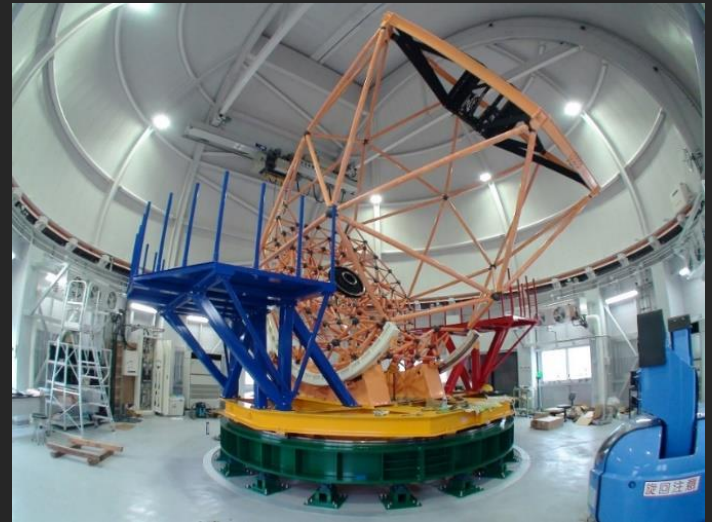
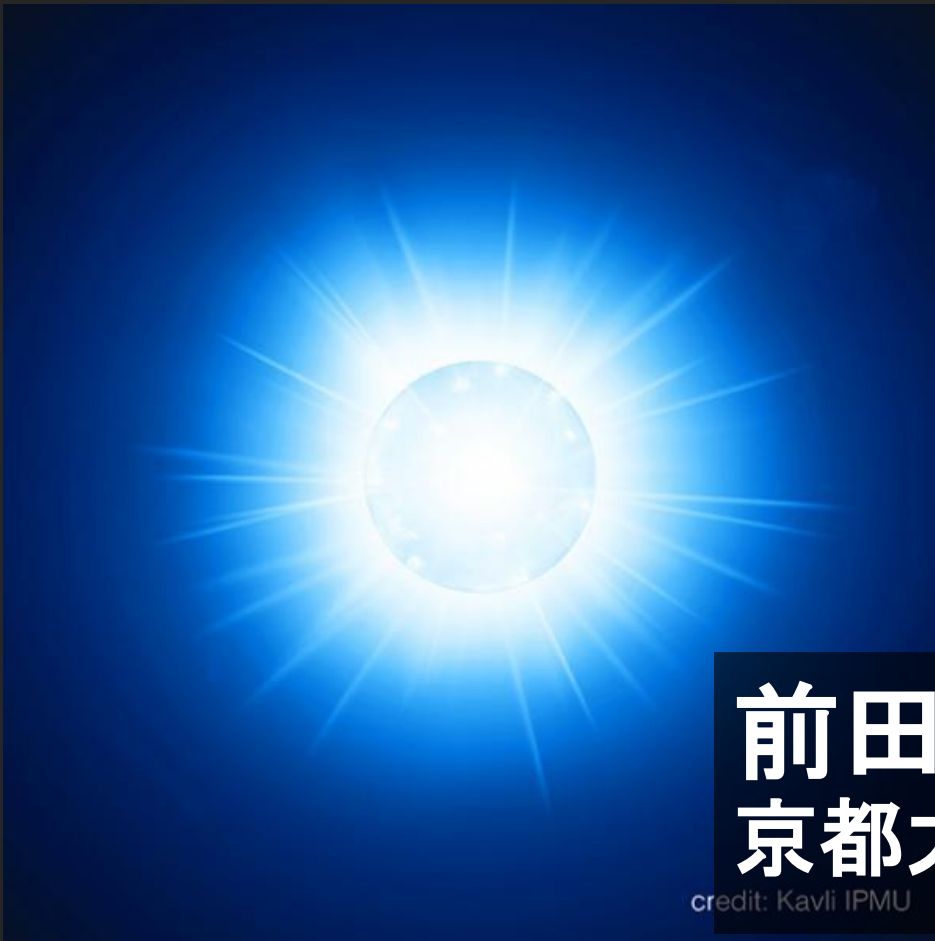


理論と観測からみた超新星

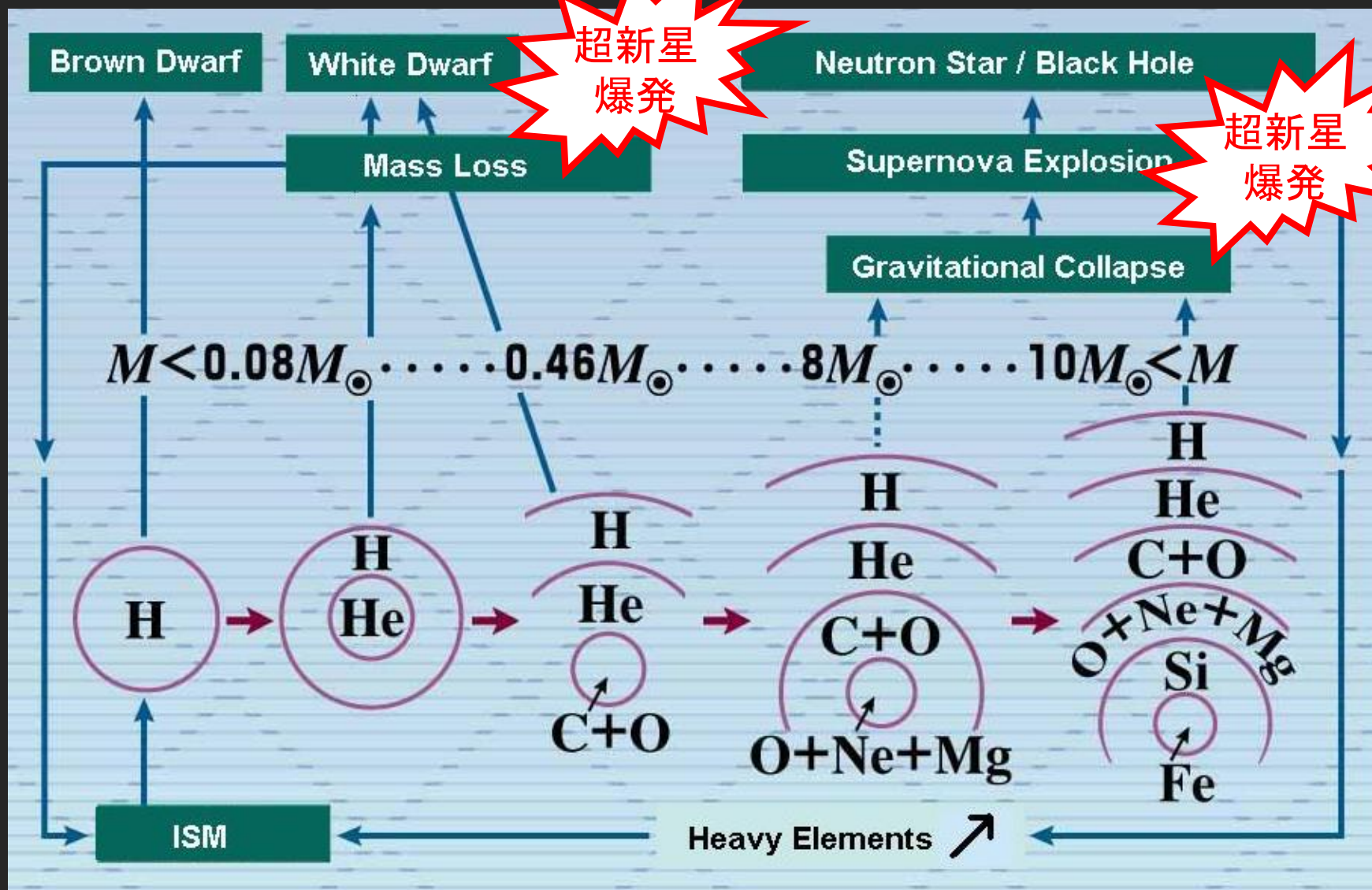
(爆発直後の観測を軸とした最近の進展)



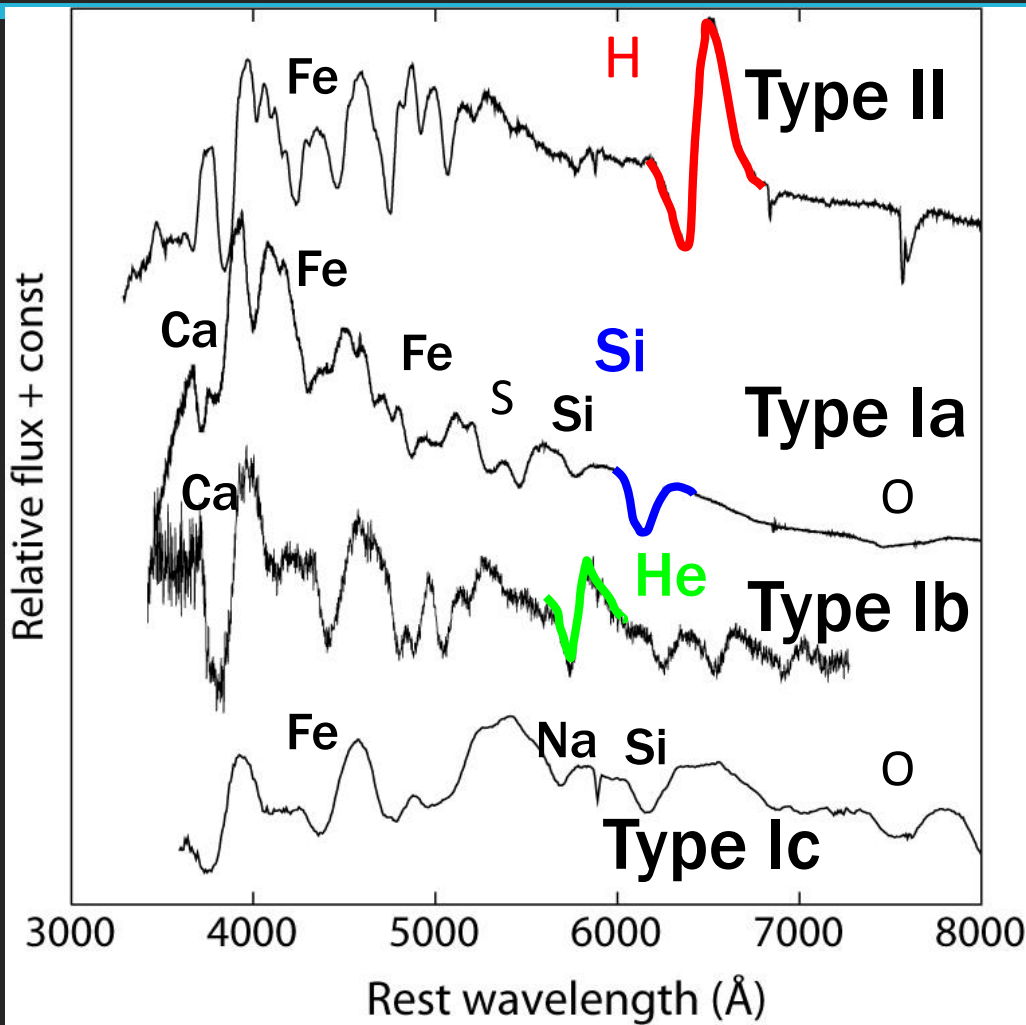
前田啓一
京都大学・宇宙物理学教室

星の進化と超新星爆発

「恒星物理学」
後期・火曜日・10:30-
@理6-304(今期はzoom)



超新星タイプ分類

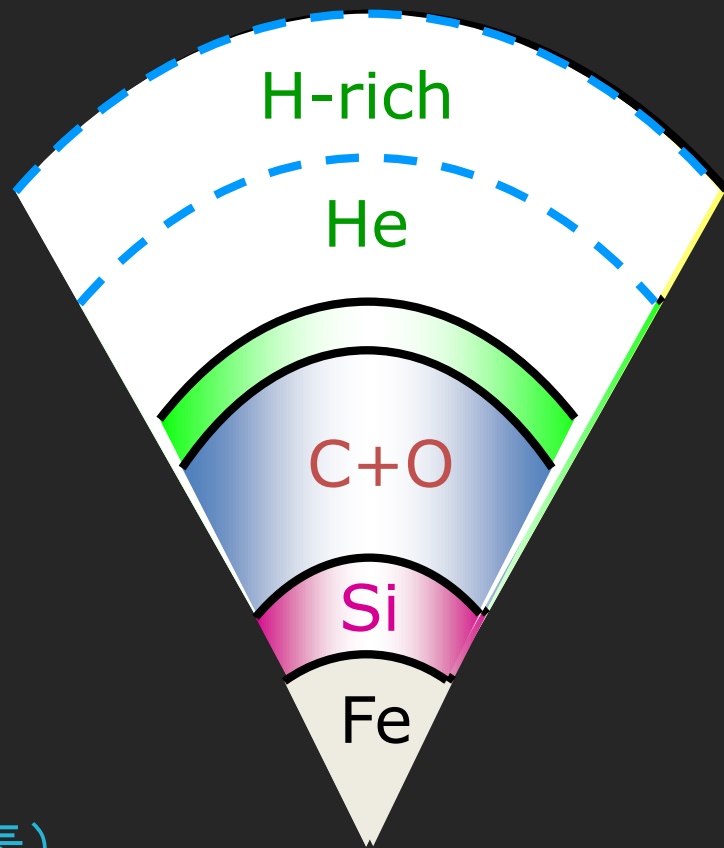


II型

赤色巨星

IIb/Ib/Ic型

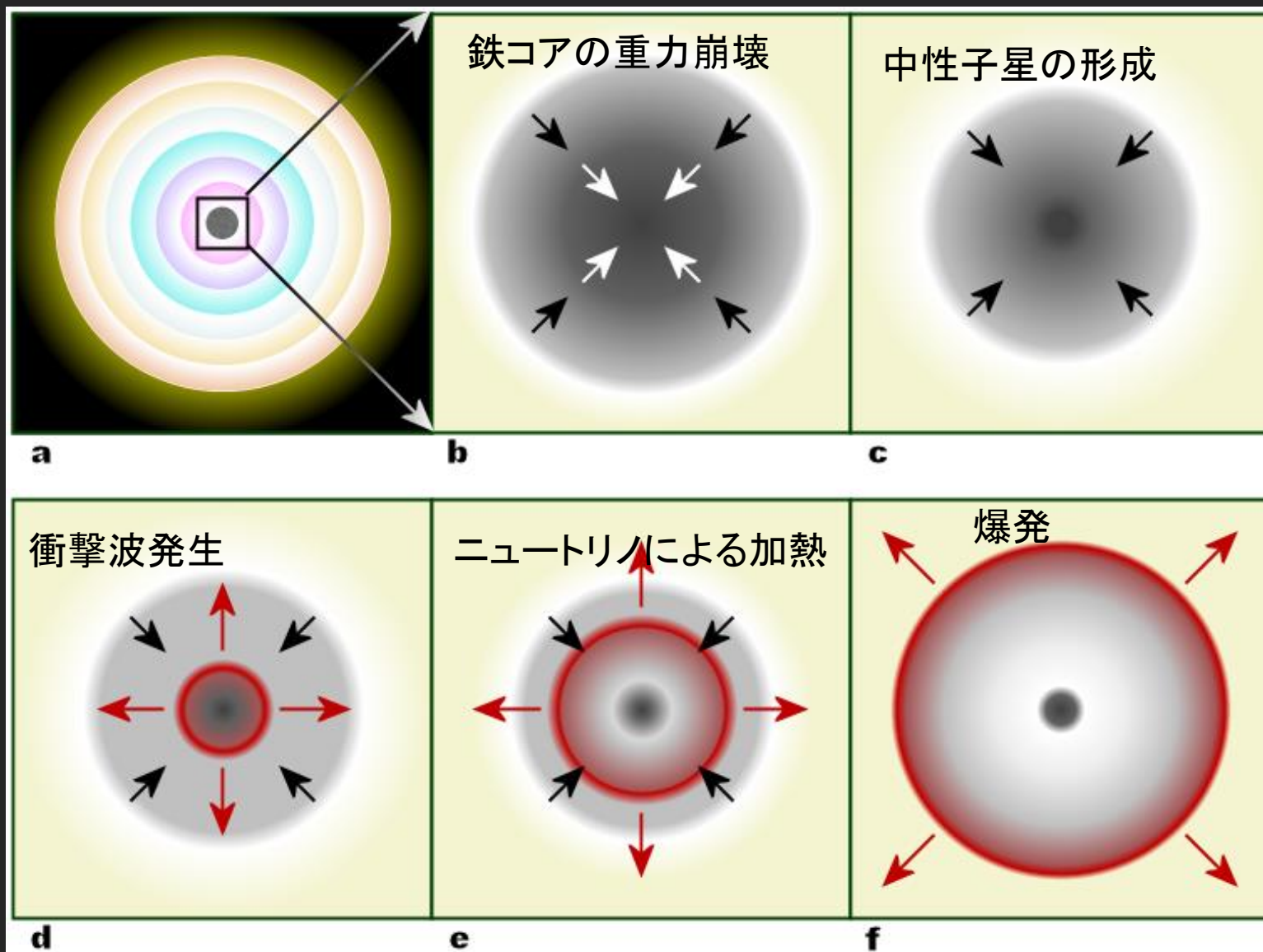
ヘリウム星、酸素星



@ 最大光度時 (~ 爆発後数週間):

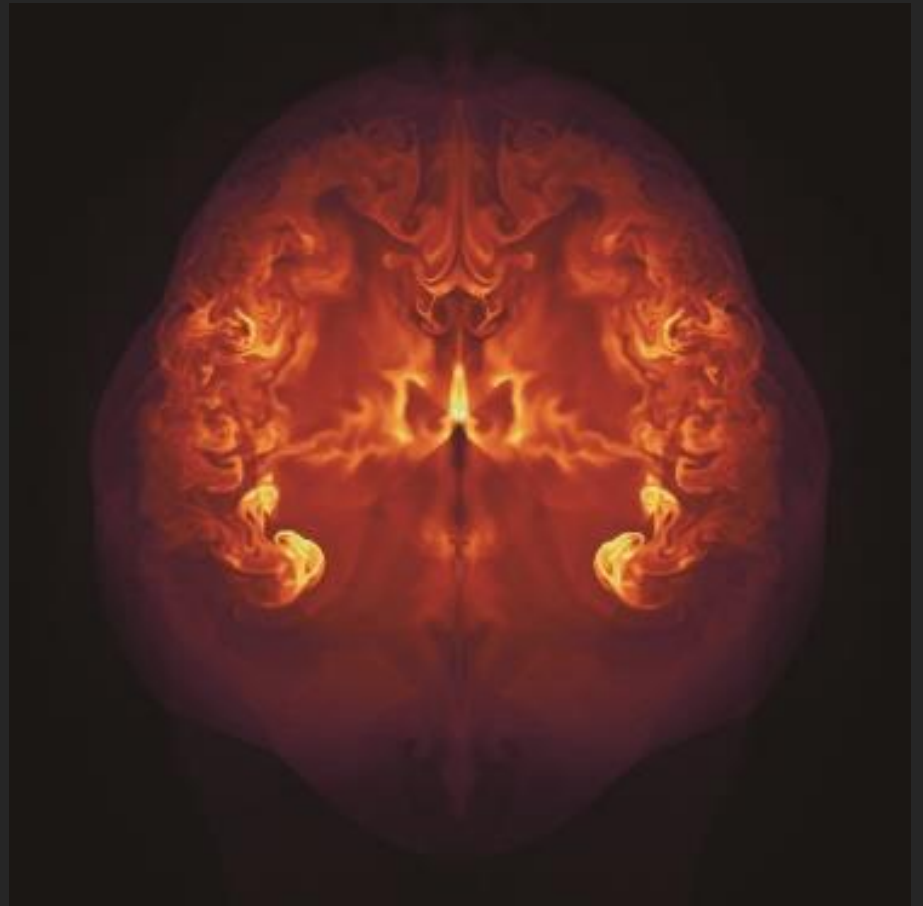
- 非常に濃い膨張ガス(表面の元素).

大質量星 ($> 10M_{\odot}$) 起源の超新星爆発



白色矮星起源の核暴走型超新星爆発

- チャンドラセカール限界質量に近いと、核反応に対して不安定。
- 核反応の暴走
→ Ia型超新星。



チャンドラセカール限界質量白色矮星の核暴走(標準理論)のシミュレーション。Maeda+ 2010, Nature + ApJ

超新星・突発天体現象の研究

観測

理論

理論・観測の
複合領域

「探査」による発見：
広く・浅く



「追観測」による詳細
データ取得：
深く・狭く



「恒星・天体進化」理論
爆発に至る進化
「爆発の物理」理論
爆発機構



「爆発後の進化」計算
流体・非平衡物理
「輻射」計算
疑似観測



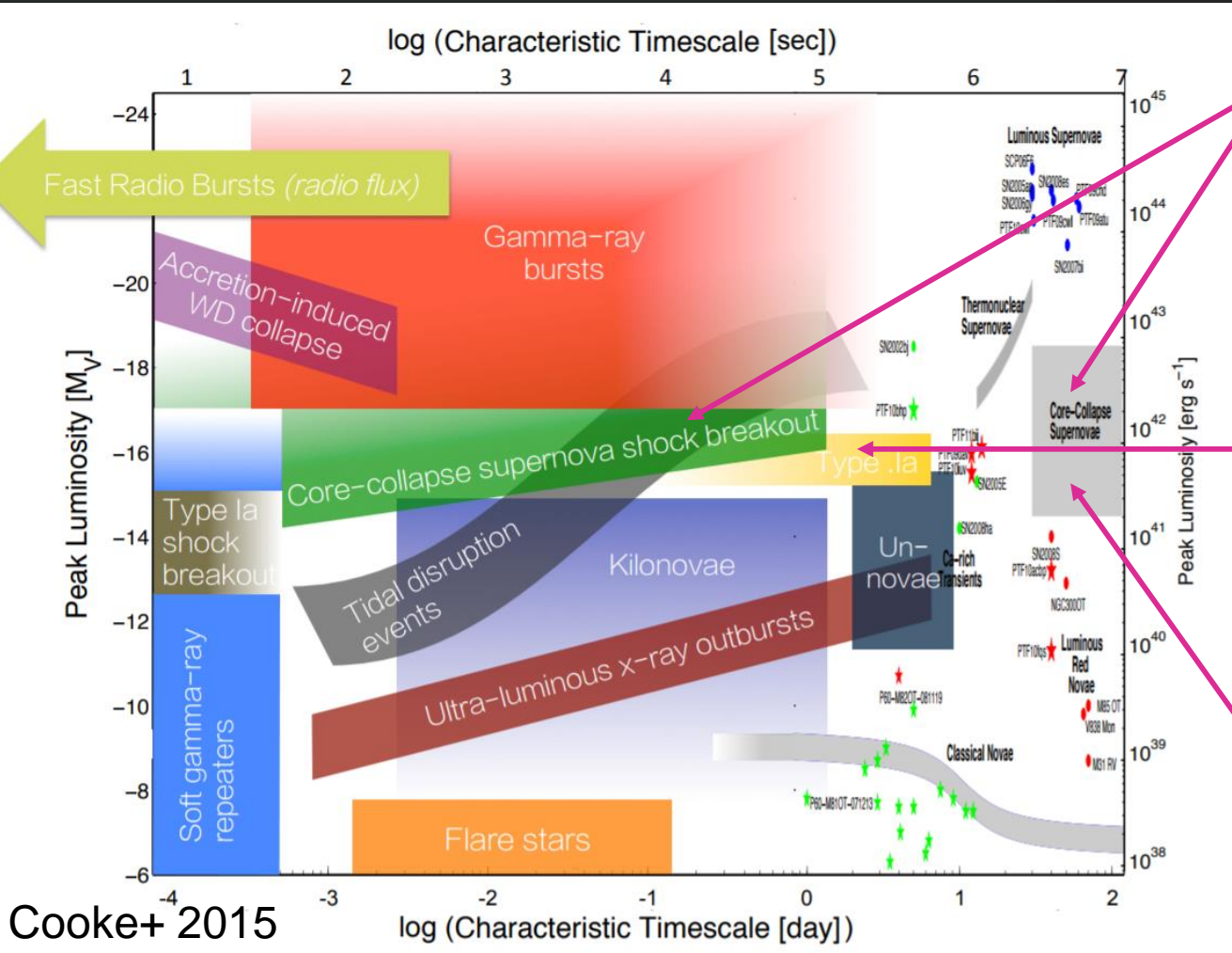
時間軸天文学の発展

短時間間隔 探査

既知の天体を爆発直後から。「理論の検証」

未知の短時間変動天体

多数の観測
新種の天体。
特異な天体。
「様々な進化経路」



新たな探査計画⇒柔軟な追観測計画

新世代の探査計画(主に1m級望遠鏡)

探査観測: 夜空を定期的に撮像して、新天体を探す。

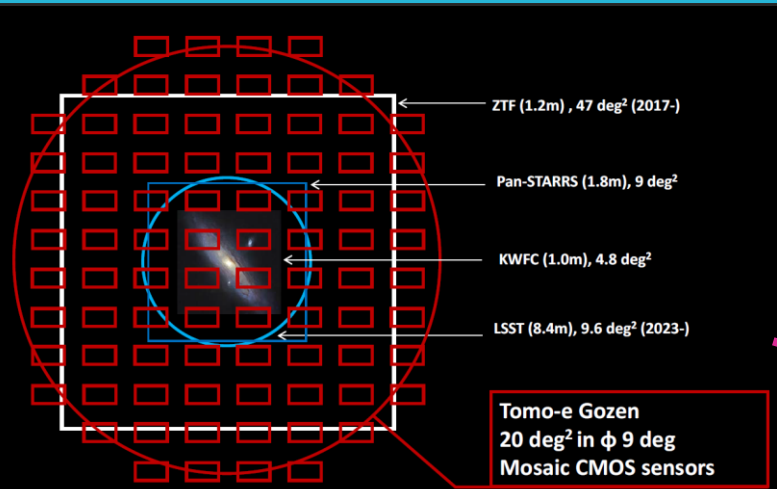
Survey	Depth (mag)	Area (deg ²)	Cadence
BlackGEM	21.5	10,000	2 weeks
DES	23.5	5,000	1 week
KMTNet	~21	~6,000	1 day
MOA	~21	~1,000	1 day
TNTS	20.0	2,000	?
PTSS	20.5	4,000	1 day
HSC	25	800	1 day
Tomo-e	18/19	7,000	2 hr/1 day
ZTF	21	23,000	3 days
	21	2,000	1 day
	21	6,000	2 hr
ASAS-SN	17	40,000	1 day
DLT40	20	600 gal	1 dat

	Tomo-e SN Survey
instrument	Tomo-e Gozen
sensor	CMOS
readout time	~0 sec
period	2018/9-
survey area [deg ²]	10,000
cadence	2 hours / 1 day
exposure time / visit	3 sec
depth	18 mag / 19 mag
filter	no (~g+r)
#(SBOs), #(SNe) / yr	5, 1000
data storage	daily-stacked image SN cutout images
reference	-

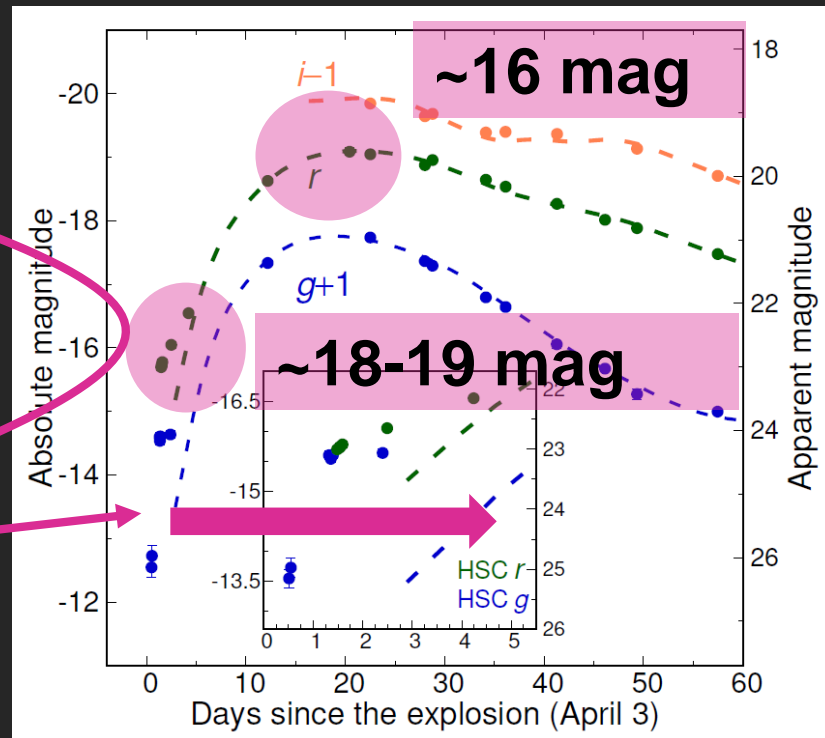
稼働中の探査計画
(+アマチュアの方々の貢献)

Tomo-e超新星
探査計画

せいめい望遠鏡による観測



東大木曾観測所Tomo-eカメラ などによる探査



発見当日に即時分光 (ToO) して、
その後も高頻度で観測する。
年間40-50晩相当 (ToOが半分)



光赤外線天文学大学間連携

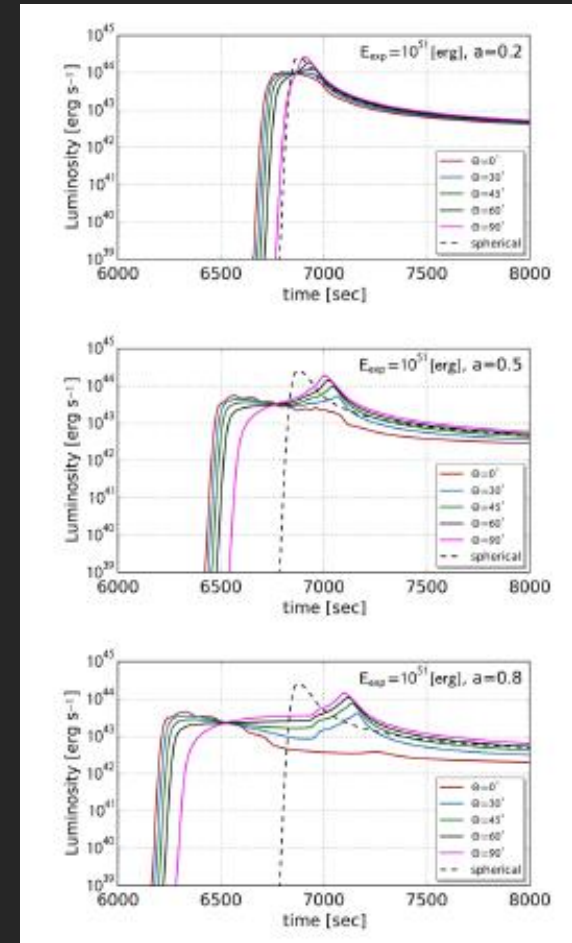
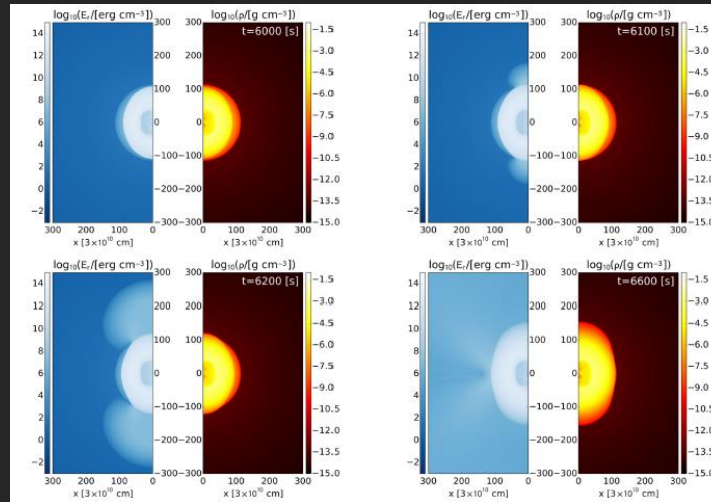
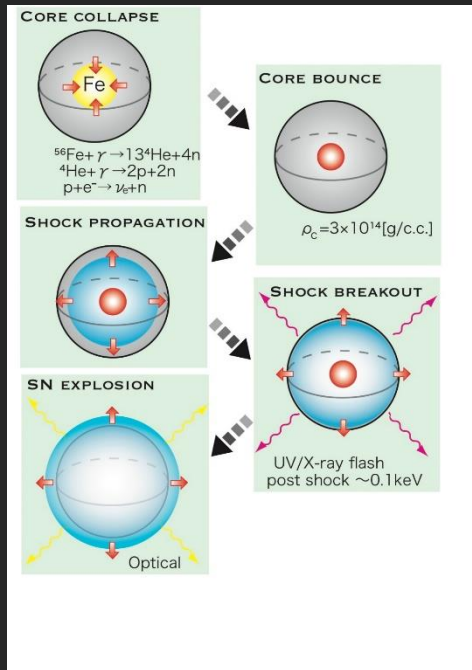


爆発直後の超新星観測で目指すサイエンス例

- 爆発から時間がたてばたつほど、もともとの星の情報は薄れる・消失する。
- 爆発の瞬間(ショックブレイクアウト)。
- 爆発した星の性質。
- 恒星末期の(原因未知の)活動性。
- 超新星爆発機構。

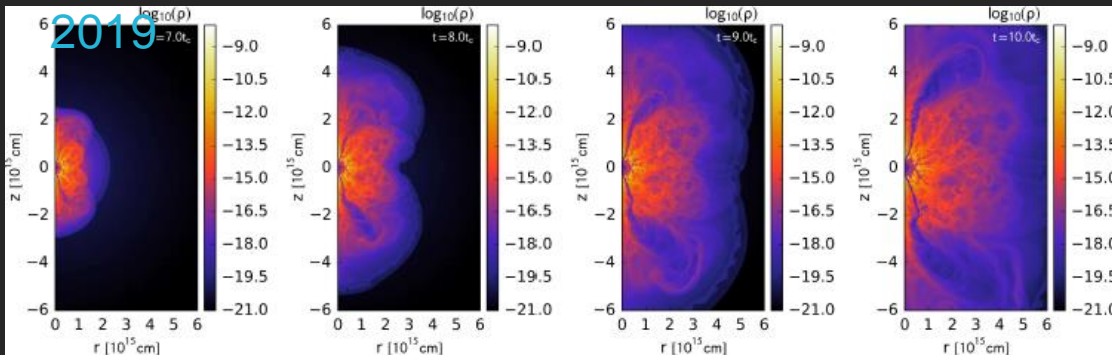
超新星爆発と最初の光 (ショックブレイクアウト)

ショックブレイクアウトの輻射流体計算例 Suzuki, Maeda, Shigeyama 2016



爆発流体計算例 Suzuki & Maeda 2017,

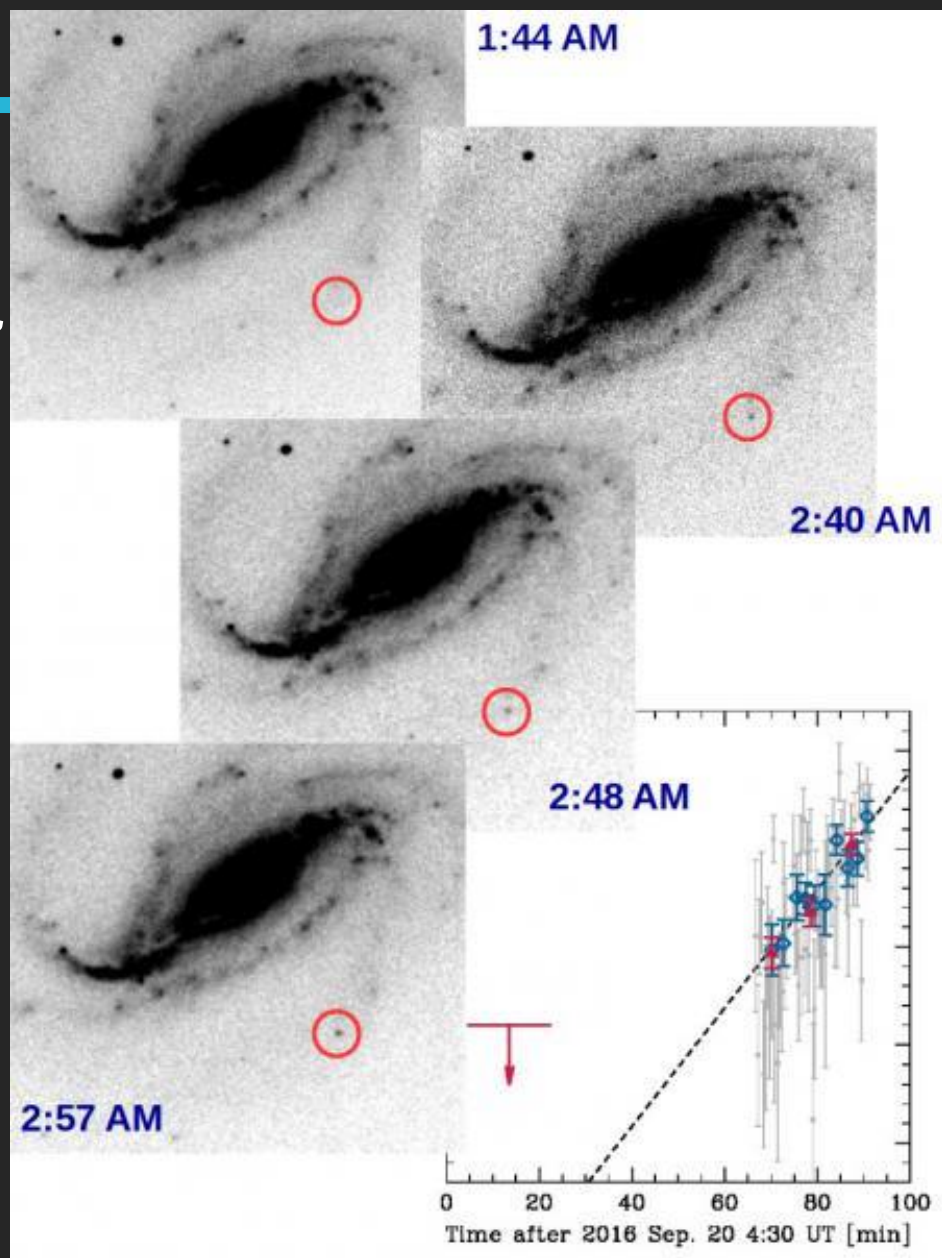
2019



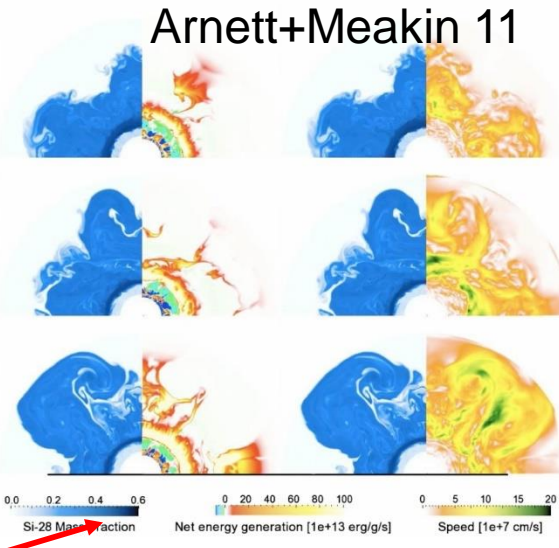
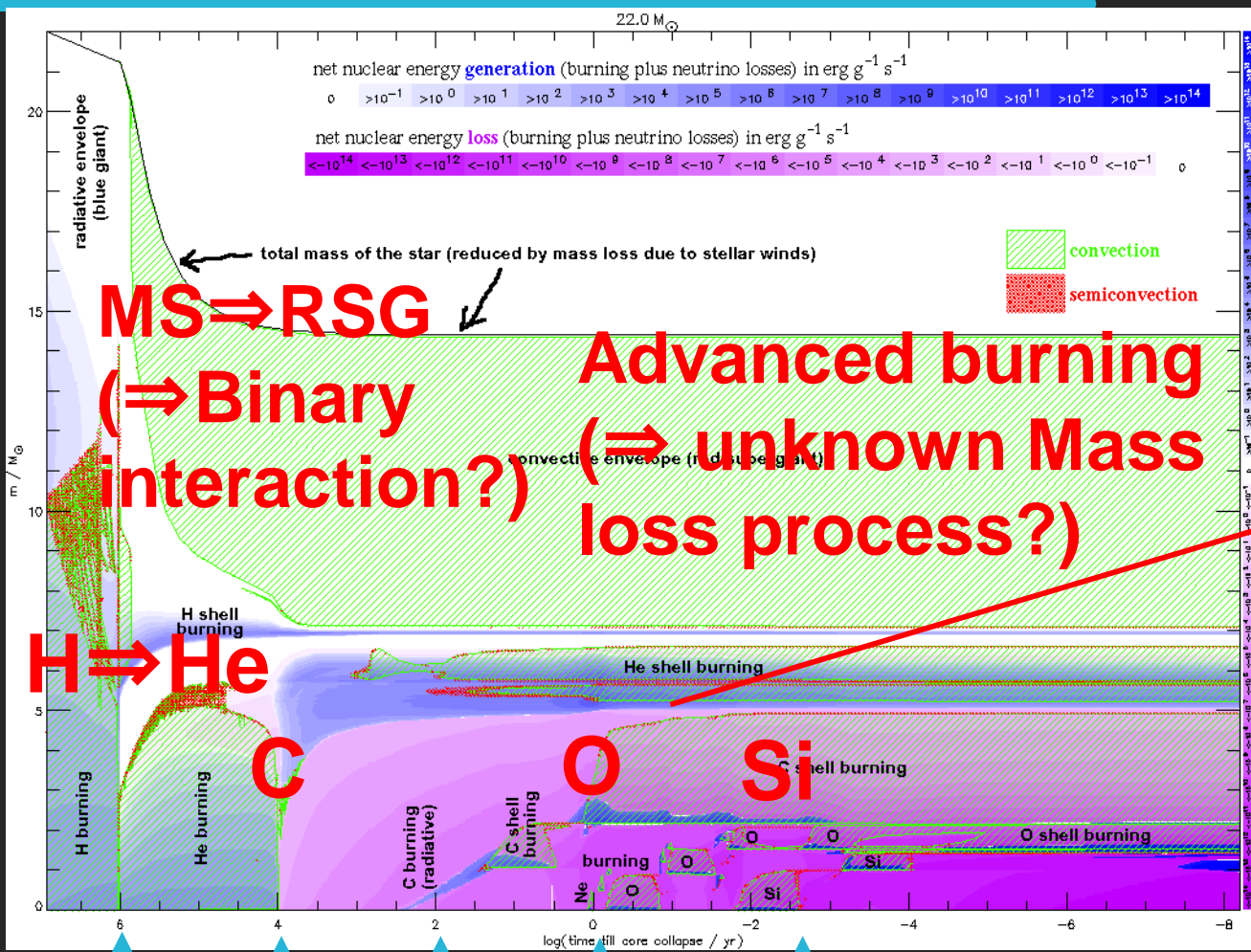
可視域での初検出

アマチュア天文家のVíctor Busoさん(@アルゼンチン)が観測中に「偶然」超新星が現れる。

Bersten, Folatelli, ..., Maeda et al.
2017, Nature



大質量星終末期進化の未解決問題

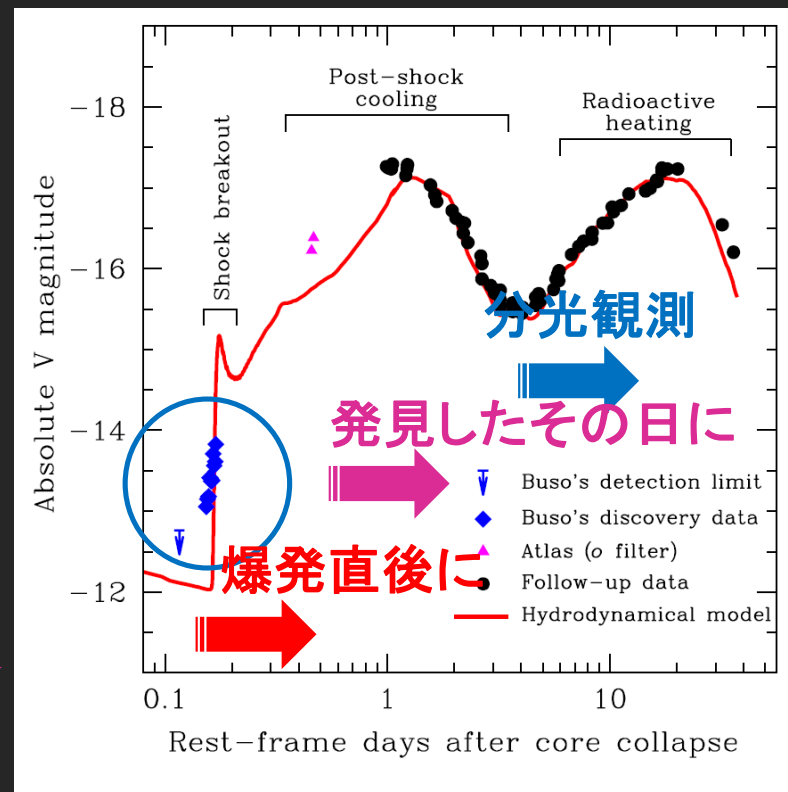
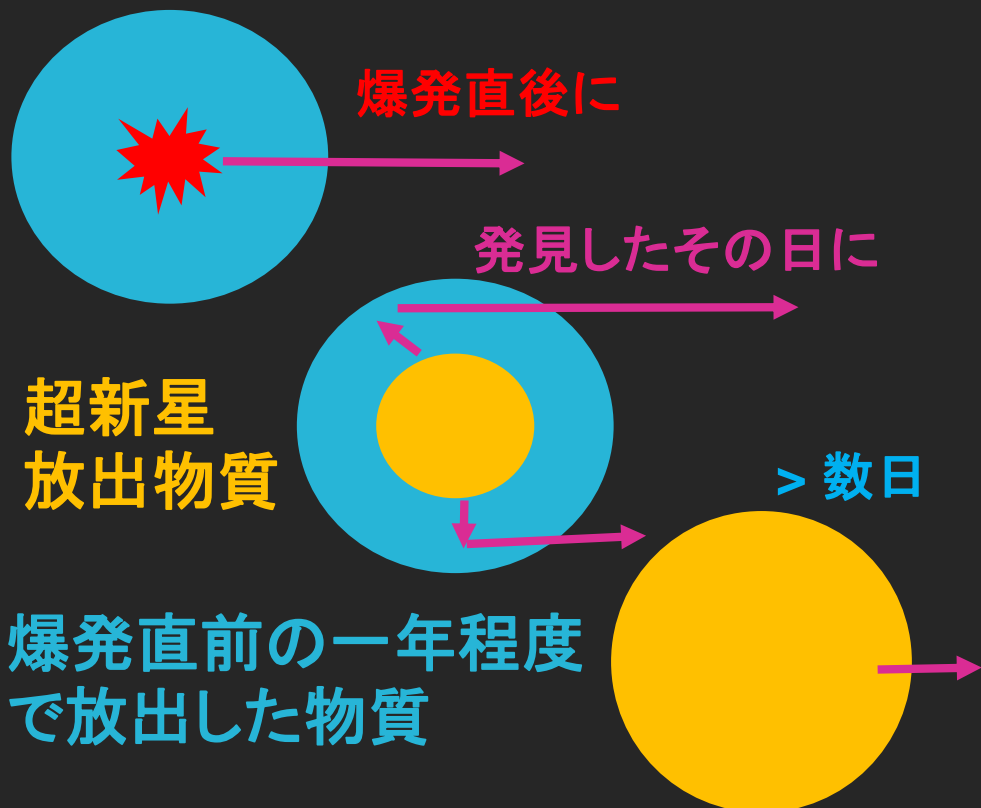


既存の標準進化理論では記述できない？

10^6 10^4 100 1年 1日

22 M_{\odot}
© A. Heger

爆発直後の観測⇒爆発直前の活動性



発見一日以内に分光観測(爆発から一日～数日)。

爆発直前の活動性を探る新手法。

爆発後数時間で分光観測。

未踏の領域。

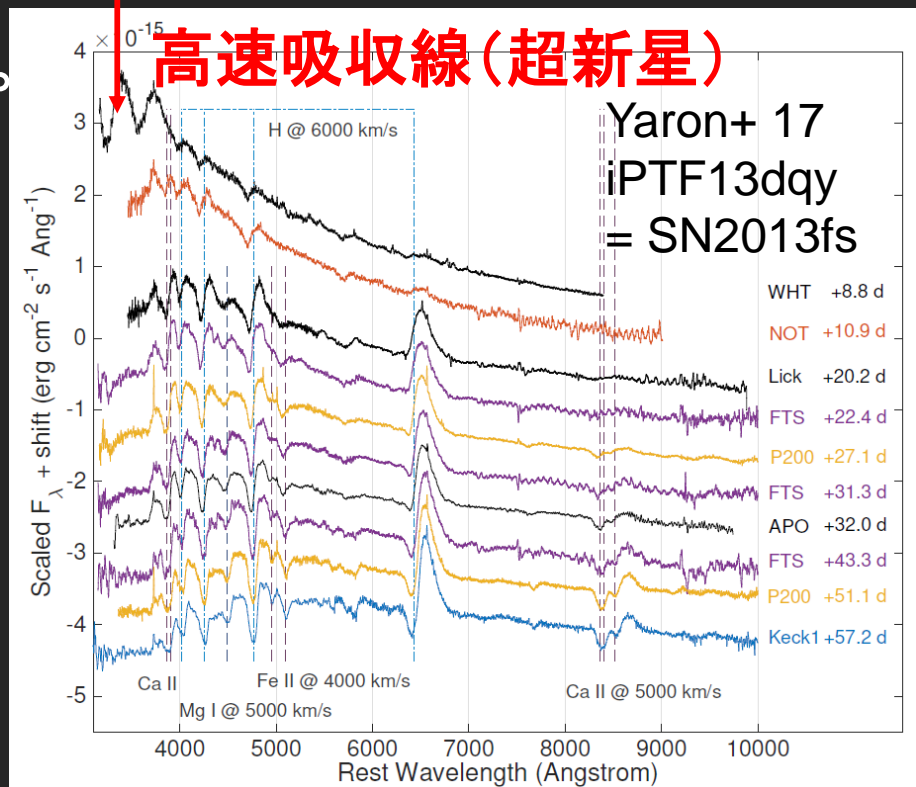
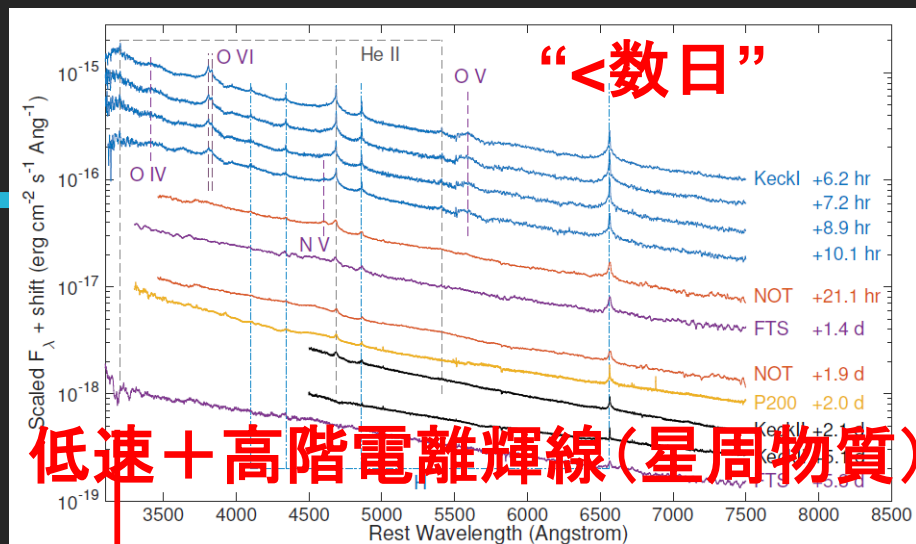
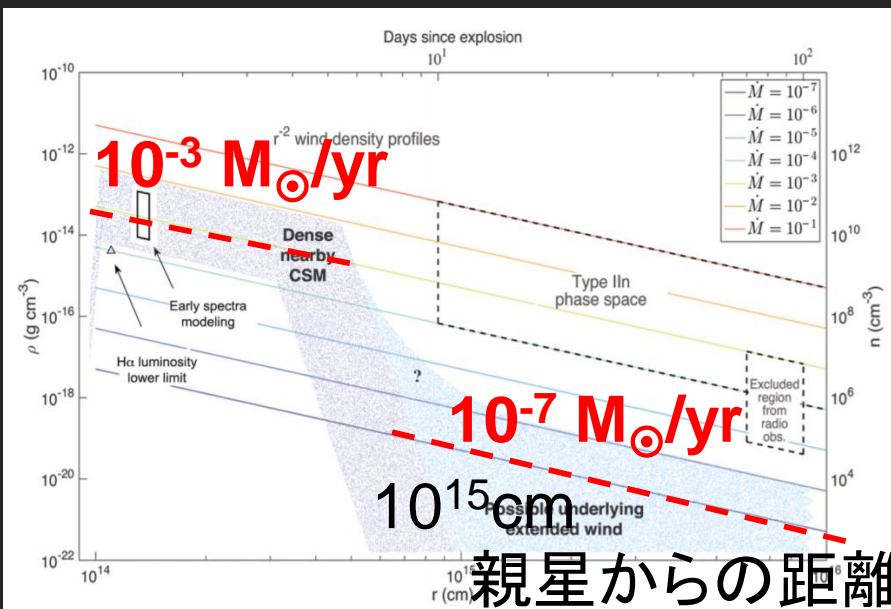
爆発直後の分光

超新星初期の高エネルギー放射により電離された星周物質？

親星からの距離~光速*1日 (<~ 10^{15} cm)。

爆発の数十年前に放出？

→大質量星終末期進化の新情報。

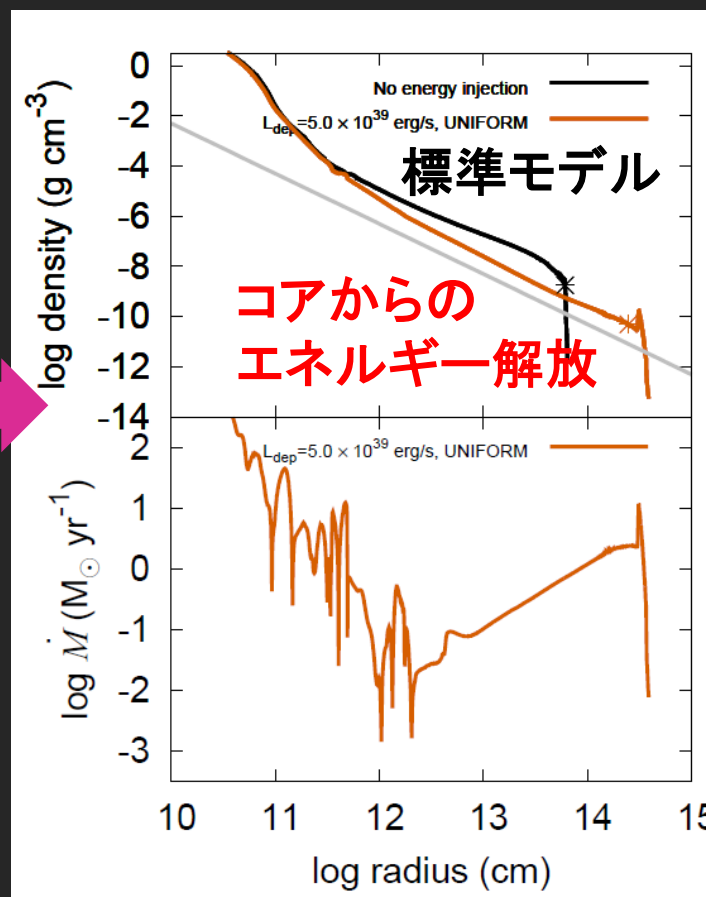
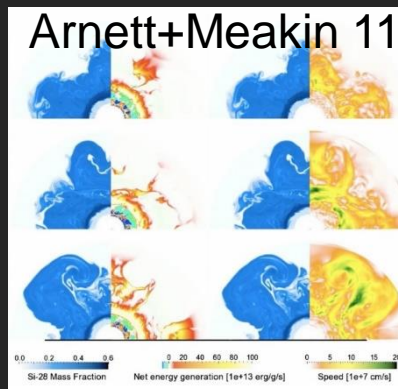
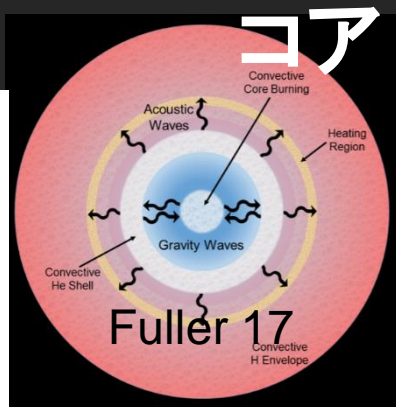
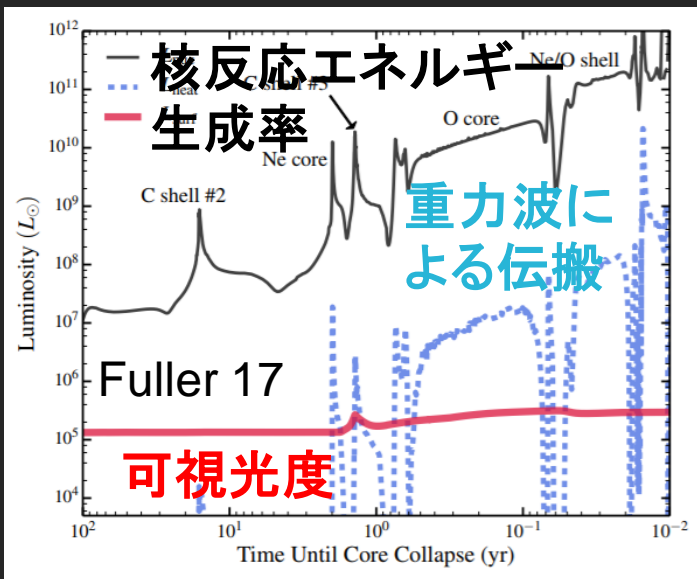


大質量星終末期進化の理論への示唆

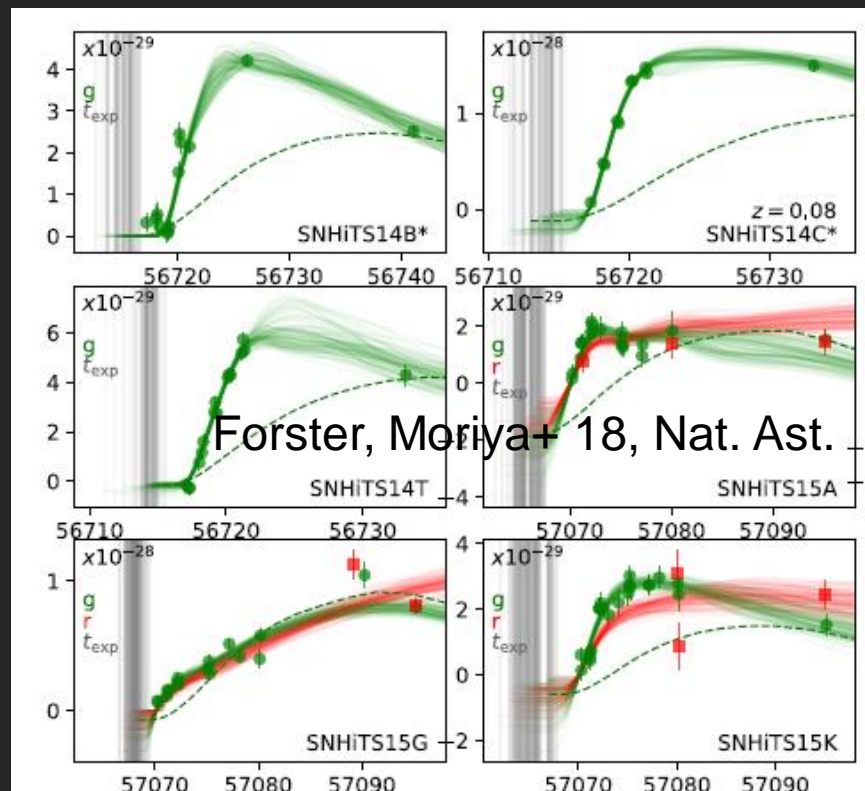
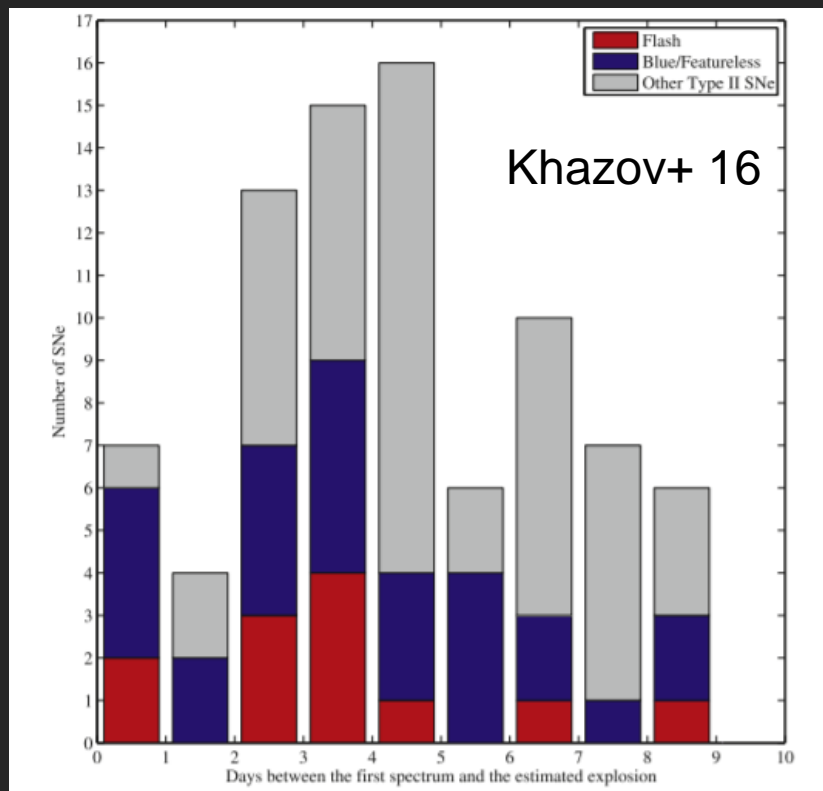
終末期活動性の起源？

外層

Ouchi & KM, 2019



終末期の活動性は一般的なのか？



即時分光の結果：
II型の20%程度？

矛盾？

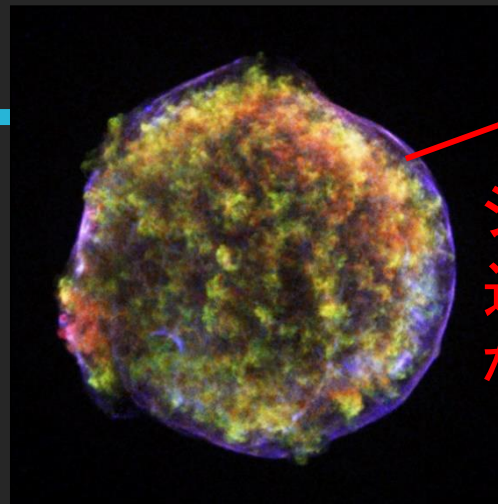
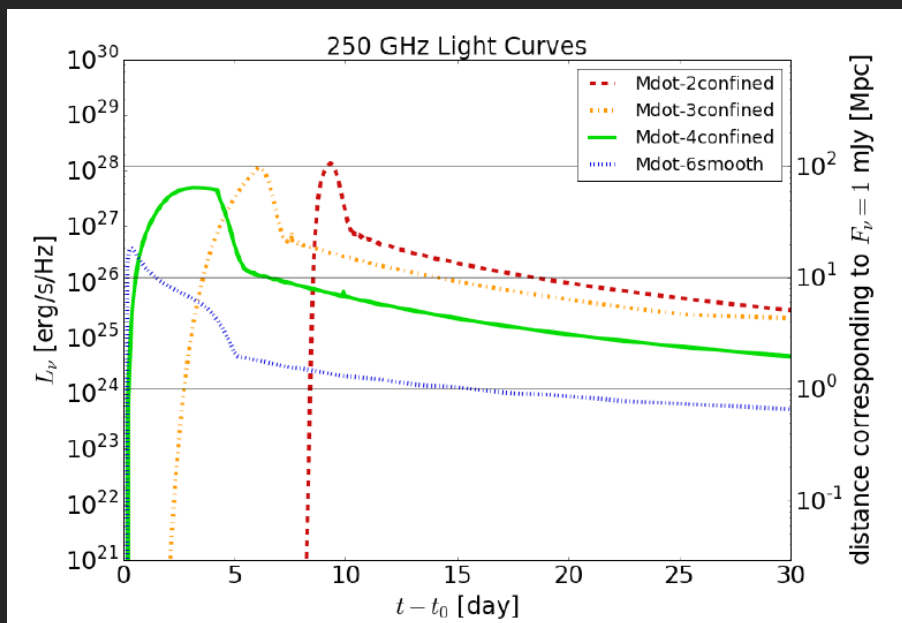
即時測光の結果：
II型の> 90%？

サンプルの増大(せいめいなどに期待)。
理論的解釈？(理論モデル構築+多波長観測による独立検証)

多波長理論と観測

電波放射計算

Matsuoka, Maeda, et al. 2019



シンクロトロン
逆コンプトン
など非熱放射

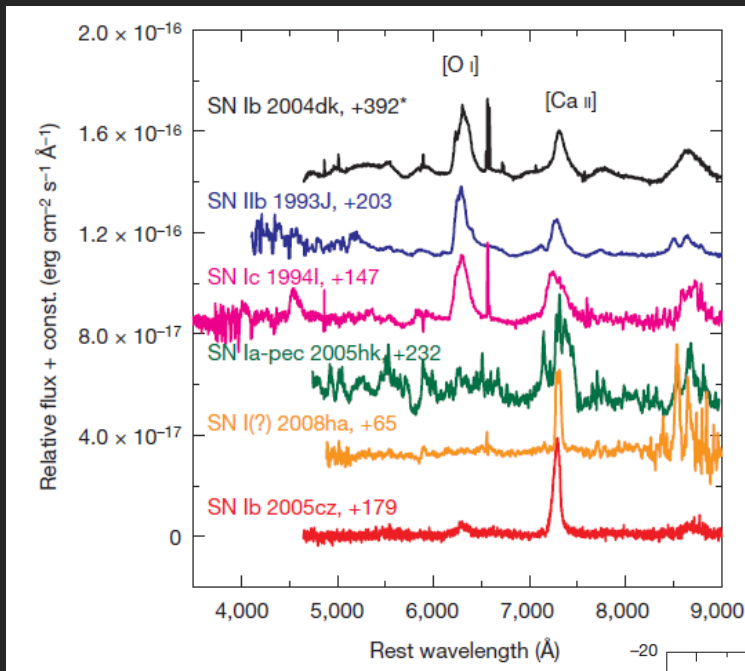
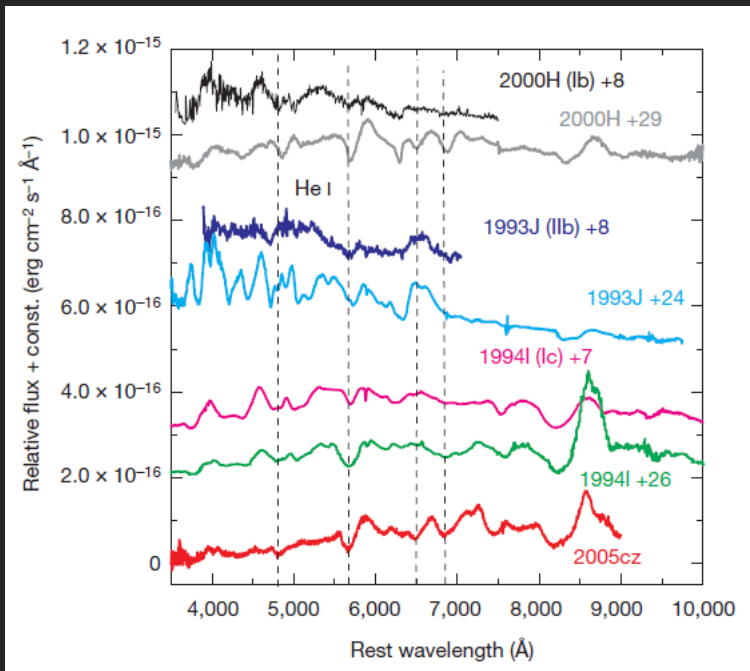
ALMA(チリ)による観測



ALMAでの爆発直後の超新星の観測
(たぶんALMAで初)

Maeda+, in prep.

恒星進化の多様性：謎のカルシウム過剰超新星

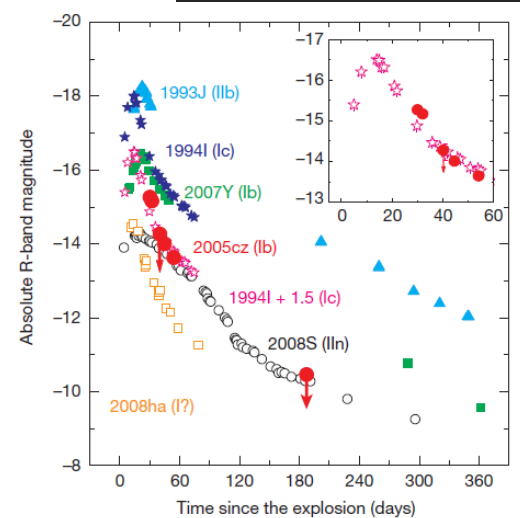


Kawabata, KM+ 10, Nature

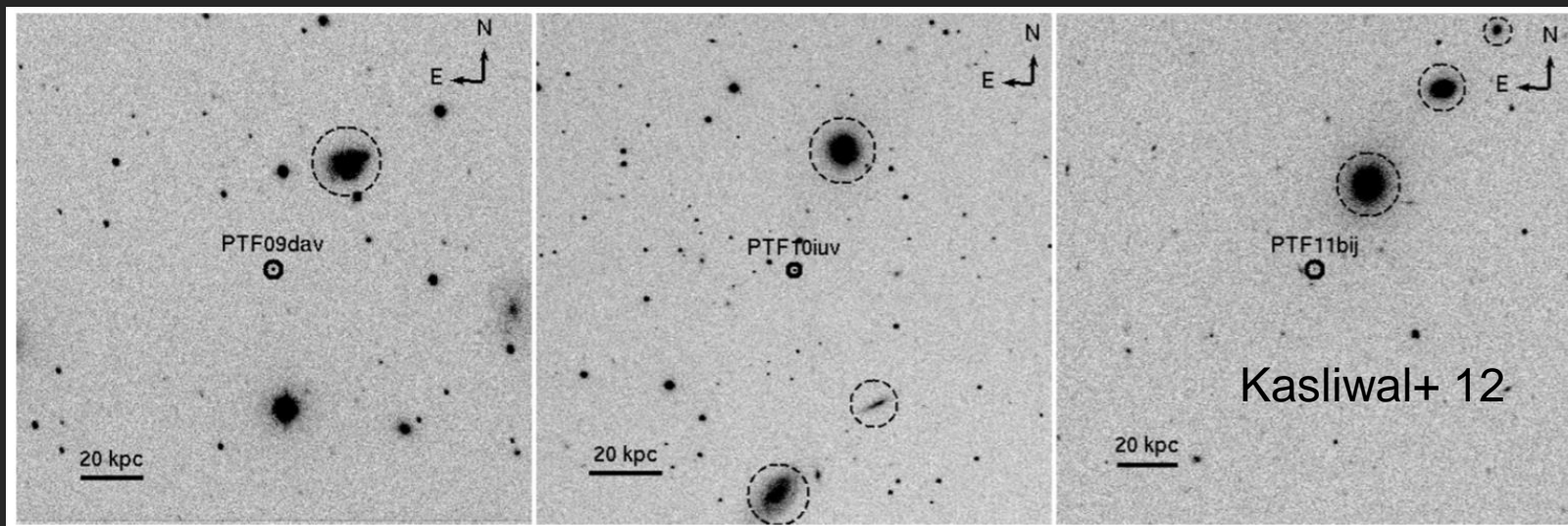
最初の発見

2005cz (Kawabata+ 10) & 2005E (Perets+ 10)

スペクトルは重い星の爆発に非常に似ている。
が、酸素放射が弱く、カルシウム放射が強い。
すぐに暗くなる(観測が難しい)。



白色矮星の爆発現象？

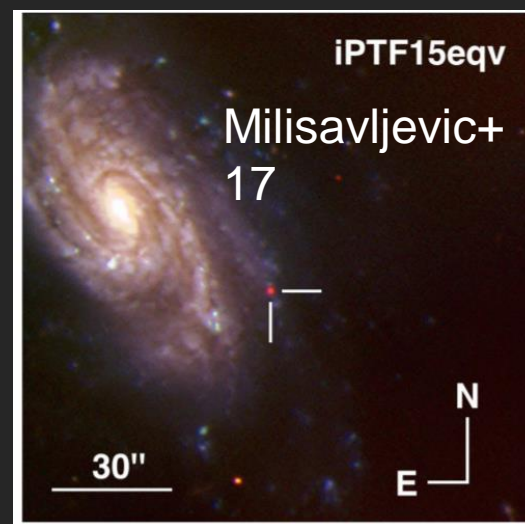


大部分は、大質量星(そもそも星)のいないように見える僻地で起こる。

白色矮星の爆発？(新星とIa型超新星の中間？)

しかし、

銀河の腕など、激しい(大質量)星形成が起こっているところで発生するものが、一部いる。



重い星？白色矮星？⇒爆発直後の観測が鍵

重い星

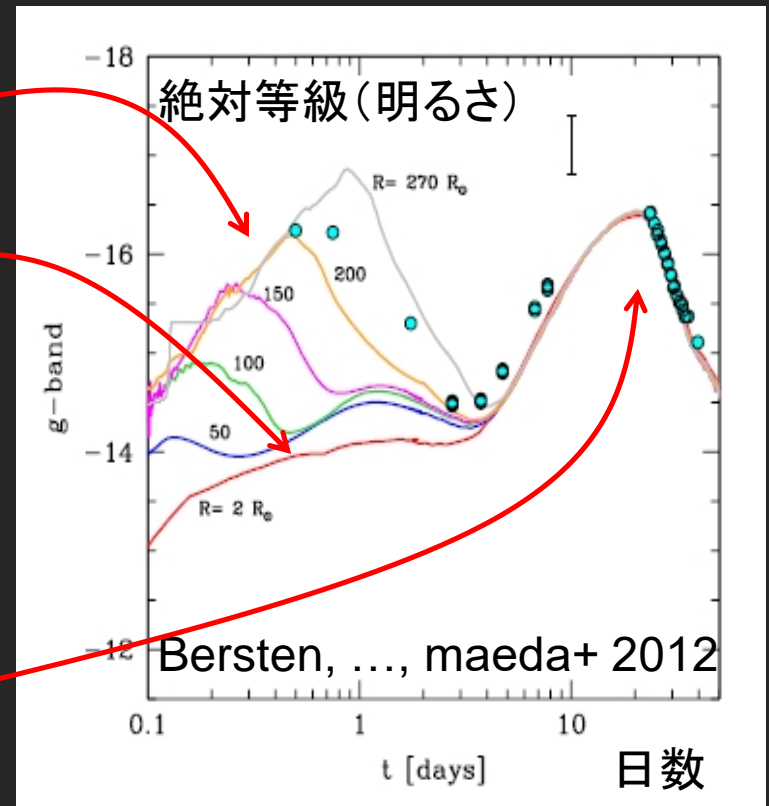
白色矮星

爆発

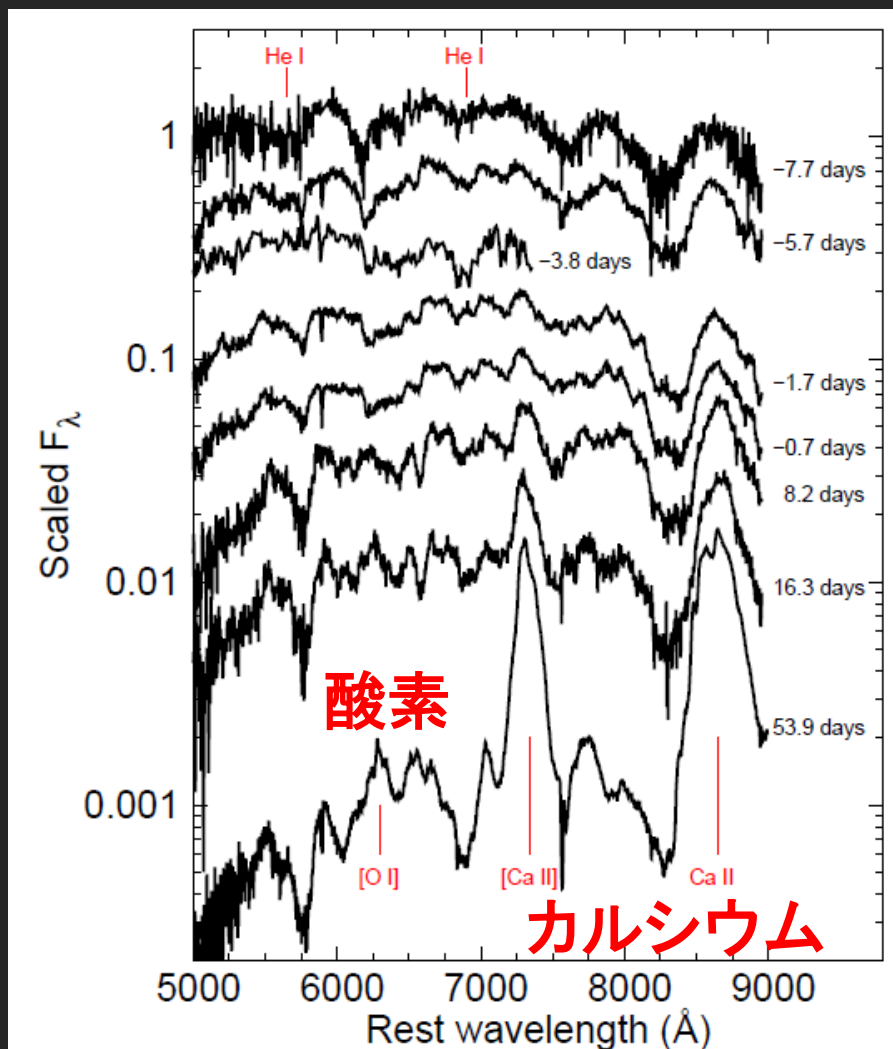
爆発直後(数日)

爆発後数週間

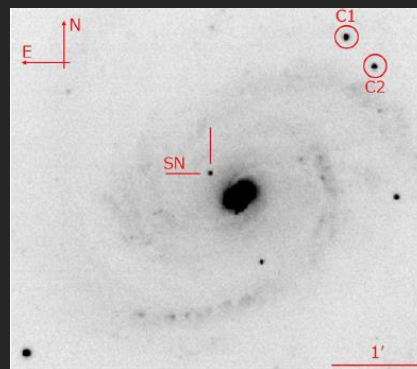
重い星の場合、さらに爆発前に出した「星周物質」で囲まれている。



せいめい・かなたで観測したカルシウム過剰超新星

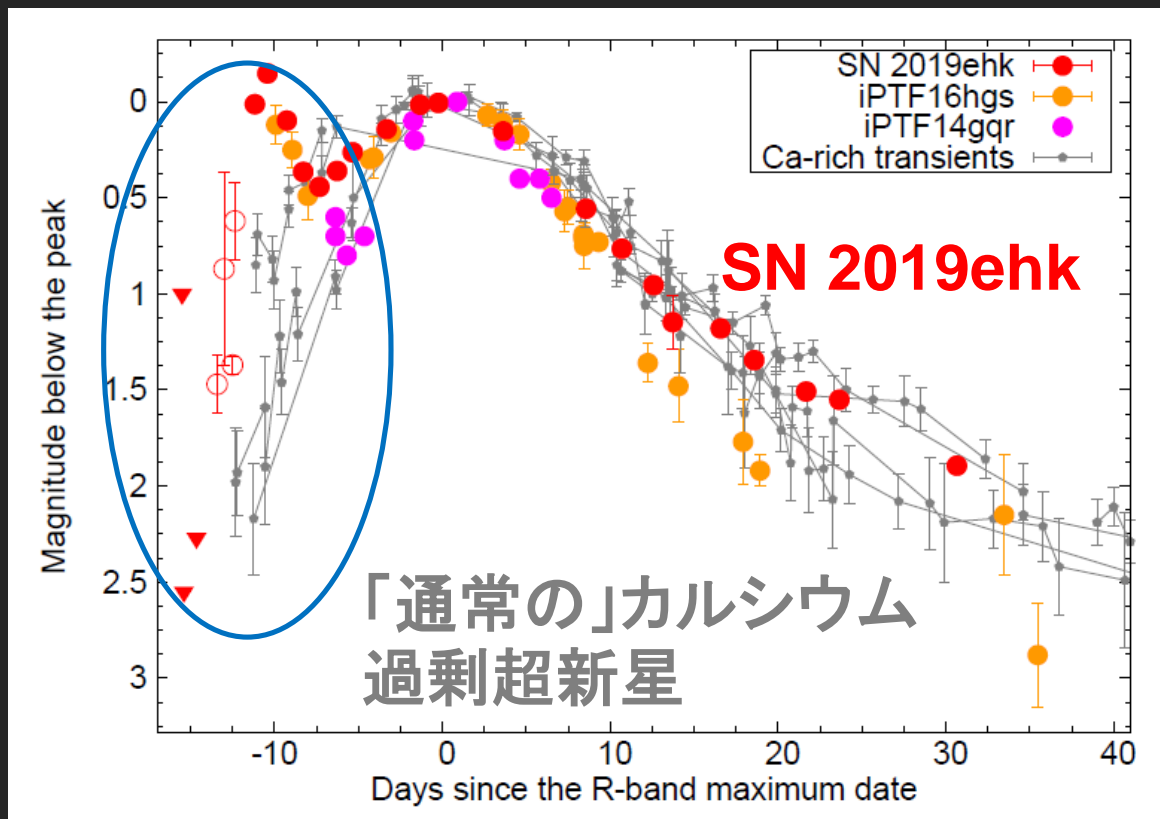


SN 2019ehk (Nakaoka, Maeda+ 2020):
2019年4月29日発見。
2日後からかなた+せいめいで
観測開始。
発見から2か月後にジェミニ望遠鏡、
半年後にはすばるで観測
(すでに暗い⇒8m望遠鏡)。



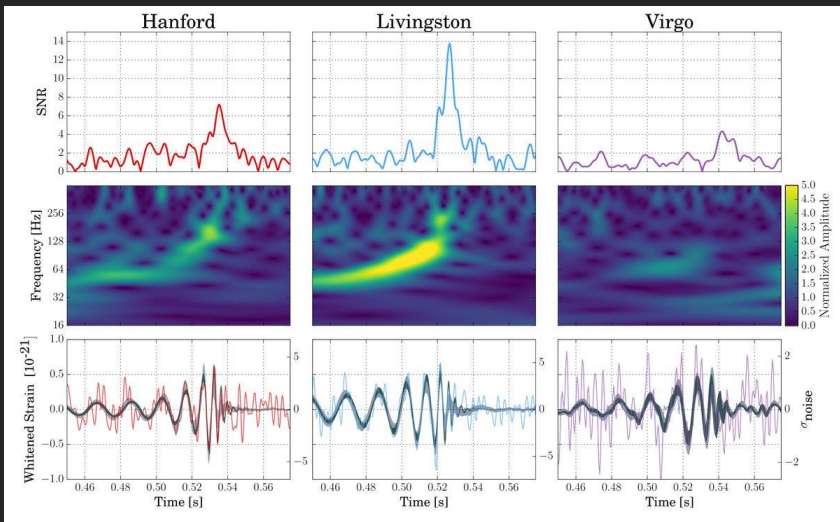
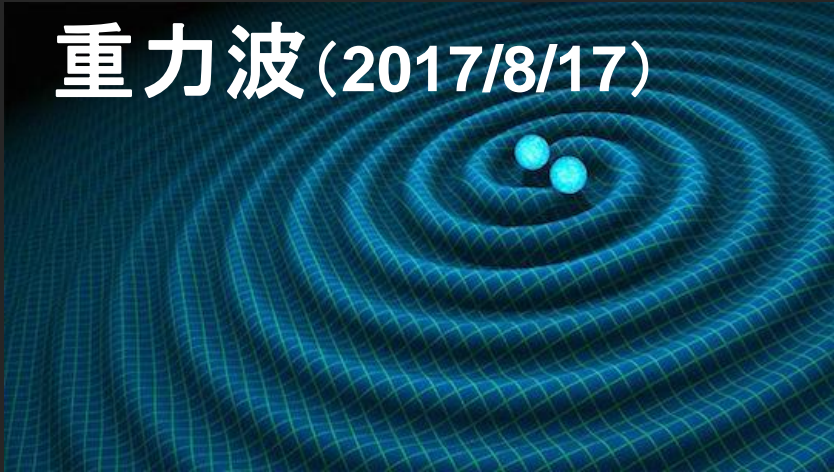
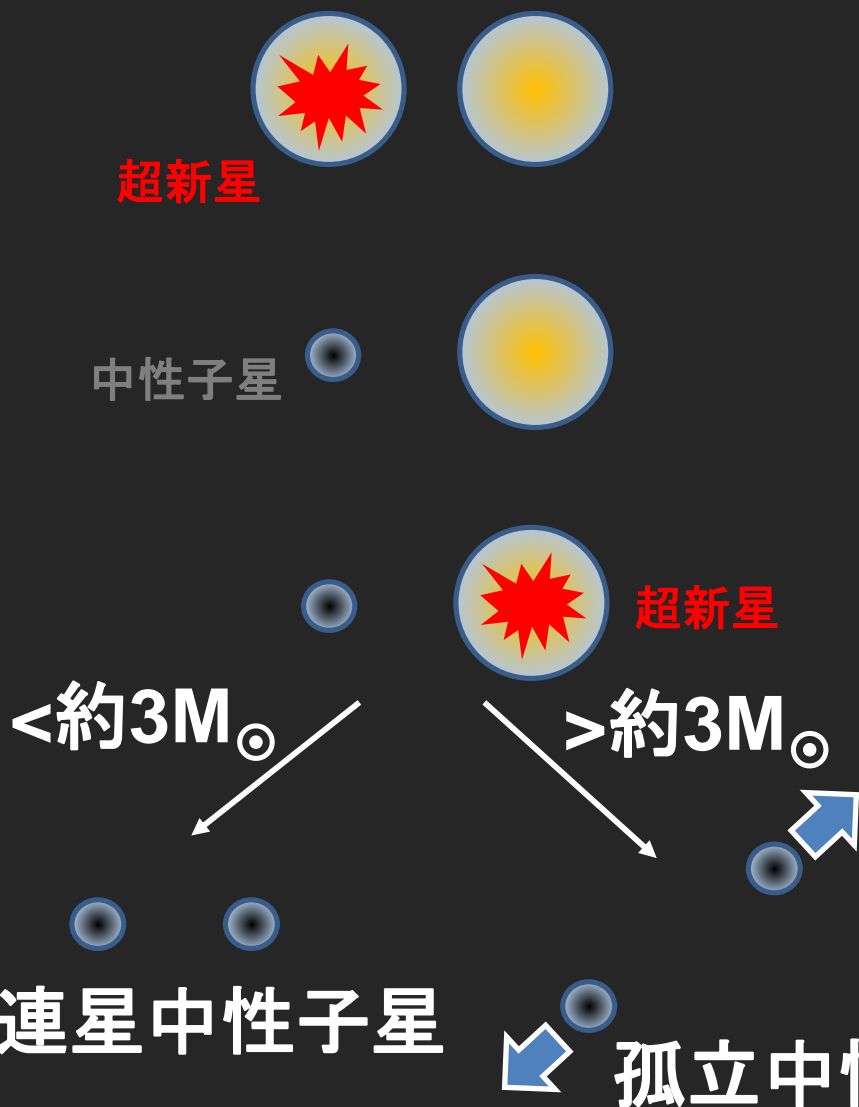
重い星が多い場所(銀河の腕)で
発生した、カルシウム過剰超新星。

初期に明るい⇒重い星の爆発では？



初期に明るい放射を示したほかの二例も、SN 2019ehkと同様に、重い星のいる環境で爆発している。
理論的な解析から、誕生時 $10M_{\odot}$ ⇒爆発時 $2M_{\odot}$ か $3M_{\odot}$ 程度の大質量星(の中でも最も軽い星)の爆発と思われる。

連星中性子星の母天体？



おそらく、複数の種族が存在

Ia型超新星の未解決問題

爆発に至る進化？

爆発の仕方？

中心での炭素核反応暴走



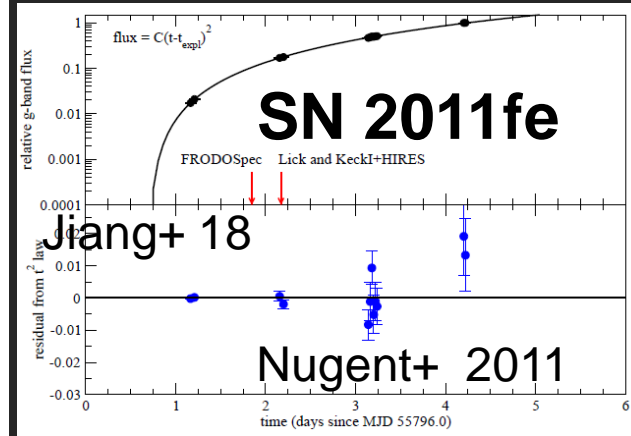
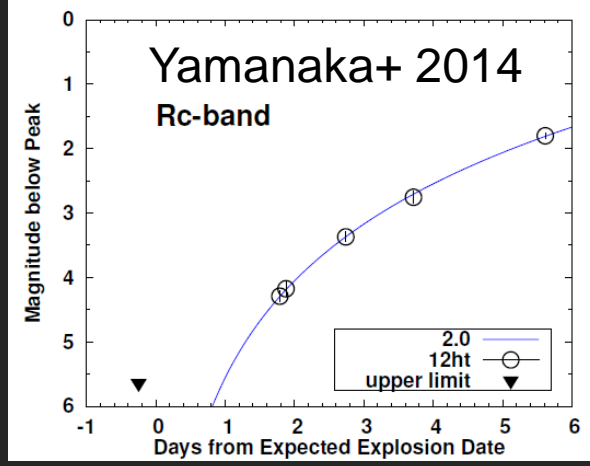
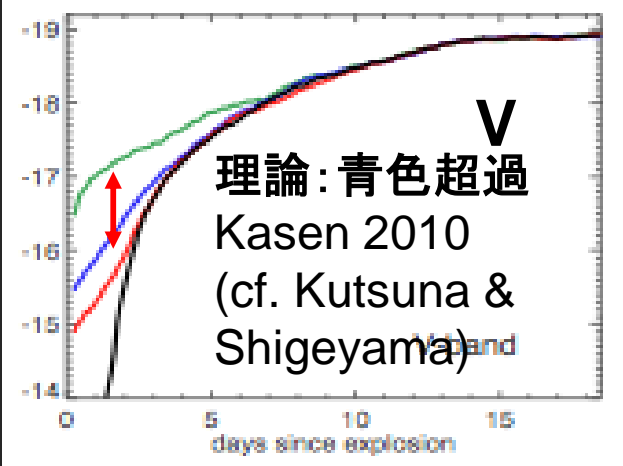
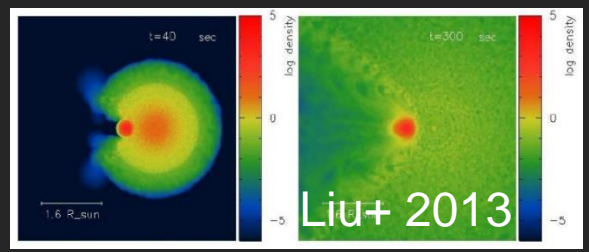
「若い」種族？



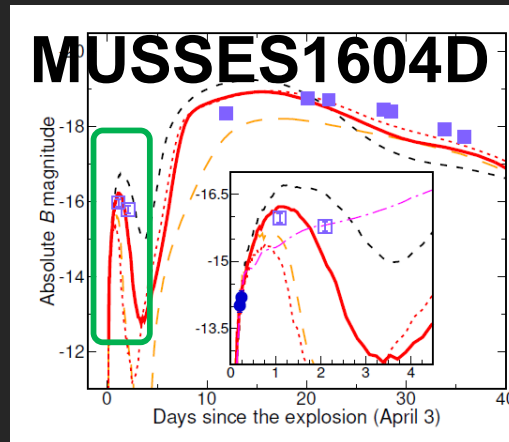
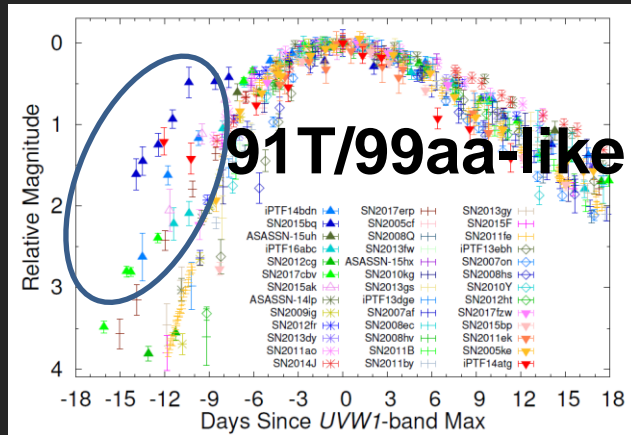
「古い」種族？



伴星はいるか？



“普通の”Ia型超新星では、初期超過は(ほとんど)見つからない。

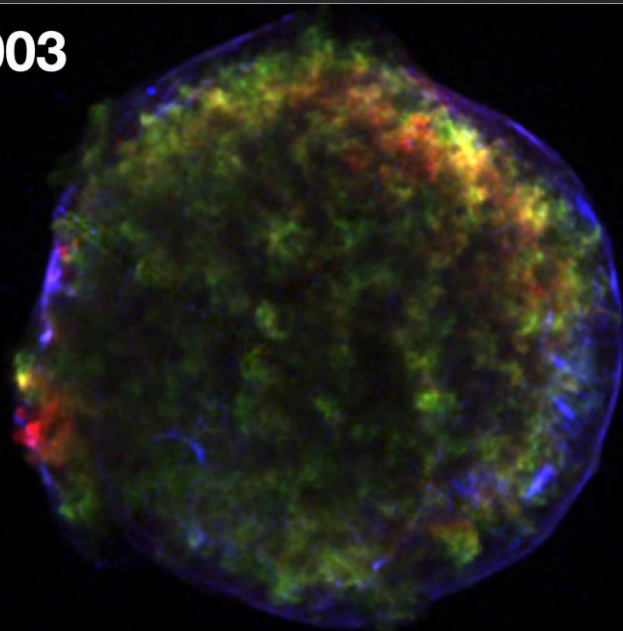


“特異な”Ia型超新星で、初期超過発見。報告例増加中
しかし、伴星の効果ではないものがほとんど？

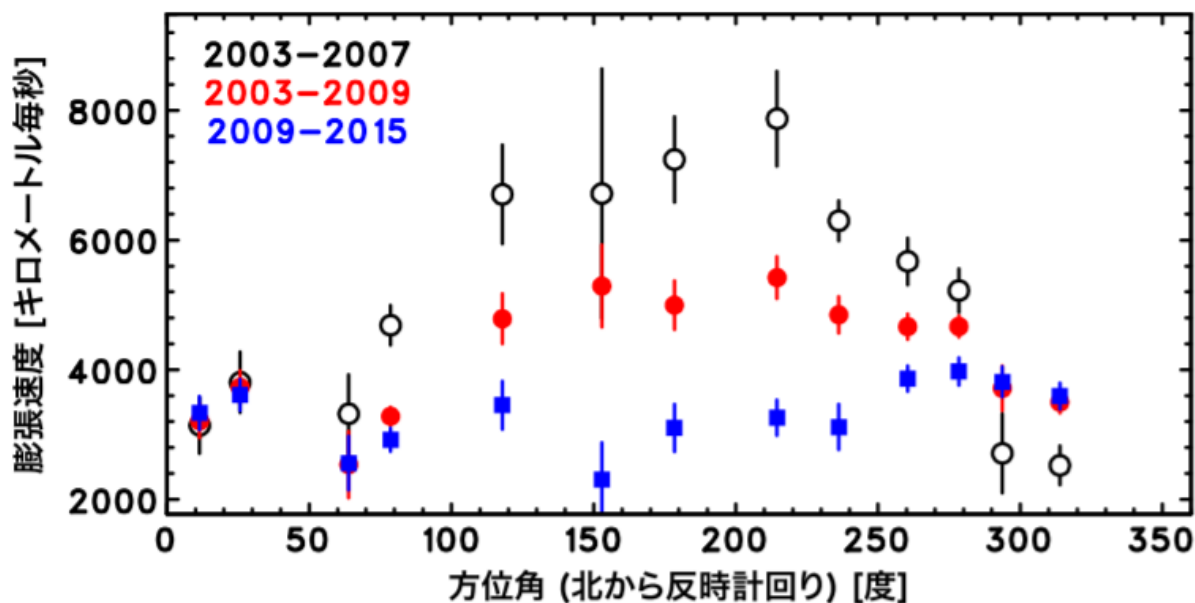
ティコの超新星残骸

1572年に爆発した超新星の現在
(ティコ・ブラーエによる観測)。
「非常に普通」のIa型超新星
(すばるによるエコー分光 : Krause+ 08)

2003



衝撃波の減速の発見 ; Tanaka+ 2021



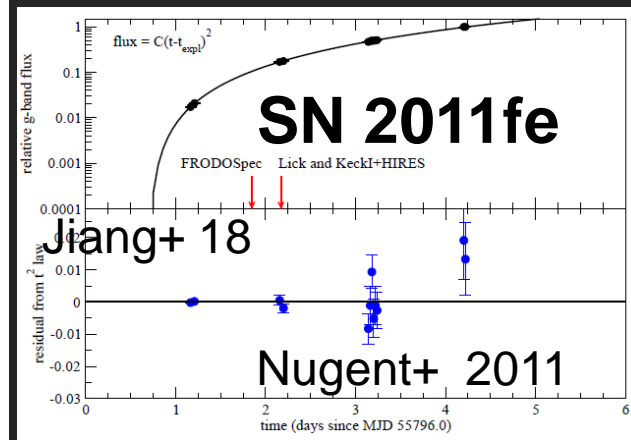
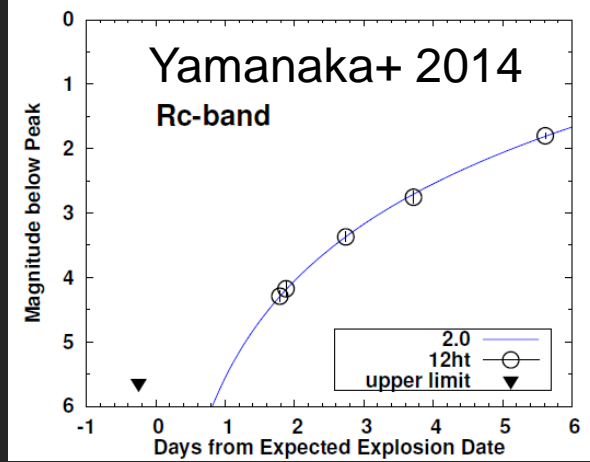
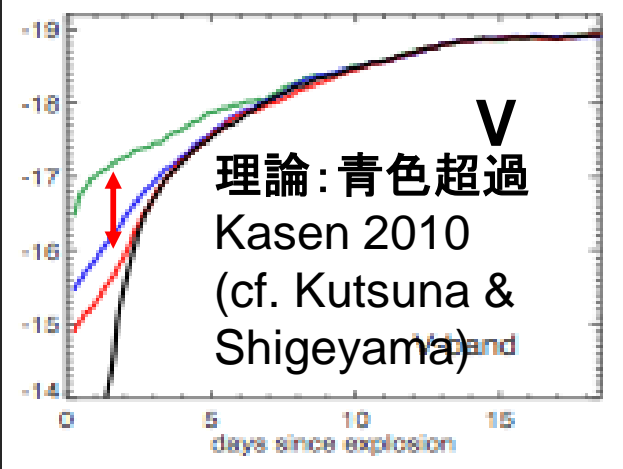
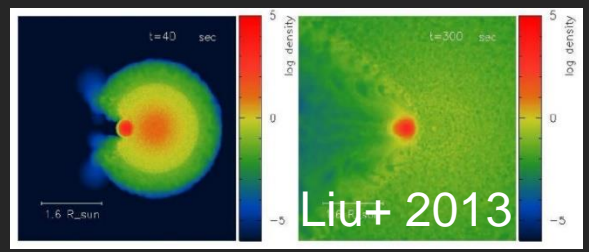
高密度の分子雲との
衝突。

濃い分子雲内(星形
成領域)で誕生・爆発
したと考えられる。

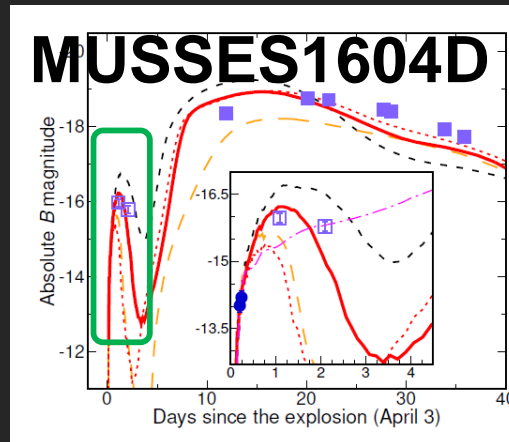
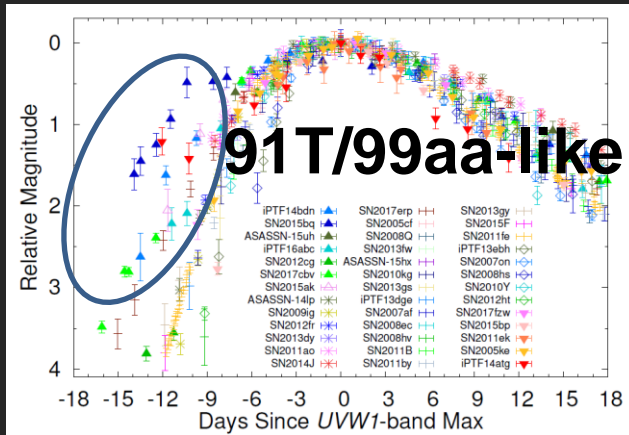
「若い」種族。

(伴星はいるはず...?)

伴星はいるか？



“普通の”Ia型超新星では、初期超過は(ほとんど)見つからない。

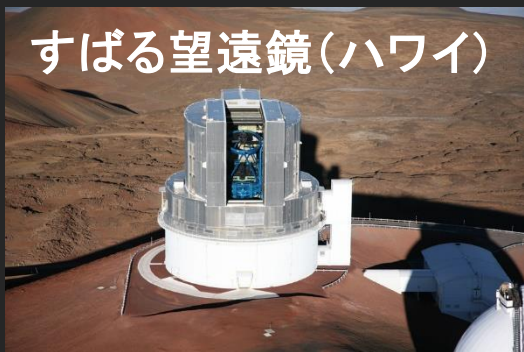


2012ht

“特異な”Ia型超新星で、初期超過発見。報告例増加中
しかし、伴星の効果ではないものがほとんど？

表面ヘリウム爆発によるIa型超新星？

すばる望遠鏡(ハワイ)

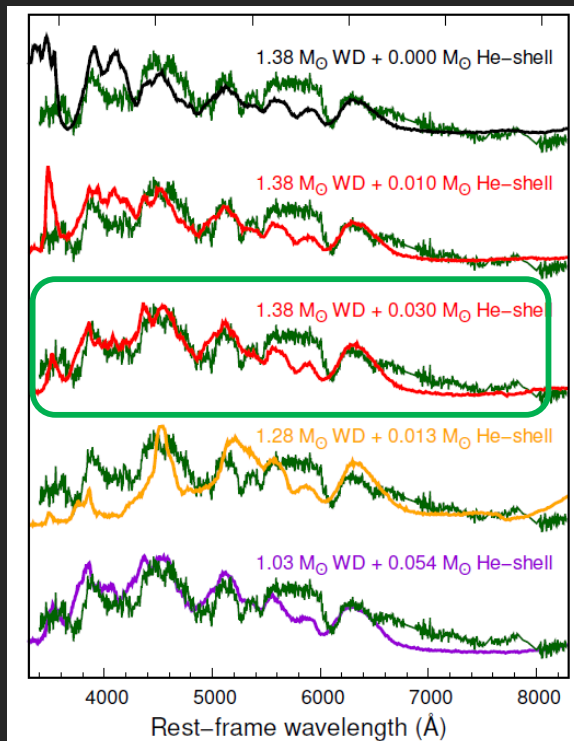
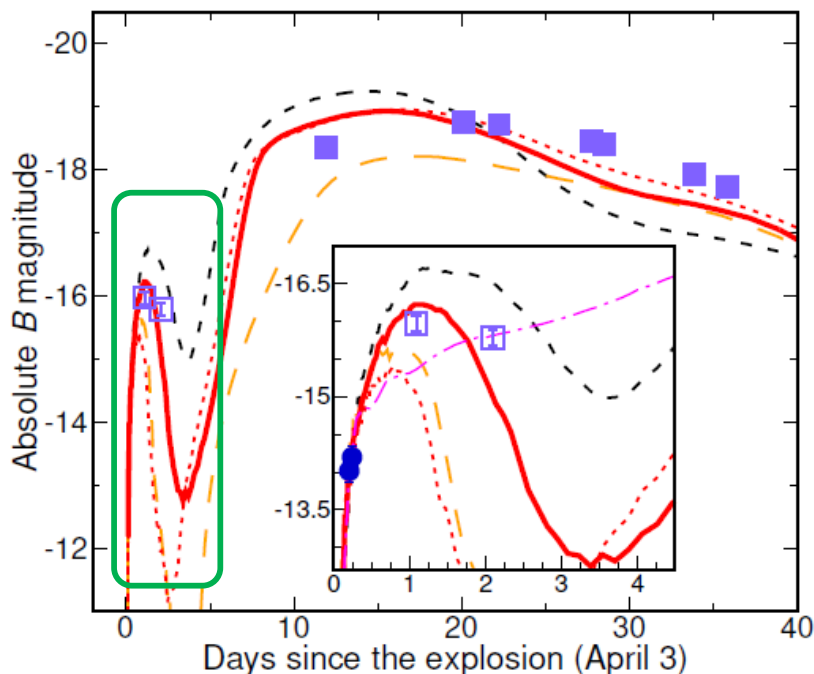


8mすばる望遠鏡による爆発直後の超新星探査
輻射輸送計算による理解
→表面核暴走で引き起こされるタイプの存在。

Jiang, Doi, Maeda, Nature, 2017
Maeda+, 2018



広視野カメラ
HSC

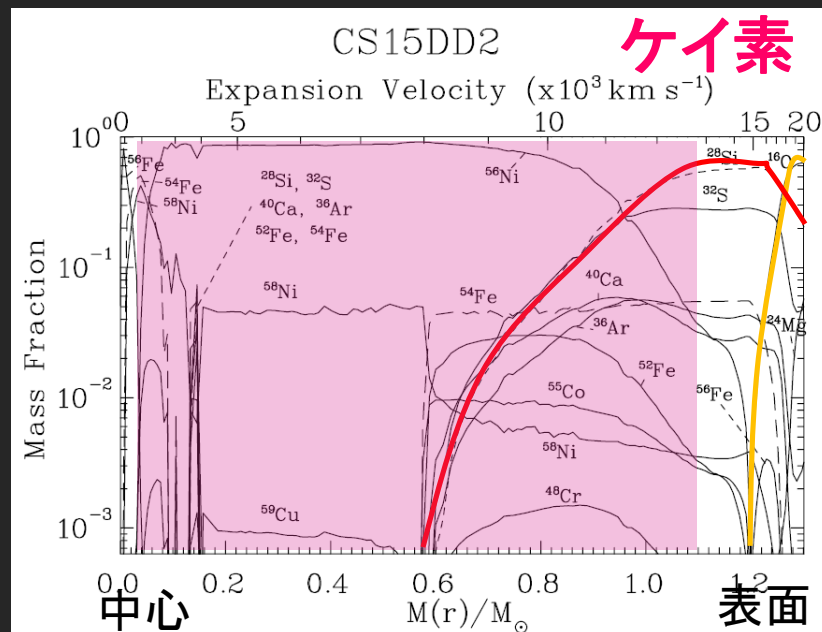
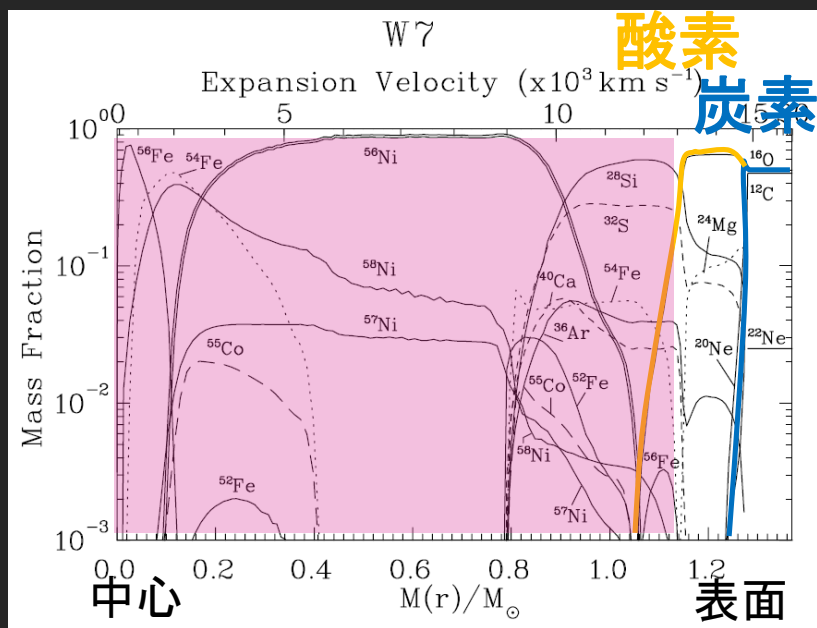


Ia型超新星：表面組成？

- 例えば、標準的な二つのモデル(ともに中心炭素着火モデル)。

爆燃モデル(Nomoto+ 84)

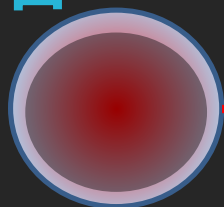
爆燃+爆轟モデル(Iwamoto+ 99)



最も外側の組成で判別できる。

超新星の時間進化

爆発後数日



最外層の物質・元素の情報



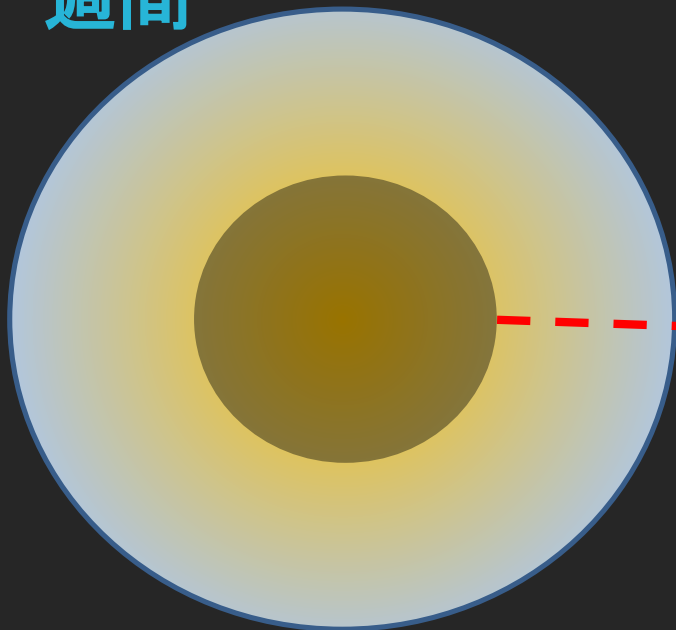
時間経過



(高速膨張⇒密度減少)

>一週間

外側ほど高速で広がる。



内側の物質・元素の情報

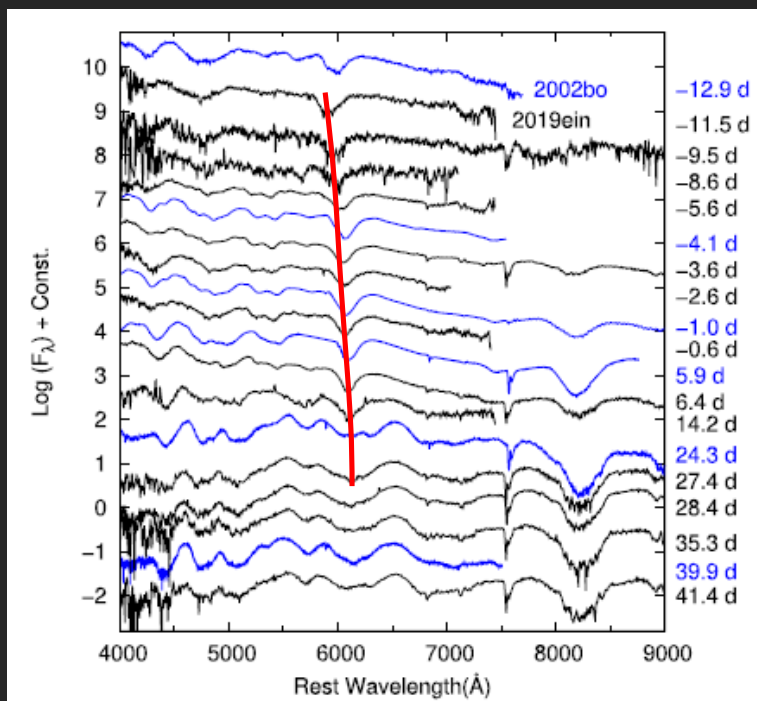


元素の切り分け＝分光
爆発直後の分光観測

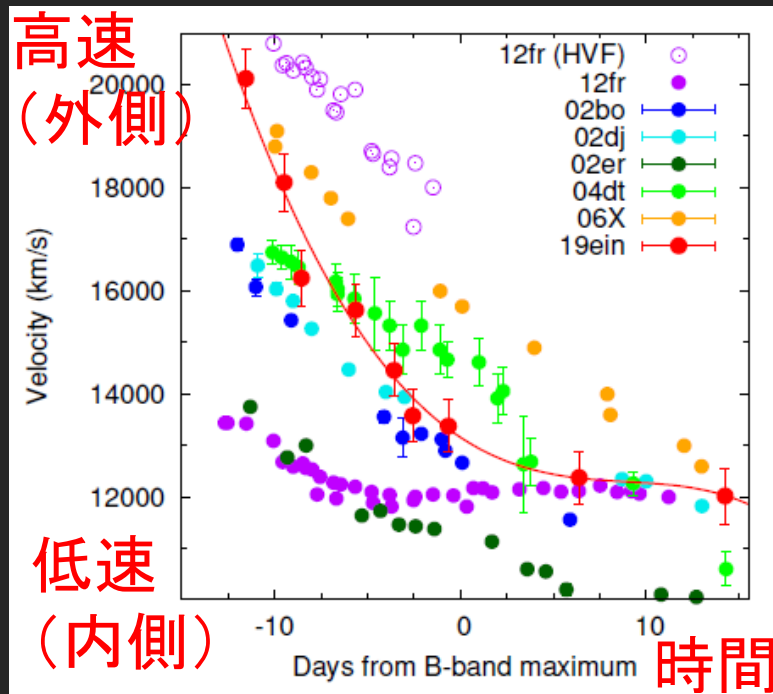
せいめいによる爆発直後からの分光観測例

- Ia型超新星 SN 2019ein (Kawabata, Maeda et al. 2020)。
- 2019年5月1日発見。
- 同日にせいめい+かなた望遠鏡で観測開始。

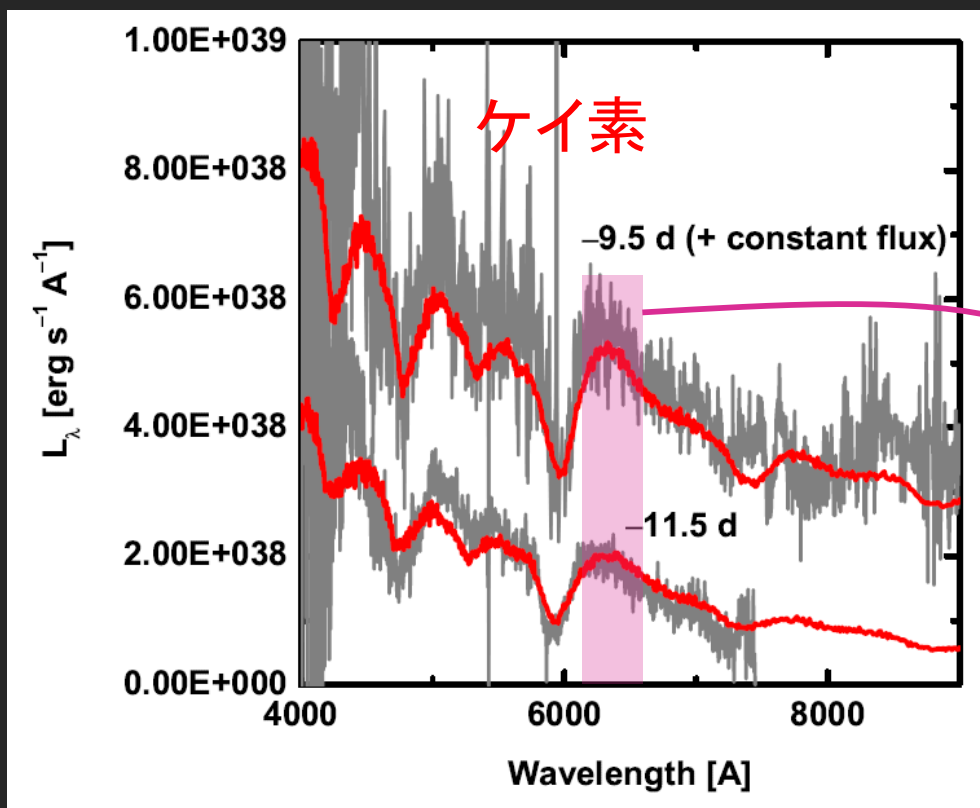
ケイ素



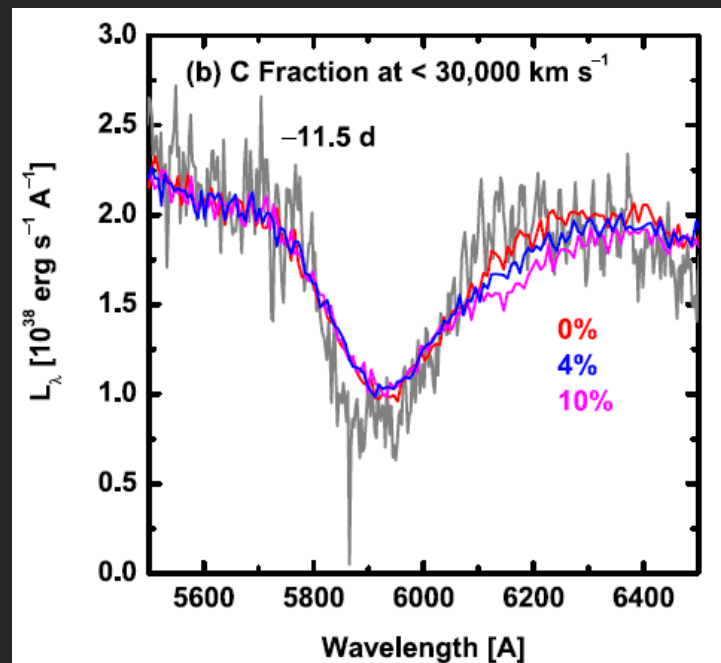
ケイ素を放射する層の速度



コンピュータシミュレーションとの比較



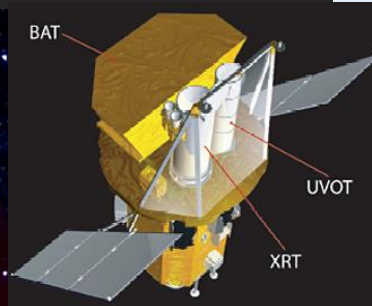
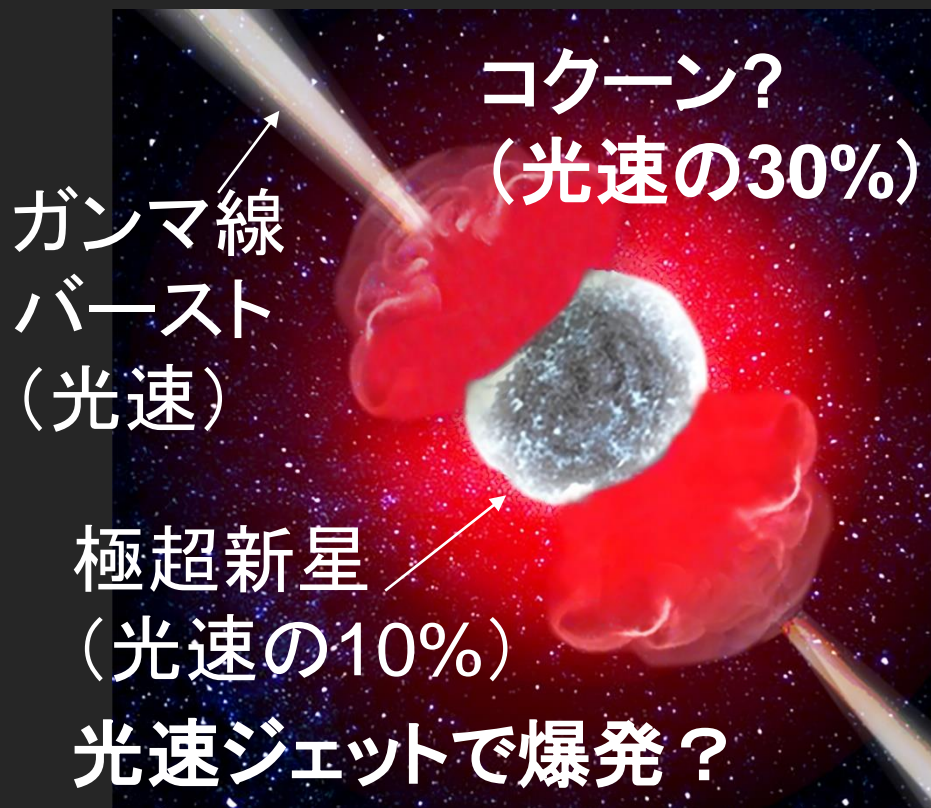
炭素がいるはずの波長(色)



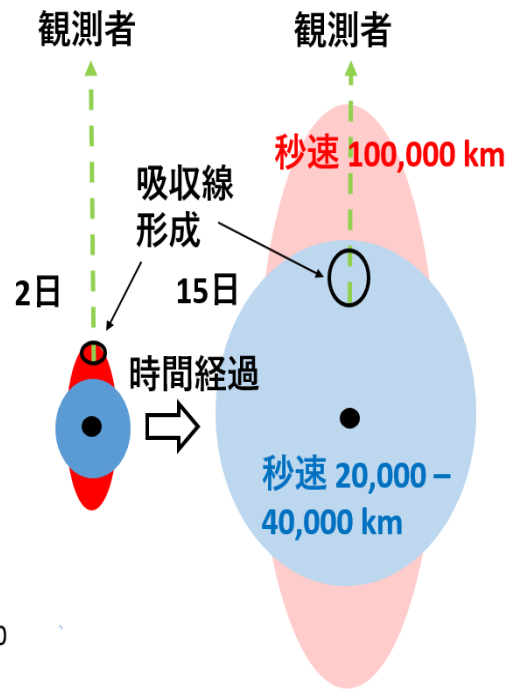
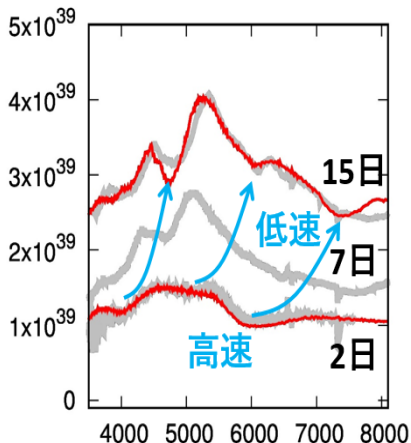
最外層部は主にケイ素。
炭素は(ほぼ)存在しない。
爆発モデルへの強い制限。

爆発直後の超新星：特異な天体の例

ガンマ線バースト：謎の天体。可視だと変な超新星に見える。



観測 v. 輻射理論



超高速成分 (~0.3c) の発見

Izzo, de U. Postigo, Maeda+, 2019, Nature

まとめ

- 近年の観測の発展により、恒星進化・爆発機構の理論の様々な検証が可能になっている。
 - 特に鍵となるのは、爆発直後の観測。
- 大質量星終末期進化。
 - 謎の活動性。一般的？解釈が正しい？新しい進化理論？
- 多様な恒星進化経路。
 - 連星中性子星の形成過程など。
- Ia型超新星の親星、爆発機構。
 - 親星問題は未解決。多様な爆発機構？
- 特異な爆発現象の正体に迫る。