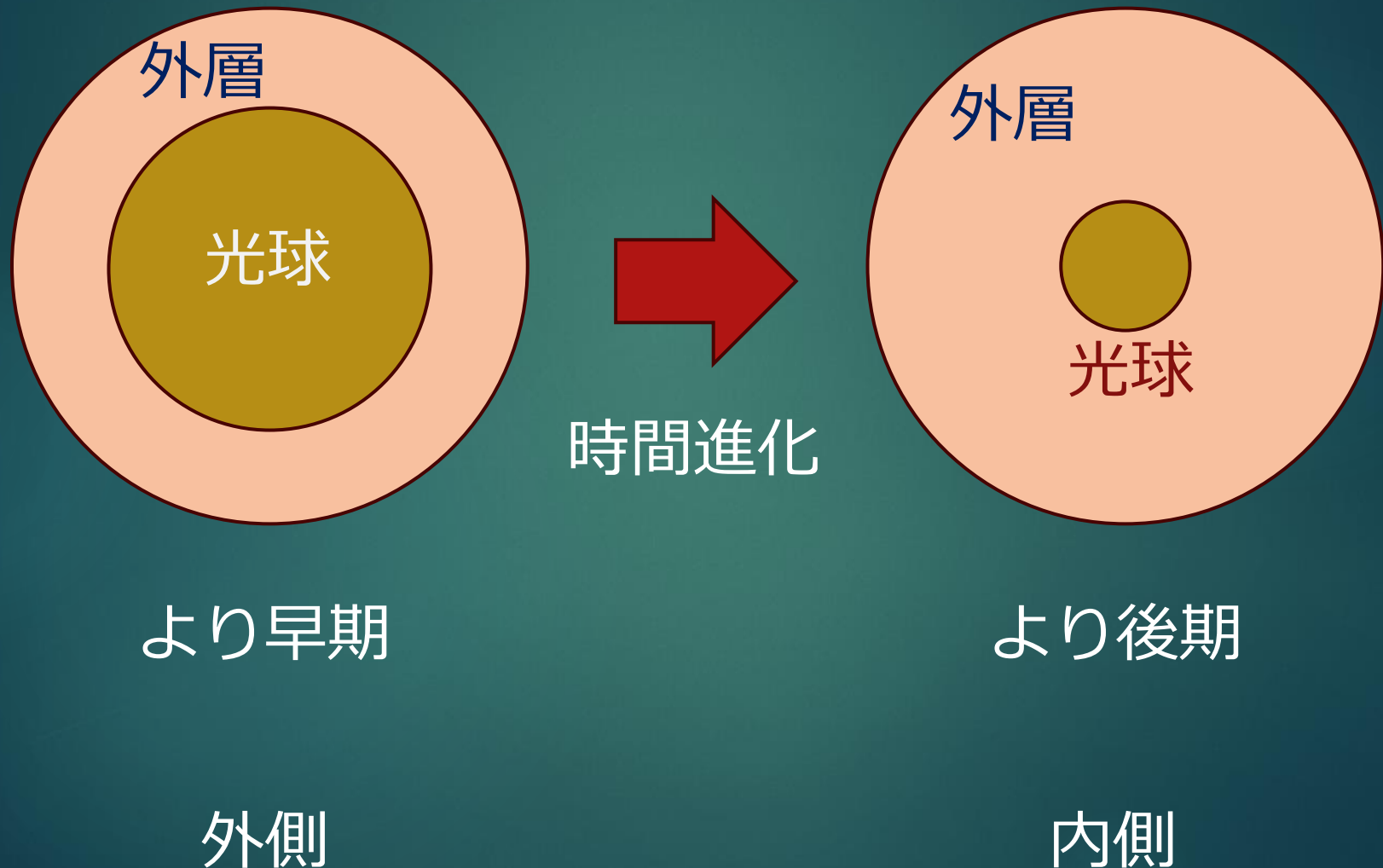
研究者：

- ・ 早期段階からの測光分光観測
(理由は後述)

アマチュア：

- ・ 早期段階からの発見
(第一発見を目指す)

なぜ早期観測が重要か（古典的）



超新星候補の発見と同定

超新星：英語では supernova (SN)

命名のルール 例えば今年最初に発見された超新星候補

AT 2024A

以降SN 2024A、 AT 2024B、 AT 2024C…

AT 2024Z, AT 2024aa, AT 2024ab…

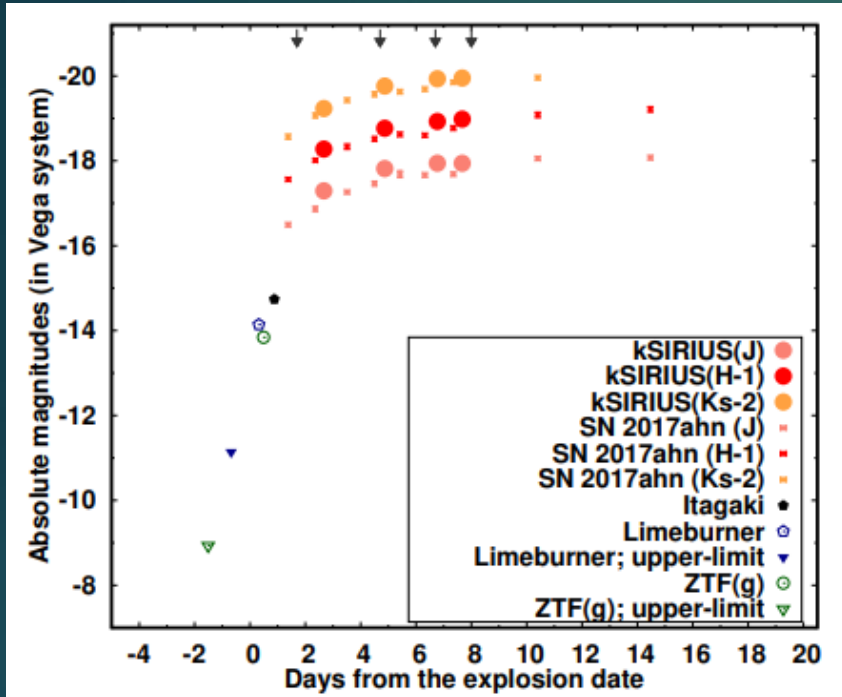
AT 2024az, AT 2024ba, AT 2024bb…

AT 2024zz, AT 2024aaa, AT 2024aab, …

2023年の1年間で20000天体の超新星候補が発見うち
約2000天体が「分光同定（後述）」され超新星と判明
例) AT 2024ggi -> SN 2024ggi (Type II)

ところで、新天体の発見とは「位置・等級（明るさ）・その時の日時（世界時）」を世界に報告することである。

ごく初期の近赤外線観測



Yamanaka et al. 2023

近赤外線のリートカーブ
緩やかな増光

SN 2017ahn と似た進化
(14G, 20pniと同クラス)

$M_J, M_H, M_K = -17.9\text{mag}$

