

# 新星の急増光期を狙った分光観測

2023-09-12 田口健太

(2023 年度せいめいユーザーズミーティング)

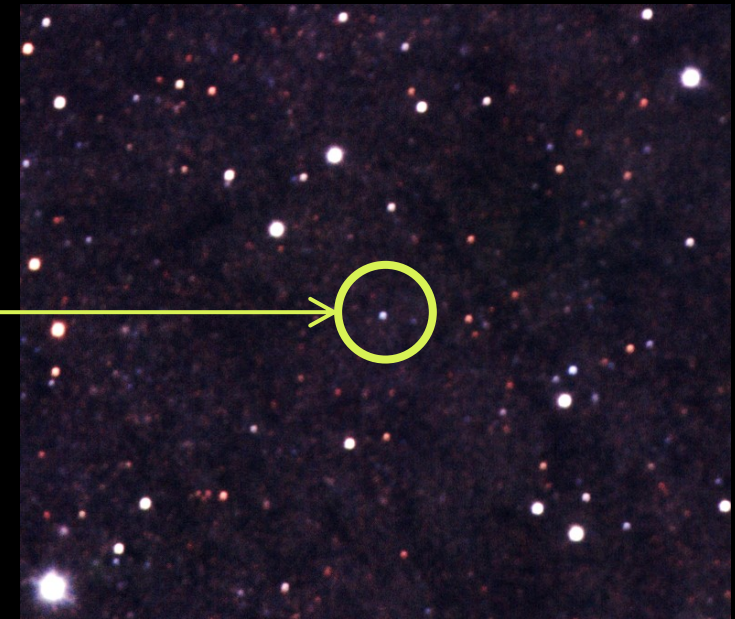
# (Classical) Novae: (古典) 新星、新星爆発

- 新星: 新しい星が夜空に出現したかのように見える現象。

2021-11-04

M31N 2008-12a taken by Seimei/TriCCS

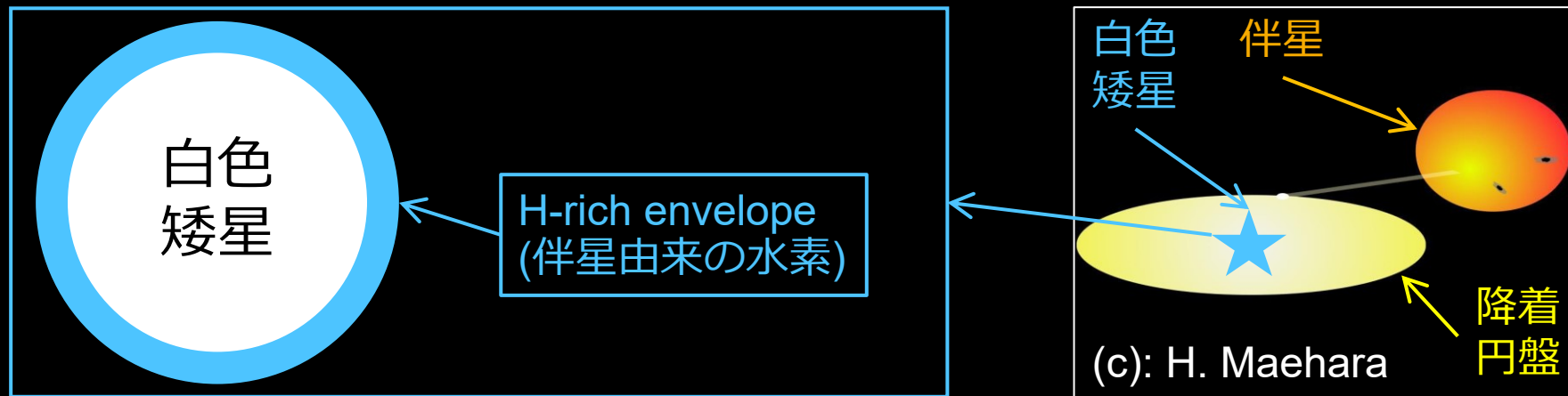
2021-11-14



- 宇宙物理学的には、新星は白色矮星表面での突発天体現象。

# 新星のメカニズム: 熱核暴走反応 (Thermonuclear Runaway)

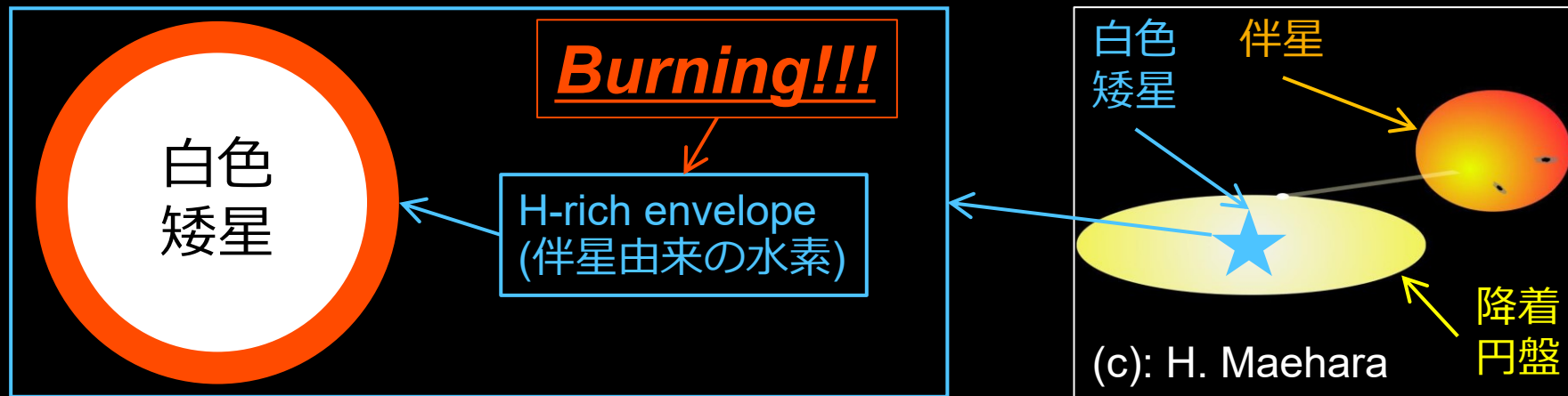
- 白色矮星 (主星) + 晩期型星 (伴星) から成る近接連星系。
- 伴星からガス降着 → 白色矮星表面に水素に富んだガス層 (envelope) 形成



- ガスが降着すればするほど、水素層の密度・温度が上昇  
→ 突然原子核反応が暴発 (熱核暴走反応) して新星を引き起こす。

# 新星のメカニズム: 熱核暴走反応 (Thermonuclear Runaway)

- 白色矮星 (主星) + 晩期型星 (伴星) から成る近接連星系。
- 伴星からガス降着 → 白色矮星表面に水素に富んだガス層 (envelope) 形成

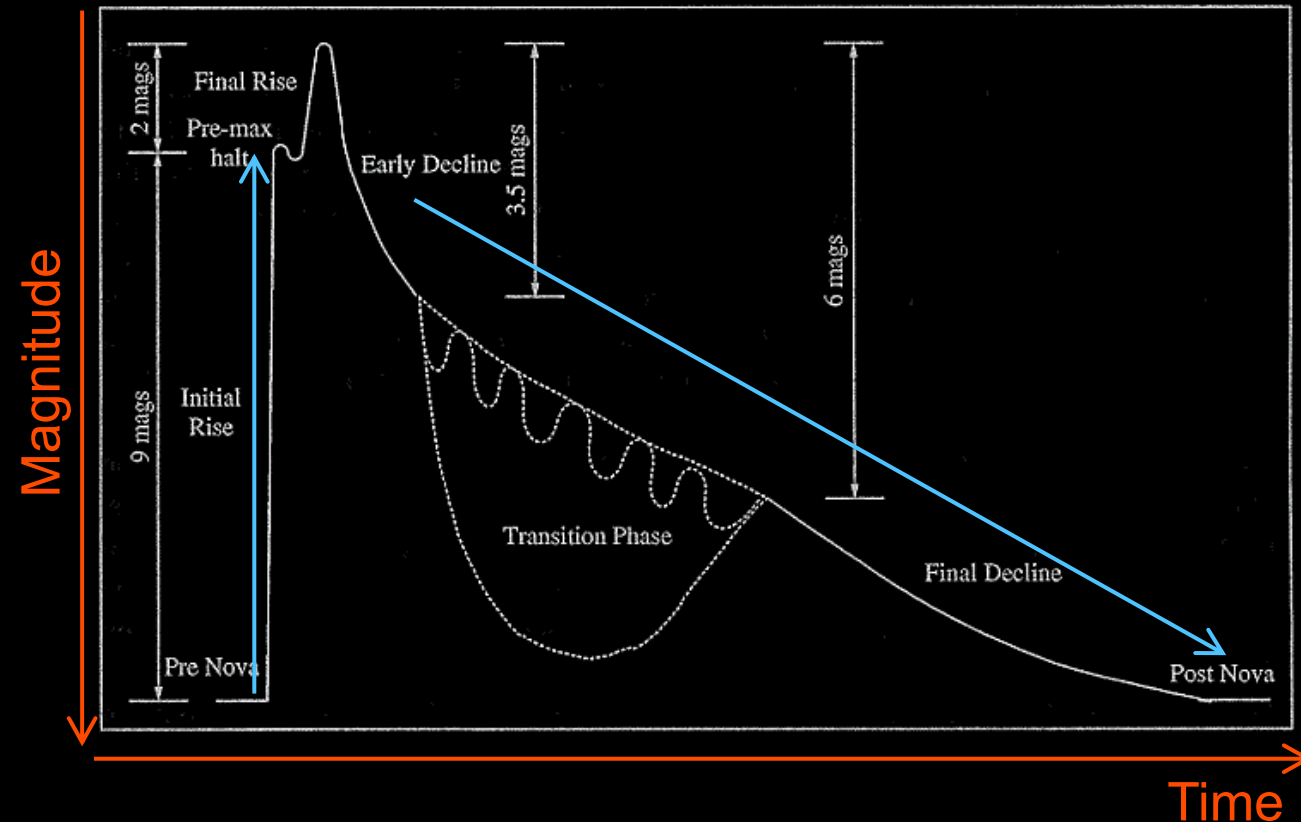


- ガスが降着すればするほど、水素層の密度・温度が上昇  
→ 突然原子核反応が暴発 (**熱核暴走反応**) して新星を引き起こす。

# 典型的な新星の光度曲線

- ~ 10 等くらい増光する
- 最初に急激な (数時間 ~ 1 日) 増光
  - 稀に ( $\leq 3\%$ ) 年単位で増光するものも
- その後は、数週間 ~ 100 年くらいかけて減光する

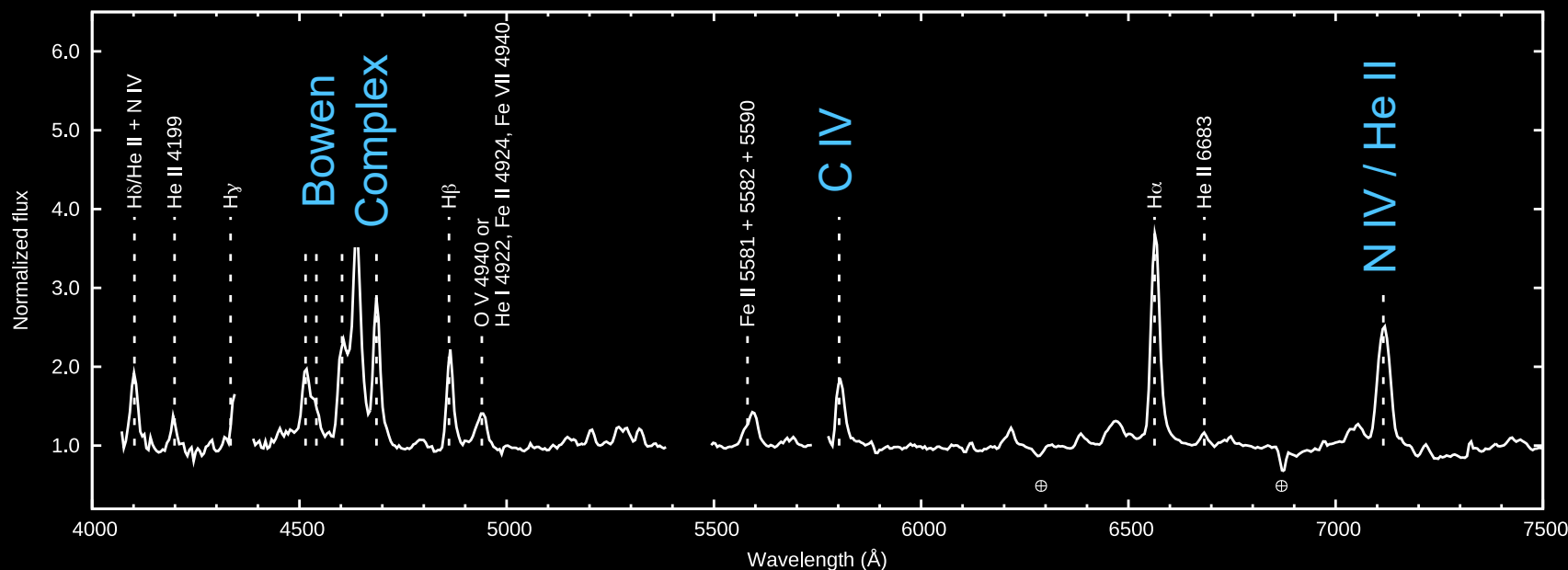
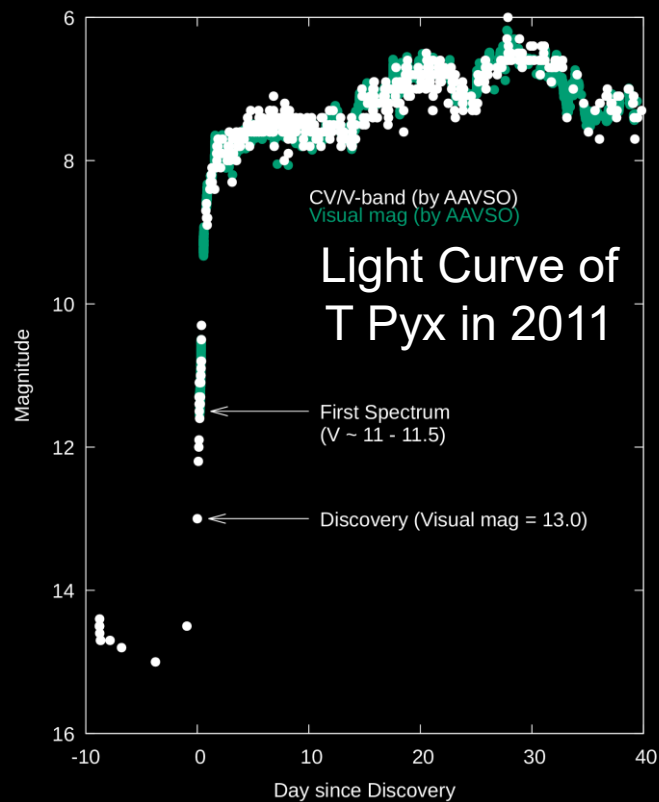
Warner (in [Bode & Evans 2008](#))



# 急増光期中の新星の分光観測例 ([Arai et al. 2015](#))

- 2011 年の T Pyx は、発見の僅か 4 時間後に分光されている。
- 極大付近 (急増光期終了後) とは全く異なる!!
  - 高階電離の輝線 (e.g., He II, C IV, N III, N IV)
  - P Cygni 型の吸収成分が見られない

• **観測例が殆ど無く、未開拓!**



# 急増光期中の新星の分光に対する せいめい望遠鏡の強み

- ToO 観測に適した構造・運用

- 分割鏡やトラス構造などの軽量化による、高速指向。
- ToO 観測がシステムとして組み込まれている。
- スクリプト観測やキュー観測も整備されている。

- 口径が大きい

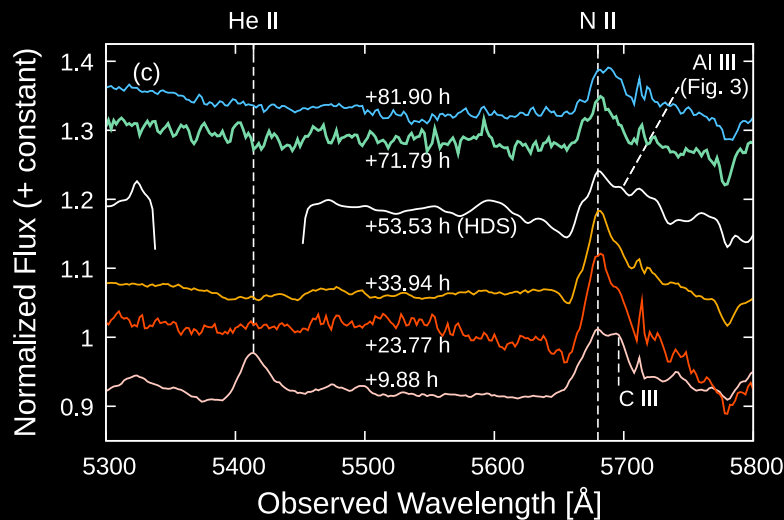
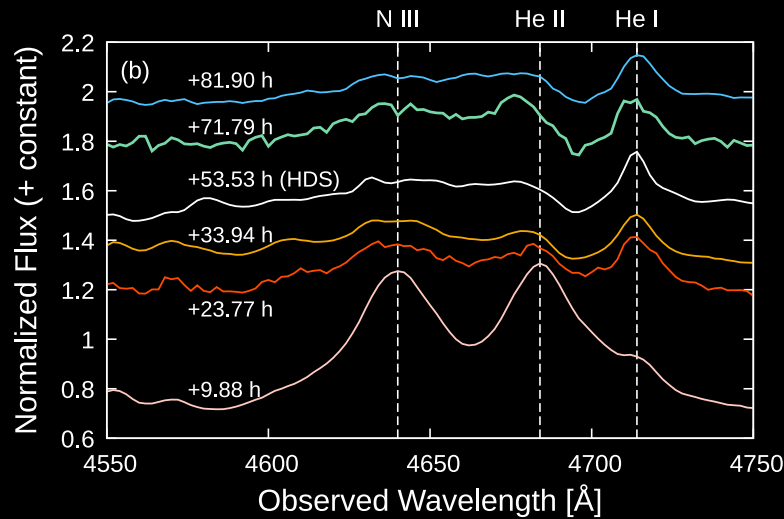
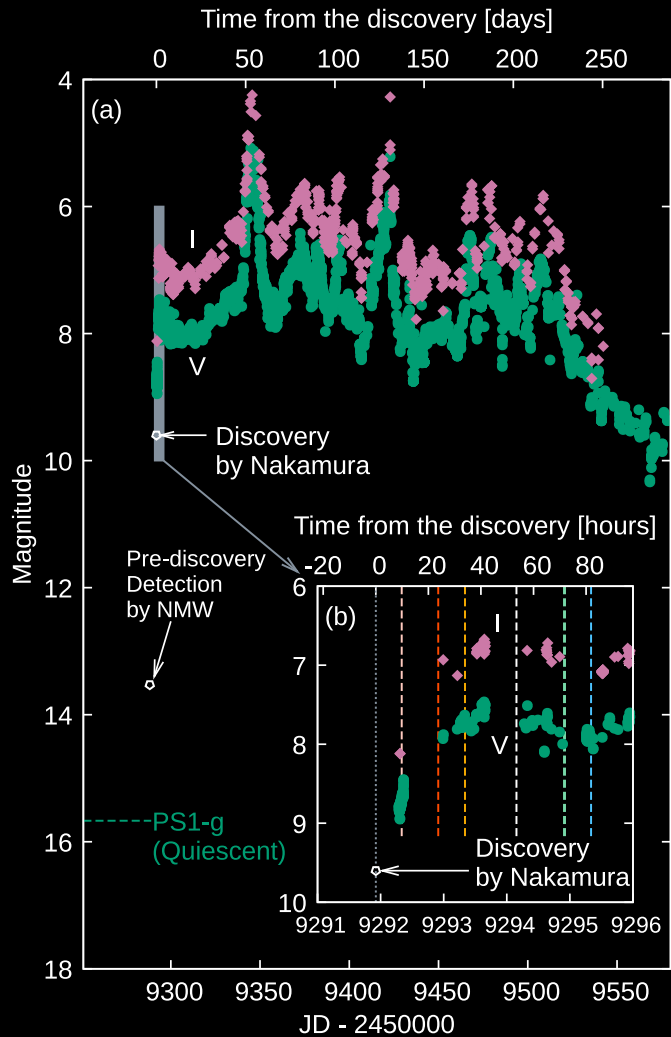
- 暗い段階から分光観測可能。
- 露出時間を短く抑えることが可能 → 急増光期中の詳細な時間変化を追える可能性

- 19A より「初期新星候補天体の即時分光」 ToO を提案している

- 統計的には 2 – 3 年に 1 度は岡山から観測可能なタイミングで新星が発生する



# V1405 Cas in 2021 (Taguchi et al., in revision)



- 発見 9.88 時間後に分光
  - 前述の T Pyx に続き 2 例目となる **急増光期中の分光!**
  - 強い He II, N III 輝線が検出!
    - 1 例目の T Pyx と同様
- 発見 1 日後以降にも分光
  - He II, N III は消失!



# 輝線の種類の変化

	N III	He II	N II	Si II	O I
+9.88 h	✓	✓	(✓)	×	×
+23.77 h	×	×	✓	(✓)	×
+33.94 h	×	×	✓	(✓)	×
+71.79 h	×	×	(✓)	(✓)	(✓)
+81.90 h	×	×	(✓)	(✓)	(✓)

- 高階電離輝線から、低階電離・中性輝線へと変化
- 理論的にも、急増光期中は極めて温度が高いことが知られている  
([Hillman et al. 2014](#); [Kato, Saio, Hachisu 2017, 2022](#) など)

→ 1つの観測的な証明

# 1-zone 近似を用いた輝線強度からの逆推定

- 目標: 急増光期中・急増光期終了後の温度の推定
  - 仮定: LTE (初期の新星は高密度のため妥当) + 1-zone 近似。
  - 式:

$$L_{u \rightarrow l}^{\text{spon}} = \frac{h\nu_{ul}}{4\pi} n_u A_{ul} V$$

$$V = \frac{4\pi}{3} R^3$$

$$R \sim 2.5 \times 10^2 R_{\odot} \left( \frac{v}{2000 \text{ km/s}} \right) \left( \frac{t_{ej}}{1 \text{ day}} \right)$$

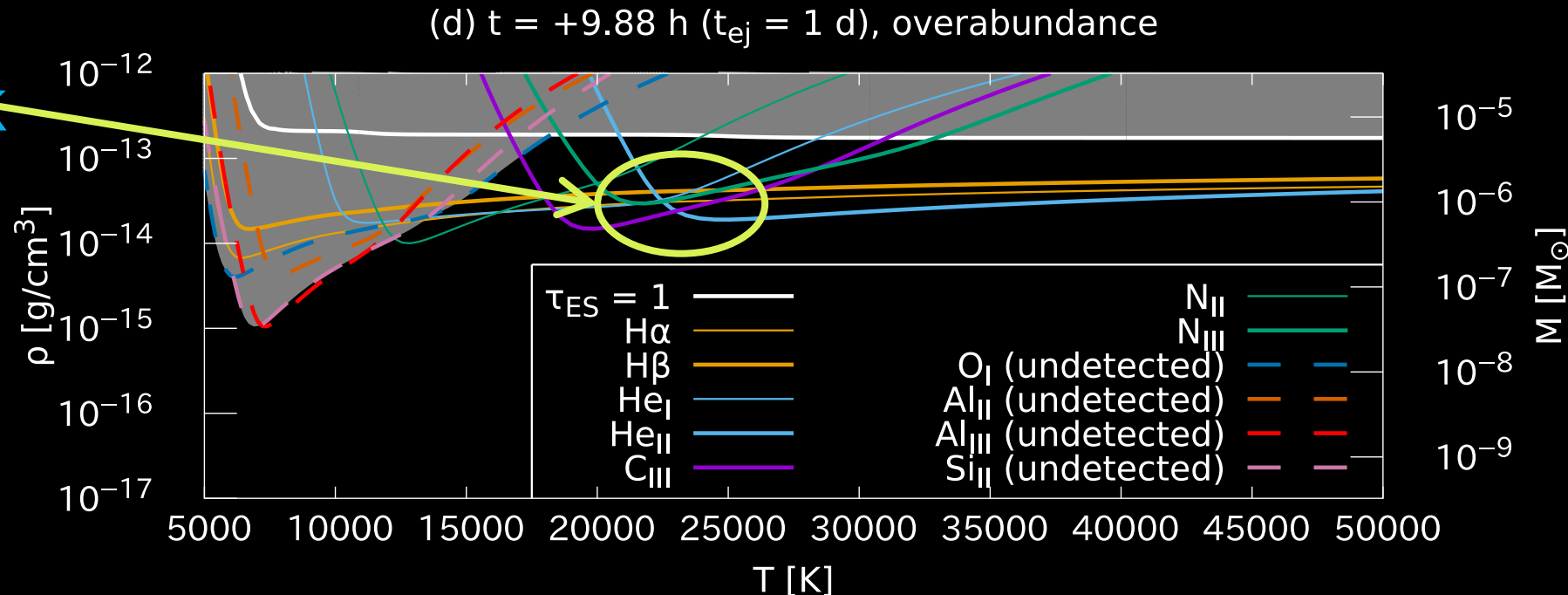
- 方針:
  - 系の温度・密度・組成 (説明変数) を与えると、LTE から emissivity が分かる。
  - Emissivity に系の体積を掛けると輝線の強度 (応答変数) が分かる。
  - これを実際に観測した輝線強度と照合することで、説明変数を逆推定する。  
(この天体は Gaia で距離が既知なので flux から luminosity に変換可能)

# 1-zone 近似を用いた輝線強度からの逆推定 (急増光期中: 発見 9.88 時間後)

- Solid line: 各輝線に対する  $L_{\text{model}} = L_{\text{observed}}$  となる  $(T, \rho)$  平面上の位置
- 灰色: 禁止領域 (実際は観測されていない輝線がモデルでは強く出るなど)

## Result:

- $T \sim 20000 - 22500 \text{ K}$
- $\rho \sim 10^{-13.5} \text{ g/cm}^3$
- $X(N) / (X(N))_{\odot} \sim 10$

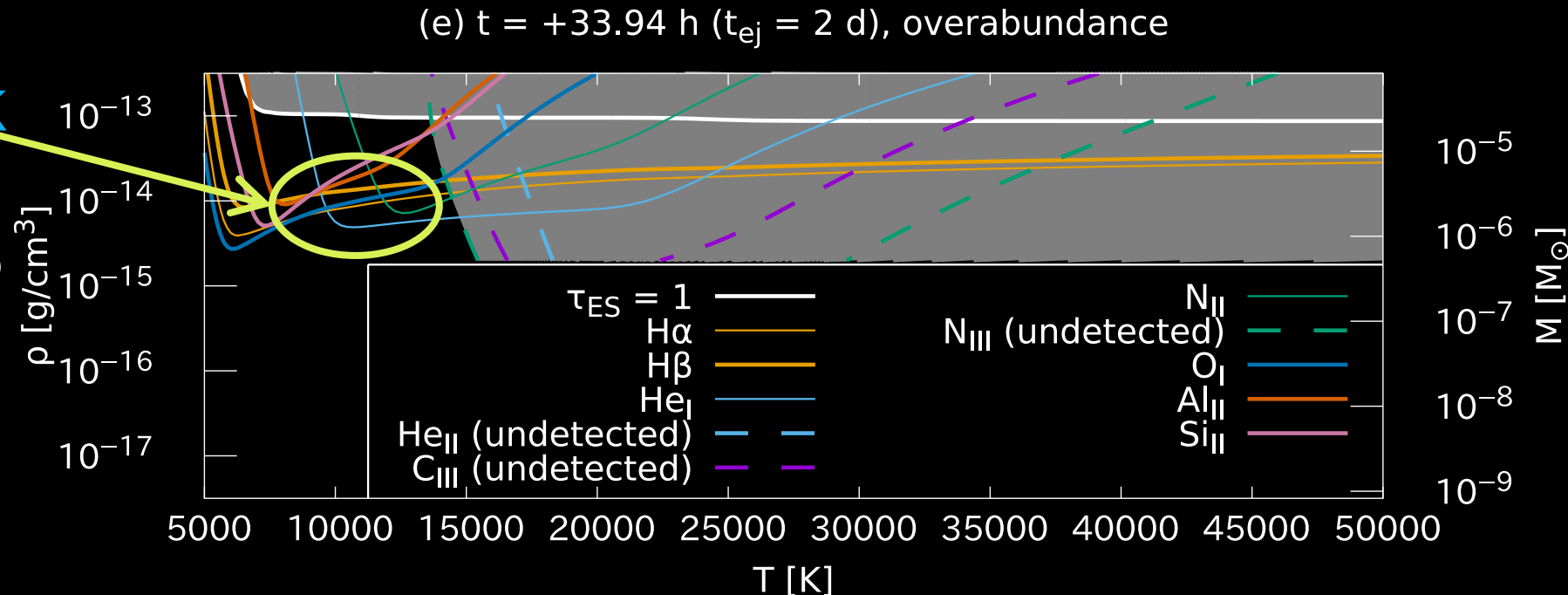


# 1-zone 近似を用いた輝線強度からの逆推定 (急増光期中: 発見 33.94 時間後)

- Solid line: 各輝線に対する  $L_{\text{model}} = L_{\text{observed}}$  となる  $(T, \rho)$  平面上の位置
- 灰色: 禁止領域 (実際は観測されていない輝線がモデルでは強く出るなど)

## Result:

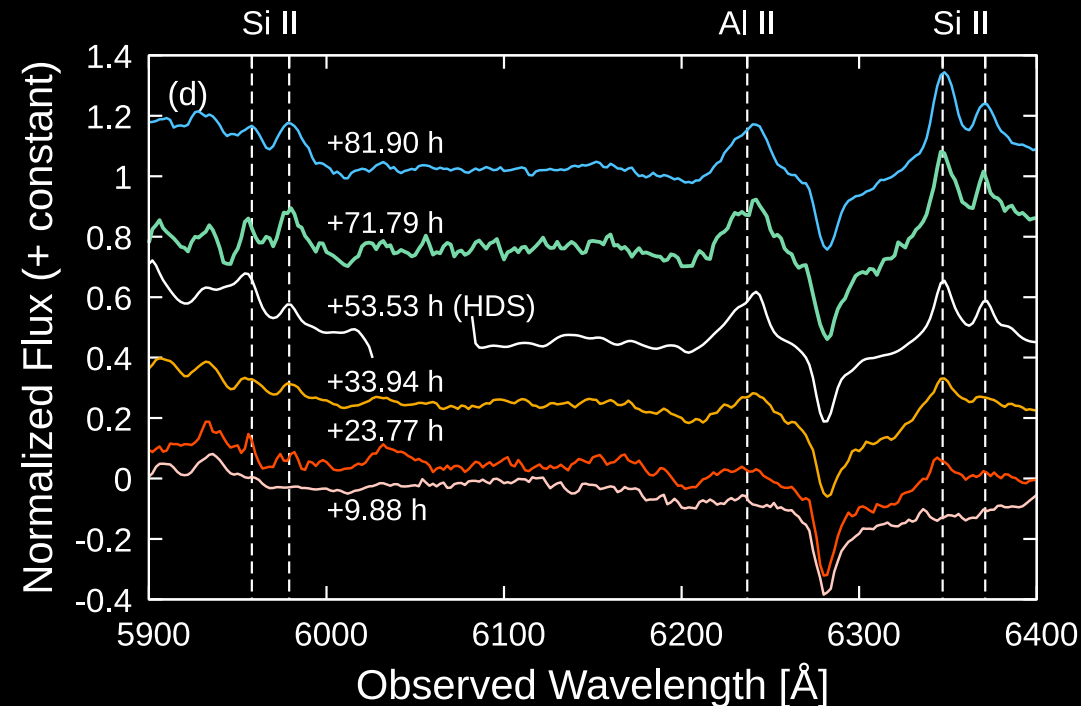
- $T \sim 10000 - 15000 \text{ K}$
- $\rho \sim 10^{-14} \text{ g/cm}^3$   
 $\rightarrow M_{\text{ej}} \sim \rho V = 10^{-5.5} M_{\odot}$
- $X(\text{N}) / (X(\text{N}))_{\odot} \sim 10$
- $X(\text{Al}) / (X(\text{Al}))_{\odot} \sim 40$



# 逆推定の結果まとめ

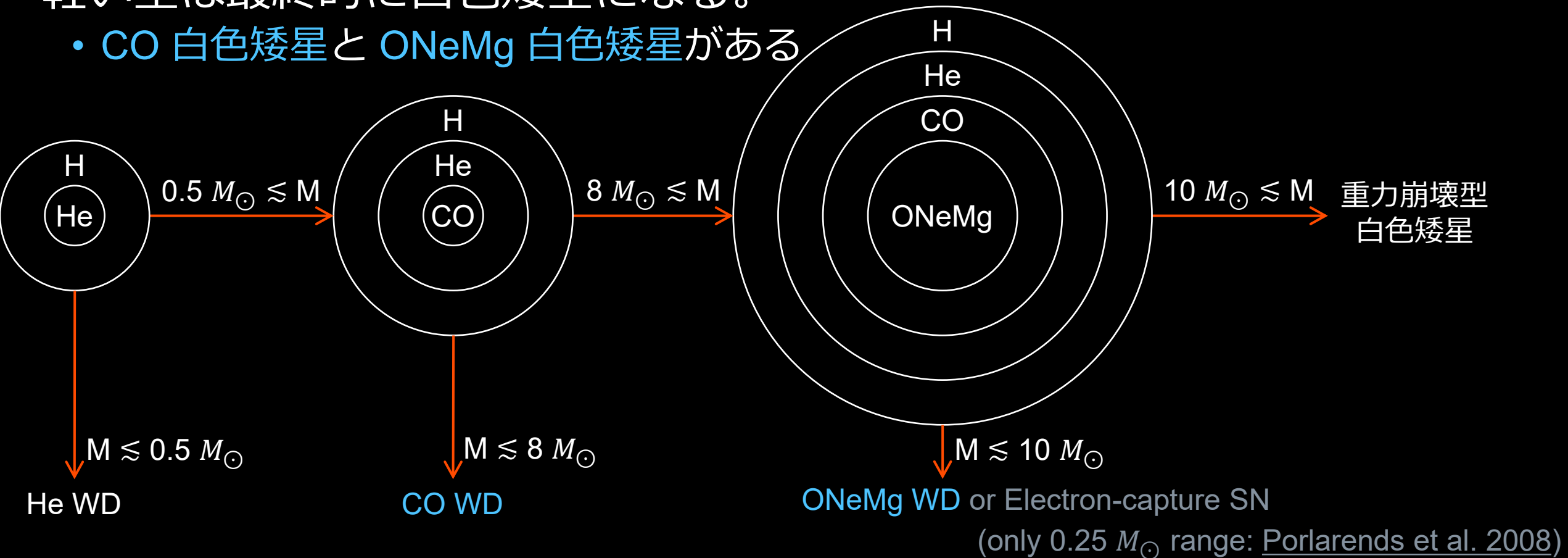
	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	T [K]	X(N) / (X(N)) <sub>⊙</sub>	X(Al) / (X(Al)) <sub>⊙</sub>
<b>+9.88 h</b>	$\sim 10^{-13.5}$	$\geq 20000$	$\sim 10$	
<b>+33.94 h</b>	$\sim 10^{-14}$	$\sim 10000$	( $\geq 10?$ )	$\sim 40$
<b>+81.90 h</b>	$\sim 10^{-14.5}$	$\sim 10000$	( $\geq 10?$ )	$\sim 40$

- 急増光期中のみ明らかに温度が高い
- 窒素とアルミニウムの超過
  - アルミニウムは太陽組成の 40 倍!



# 恒星進化と白色矮星

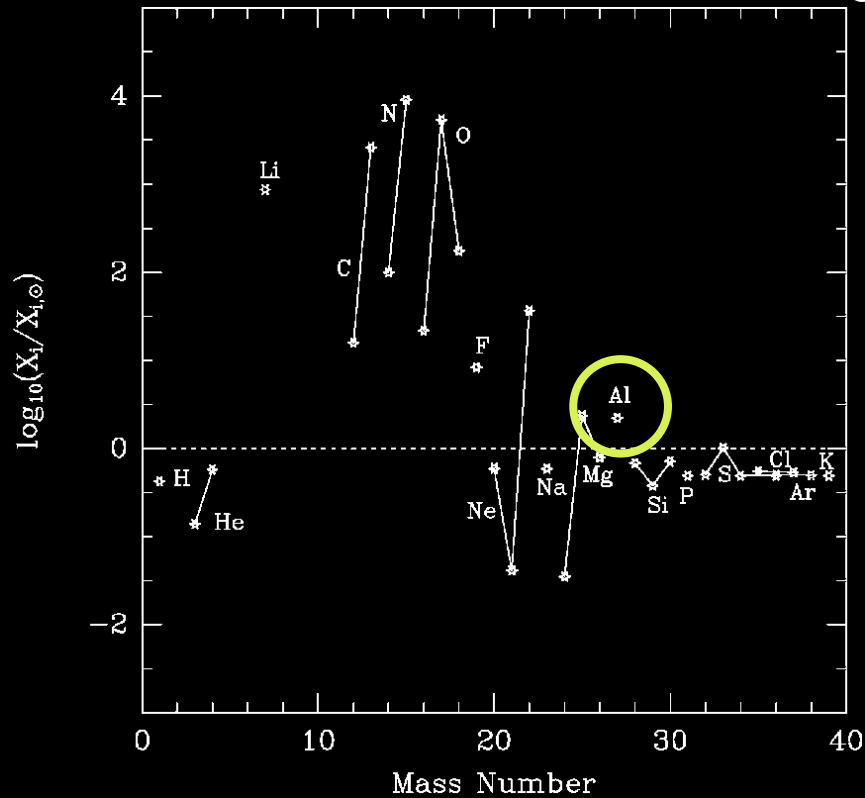
- 軽い星は最終的に白色矮星になる。
  - CO 白色矮星と ONeMg 白色矮星がある



# アルミニウムを多く作る新星は？

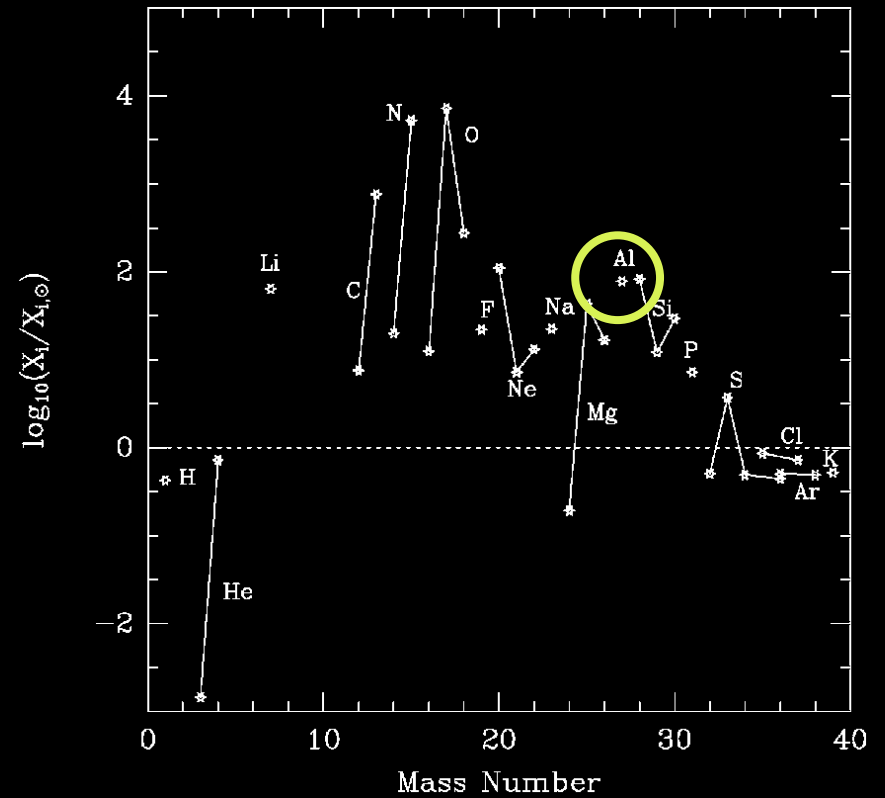
- 元素合成計算によると、アルミニウムを太陽組成の 10 倍以上作る新星は、**ONeMg 白色矮星に限られる**

CO 白色矮星での新星 ( $M_{WD} = 1.15 M_{\odot}$ )



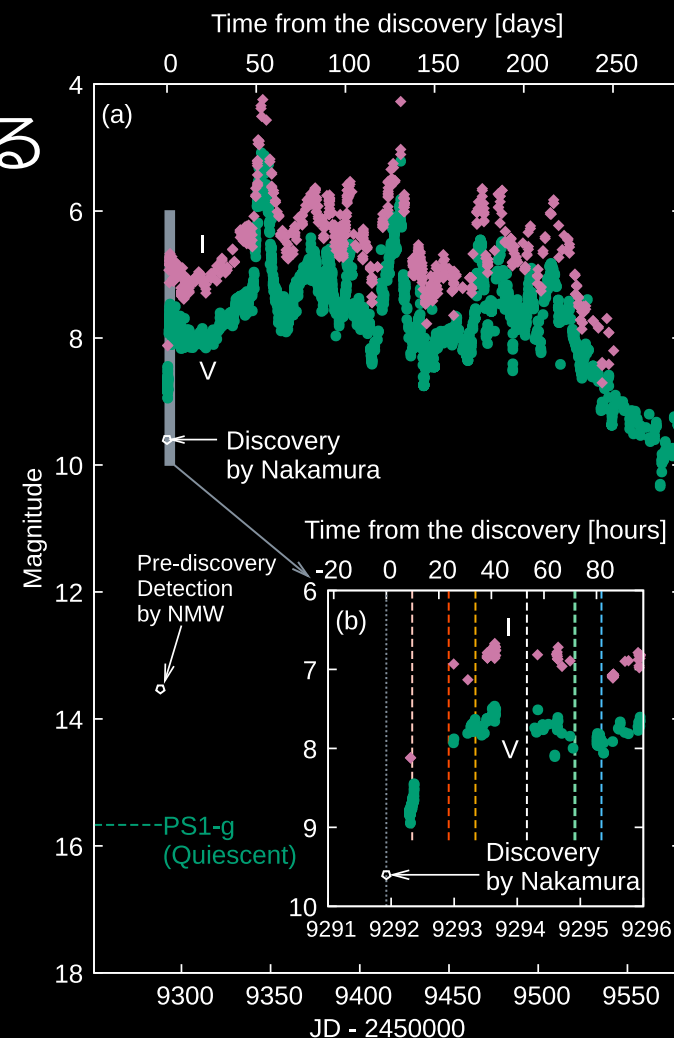
[José et al. \(2006\)](#)

ONeMg 白色矮星での新星 ( $M_{WD} = 1.15 M_{\odot}$ )



# V1405 Cas の正体: 軽い ONeMg 白色矮星

- V1405 Cas は減光が遅く、極大付近に bump が多数。  
→ 理論的にはこれらの特徴は軽い白色矮星 ( $< M_{\odot}$ ) を示唆する  
(e.g., [Kato & Hachisu 2006](#); [Kato & Hachisu 2009](#))
- しかし ONeMg 白色矮星は  $> 1.1 M_{\odot}$  で生まれるはず  
(e.g., [Lauffer et al. 2018](#))
- 過去に何度も新星爆発を起こして質量を減らした?
- 軽い ONeMg 白色矮星由来の新星は V723 Cas ([Takeda et al. 2018](#)) に次ぐ 2 例目。





# まとめ

- 新星は数時間 ~ 1 日で急増光する現象。
- 急増光期中の分光観測例は T Pyx の 1 例のみだった。
- せいめい望遠鏡で **2 例目となる急増光中の新星 V1405 Cas の分光**に成功。
  
- 輝線強度から、温度・密度・組成を逆推定
  - 急増光期中のみ温度は  $> 20000$  K  $\rightarrow$  急増光期終了後は  $\sim 10000$  K に落ち着く。  
(急増光期中は温度が高いという理論の強い裏付け)
  
  - **アルミニウムが太陽組成の 40 倍**  $\rightarrow$  ONeMg 白色矮星を示唆
    - ただし光度曲線からは白色矮星が  $< M_{\odot}$  だと考えられる。  
 $\rightarrow$  V723 Cas に次ぐ 2 例目の、**軽い ONeMg 白色矮星からの新星爆発**
      - 過去の新星爆発など、進化の過程で大量の質量を失った?