

新星の分光観測と イジェクタ構造

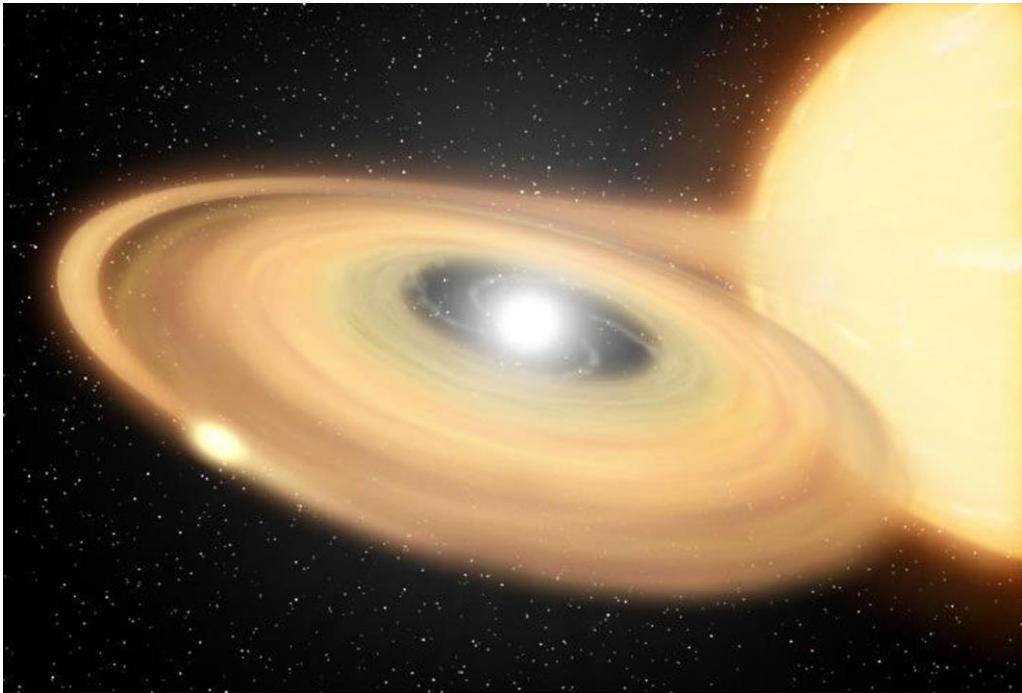
京都産業大学 神山天文台
新井 彰

Contents

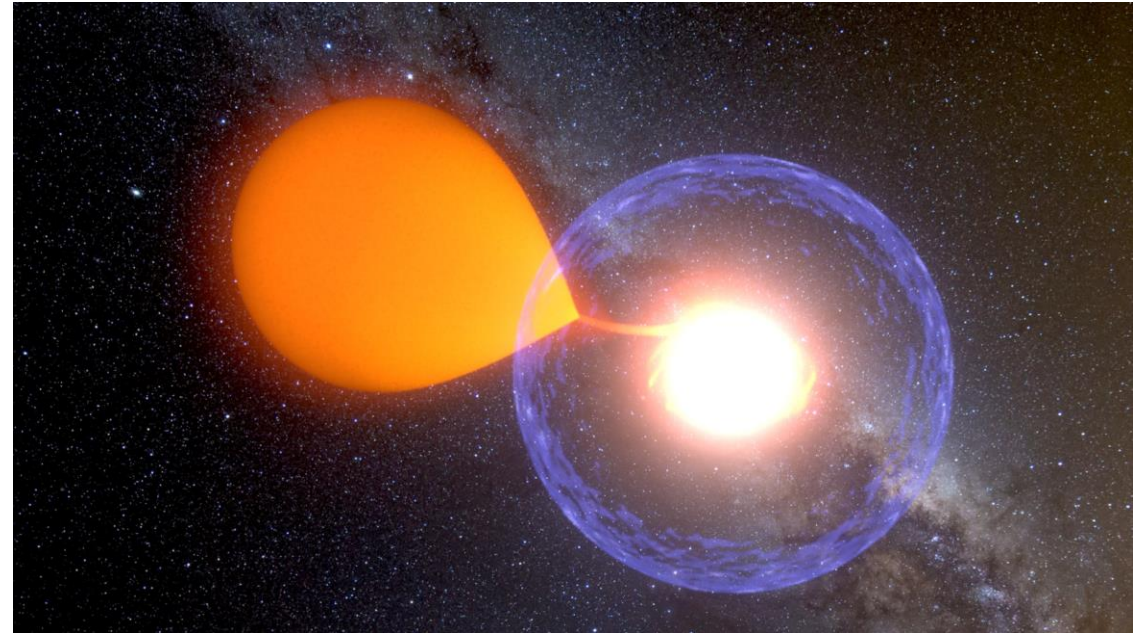
- 新星の元素合成ーリチウム、炭素窒素の同位体
- 新星の初期のイジェクタ構造
- 初期のイジェクタ構造を探るための今後の展開

新星とは

- 白色矮星と、主系列星もしくははより進化した伴星の近接連星系で生じる爆発現象
- 伴星の表層のガスが降着円盤を介し白色矮星の表面に薄く積もらせる
- そのガス層が厚くなるにつれて温度・密度は次第に上昇
- ある臨界点を超えると急激な熱核反応（熱核暴走反応）による爆発現象を引き起こす
- 爆発時にはPPチェーン反応, CNOサイクル反応による元素合成が生じる

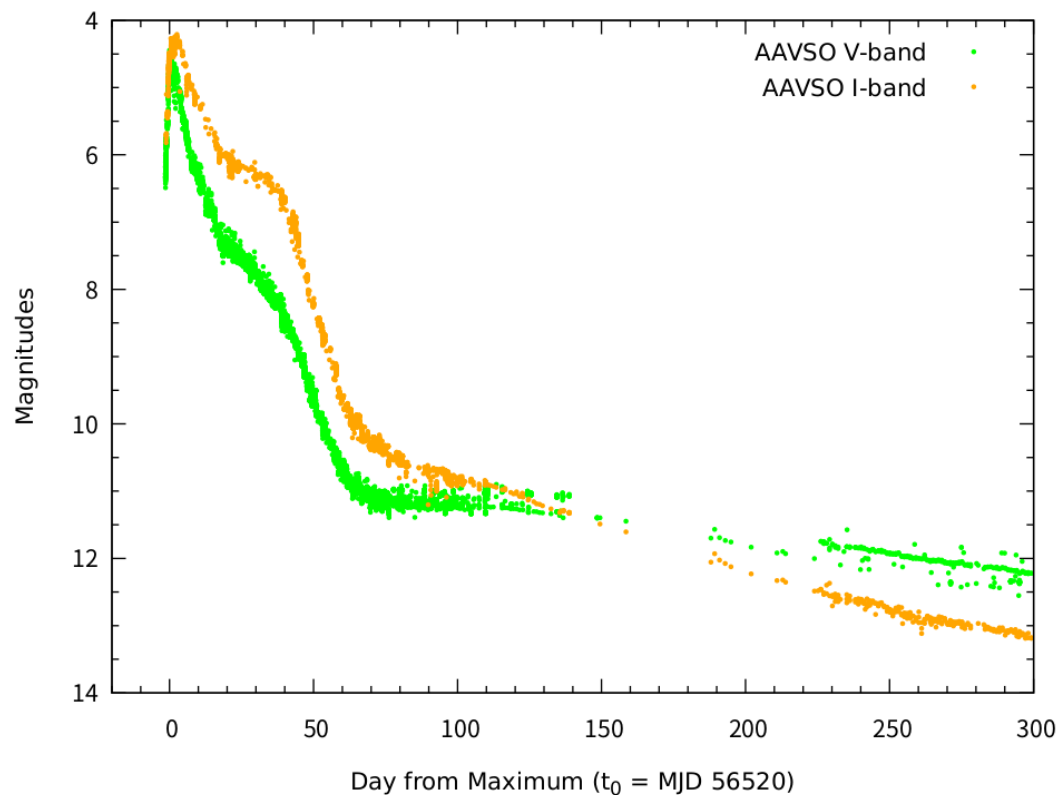


Credit: NASA



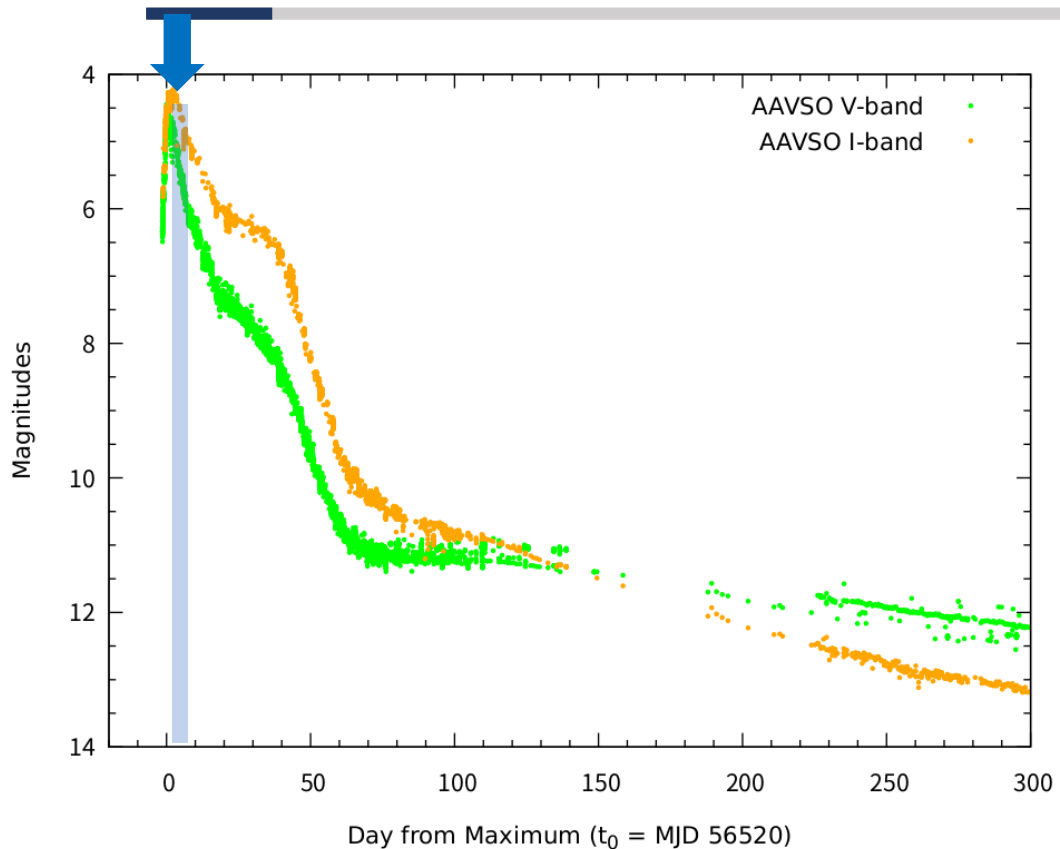
Credit: K. Ulaczyk / Warsaw University Observatory

新星の光度・スペクトル



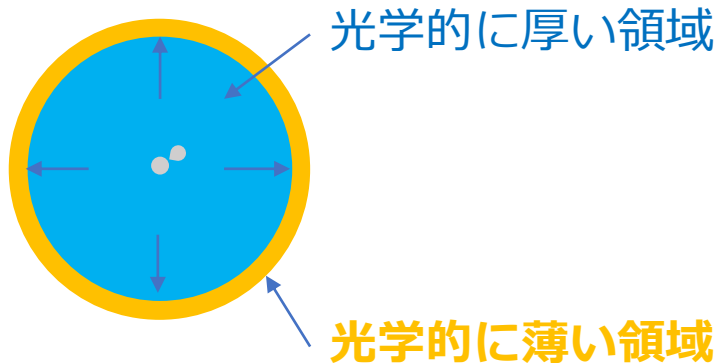
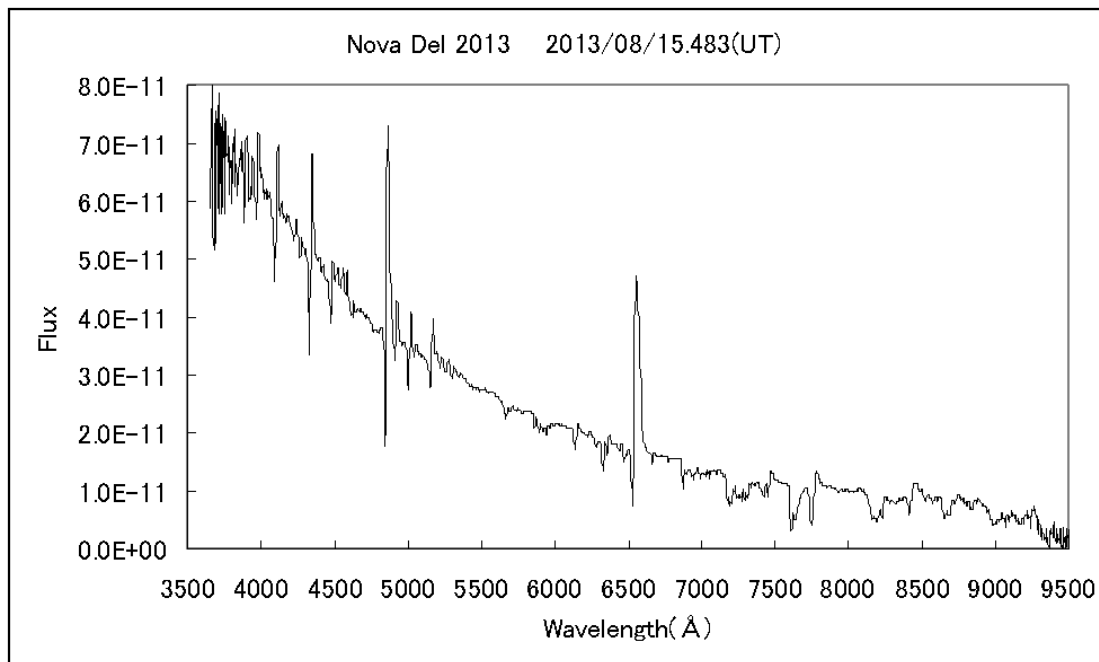
V339 Del
(Nova Del 2013)

新星の光度・スペクトル

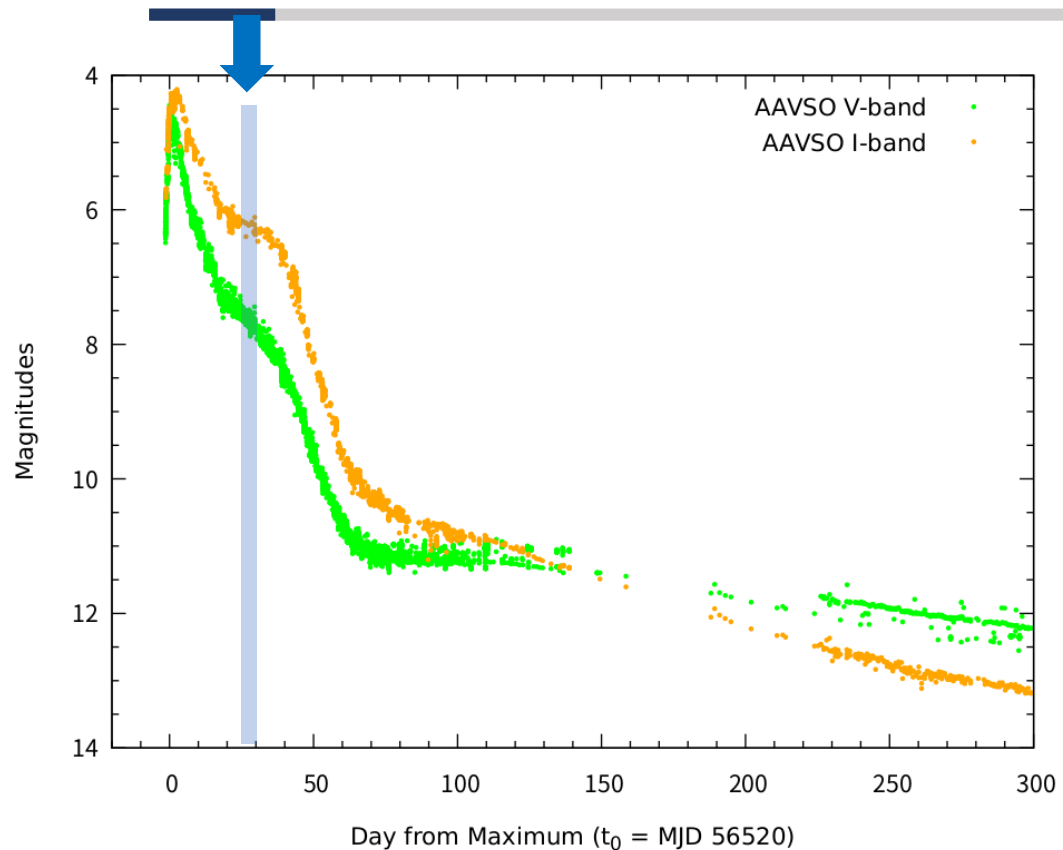


V339 Del
(Nova Del 2013)

Spectrum (Fujii-Kurosaki Observatory)

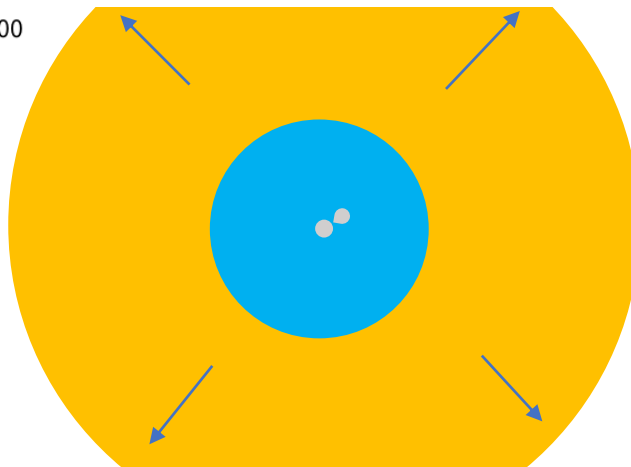
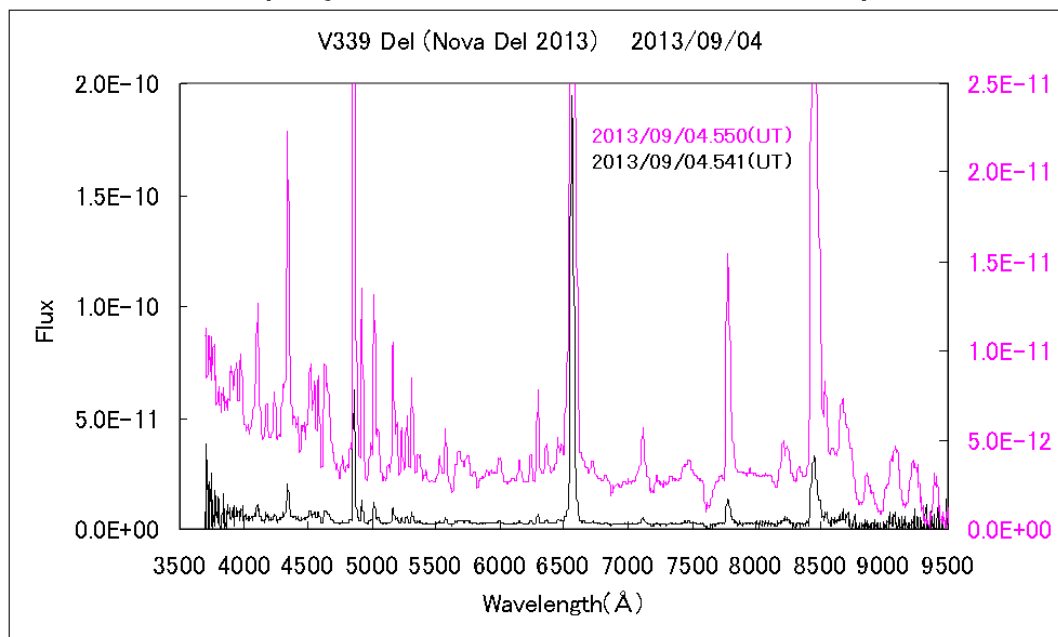


新星の光度・スペクトル

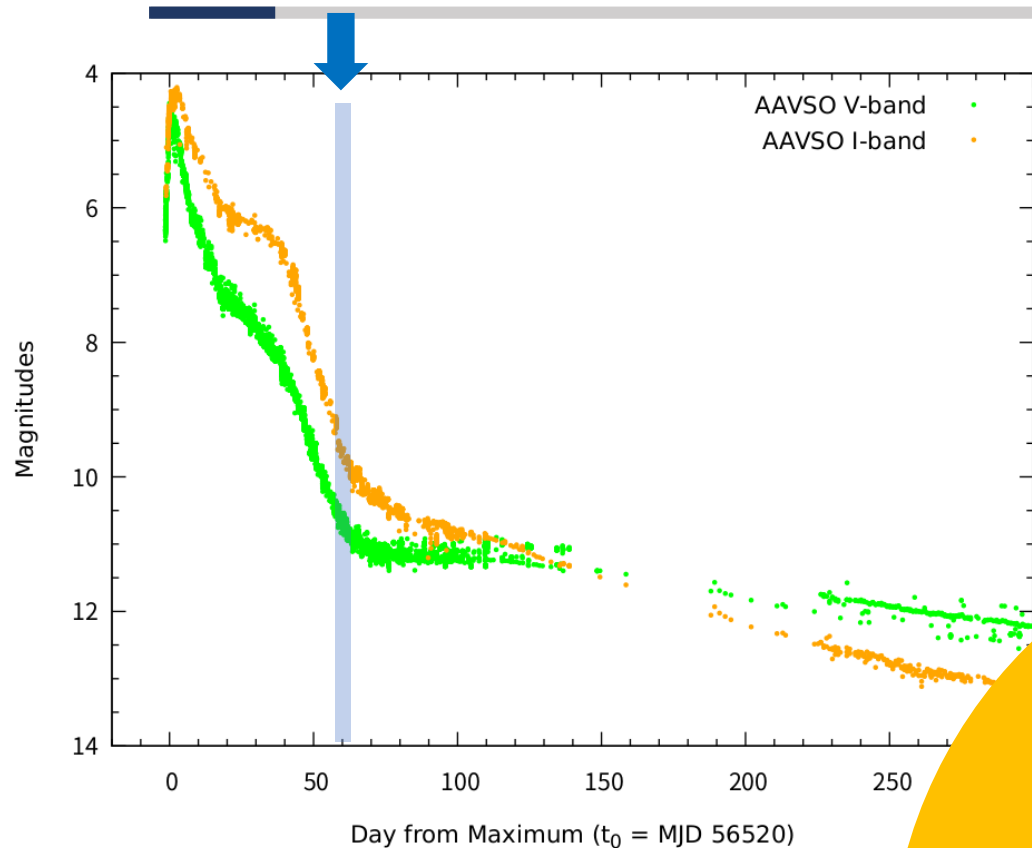


V339 Del
(Nova Del 2013)

Spectrum (Fujii-Kurosaki Observatory)

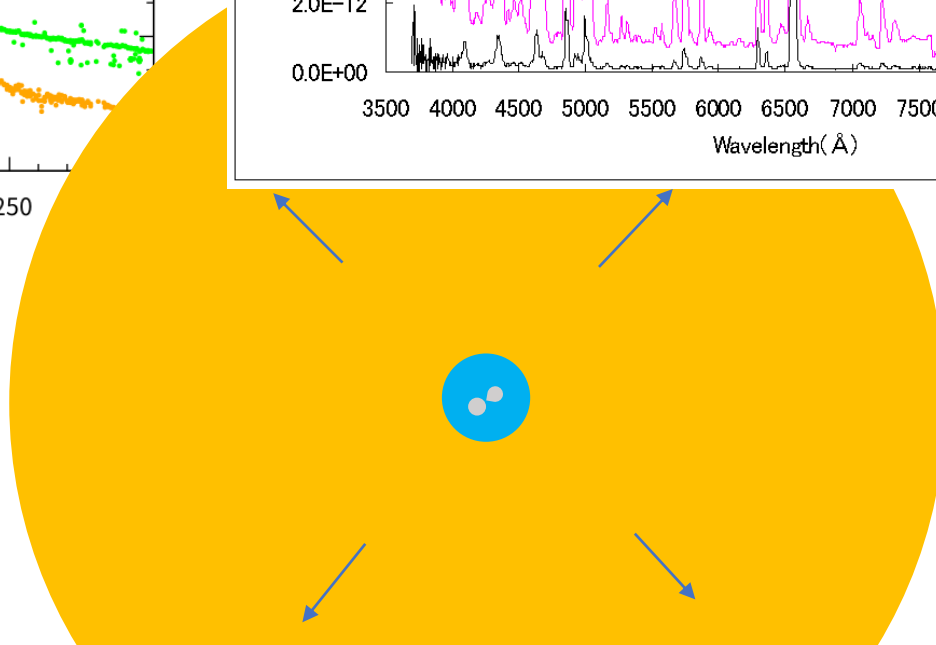
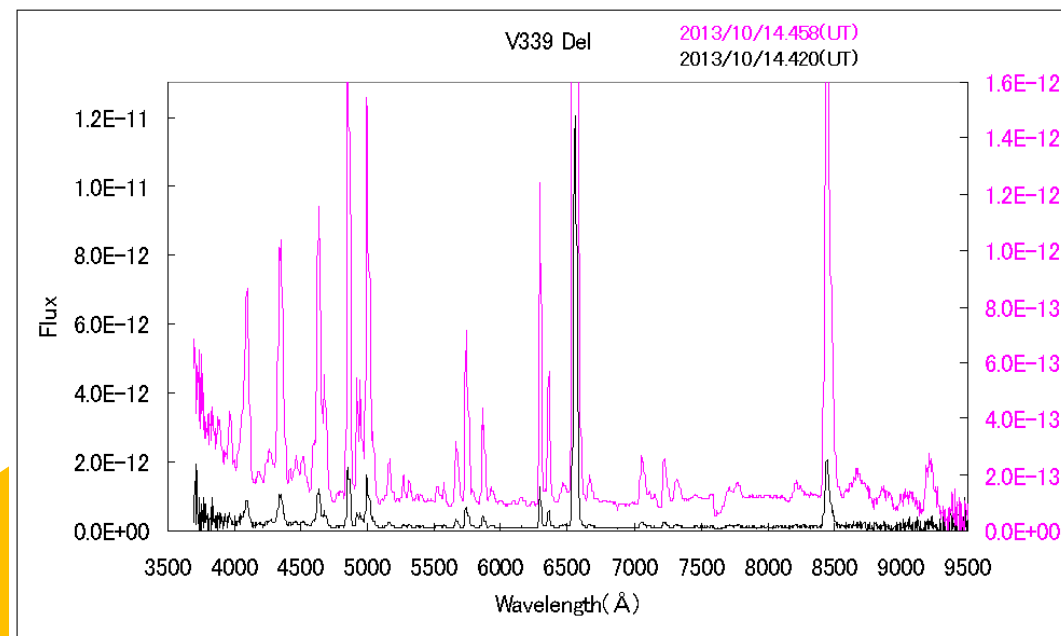


新星の光度・スペクトル

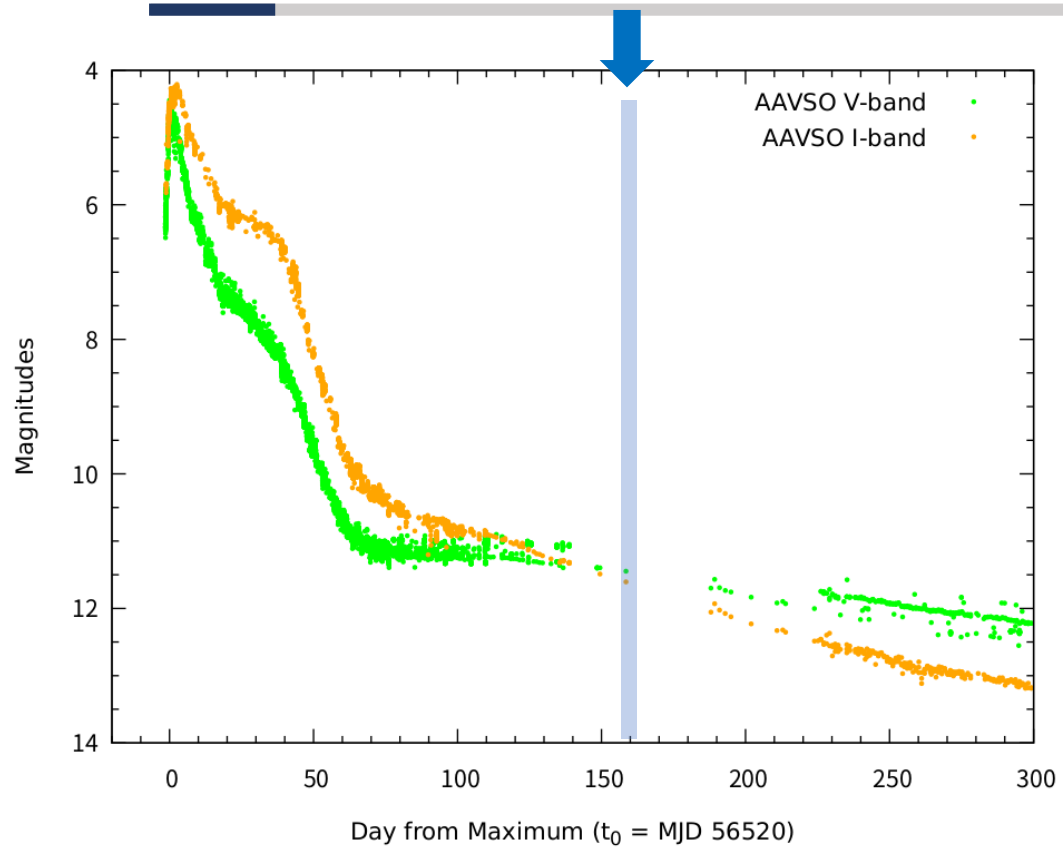


V339 Del
(Nova Del 2013)

Spectrum (Fujii-Kurosaki Observatory)

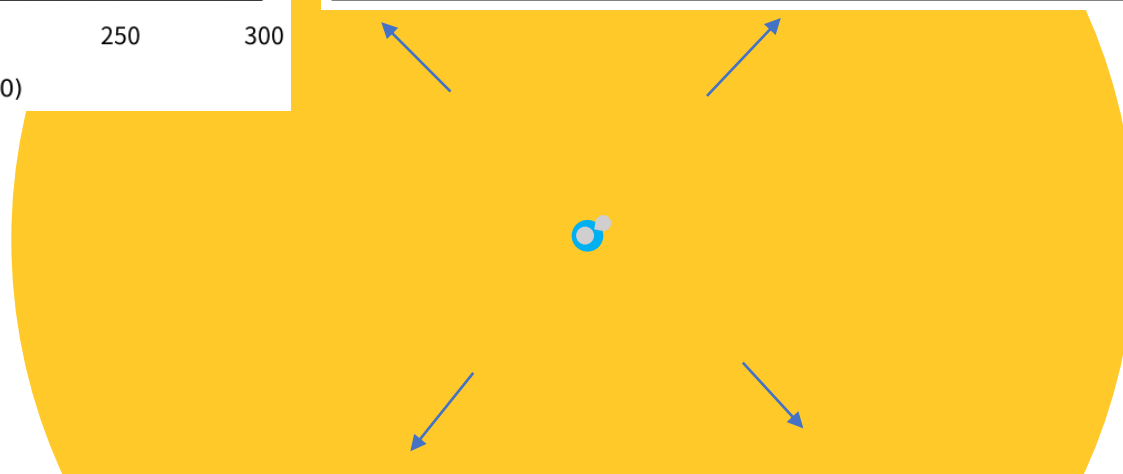
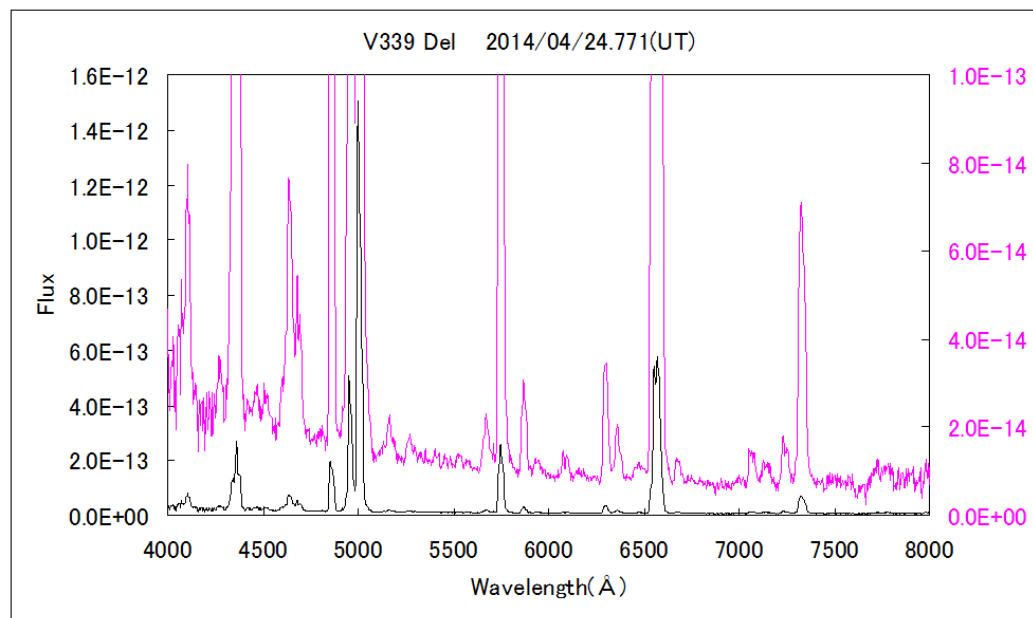


新星の光度・スペクトル



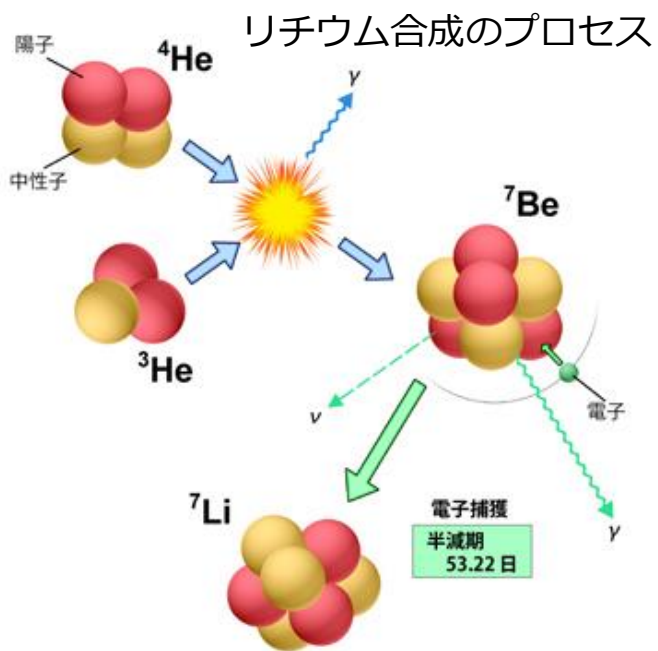
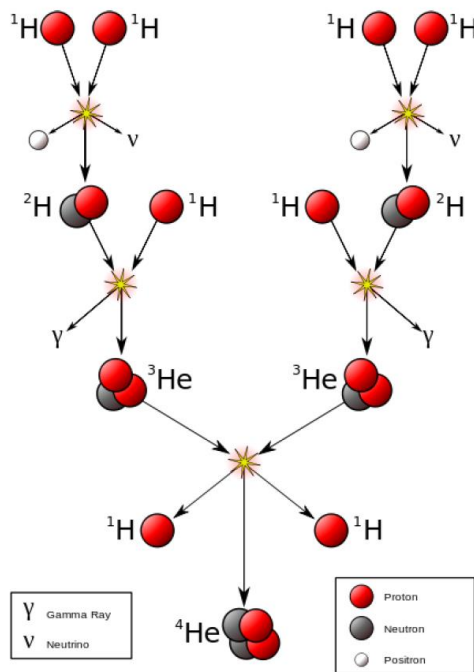
V339 Del
(Nova Del 2013)

Spectrum (Fujii-Kurosaki Observatory)



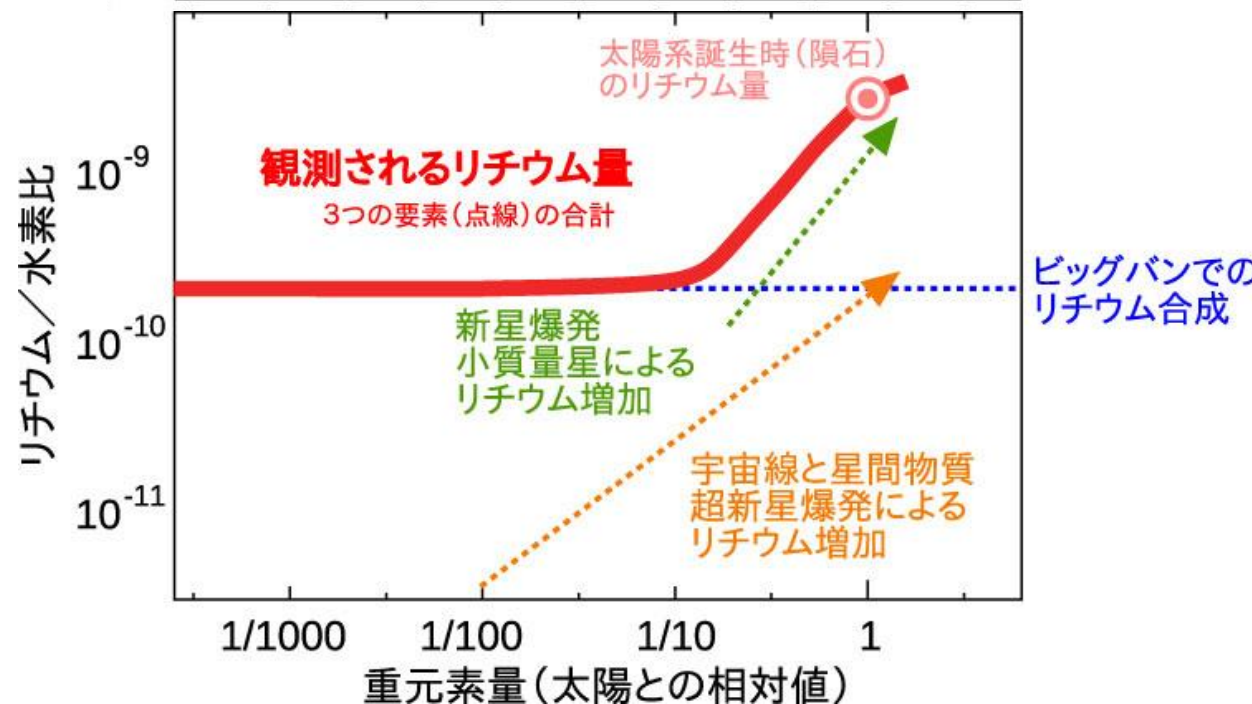
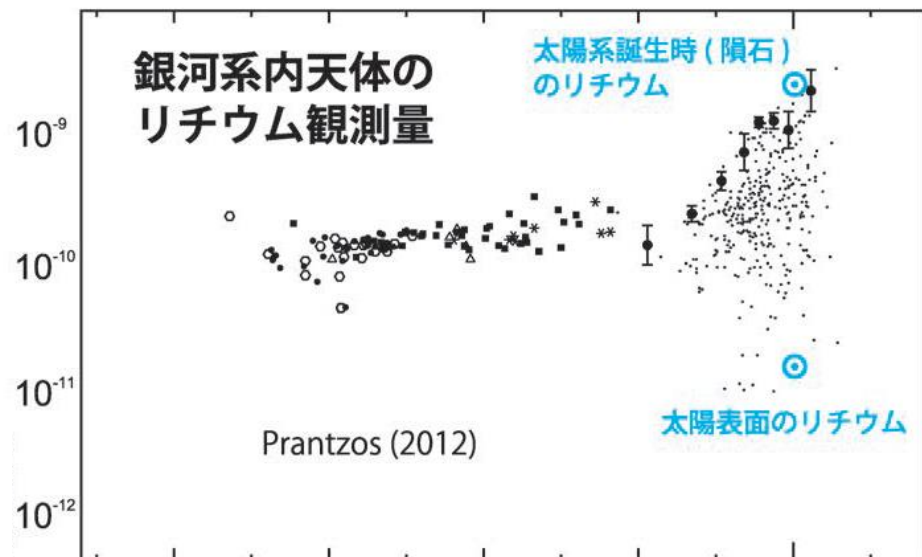
新星の元素合成

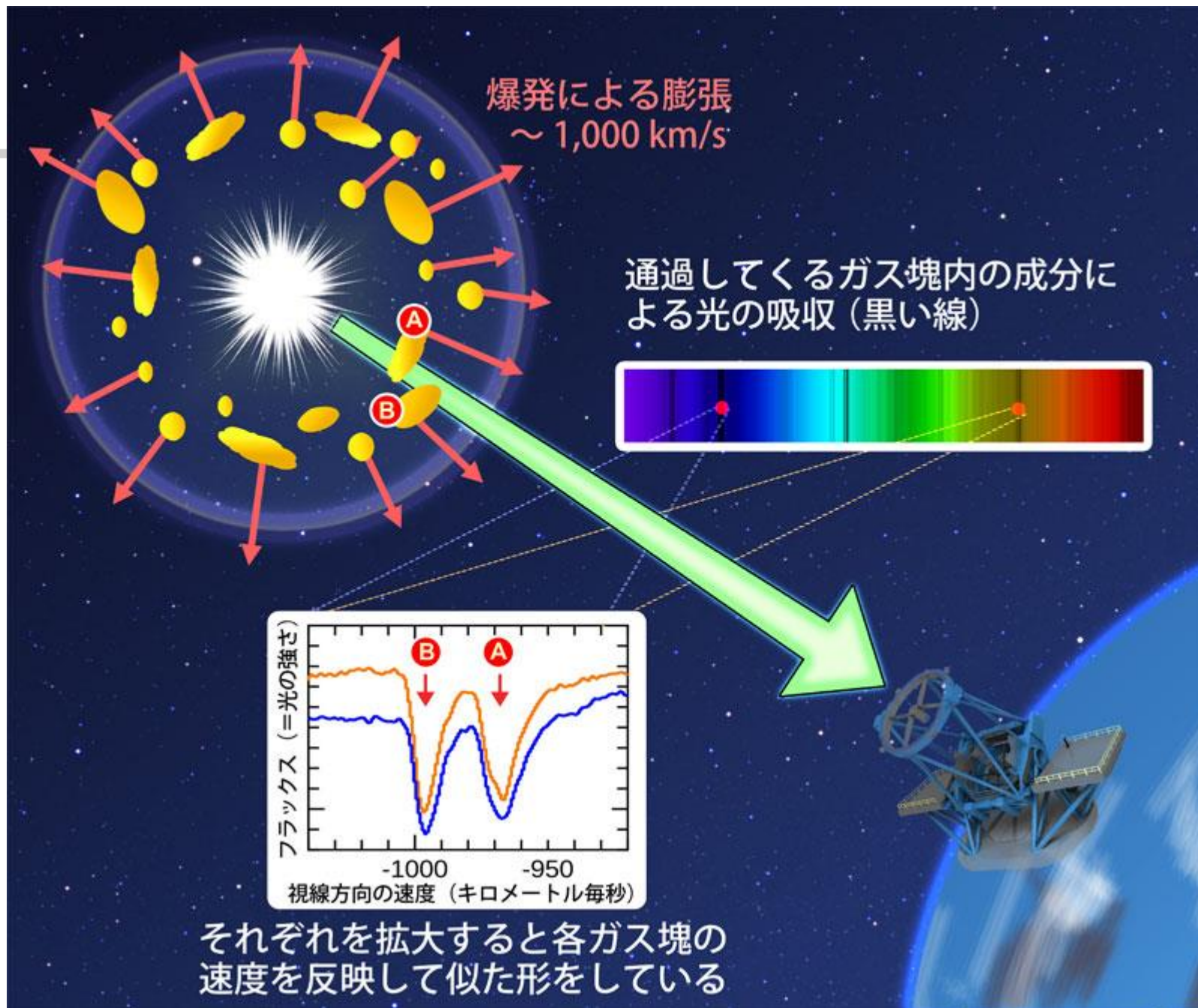
- 新星におけるリチウムの合成
 - 天体から放出されている観測的証拠は
国立天文台・すばる望遠鏡/HDSで
捉えた Nova Del 2015(V339 Del)が初めて



国立天文台

https://subarutelescope.org/Presrelease/2015/02/18/j_index.html

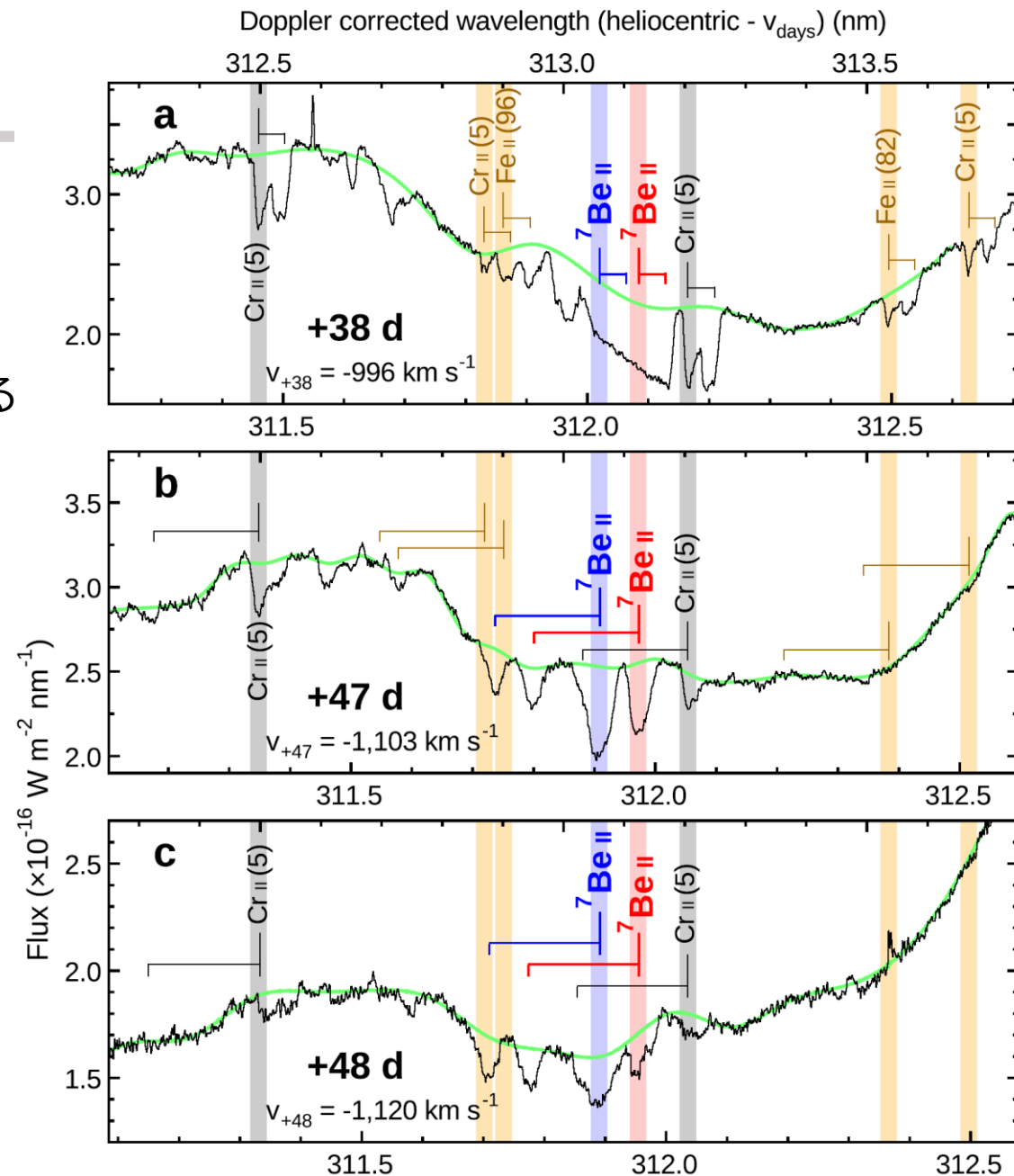
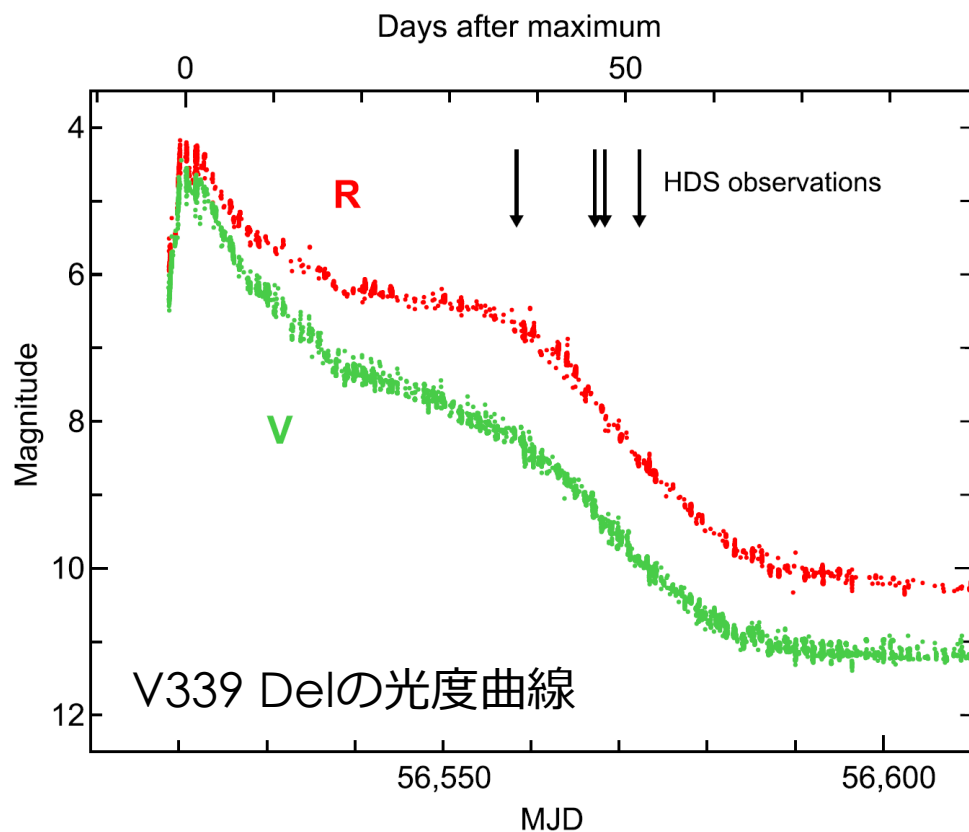




(クレジット：国立天文台)

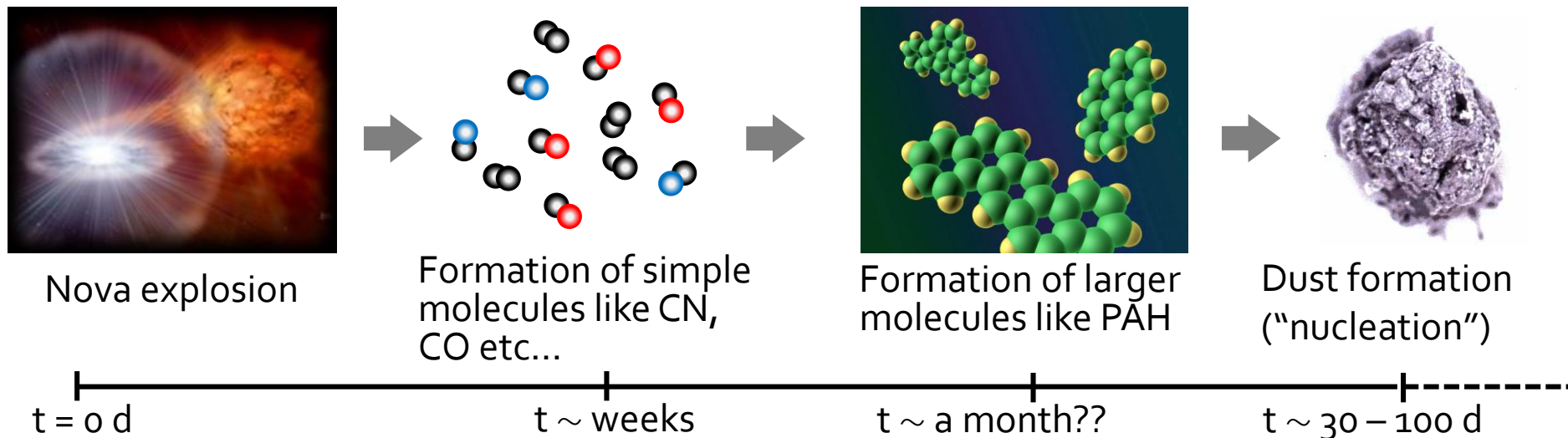
新星の元素合成

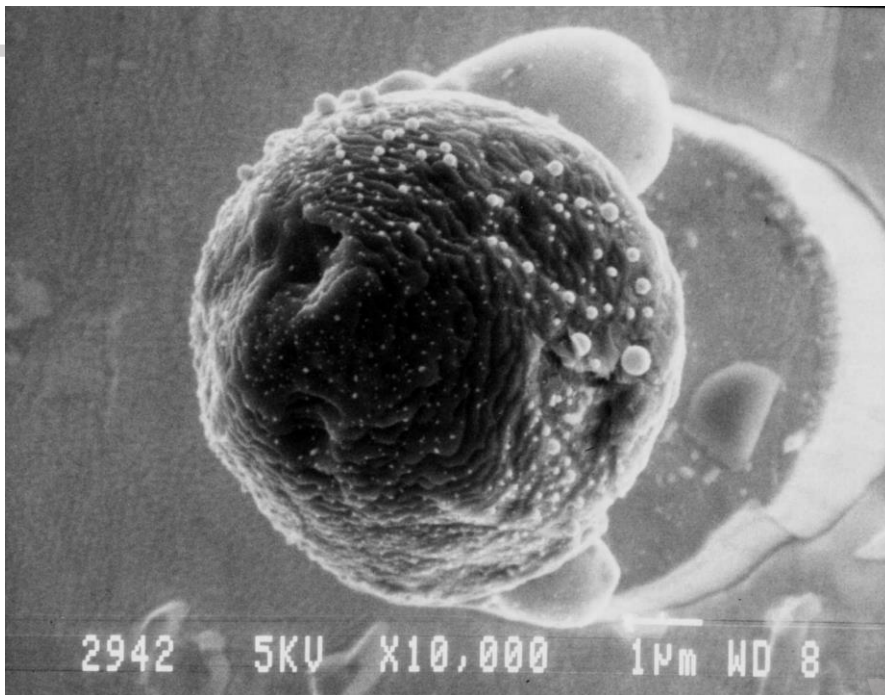
- **Tajitsu+(2015), Nature, 14161**
 - 板垣さんが発見した古典新星V339 Delでリチウムの壊変前の ${}^7\text{Be}$ の初検出:
 - 天体からのリチウム放出を初めて観測的に確認した
 - 理論予想の6倍以上の生成量が放出されたと考えられる



新星の元素合成

- ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O などの同位体の合成
 - 太陽系形成過程（プレソーラー粒子）との関係
 - 新星で生成されるダストと宇宙ダストとの関係





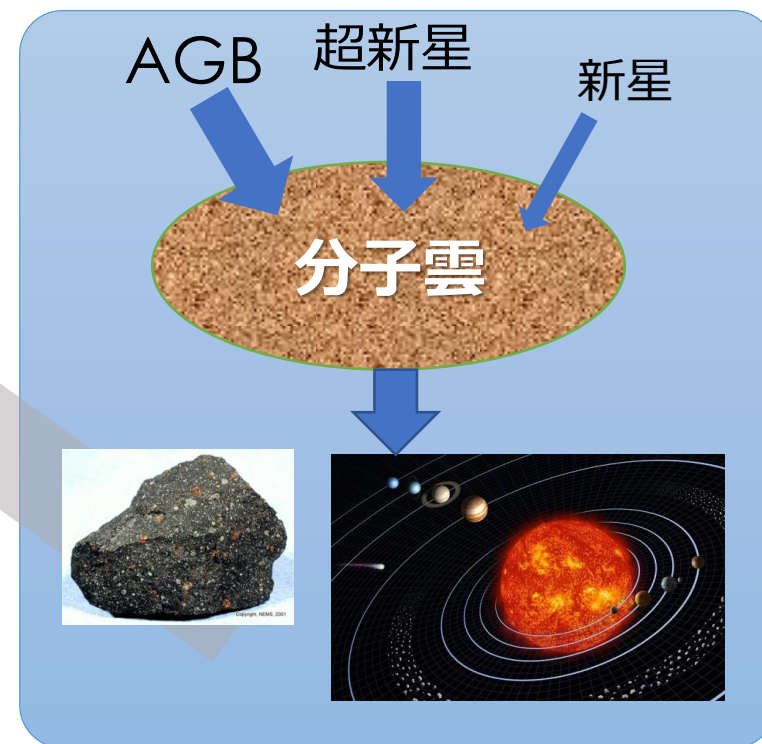
Secondary electron image of the graphite nova candidate grain KFC1a-551 after SIMS analysis. Image courtesy of S. Amari.

Clayton & Hoyle 1976; Amari et al. 2001;
José et al. 2004; José & Hernanz 2007

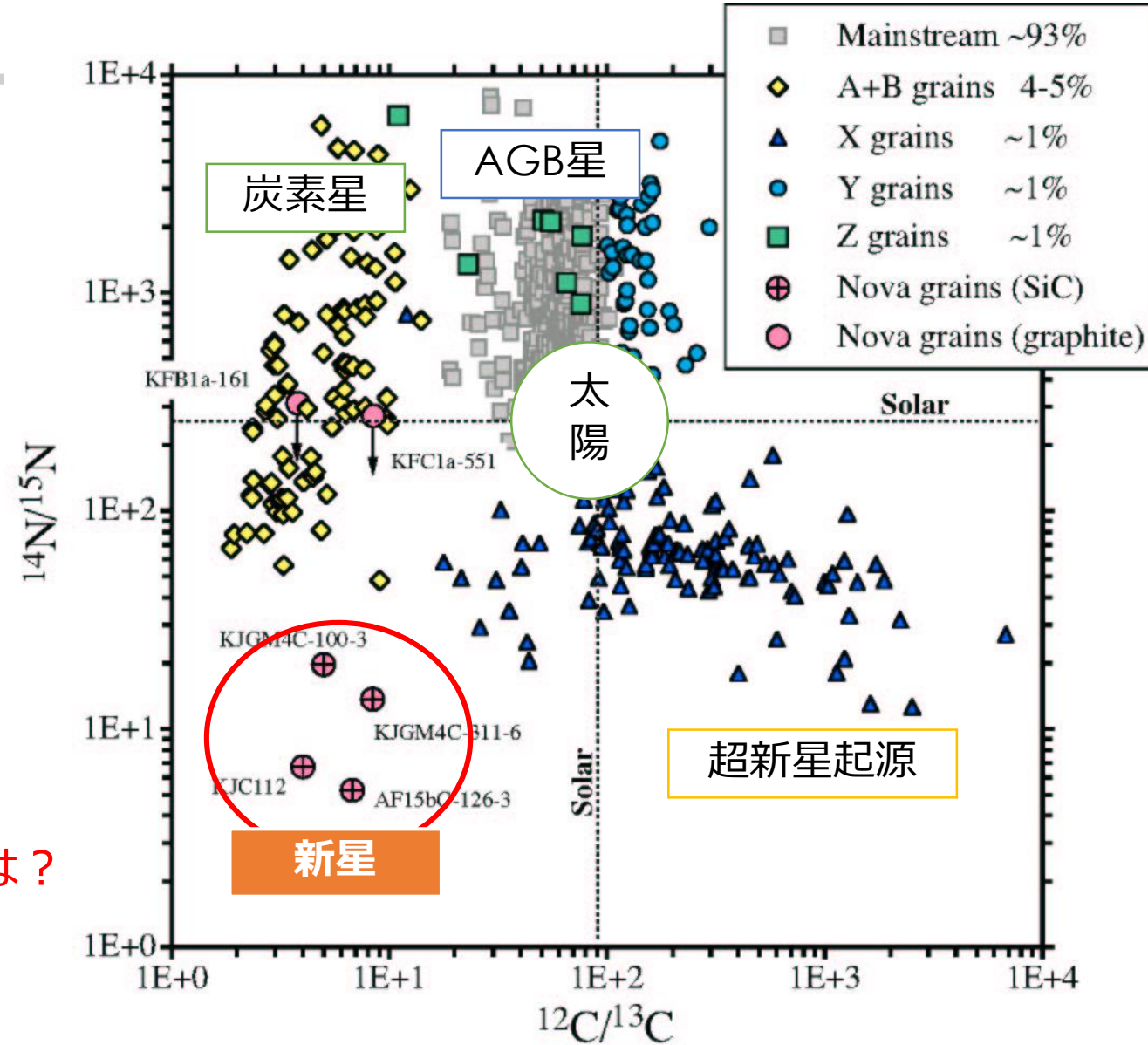
- 太陽系形成以前に存在した粒子
- 隕石中に発見される

→ 太陽系形成前の分子雲の情報

- 起源となる天体の核融合生成物の特徴
- 現在の太陽と異なる窒素・炭素同位体の組成比を示す

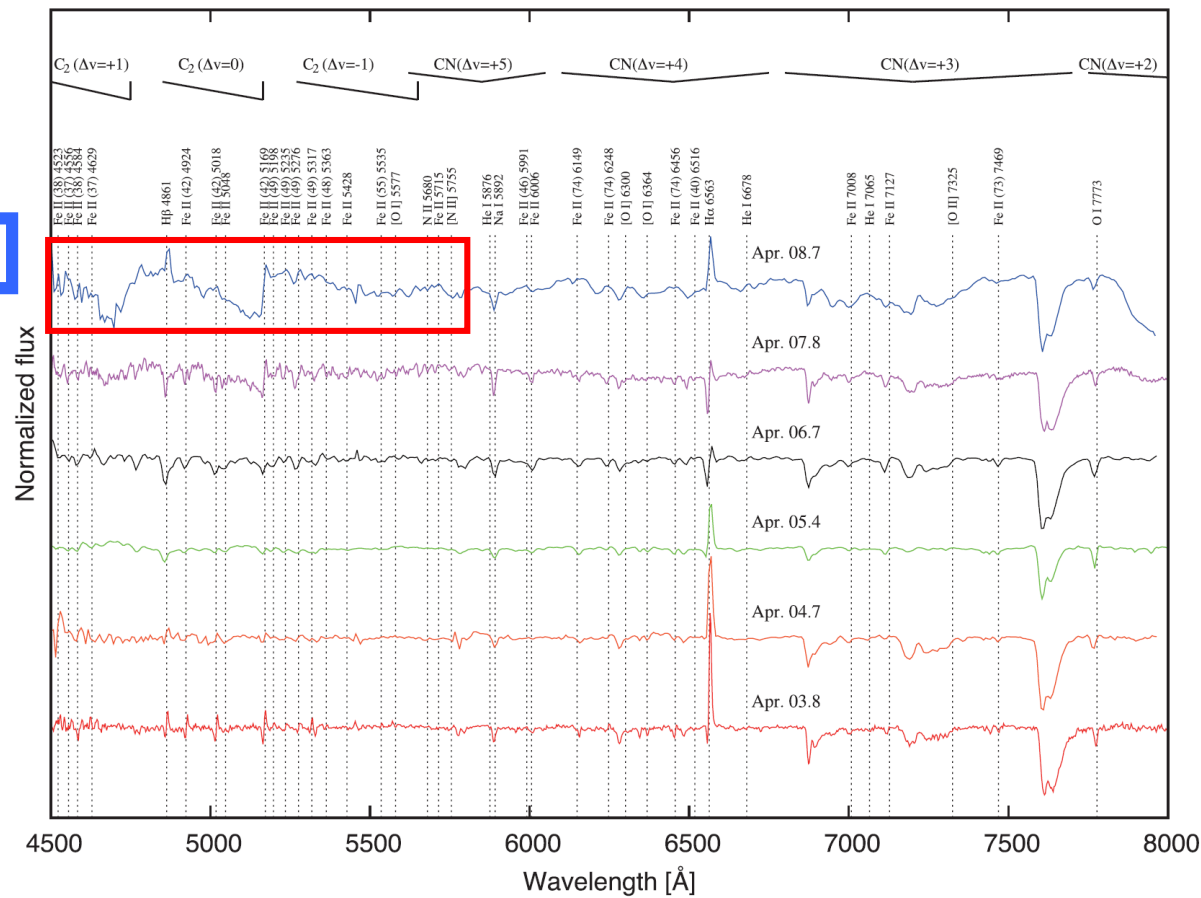
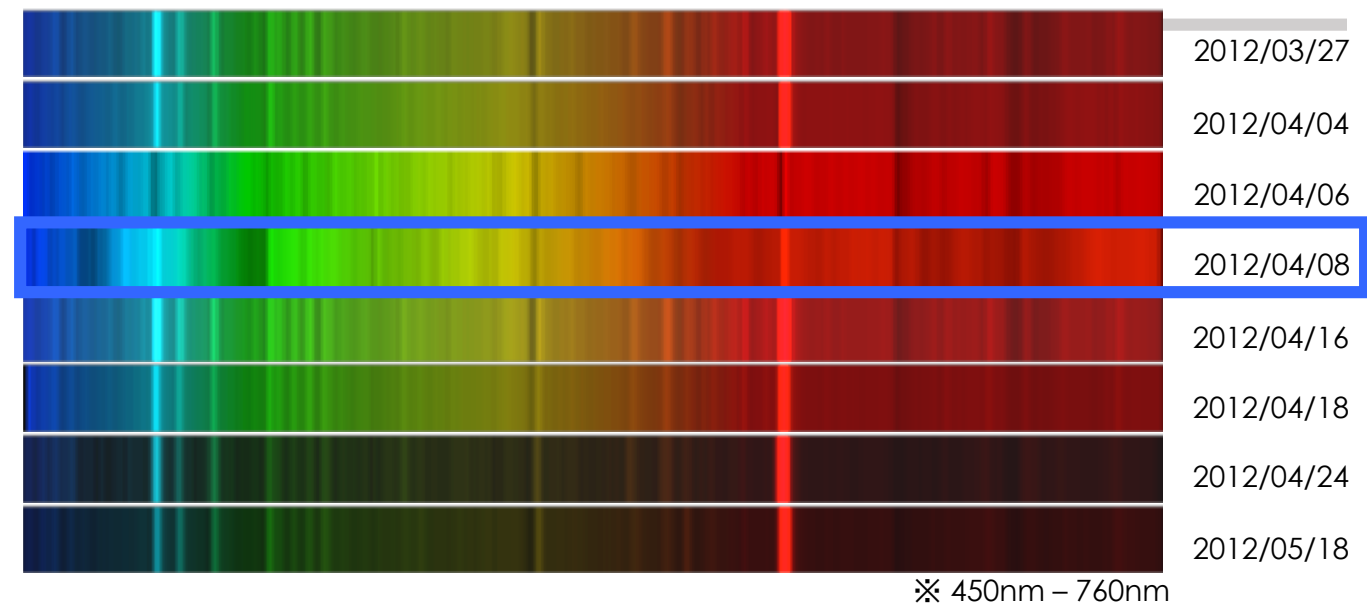


プレソーラー粒子の窒素・炭素の同位体組成比

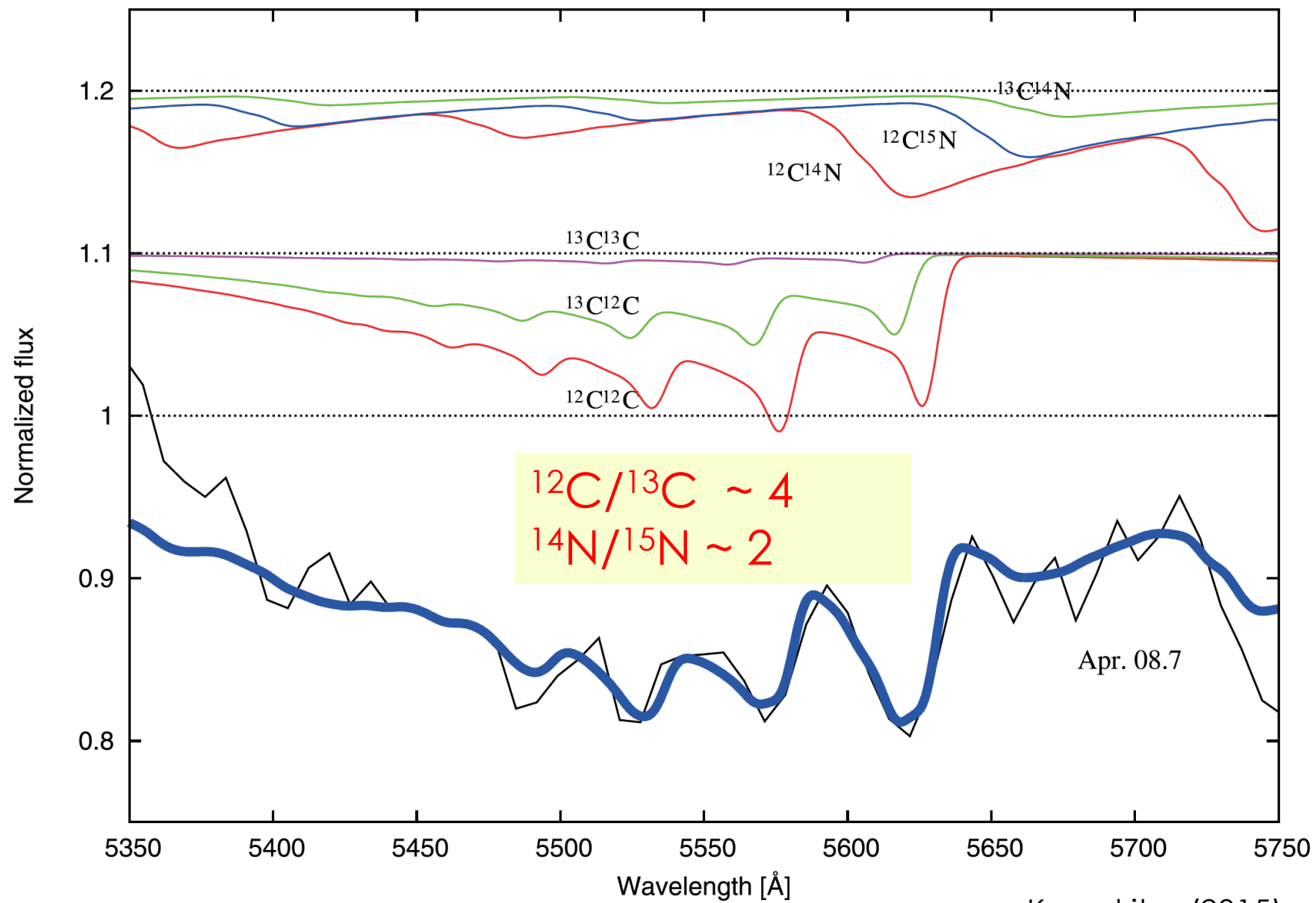


窒素同位体(^{15}N)過剰
の原因は新星なのでは？

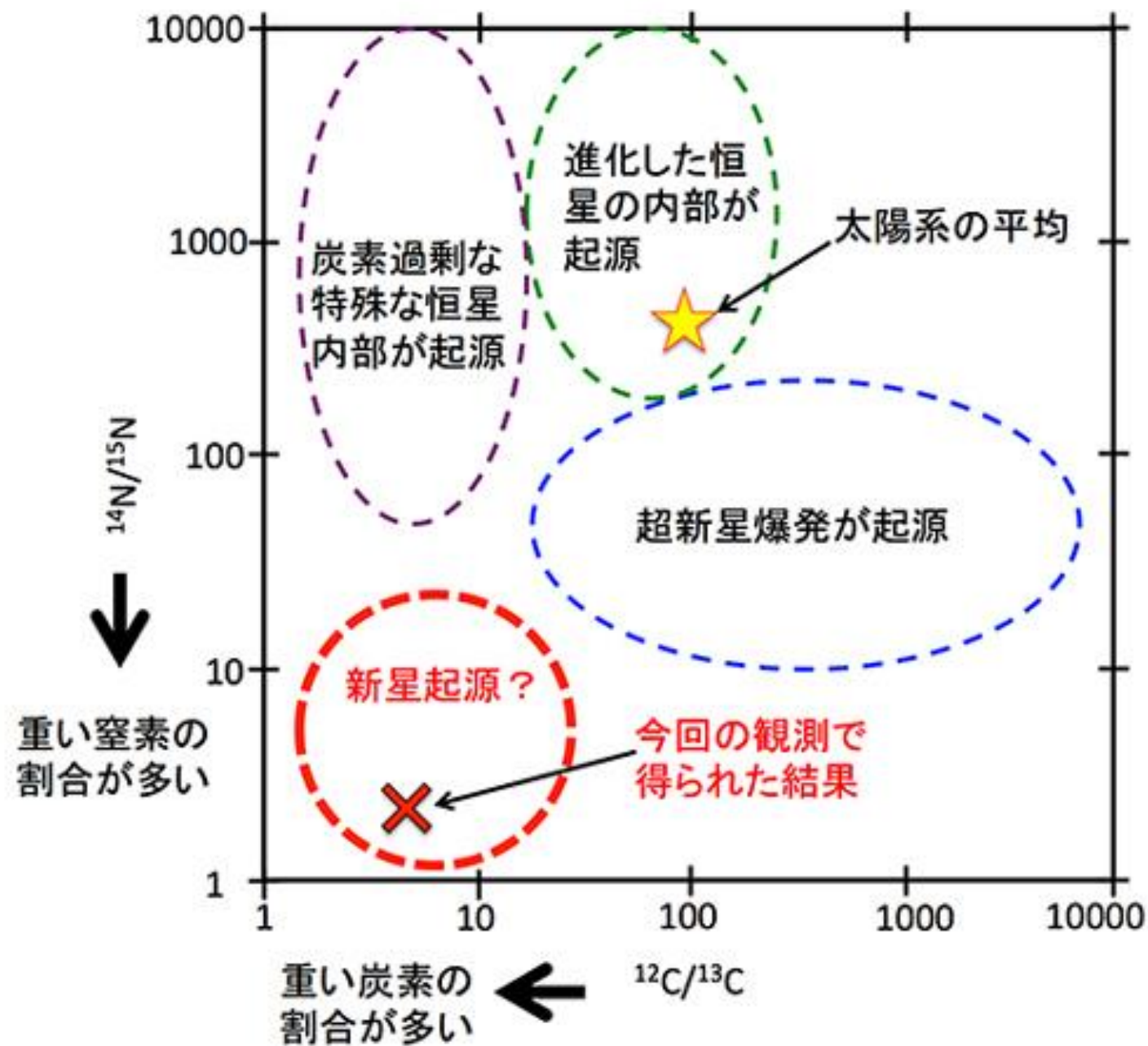
分子の検出から同位体組成比へ



Kawakita+(2015)



Kawakita+(2015)



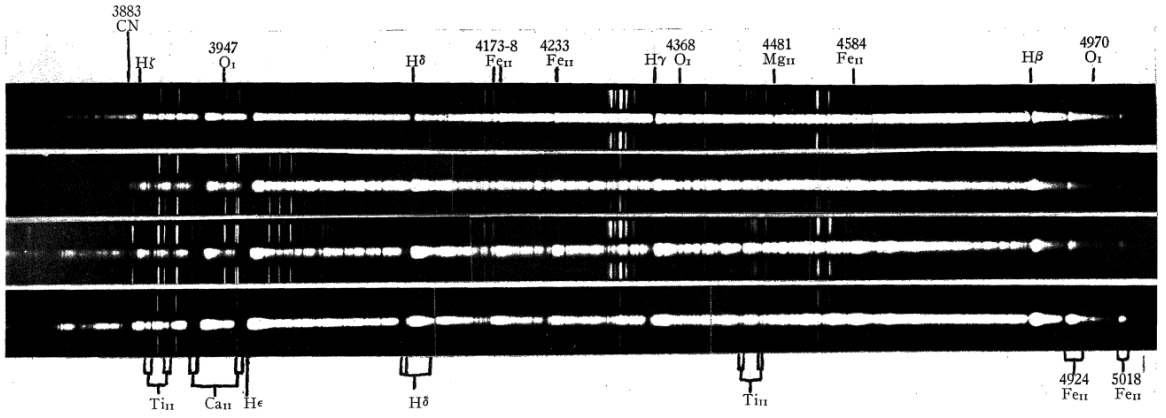
新星の元素合成 まとめ

- 新星で元素合成は重要
 - しかし、お目当ての核生成物は初期の吸収線で検出例ばかり
- 初期のイジェクタ構造の理解
 - 爆発過程のそのものの解明
 - ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$ などの核合成物の放出量の推定

初期のイジェクタ構造

新星のイジェクタ構造の研究は古く、1940-50年代にMcLaughlinが可視光高分散分光観測から多層構造のイジェクタ描像を提案したことに始まる。

Spectra of DQ Her (McLaughline 1935)



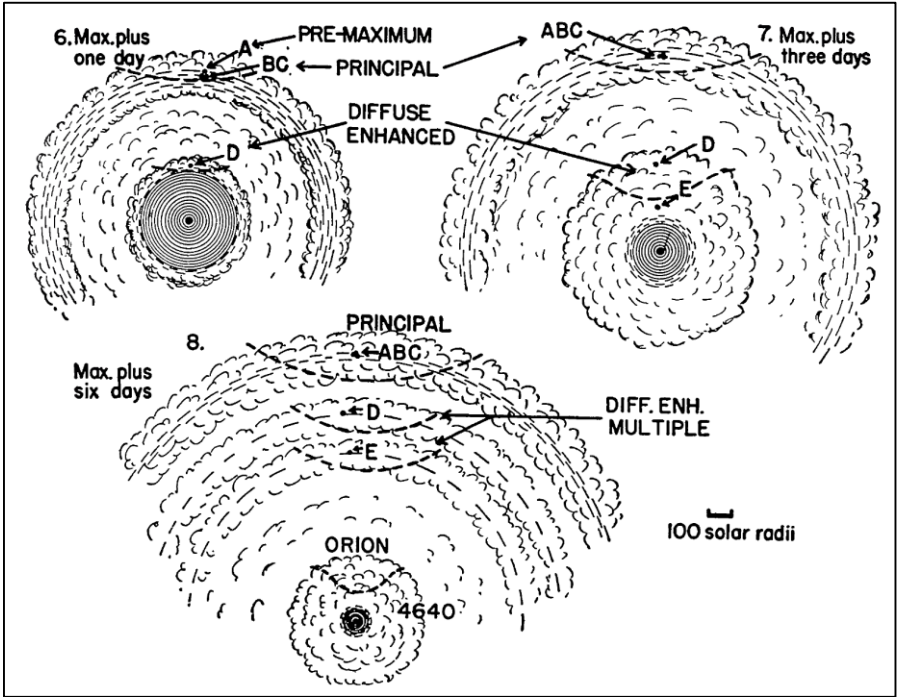
CHANGES IN THE SPECTRUM OF NOVA HERCULIS IN THE PHOTOGRAPHIC REGION.

VELOCITIES, IN KM/S, OF NOVA ABSORPTION SYSTEMS

NOVA	TYPE	<u>PREMAXIMUM</u>	<u>PRINCIPAL</u>	<u>DIFFUSE-ENHANCED</u>	ORION
Aql 1918	Fast	— 1300	— 1500	— 2200	2700
Gem 1912	Average	400	800	1400	1600
Her 1934	Slow	180	300	800	500 (*)

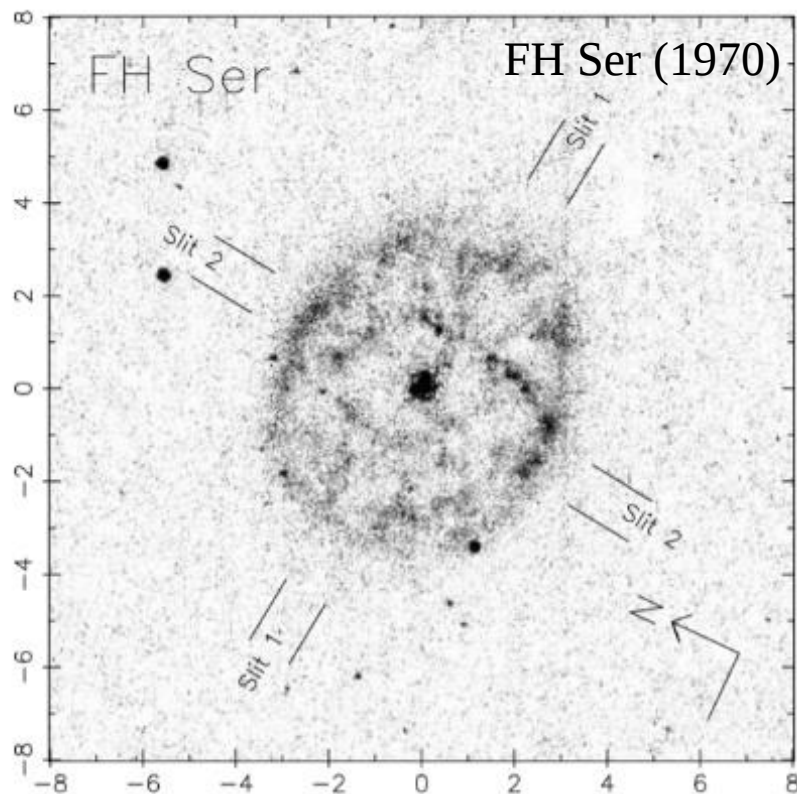
(*) A second Orion system, intermittently present in Nova Her 1934, had velocity of about — 1000 km/s.

Schematics by McLaughlin (1950)

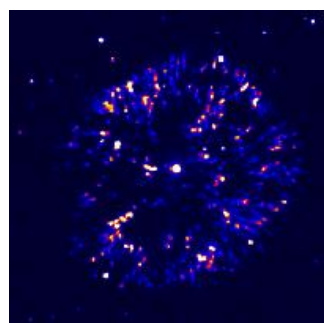


爆発後のイジェクタ構造

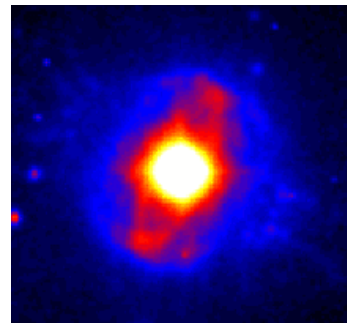
- ・爆発後数十年経過した新星の直接撮像、分光観測（輝線）
- ・イジェクタ構造多様性に富んでいる



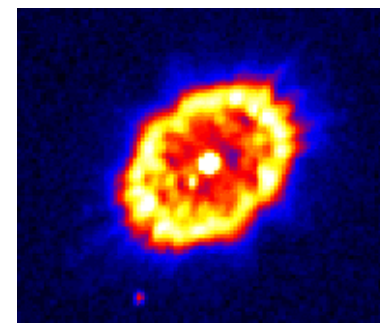
Gill and O'Brien, (2000), MNRAS, 314, 175



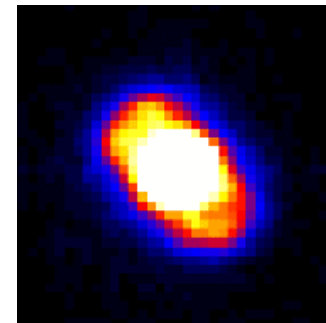
GK Per (1901)



RR Pic (1927)



DQ Her (1934)



HR Del (1967)

O'Brien & Dunlop (1995), Gill & O'Brien (1998)

なぜ非球対称形状になるのか？
連星間物質との相互作用？

- ・このような構造を作る過程は十分に解明されていない
- ・観測・シミュレーションが必要

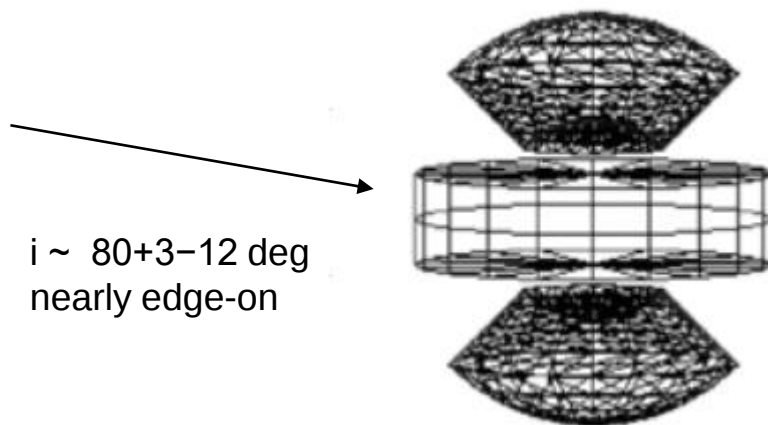
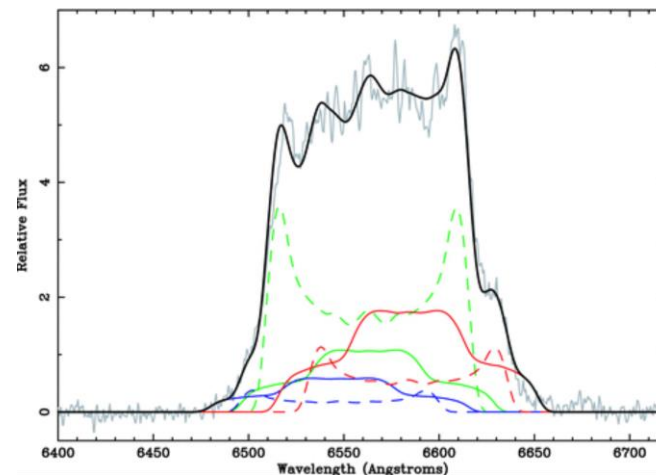
爆発後のイジェクタ構造

- 爆発後期（星雲期）の輝線形状から
イジェクタ構造を推定
- Optically thinなイジェクタ
- SHAPE, CLOUDYなどの
3D シミュレーションソフト
(Steffen et al. 2011) (Fernandez et al. 2011)
- Optically thickな初期の
イジェクタ構造には適用できない

Similar example: V2491 Cyg (t=108d)

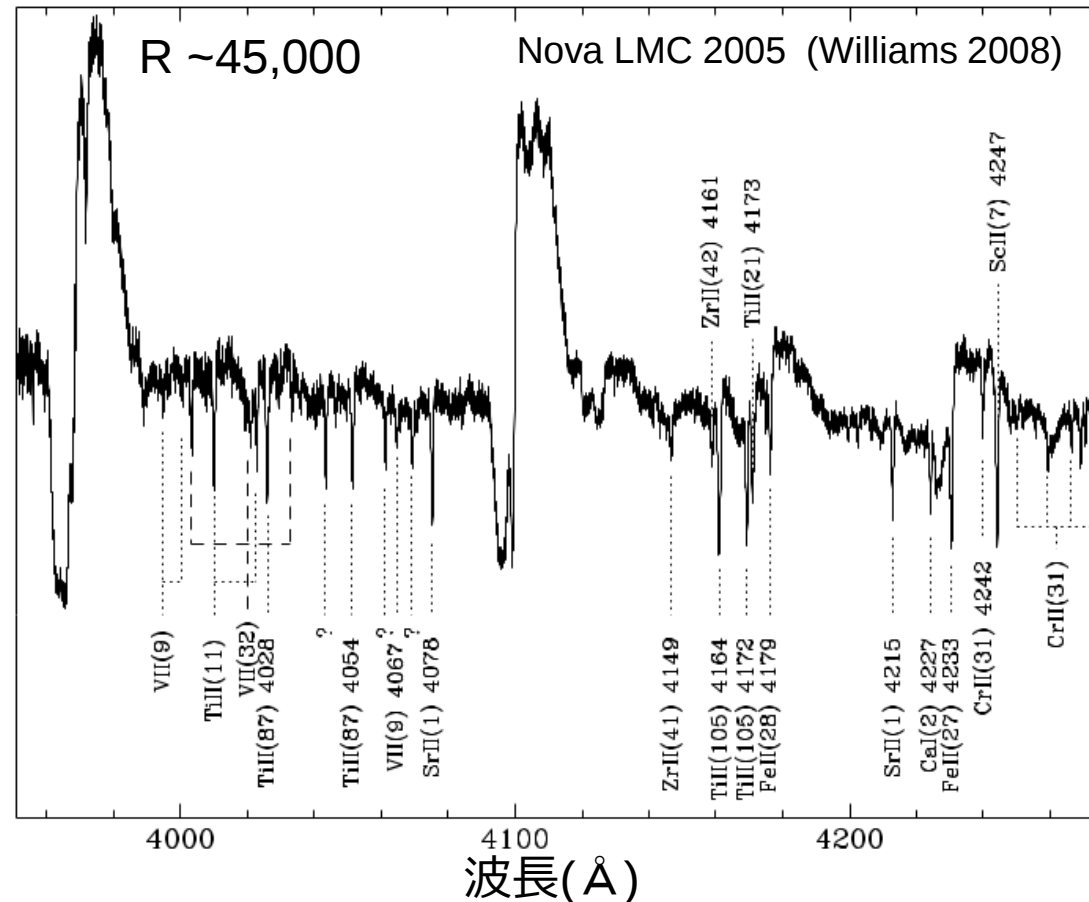
Ribiero et al.(2011)

Polar blobs and equatorial ring

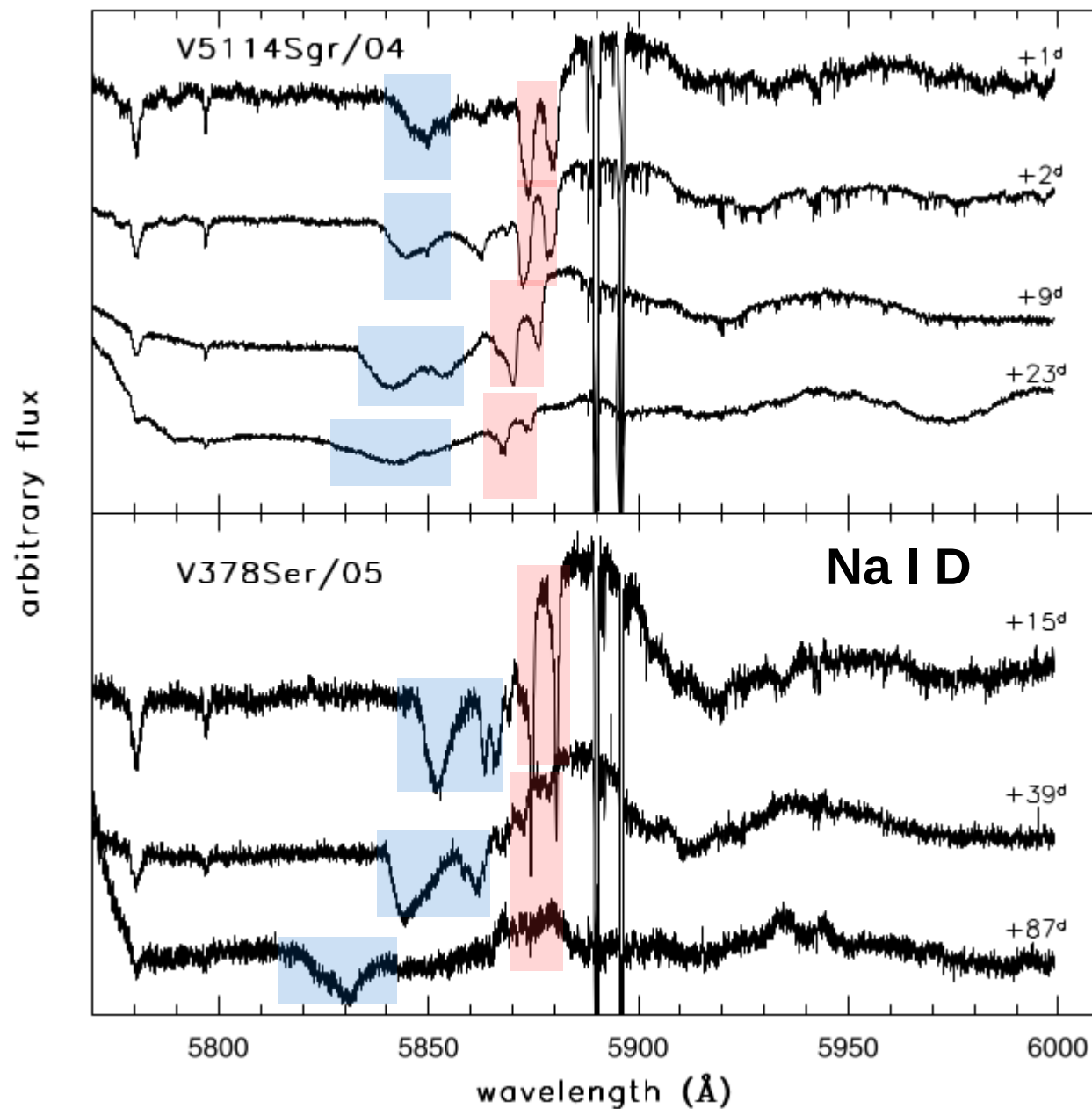


吸収線で探る初期のイジェクタ構造

- Williams et al. (2008): 初期のイジェクタ構造の議論に一石を投じた
- “Transient Heavy Element Absorption ;THEA”とその起源について議論 (Williams 2008,2012,2013)



- 減光期にみられる“principal” spectrumは、transient heavy element absorption (THEA) system と判定
- 多くの新星で見られる二つの速度成分は、THEA と 新星イジェクタ ではないか？



THEA (Low Velocity Component: 低速な吸収成分)

$v_{\text{rad}} = -400 - -1000 \text{ km/s}$

Primary ejecta

(High Velocity Component: 高速な吸収成分):

$v_{\text{rad}} = -2000 - -4000 \text{ km/s}$

2つの速度成分と吸収線系の関係

THEA (Williams)

= principal sys. (McLaughlin)

= **LVCs**

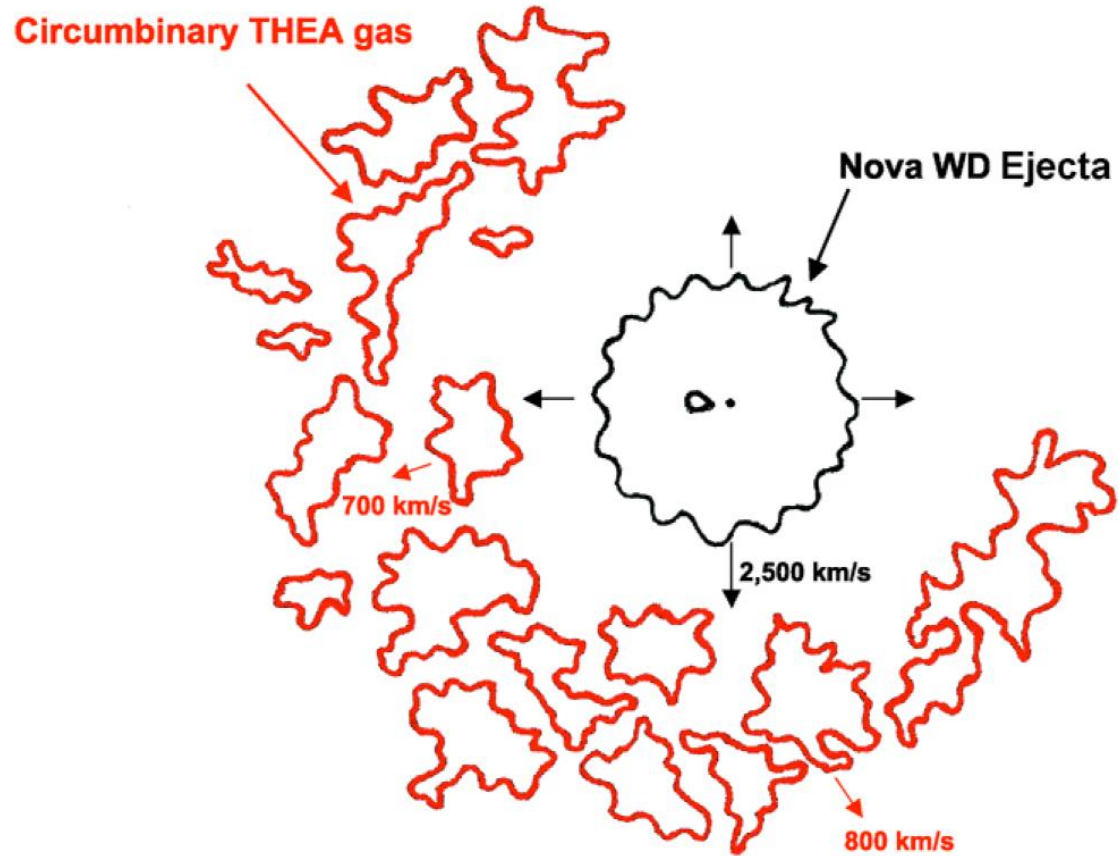
Primary ejecta (Williams)

= diffuse enhanced sys. (McLaughlin)

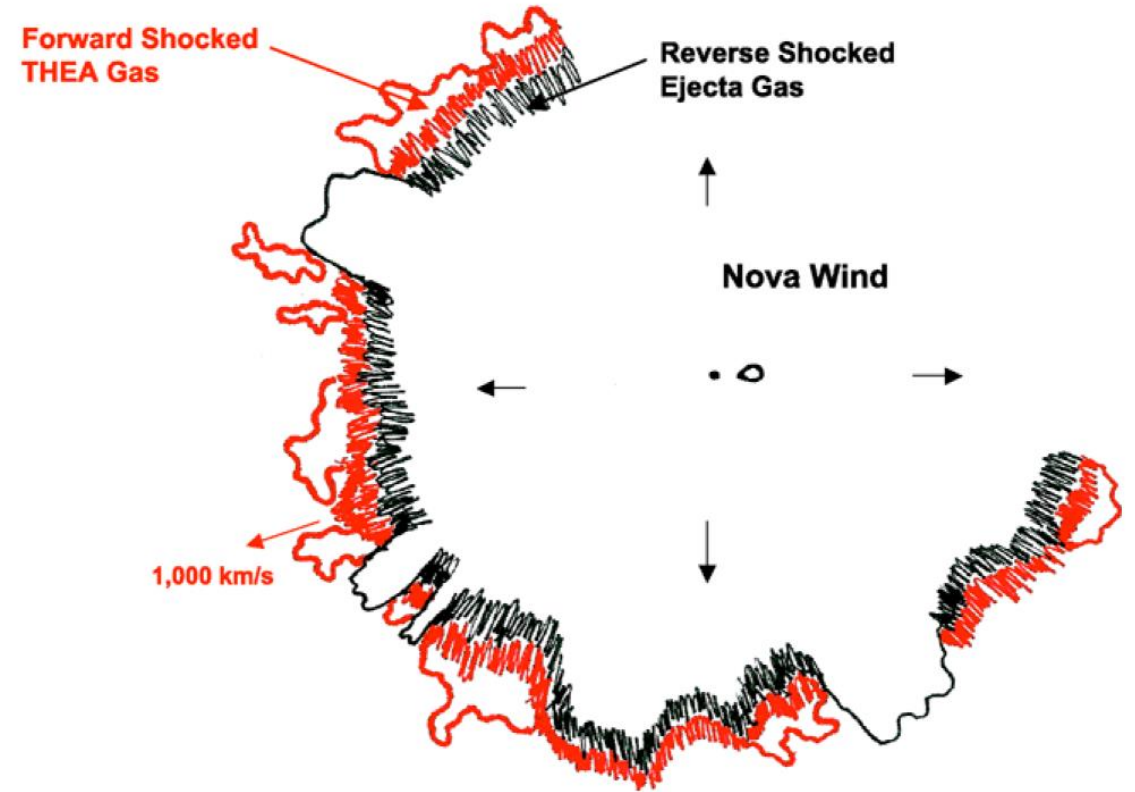
= **HVCs**

Williamsの描像

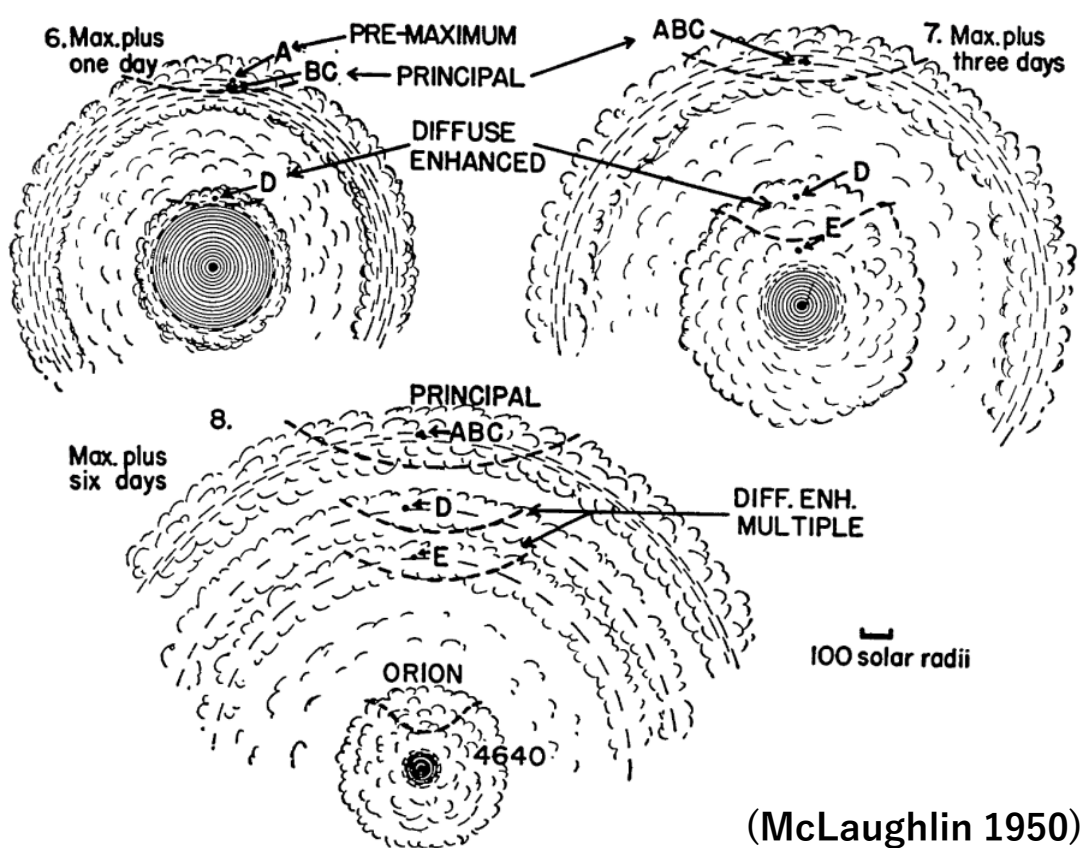
a) Photosphere Phase



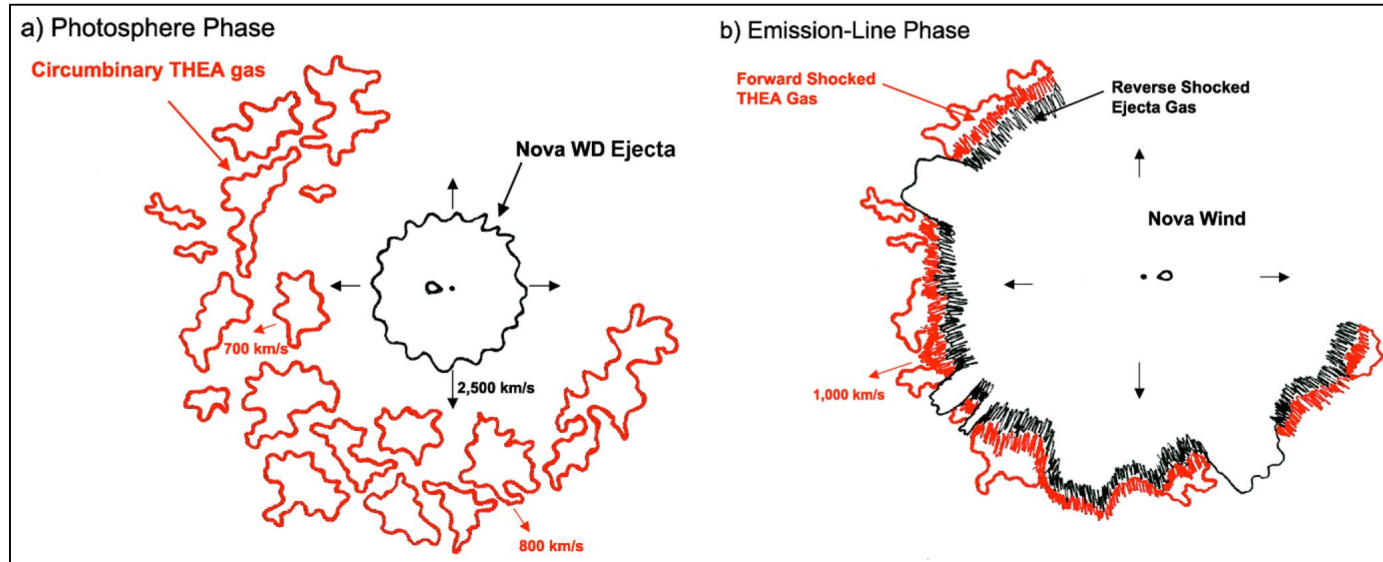
b) Emission-Line Phase



2つの描像



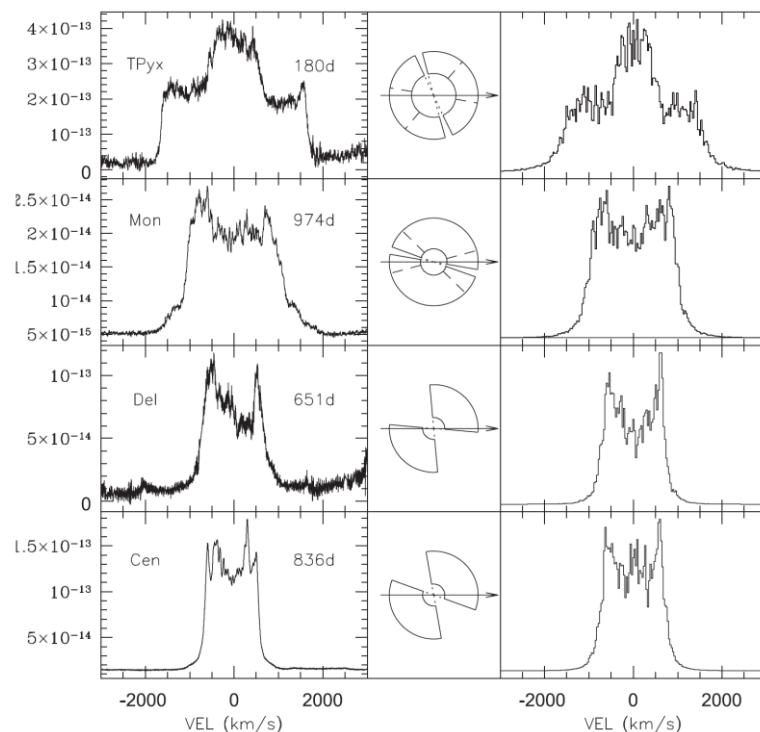
"McLaughlin's view" (Case A)
単独爆発モデル



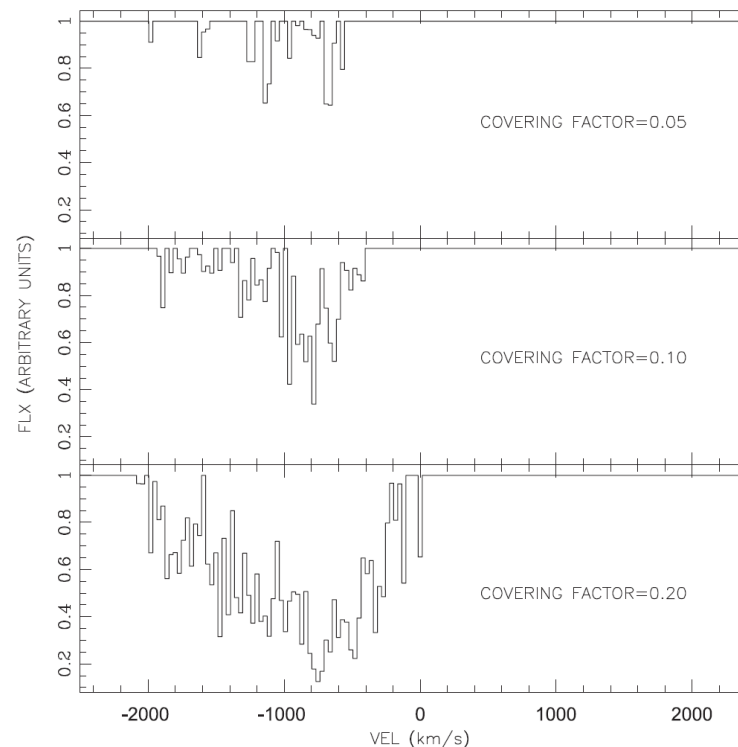
"Williams' view" (Case B)
多重放出モデル

どちらのモデルが妥当か？ 検証例

- Shore+(2011), Mason, Shore et al. (2017) の提案
 - 1回の放出でOK
 - イジェクタ内の密度の違いが吸収線の多様性を生んでいる
 - イジェクタ内の電離領域の変化で、吸収線の速度変化は説明できる
 - 2種類の速度成分 (LVC, HVC) の吸収線については特に言及していない



Mason, Shore et al. (2017), ApJ, 853, 27



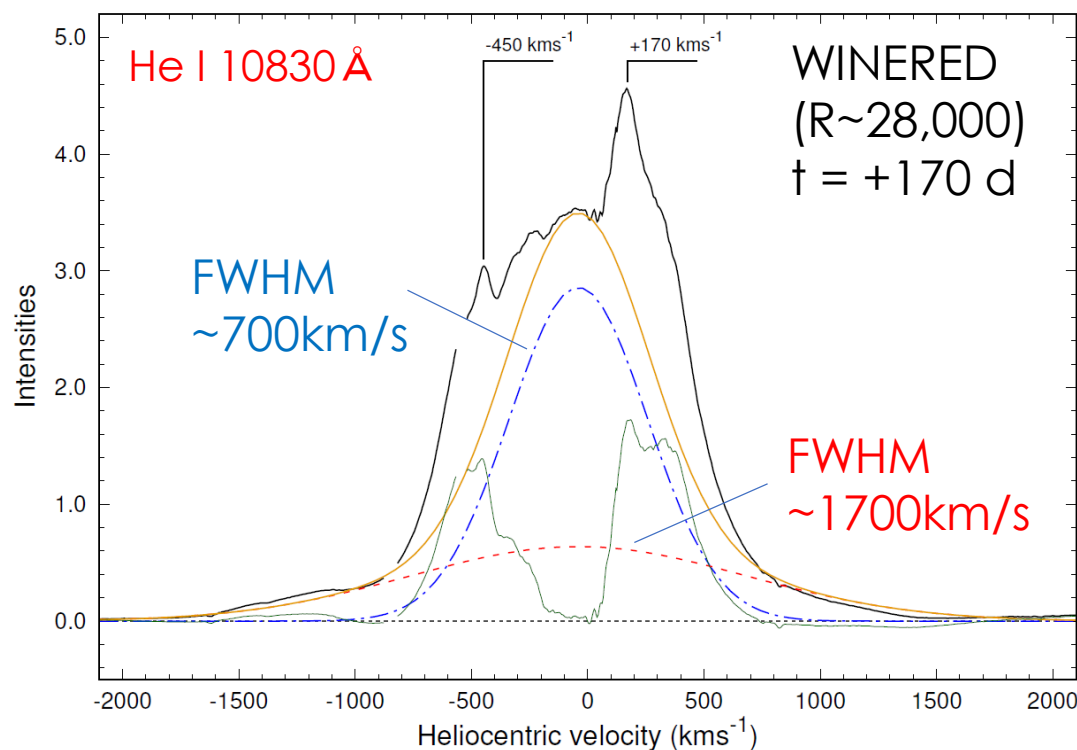
ガスの充填率とプロファイル
モデル計算結果

Figure 13. Simulation showing the increasing number of absorption structures for increasing covering factors (see text for more details).

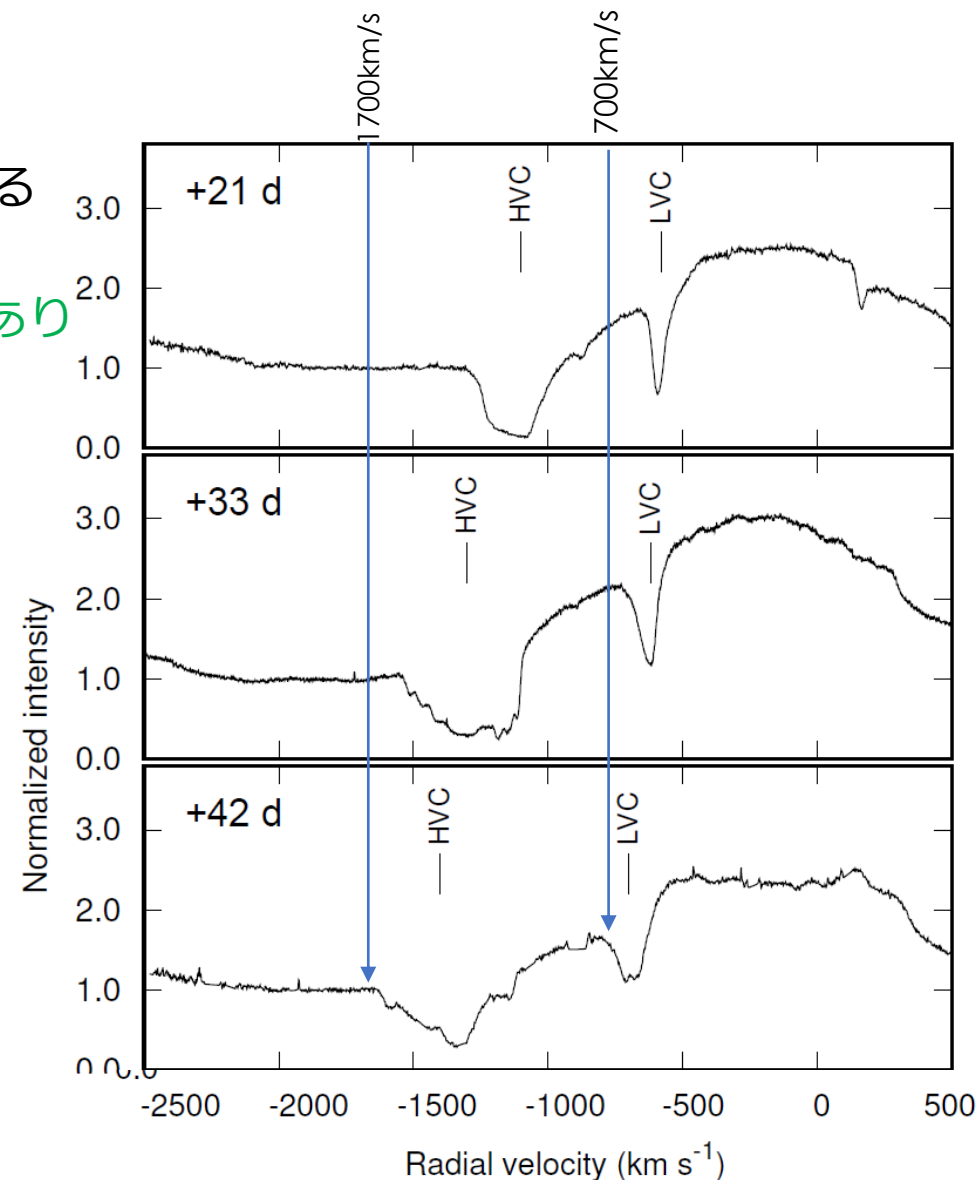
どちらのモデルが妥当か？

検証例

- Arai et al. (2016, 2018)
 - 2つの分離吸収線を生むには、2層構造が必要では？
 - THEAといわれている吸収線も新星イジェクタと考えられる
 - 星雲期の輝線プロファイルに吸収線の終端速度の名残
 - 1天体でのみ検証(V2659 Cyg). サンプル数を増やす必要あり

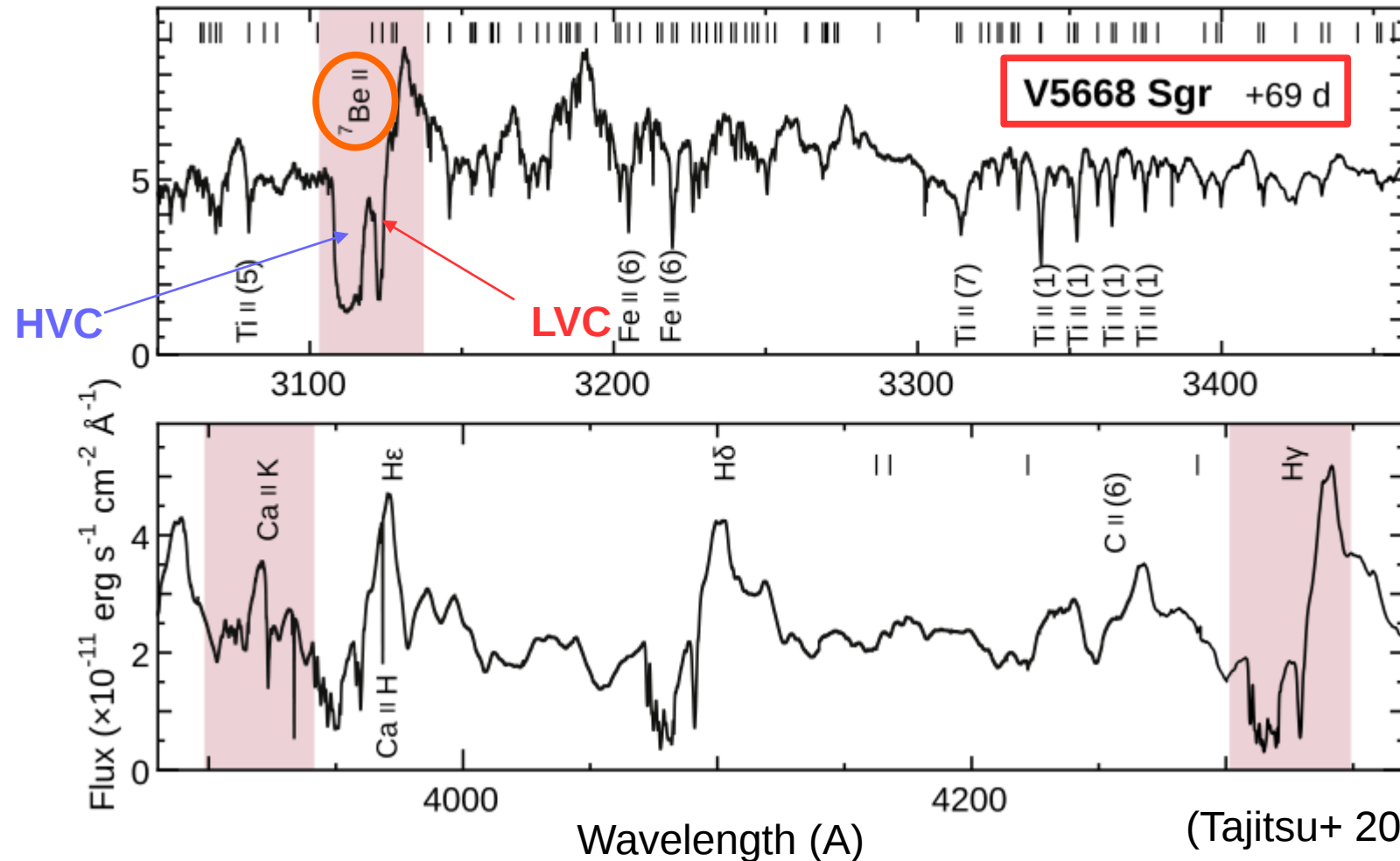


Arai+(2018), PoS (GOLDEN 2017), 53



いろいろな新星での ^7Be , ^7Li の検出

- すでに7天体で検出されている



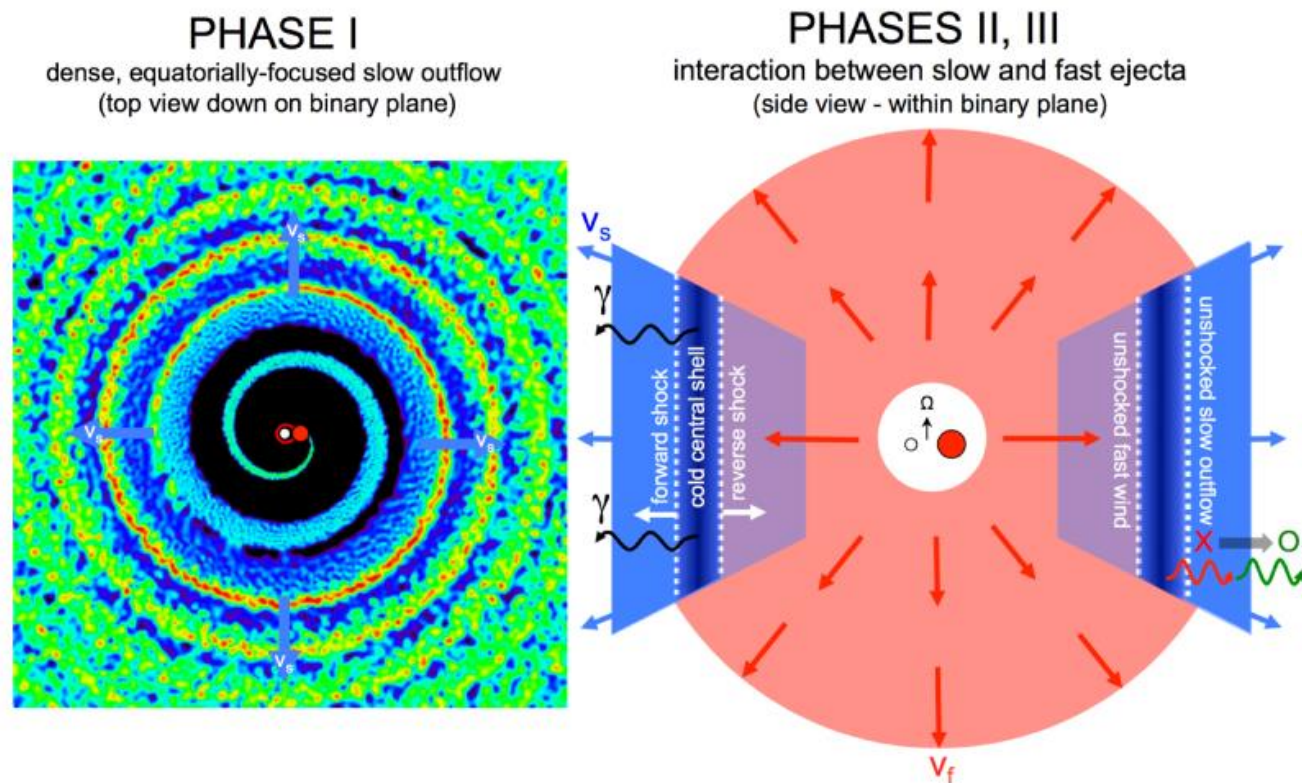
V339 Del: Tajitsu et al. (2015)
V1369 Cen: Izzo et al. (2015)
V5668 Sgr, V2946 Oph, Tajitsu et al. (2016)
V5668 Sgr: Molaro et al. (2016)
V407 Lup: Izzo et al. (2017)
V838 Her: Selvelli et al. (2018)
V5669 Sgr: Arai et al. in prep

^7Be が HVC, LVCの両方に検出された
(V5668 Sgr, V2694 Oph, V5669 Sgr)

⇒ どちらの吸収線も、新星のイジェクタを含む

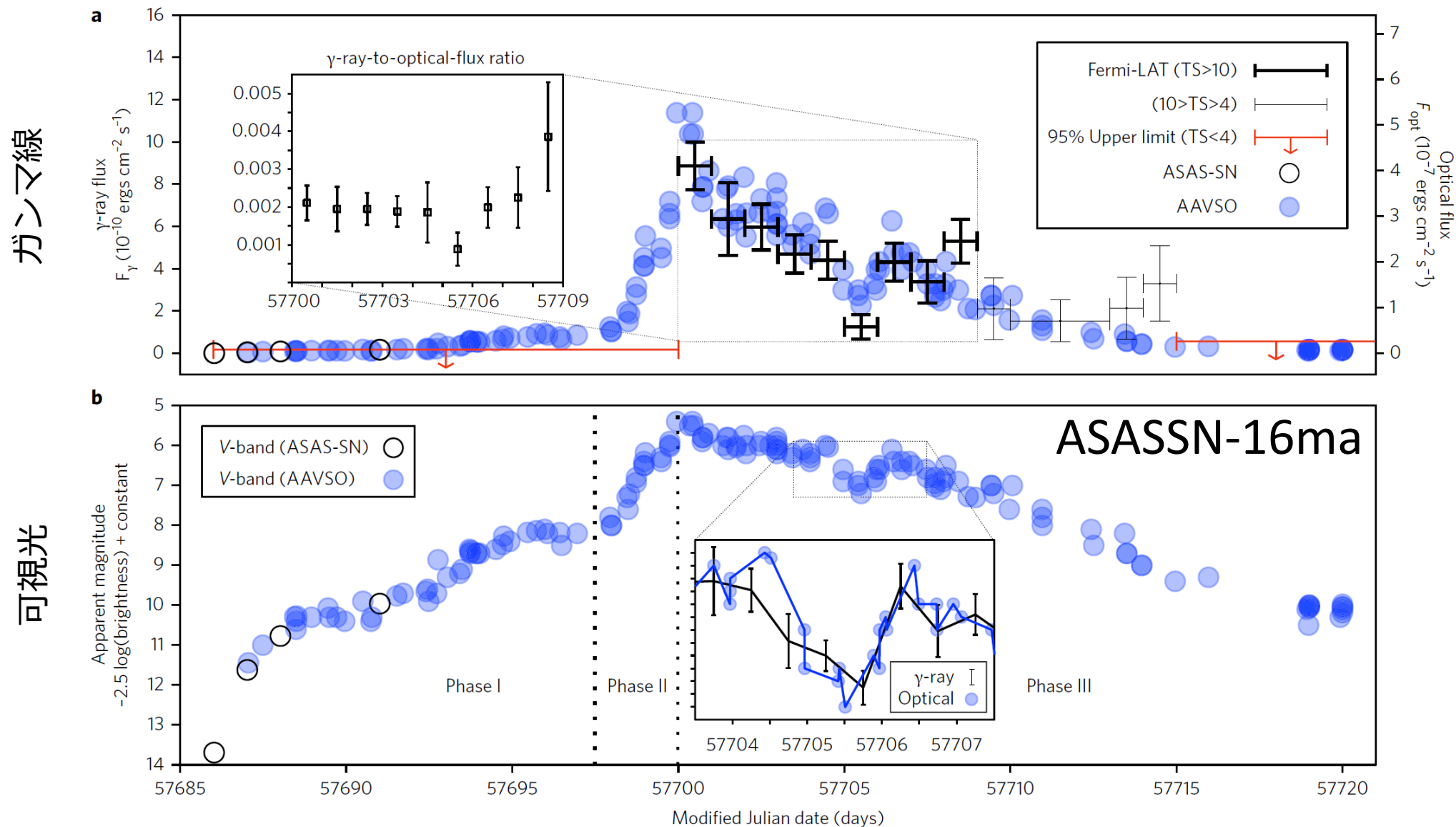
2 段階放出モデル

- ガンマ線が検出された古典新星 ASASSN-16ma
- イジェクタは2段階で放出される
- Phase I (極大前):
 - 低速のガス放出が L2 から連星起動面に流出
- Phase II: (極大付近):
 - 高速のイジェクタ
($V_f \sim 2000$ km/s; optically thick wind)
 - Phase I のイジェクタとショックを起こす
(gamma-ray emission, dust formation)



Li et al. 2017, Nature Astronomy, 41550-017-0222-1
(arXiv:1709.00763)

2 段階放出モデル：ガンマ線放射新星からの示唆

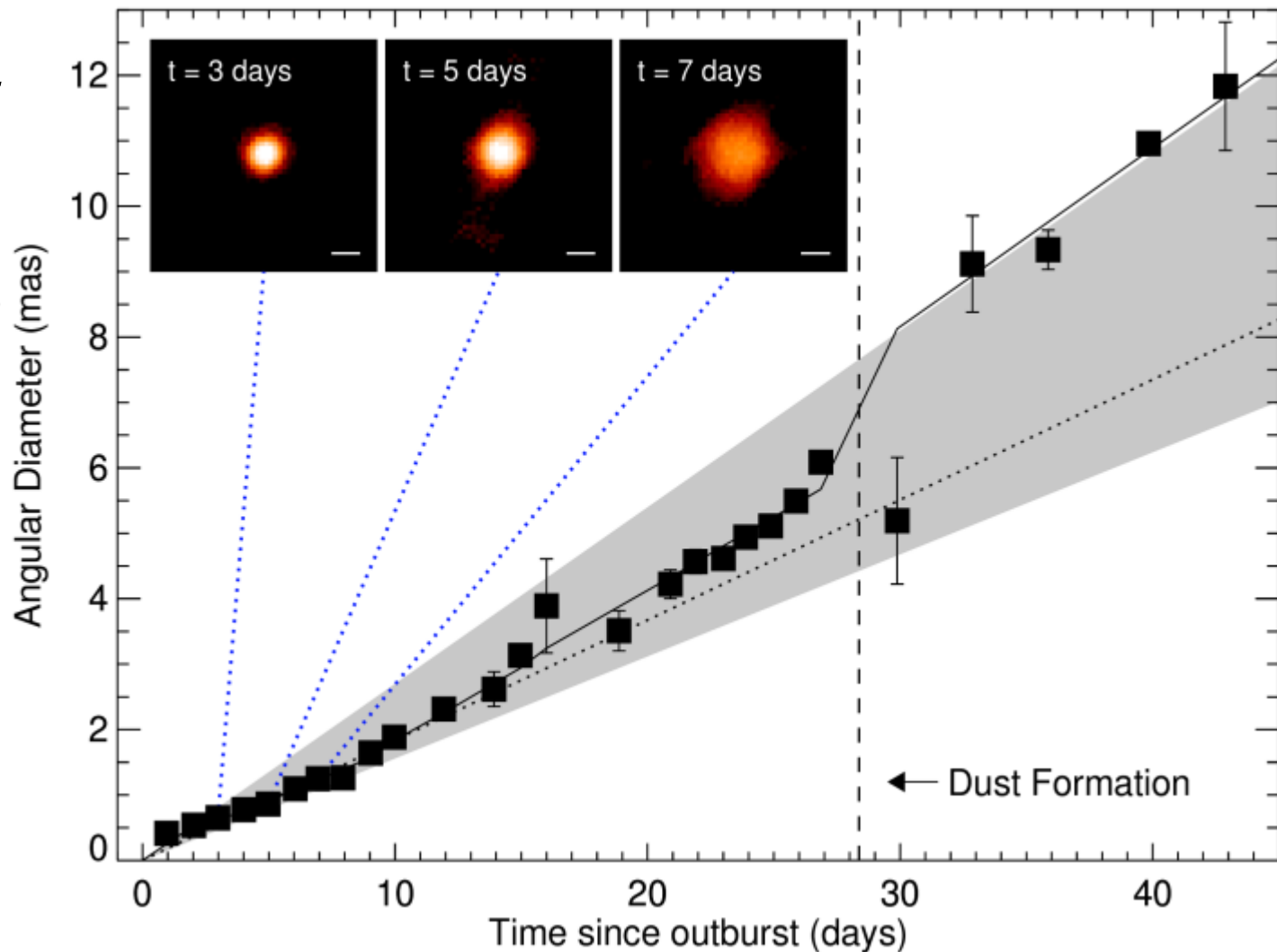


今後の展開

- 初期のイジェクタ構造
 - Li のモデルの検証
- アプローチ：爆発直後の観測
 - 赤外干渉計
 - 高分散分光観測 (${}^7\text{Be}$ やLVC, HVCの詳細調査)
 - 偏光分光観測

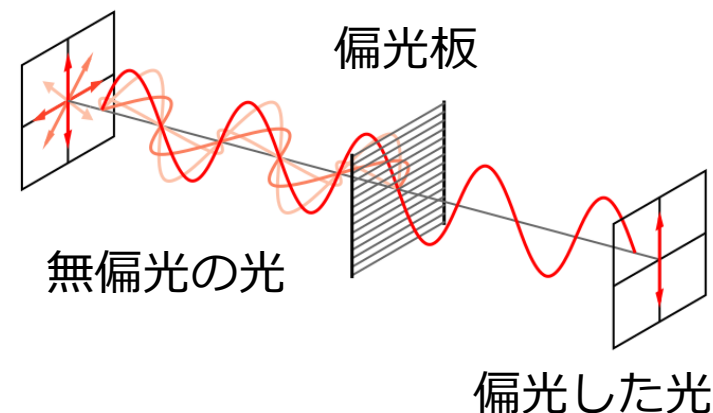
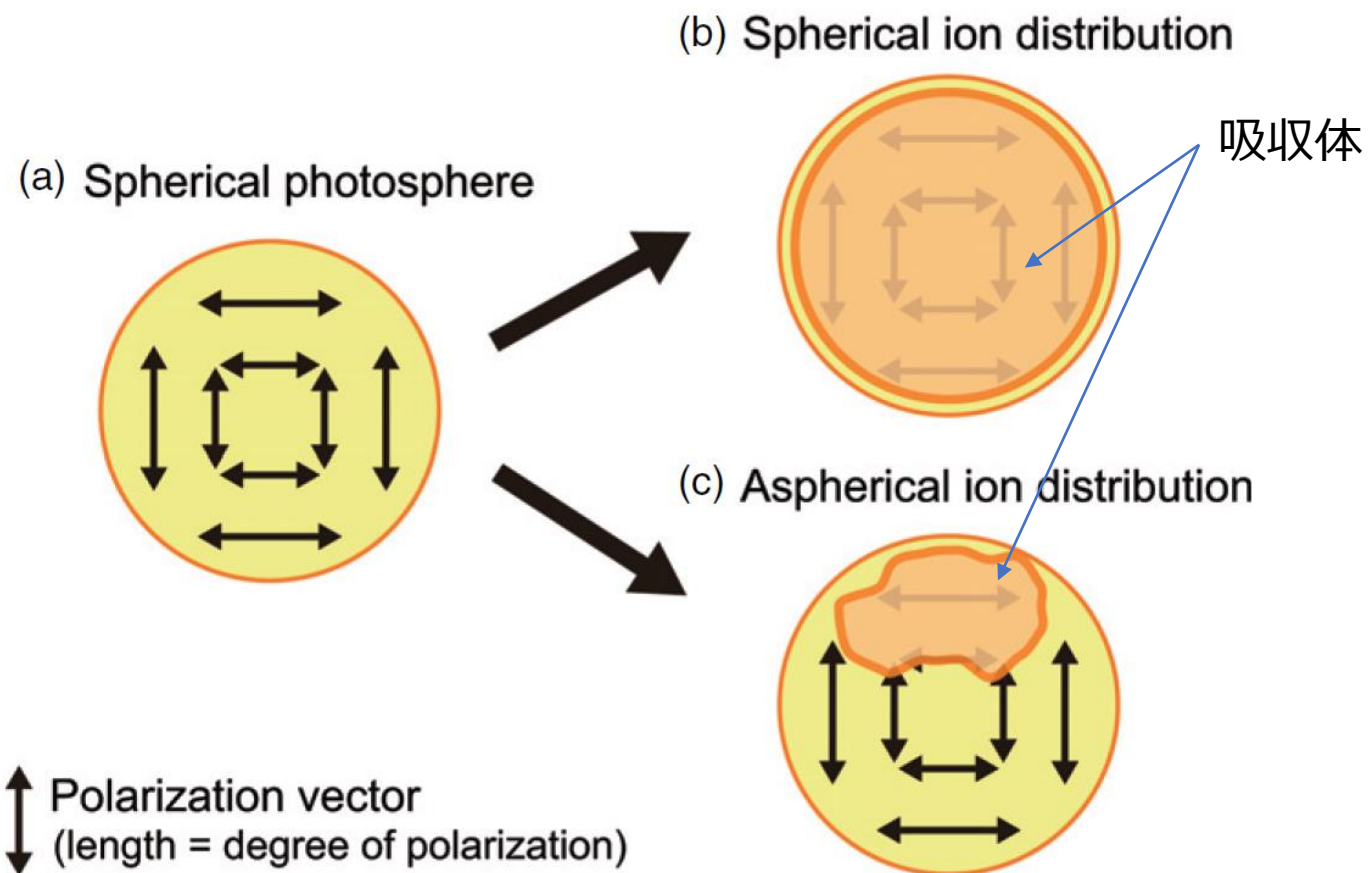
赤外干渉計

- 明るくて近い天体には最適
- V339 Del (Nova Del 2013)
 - $D \sim 1.5$ kpc
- Schaefer et al. (2014), Nature, 515, 243



偏光分光観測で探るイジェクタ構造

重力崩壊型超新星の偏光モデル Tanaka et al. (2012, 2017 etc.)

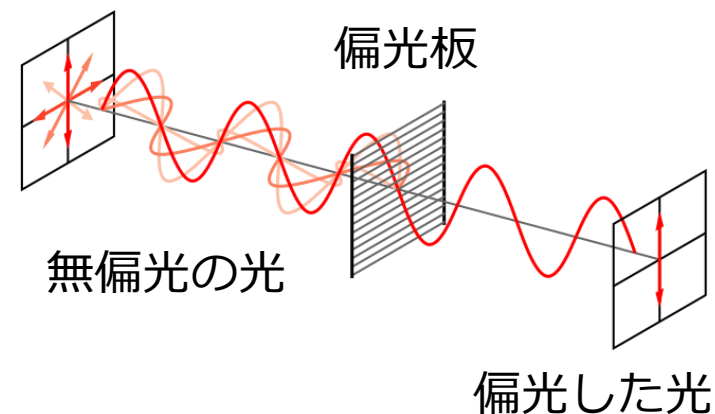
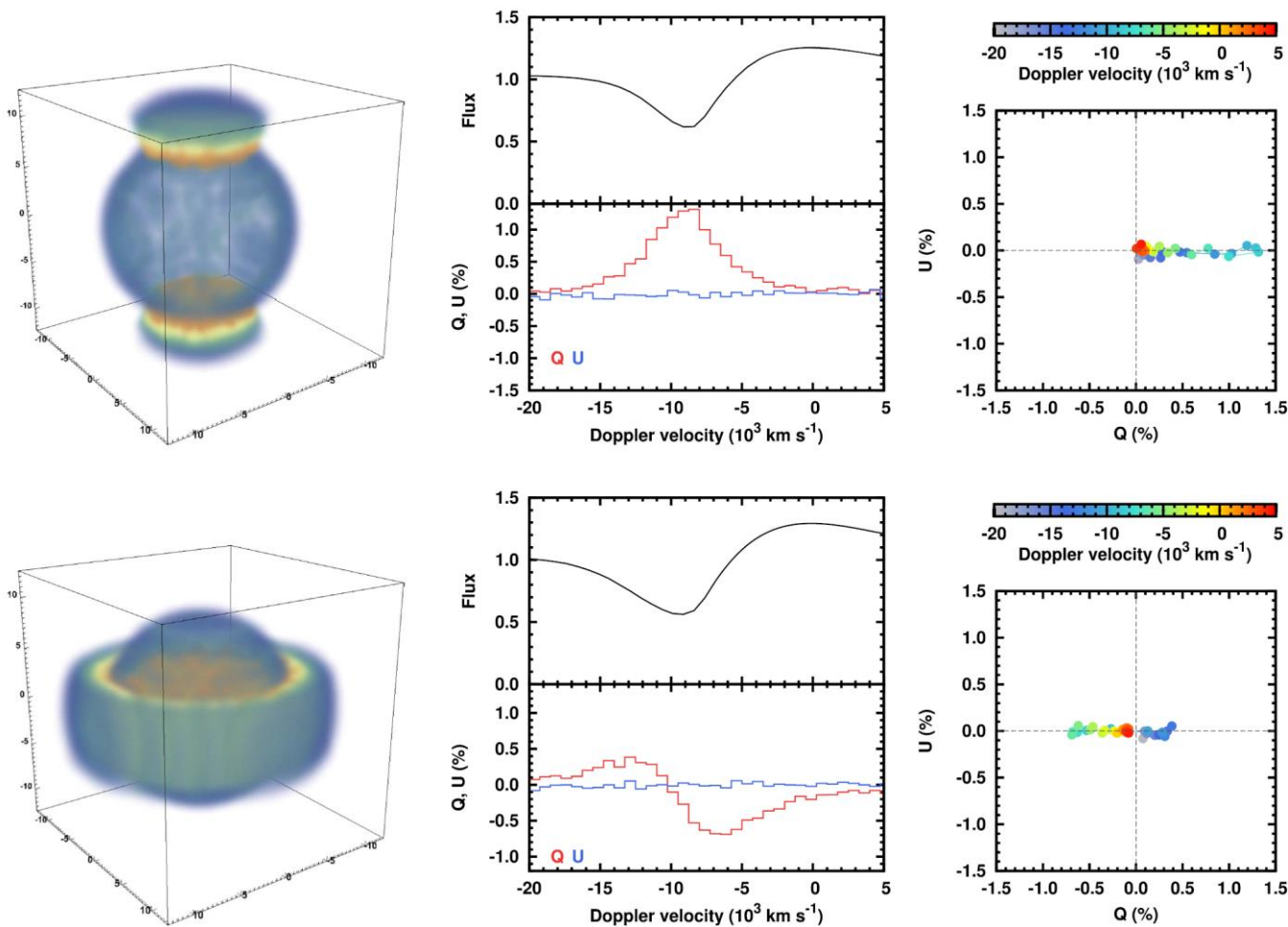


Wikipediaより

高い観測精度が要求されるが、
非常に明るい新星に適用できる

偏光分光観測で探るイジェクタ構造

重力崩壊型超新星の偏光モデル



新星に適用できる

偏光分光観測で探るイジェクタ構造



Our results: Kawakita+(2018) submitted to ApJ

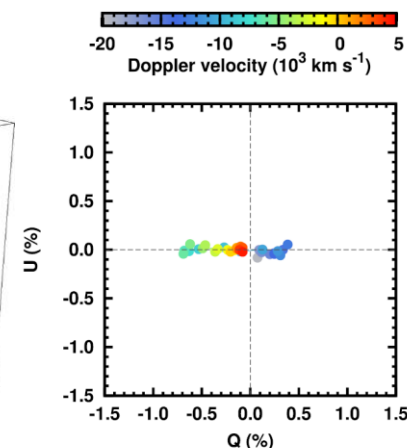
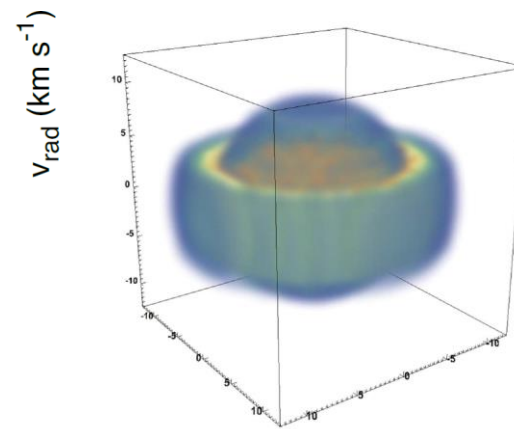
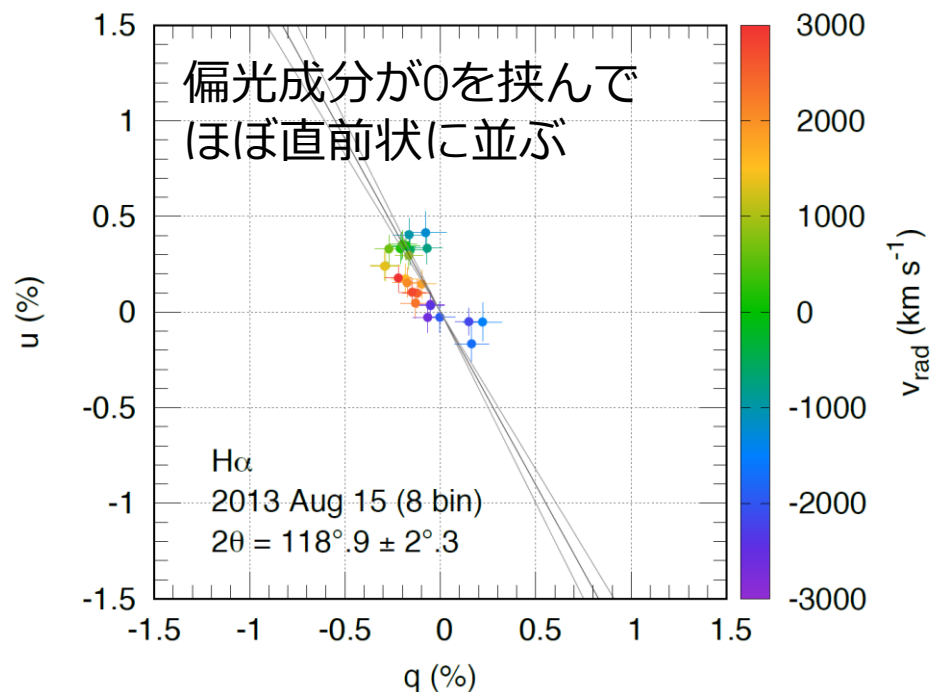
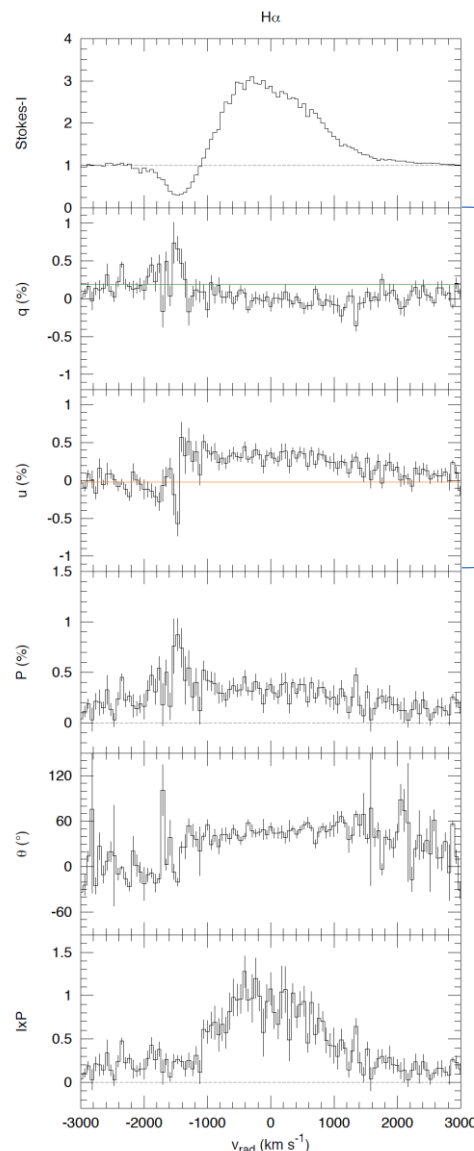


Figure 2 in Tanaka+(2017), ApJ, 837, 105

- 初期はトーラス成分が卓越している
- その後、それとは垂直な放射成分が卓越
 - Liらのモデルとconsistent

⇒ **線スペクトルの偏光観測から**
初期のイジェクタ構造に制限を加える初めての結果

まとめ

- 新星は重要な元素合成天体のひとつ
- 合成元素のシグナル（主に吸収線）は爆発初期に集中
 - ガンマ線放射（爆発から数日）、ダスト形成（爆発から数10日）も爆発初期
- しかし、初期のイジェクタ構造の理解は不十分
- 爆発初期(optically thick phase)の新星イジェクタの構造理解
 - 高分散分光観測： 吸収線から探る、吸収体の分布や物理状態の推定
 - 地味だが観測サンプル数を最も多く稼げる
 - 偏光分光観測： 線スペクトルの偏光観測からのガスの分布
 - 明るい天体に限られるが、初期の構造解明には大きな有用性
 - 電波干渉計・赤外干渉計：
 - 装置が特殊・非常に明るい天体には最適