

古典新星 V1405 Cas の 増光中のスペクトル

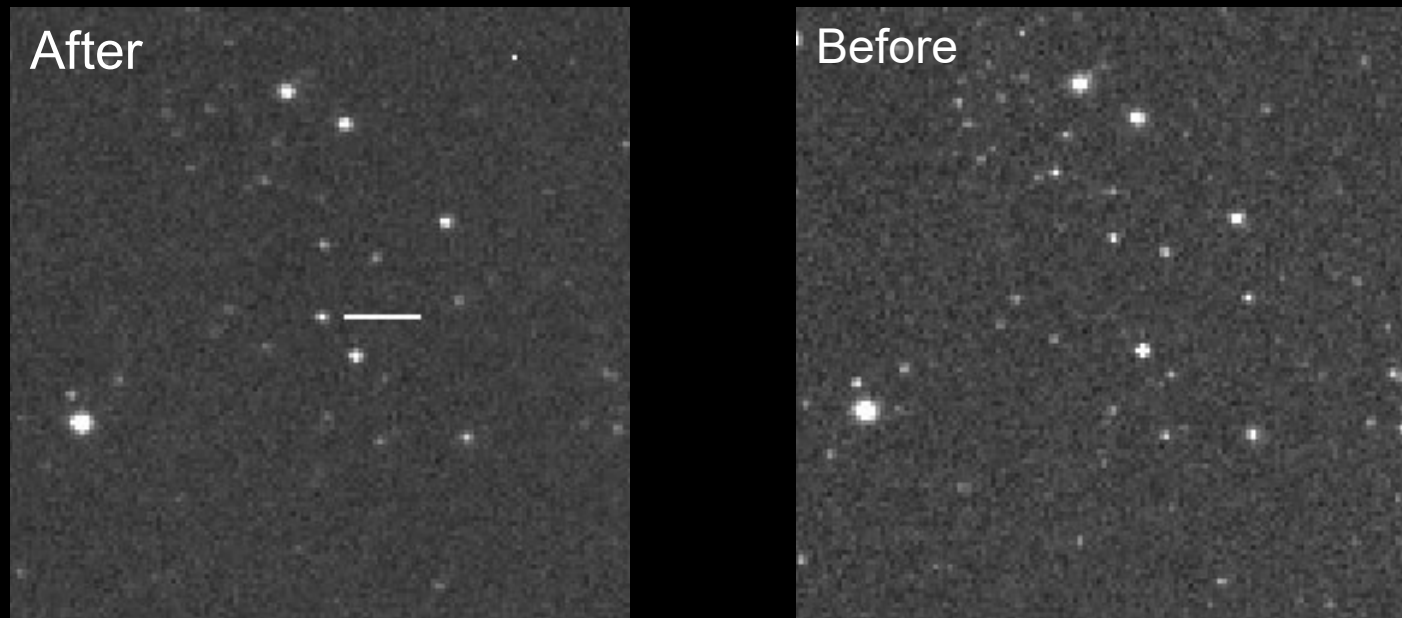
2022/7/28 (激変星研究会)

田口健太 (京大 D3)

(Classical) Novae: (古典) 新星、新星爆発

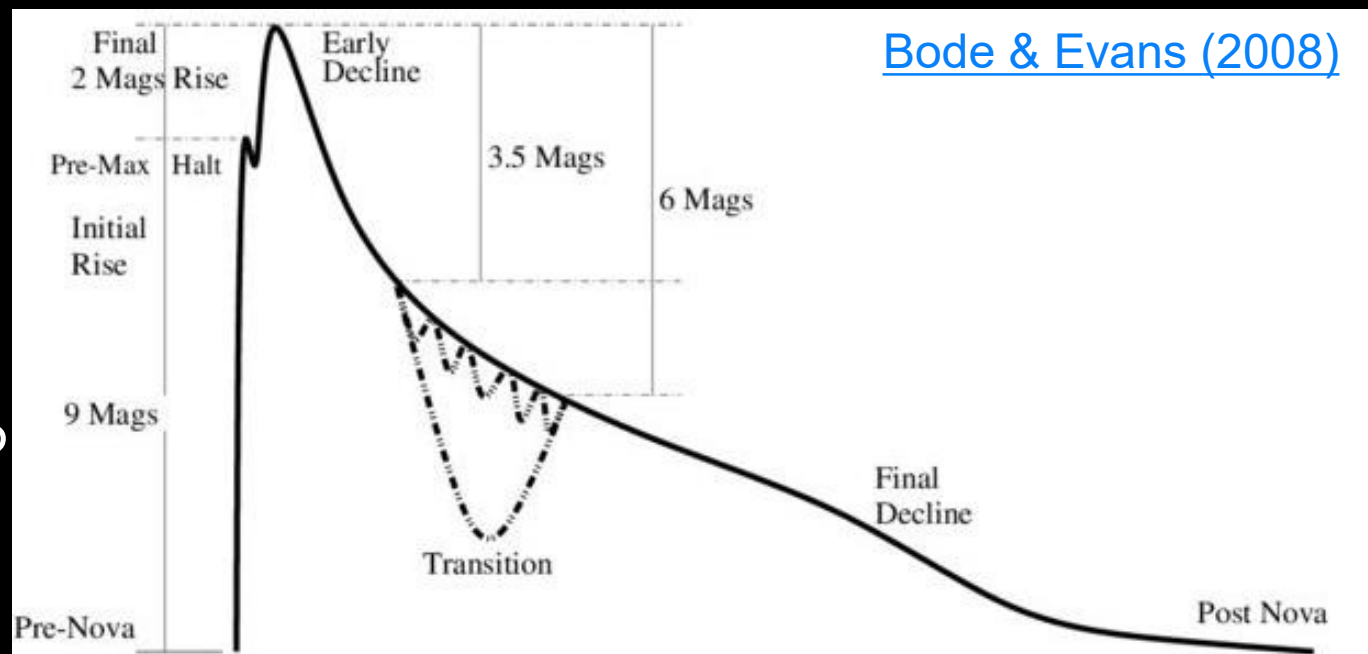
- “Nova” とはラテン語で “new star” の意味
- 「新しい」星が突然 (多くの場合 ~ 1 day 以内で) 出現する
- 宇宙物理学的には、これも突発天体現象

V1405 Cas (by Yuji Nakamura)



可視光での light curve

- 図: 典型的な光度曲線
 - **最初の1日くらいで「initial rise」**
 - (分光) 観測が難しい
 - せいめいなら可能かもしれない
 - **突発天体に重きを置いた構造・運用**
 - 典型的には数週間～数年で暗くなる (暗くなる間の観測は簡単)

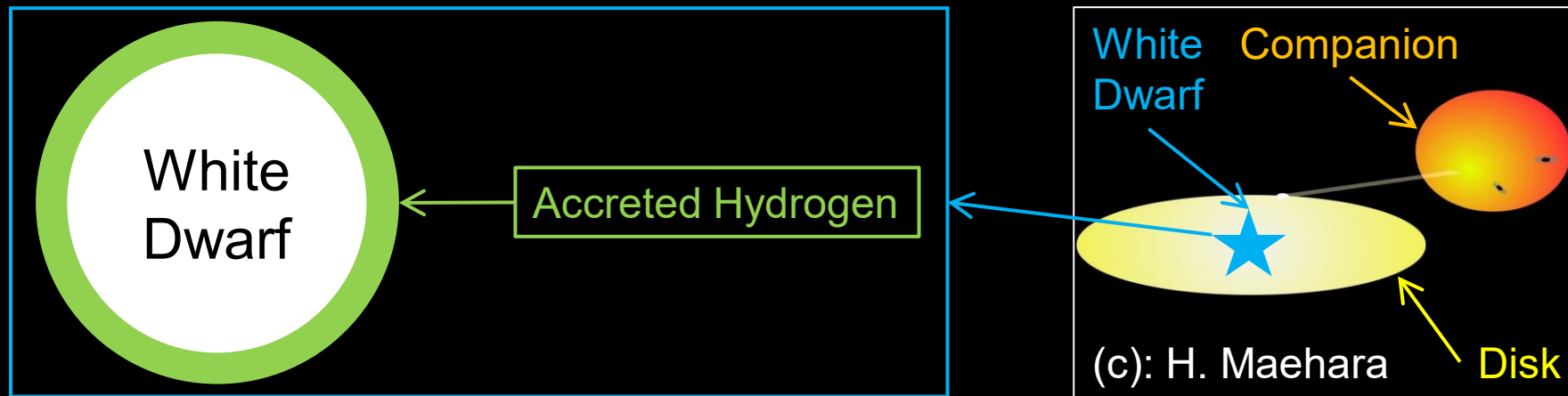


- **ざっくり～10等くらいの増光幅**
(最低でも～7等、最高だと～19等)
- 絶対等級 $M_{V,peak} \sim -6$ to -10
 - 銀河系内 (+ M31 など) が観測対象 → **銀河面付近と M31 方向**が主要なターゲット

新星爆発を起こす要因

(Thermonuclear Runaway, 熱核暴走反応)

- **白色矮星 (WD, 主星)** と **晩期型星 (伴星, companion)** から成る連星系 (e.g., 激変星 (novalikes, 矮新星, polars, など) や共生星などが該当)
- **伴星**由来のガスが**白色矮星表面**に降着し、**水素ガス**の層を形成

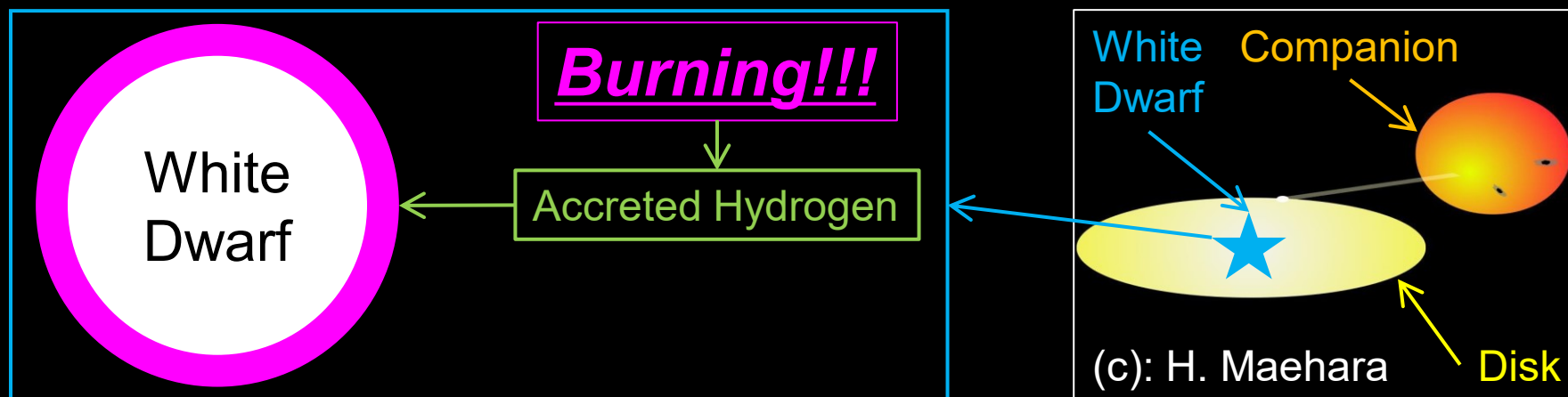


- ガスが溜まれば溜まるほど、水素ガス層の温度・密度は高まる
→ 突然**核反応**が始まり、新星を引き起こす

新星爆発を起こす要因

(Thermonuclear Runaway, 熱核暴走反応)

- **白色矮星 (WD, 主星)** と **晩期型星 (伴星, companion)** から成る連星系 (e.g., 激変星 (novalikes, 矮新星, polars, など) や共生星などが該当)
- **伴星**由来のガスが**白色矮星表面**に降着し、**水素ガス**の層を形成



- ガスが溜まれば溜まるほど、水素ガス層の温度・密度は高まる
→ 突然**核反応**が始まり、新星を引き起こす

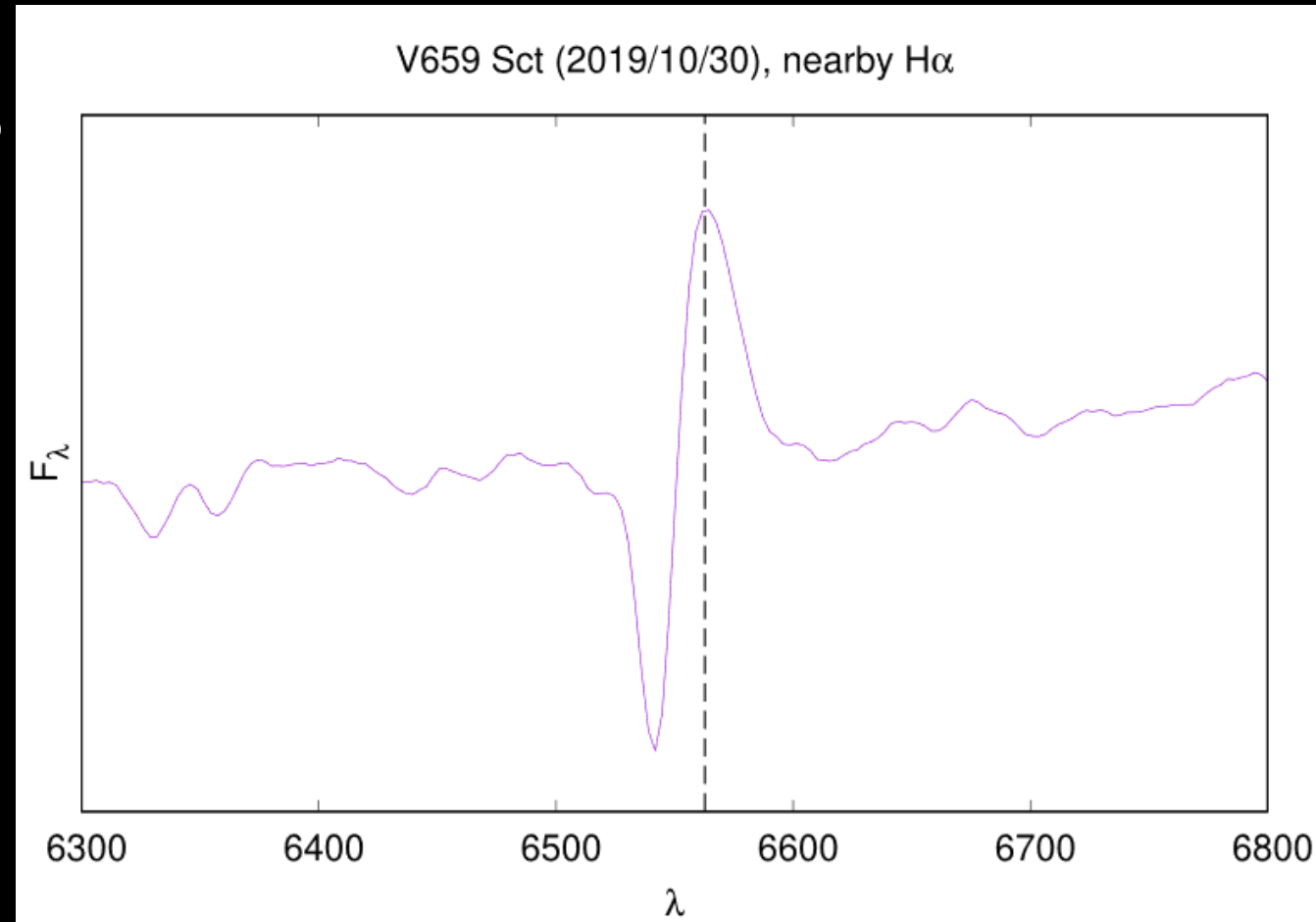
反復新星

(Recurrent Novae, 再帰新星などとも)

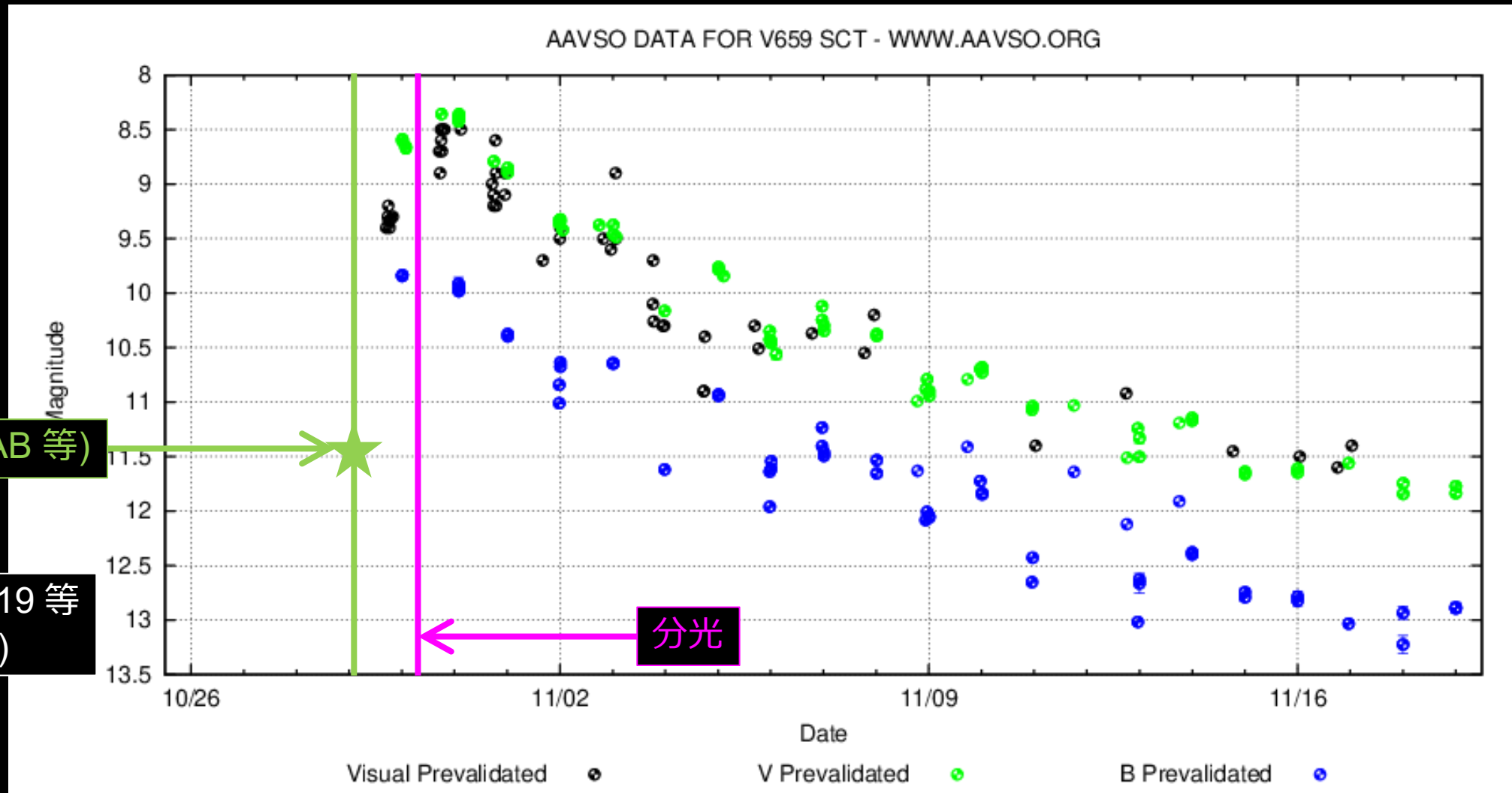
- 新星爆発後、連星系が降着を再開 → **将来再び新星が起きるはず**
 - 多くの新星は 10^4 年とか極めて長い間隔で起きると考えられている
 - しかし、白色矮星が重いか、降着率が高いと、間隔は短くなる
- 反復新星: **史上複数回の新星爆発が記録されている天体。**
 - 銀河系内では 10 天体くらい知られている
 - いち早く爆発開始を発見すべく、アマチュアなどの監視対象
 - RS Oph: 1898, 1907, ..., 1985, 2006, 2021
 - U Sco: 1863, ..., 1999, 2010, 2022 (後述)
 - T CrB: 1866, 1946, (2020s?)

極大付近 (発見 1 日後) の新星スペクトル

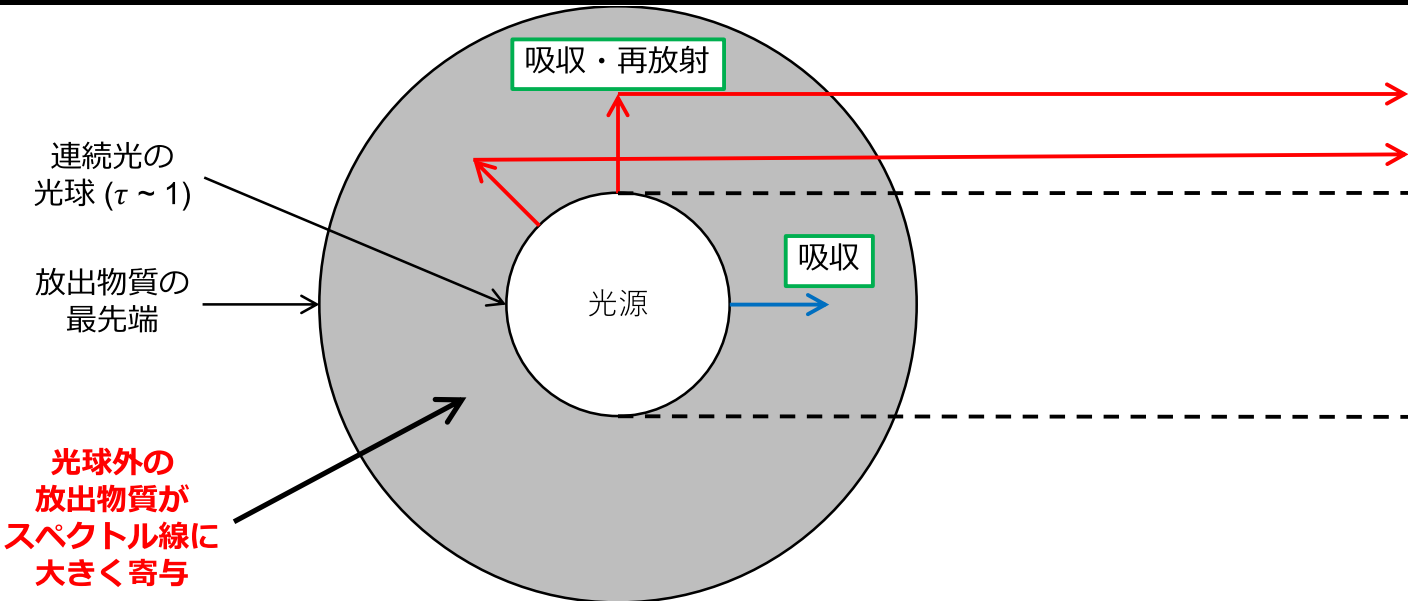
- H I, He I, Fe II などの line が頻出
 - (後述の天体より) **電離階数は低い**
- **P Cygni 型の line** がよく見られる
 - 青方偏移した吸収成分
 - ほぼ静止波長の輝線成分
- P Cygni 型は (line に対し) optically thick な outflow の存在を示すもの
(次々スライド)



前ページの天体の Light Curve



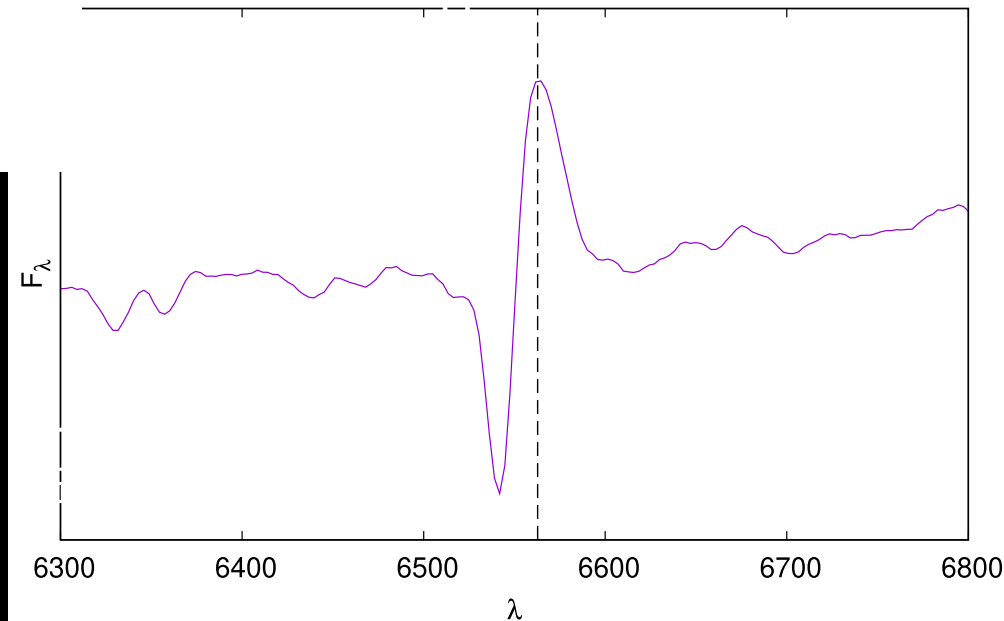
P Cygni 型プロファイル



• P Cygni 型の line

- 青方偏移した吸収成分
- ほぼ静止波長の輝線成分

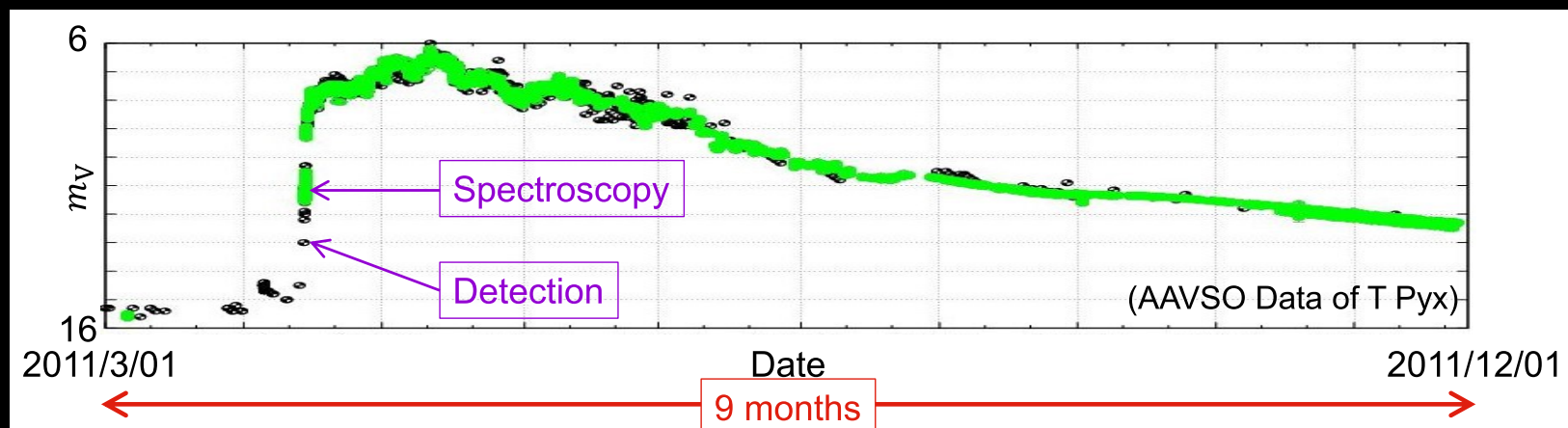
V659 Sct (2019/10/30), nearby H α



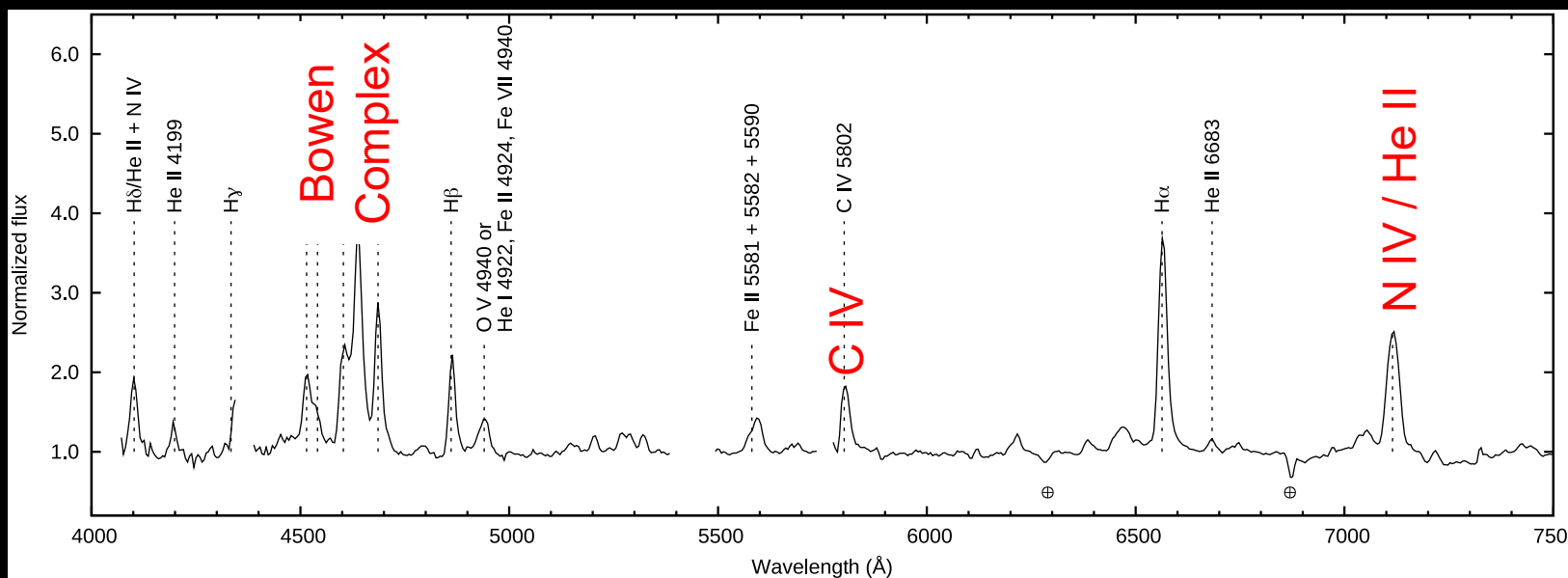
- P Cygni 型の line は (line に対し) **光学的に厚い膨張系を示す**
 - 何もなければ光球面から光が届くだけ
 - もしも光球面の外に line に対して光学的に厚い層があれば
 - 我々に届く光は吸収されてしまう (吸収線)
 - 我々に届く予定ではなかった光が吸収再放射などで届く (輝線)
 - 膨張に伴う Doppler 効果で、吸収のみ青方偏移

急増光期の反復新星 T Pyx (2011) の分光観測 (Arai et al. 2015)

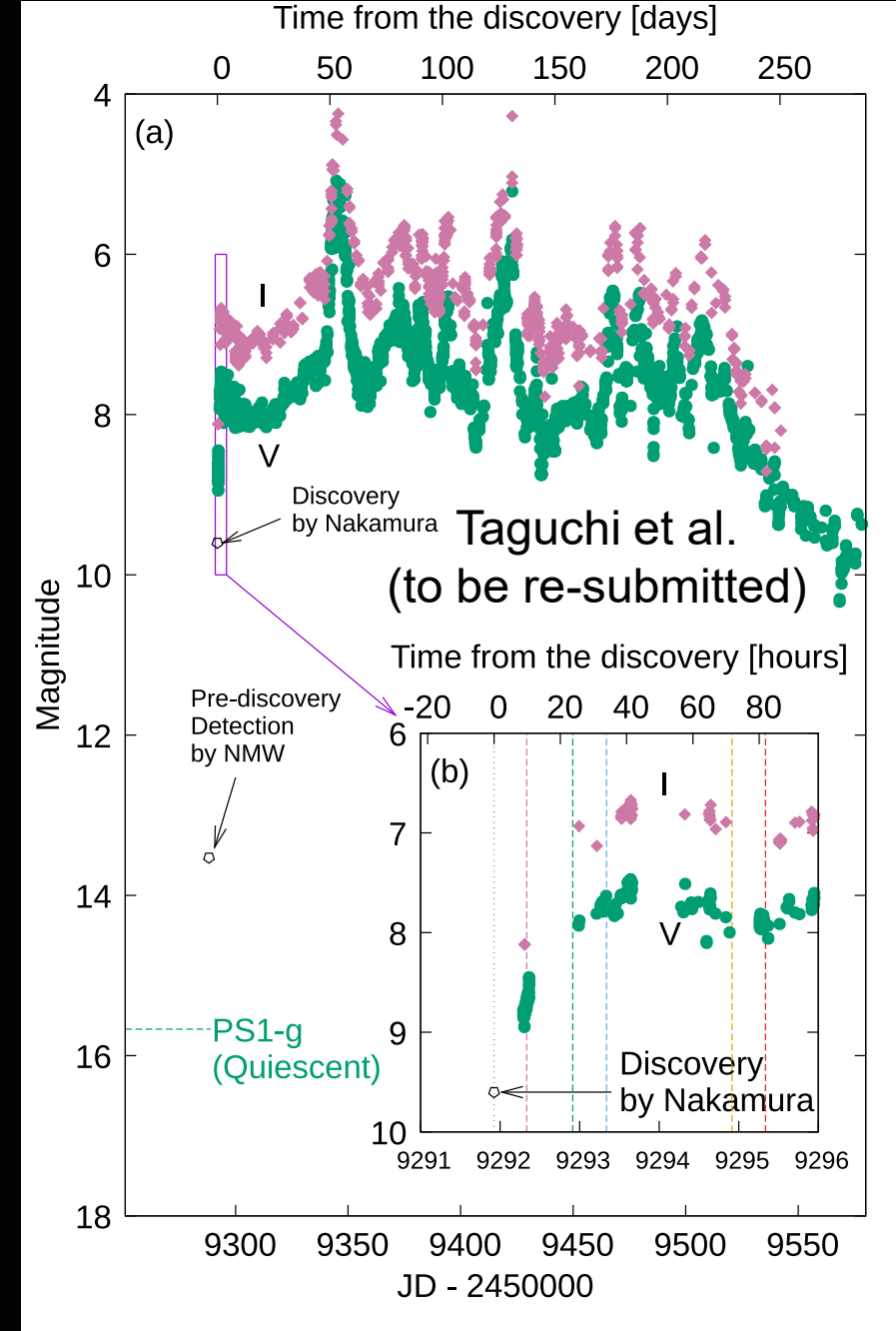
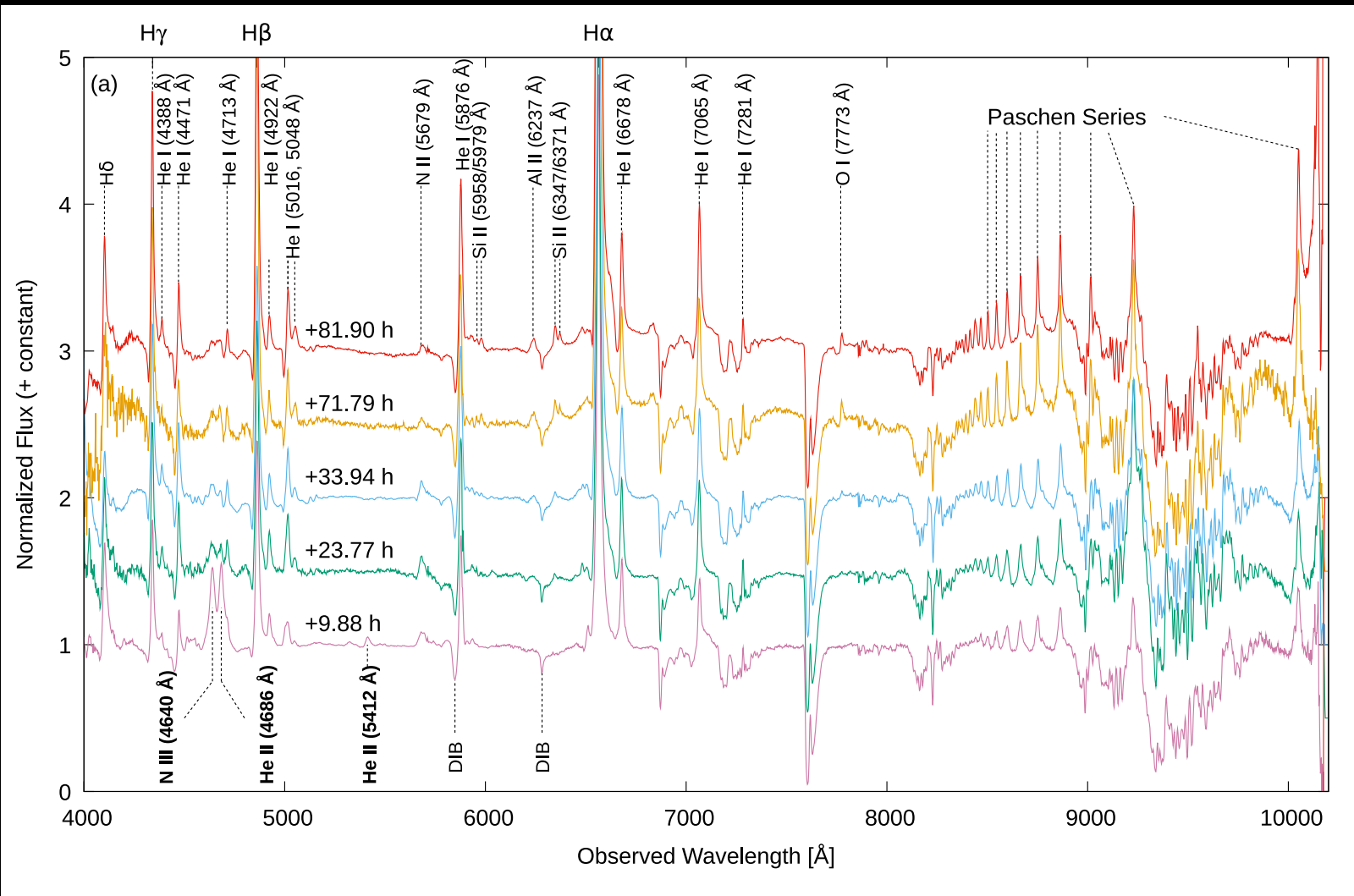
- 発見 0.19 日 (4.6 時間) 後に分光
 - 反復新星であったため、多くの人々がモニターしていた



- 特徴
 - **高い電離階数の輝線**
 - 極大付近では消えた
 - 恐らく観測史上初?
 - **P Cygni 型の吸収なし**
 - 重力崩壊型超新星の“Flash spectroscopy”と似てる

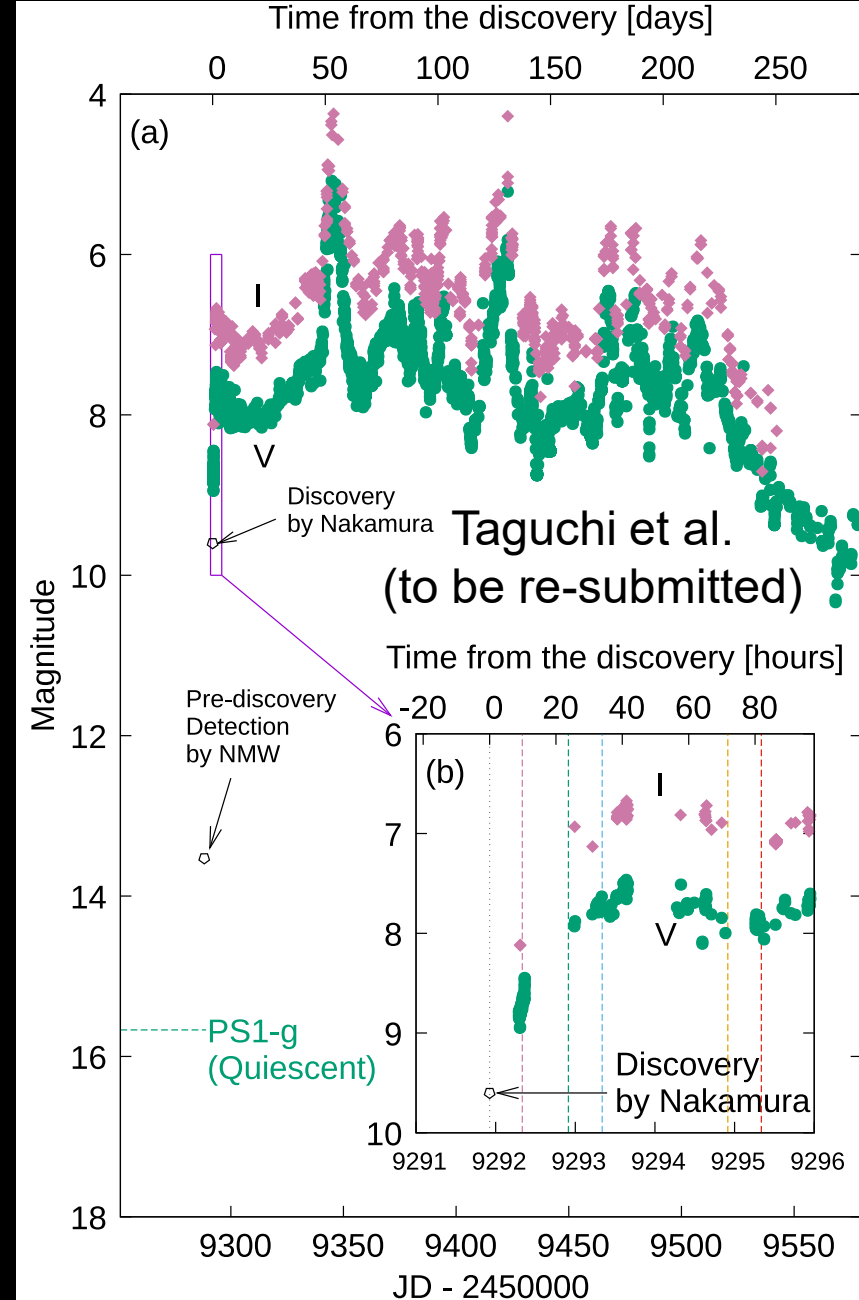
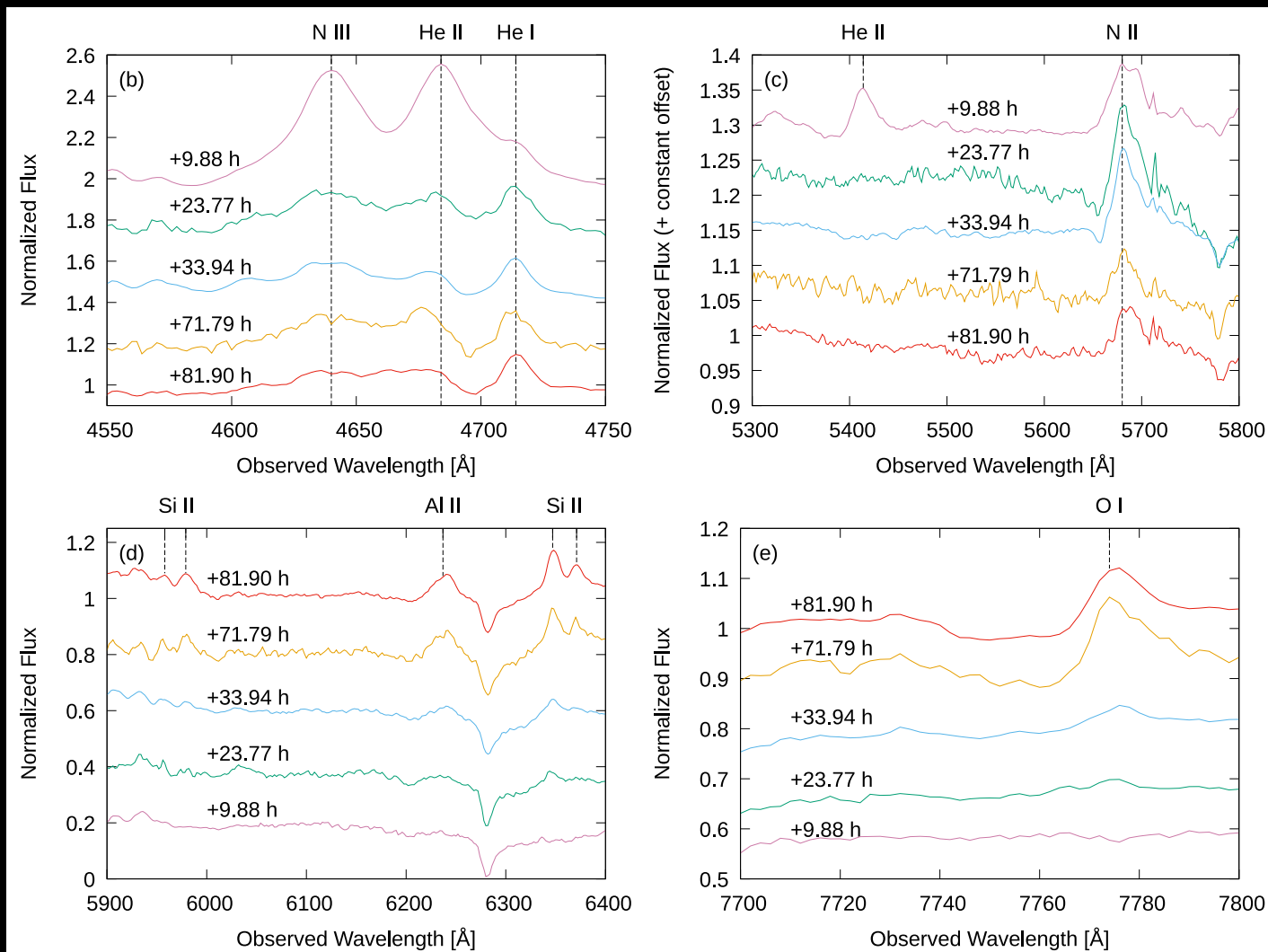


V1405 Cas の初期スペクトル (0) スペクトル全体図



V1405 Cas の初期スペクトル (1)

Line の種類

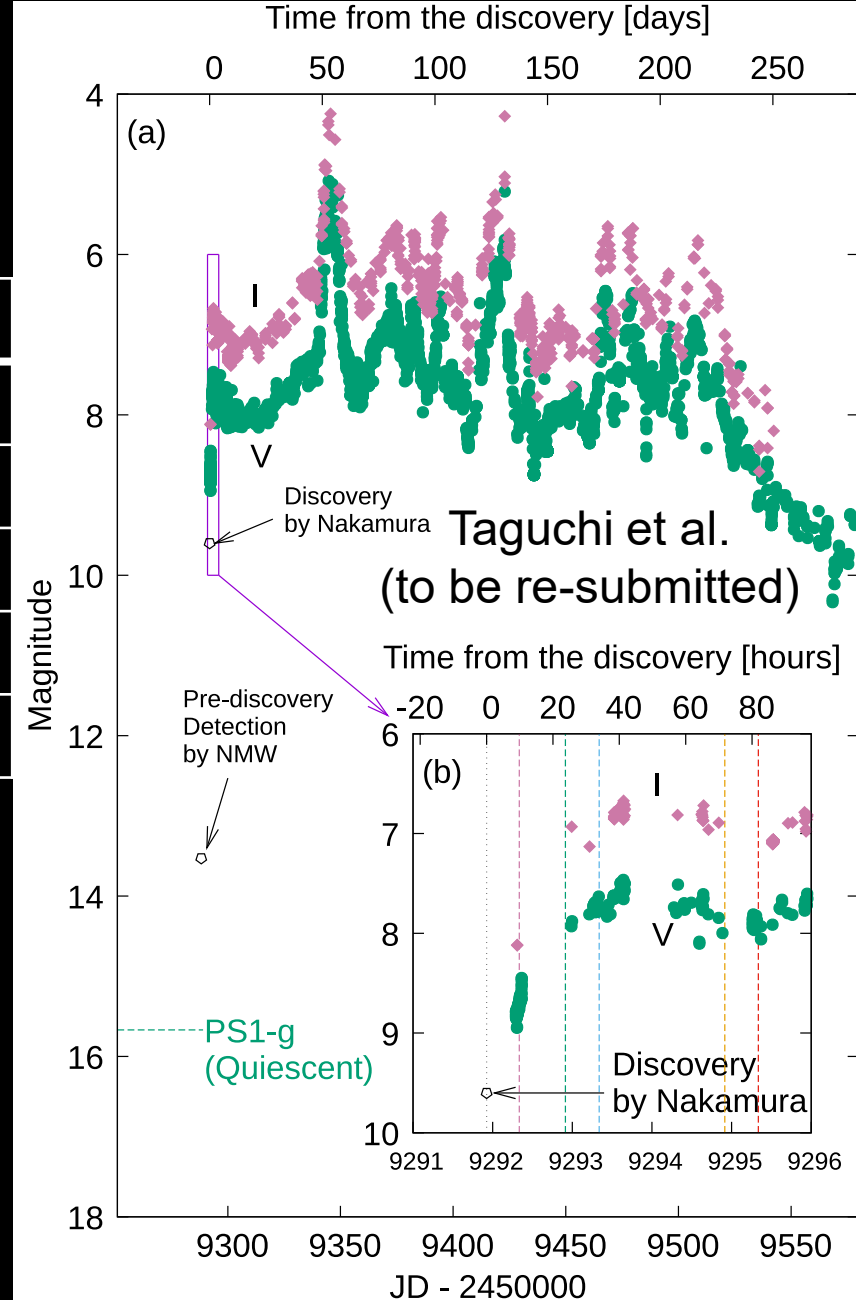


V1405 Cas の初期スペクトル (1)

Line の種類

	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	×	×	(✓)	(✓)	(✓)

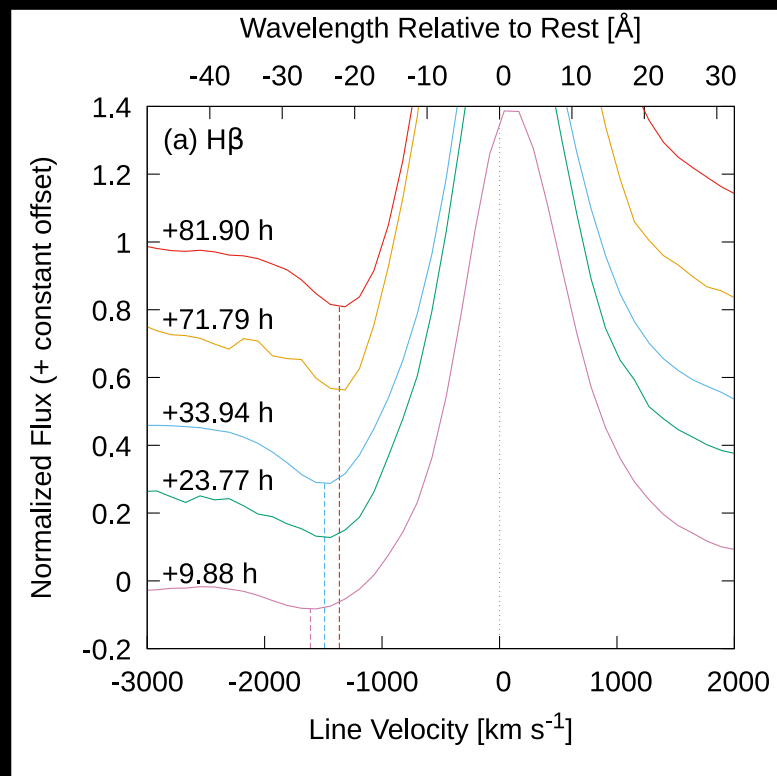
- 発見後最初の 3 日間の分光観測
 - 最初のスペクトル (**+9.88 h**) は、急増光期。
- 高い電離階数 (**+9.88 h**) → 低い電離階数
 - T Pyx ([Arai et al. 2015](#)) とも consistent.
 - このような結果は T Pyx に続き 2 例目



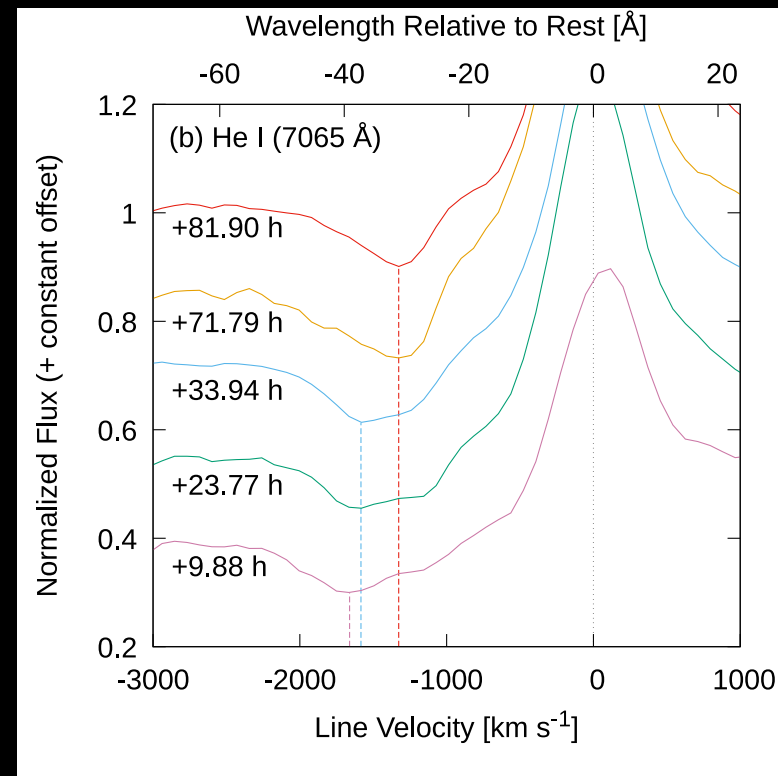
V1405 Cas の初期スペクトル (2)

Line の速度

- 最初のスペクトルの時点で P Cygni 型プロファイルが見られた
 - T Pyx ([Arai et al. 2015](#)) よりも遅い時期を見ている?
- 吸収成分の速度は 3 日の間で 2 ~ 3 割くらい減速した



Taguchi et al.
(to be re-submitted)



T Pyx と V1405 Cas を合わせた時間進化の様子

• 下記表のような時間進化になるのだろう

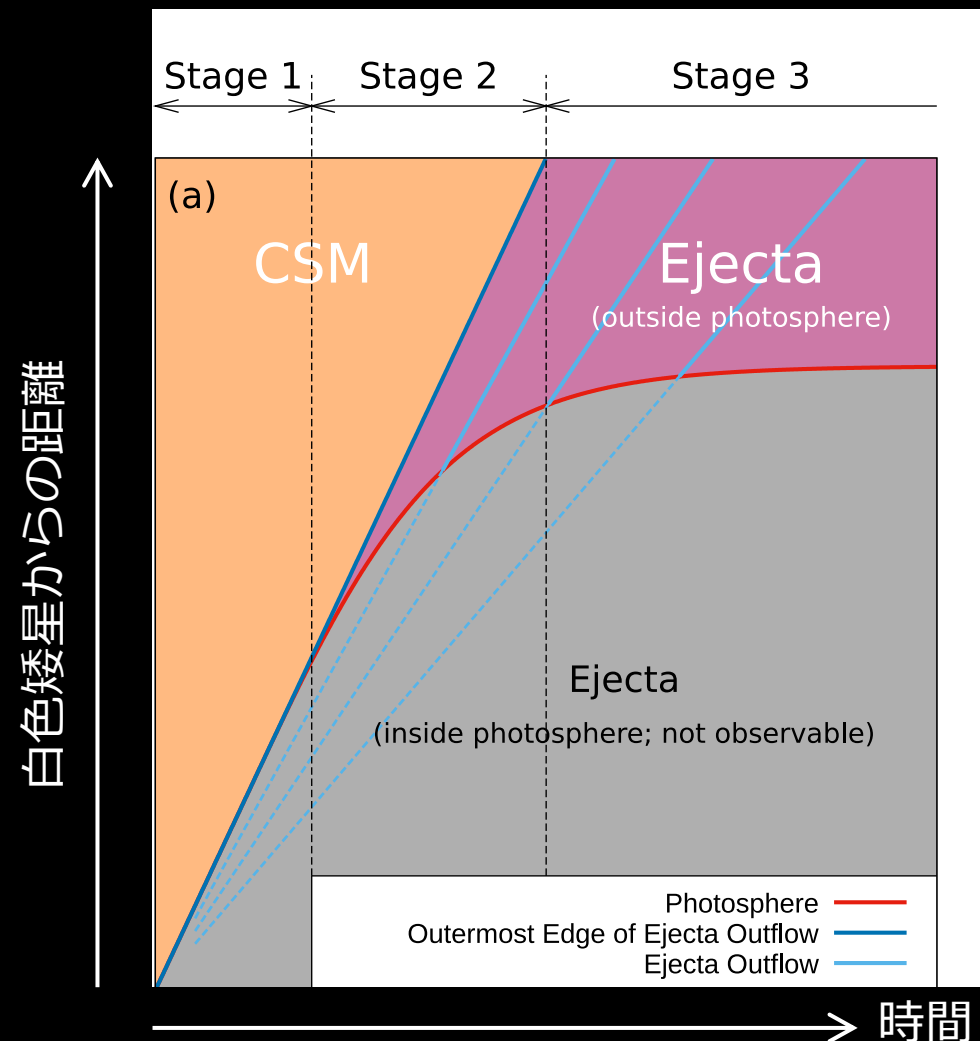
• 増光途上は高温。

• P Cygni profile は、最初は見られず。その後見られるが、時間と共に減速。

		高温 ←—————→ 低温					
		N IV	N III / He II	N II	Si II	O I	P Cygni profile
時間 ↓	+4.56 h (T Pyx, Arai+2015)	✓	✓	×	×	×	見られなかった。
	+9.88 h	×	✓	(✓)	×	×	見られた。最も高速。
	+23.77 h	×	×	✓	(✓)	×	(2 – 3 割の減速)
	+33.94 h	×	×	✓	(✓)	×	
	+71.79 h	×	×	(✓)	(✓)	(✓)	
	+81.90 h	×	×	✓	(✓)	(✓)	見られた。最も低速。

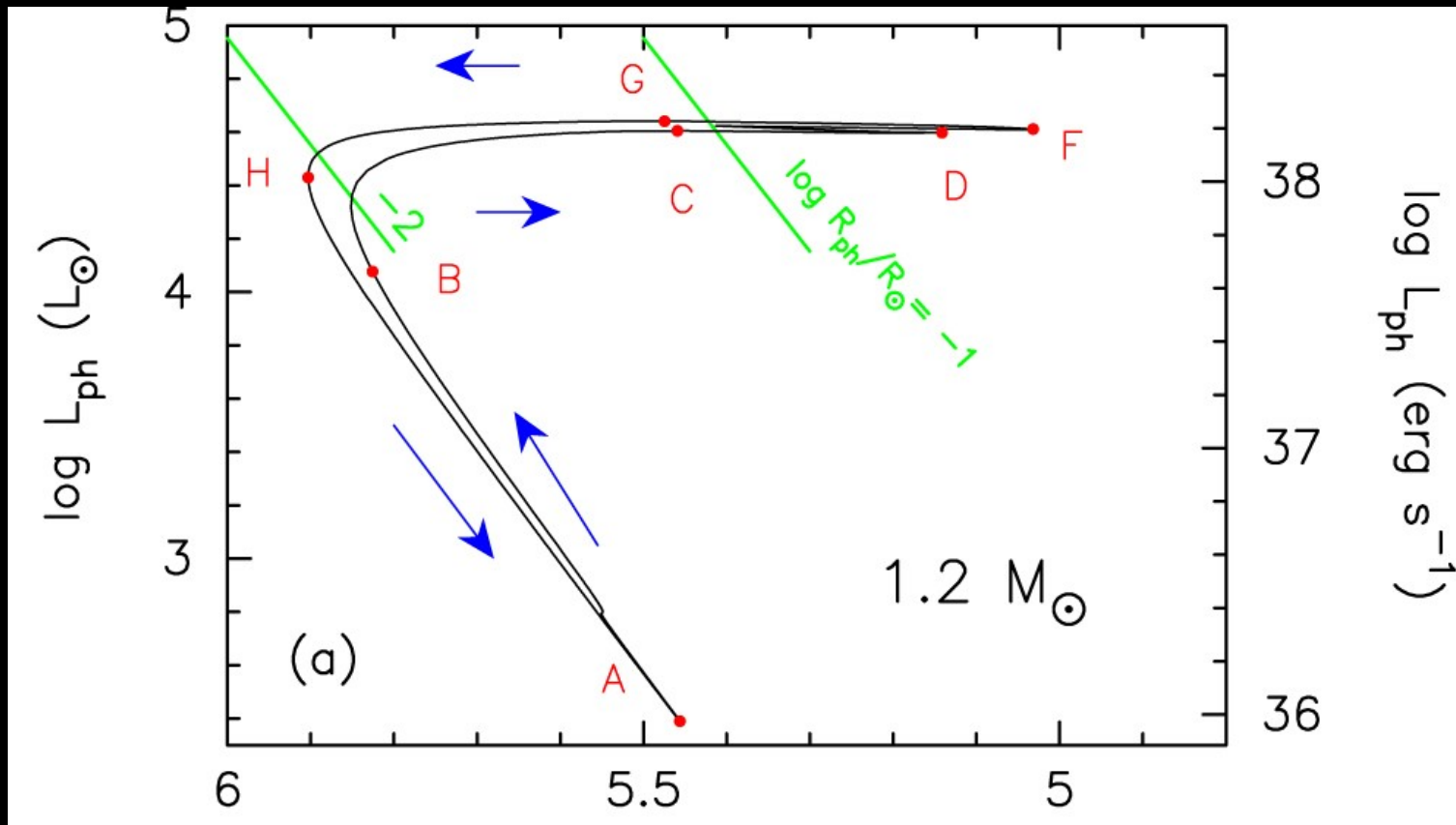
時間進化の定性的な説明

- Ejecta front 面はどんどん広がっていく
- 光球面は、極大に向かうにつれ、一定のサイズに落ち着く
- P Cygni を作るのは「光球面の外の ejecta」だから、2つの面の間の層に相当
- 最初は2つの面が一致: P Cygni なし
- その後、両者が乖離: P Cygni 発現
 - 時間と共により内側 ejecta が見える → 減速
- 温度 (線種) 変化もこの描像で説明可能
 - $R \nearrow = T \searrow = L_{\text{可視}} \nearrow$ の関係 (多分加藤さん talk)



膨張と温度低下と増光の対応

- 膨張 (R 増) → 温度低下 (line の変化) → 放射が X, UV から可視に移行し、可視増光



[Kato, Saio, Hachisu \(2017\)](#)

N III の line

- 一瞬だけ見えた N III の line

- Rising 中に一瞬だけ、というのは、珍しい。

- もっと重い (~ recurrent) nova とか、nebular 期とかにはいるが。

→ この line の意味するところを知りたい

	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	×	×	(✓)	(✓)	(✓)

- データ再解析

- 波長ごとに

- PSF の中心位置決定

- IFU からの見切れ率計算

→ 何とか flux calibration

- 更に星間補正 + Gaia 距離

→ Line luminosity: $L_{N III} \sim 2 \times 10^{34} \text{ erg/s}$ (preliminary)

N III 4640 A の準位についての考察

- N III の基底状態
 - $1s^2 2s^2 2p$ (2P_o): $g = 6$
 - N IV へのイオン化エネルギー 47.4 eV
- 第 1 励起状態
 - $1s^2 2s 2p^2$ (4P_e): $g = 12$
 - 基底状態からの励起エネルギー: 7.1 eV くらい (と高いので、「**ほぼ全部基底**」)
- 4640 A の低い側の状態
 - $1s^2 2s^2 3p$ (2P_o): $g = 6$
 - 励起エネルギー: 30.4 eV くらい (普通に励起するのは無理 → **N IV からの再結合?**)
- 4640 A の高い側の状態
 - $1s^2 2s^2 3d$ (2D_e): $g = 10$ 、励起エネルギーは 33.1 eV。

Pilot Study: ざっくり Order Estimate

- 速度 $v \sim 2000 \text{ km/s}$
- 時間 $t \sim 1 \text{ day}$
 - 天体のサイズ $R \sim vt \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}$
- N III の emissivity
 - $j(\text{N III}) \sim n(\text{N IV}) \times n(e) \times \alpha \times P_{4640} \times \frac{h\nu_{4640 \text{ A}}}{4\pi}$
 - $\alpha [\text{cm}^3/\text{s}]$: N IV から 4640 A の上の準位 ($1s^2 2s^2 3d, ^2D_e$) に落ちる割合
 - P_{4640} : 上の準位から実際に 4640 A を出す確率 (殆どは基底状態に落ちるので確率は 0.5% とか)
- N III の luminosity
 - $L(\text{N III}) \sim j(\text{N III}) \times \frac{4\pi}{3} \times R^3$
- 太陽組成を仮定、 $n(\text{N III}) / n(\text{N IV})$ は Saha で計算できるものとする。

再結合係数?

- 「N IV から N III の励起状態への吸収係数」のデータは見つからず
 - 一方で、「N III の励起状態から N IV への電離断面積」はある。
 - これを使って再結合率を求められないか?
 - 今回は詳細つり合いしていないが、再結合係数は完全に熱平衡になってて詳細つり合いしてる場合と同じと思う (Bound-bound の時と同じ発想) と

$$\int_{\nu_{ij}}^{+\infty} \frac{4\pi B_\nu}{h\nu} n_i \sigma_{i \rightarrow j}(\nu) d\nu = n_j n_e \alpha_{j \rightarrow i}$$

で再結合係数は書けそう。

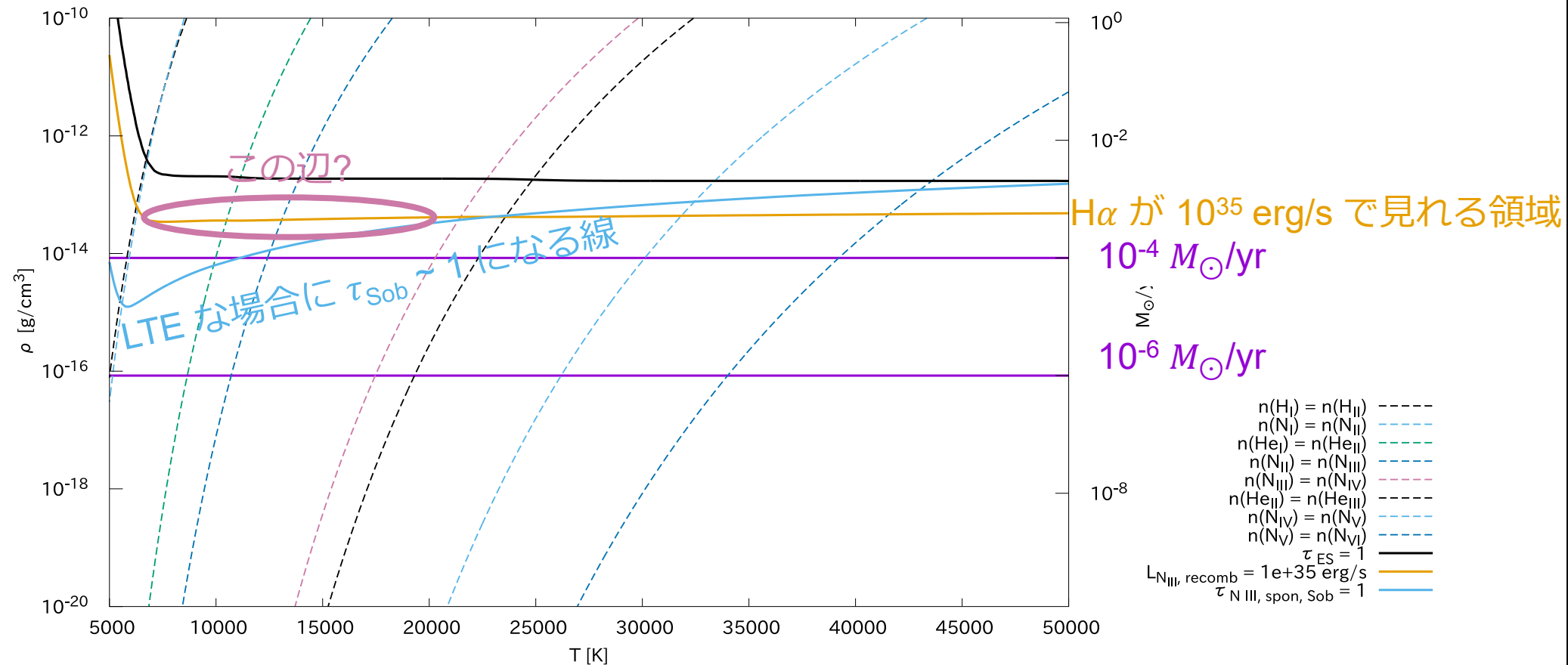
- 熱平衡なら、さらに Saha も使って n_i, n_j, n_e も関係できそう

$$\alpha_{j \rightarrow i} = \frac{g_i}{2g_j} \left(\frac{h^2}{2\pi m_e kT} \right)^{3/2} \frac{4\pi}{h} \int_{\nu_{ij}}^{+\infty} B_\nu \sigma_{i \rightarrow j}(\nu) d \ln \nu$$

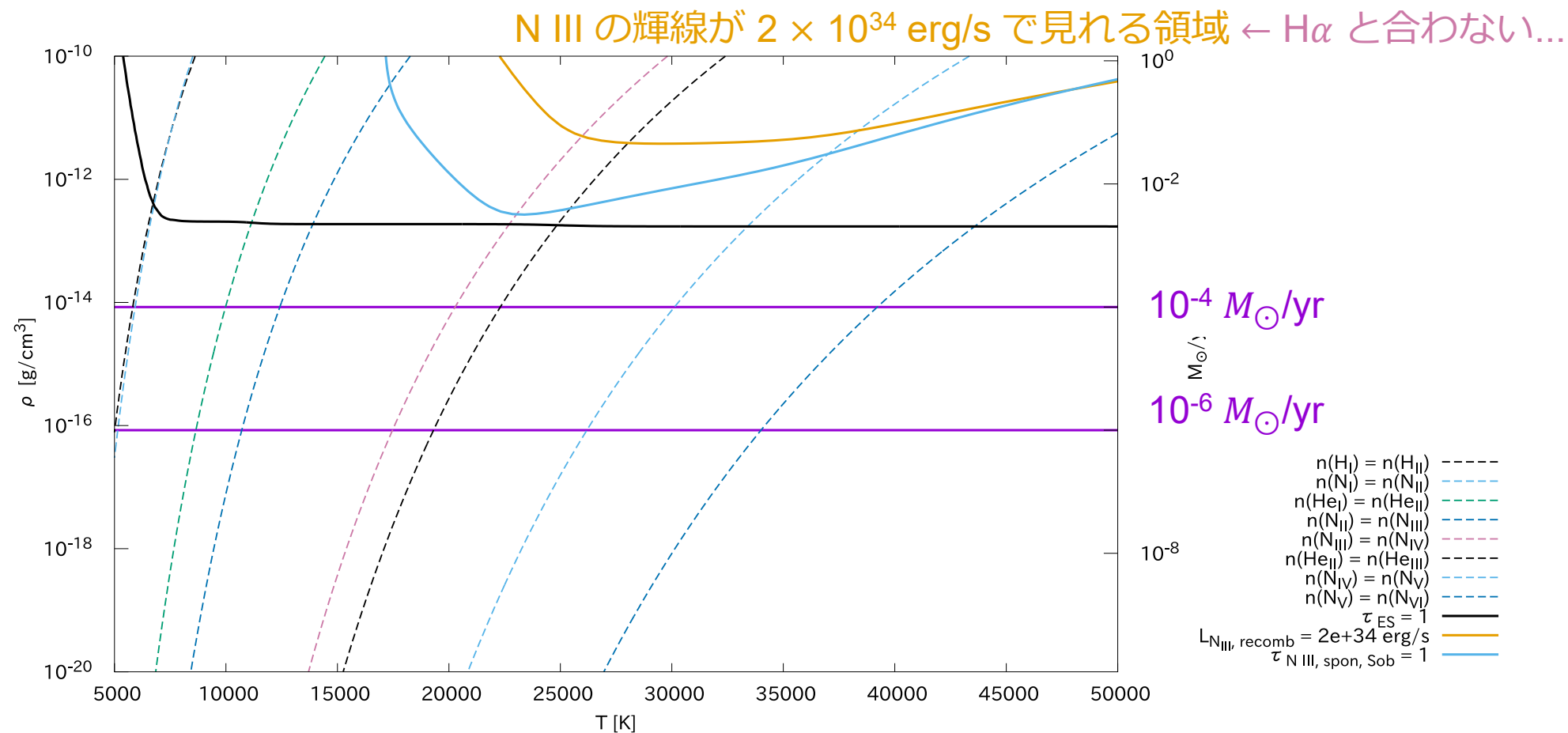
- 但し (実は) B_ν ではなく、以下を用いた (free-bound 版「誘導放射」の効果を除く)

$$B'_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

H alpha に関する条件 (preliminary)



N III に関する条件 (preliminary)



まとめ

- 新星 V1405 Cas を増光途上に分光観測。T Pyx に次いで 2 例目。
- 恐らく T Pyx → V1405 Cas → 極大、の進化順
 - T Pyx ([Arai et al. 2015](#))、発見 0.19 日 (4.6 時間) 後
 - 高い電離階数の line: He II, C IV, N III, N IV、P Cygni 型吸収なし
 - V1405 Cas (Taguchi et al., to be re-submitted)、発見 9.88 時間後
 - 高い電離階数の line: He II, N III (C IV, N IV は無し)、P Cygni 吸収あり (速度は激しく減速)
 - 極大付近
 - 温度は十分低下。
 - P Cygni の速度も割と落ち着き、タイムスケールは長くなる。
- 現在、物理的に解釈中 (Taguchi et al., to be re-submitted)
- なお、新星は千差万別 → サンプルを増やす必要があると考えています。
 - 観測の成功率を上げることが出来れば嬉しいです。