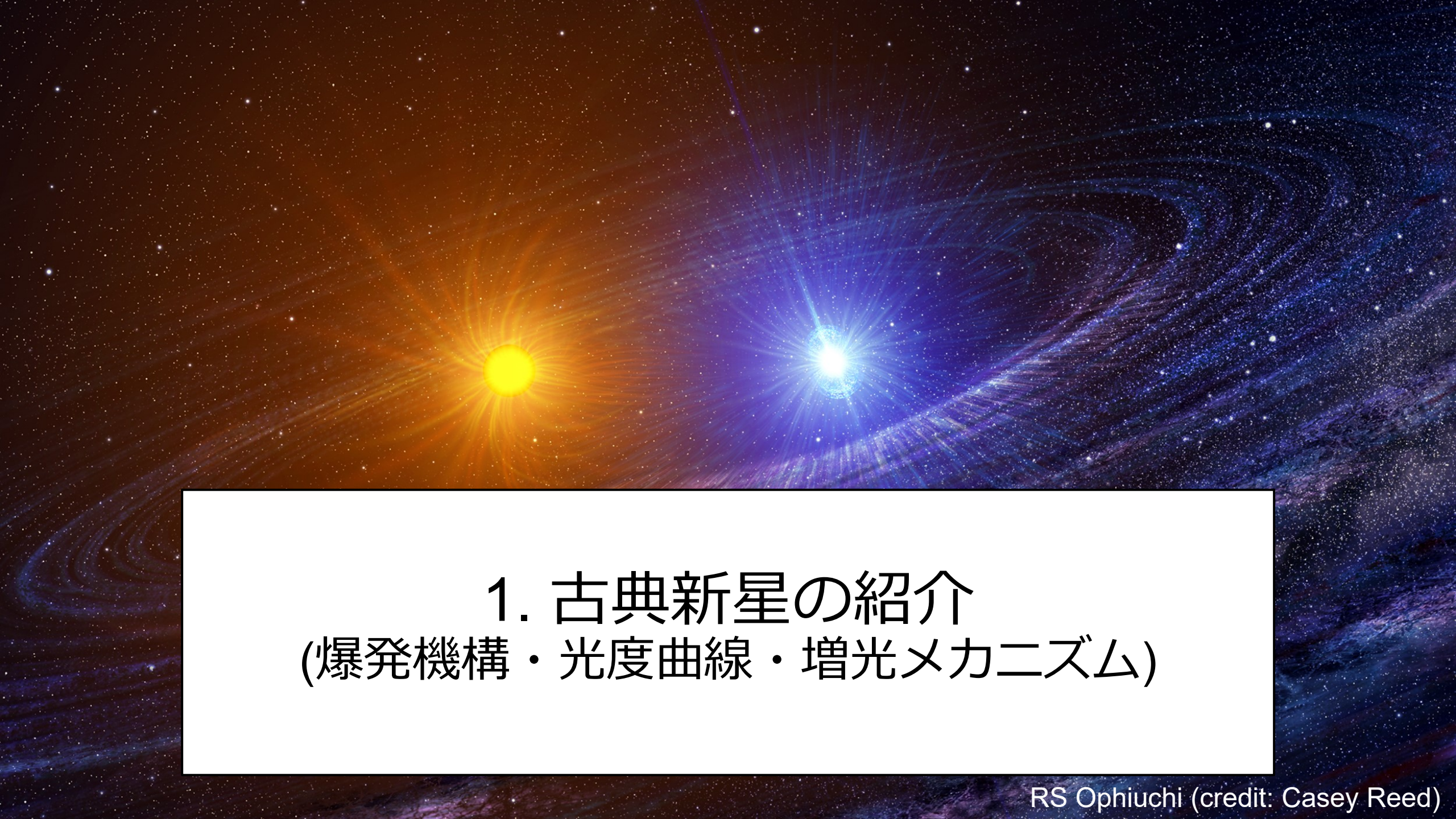


広視野・高頻度サーベイと
即時フォローアップによる古典新星の
初期の急増光期の研究可能性

2021.10.5 (木曾シュミットシンポジウム)

田口健太 (京都大学 D2)

共同研究者: 前原裕之 (国立天文台)、前田啓一 (京都大学)

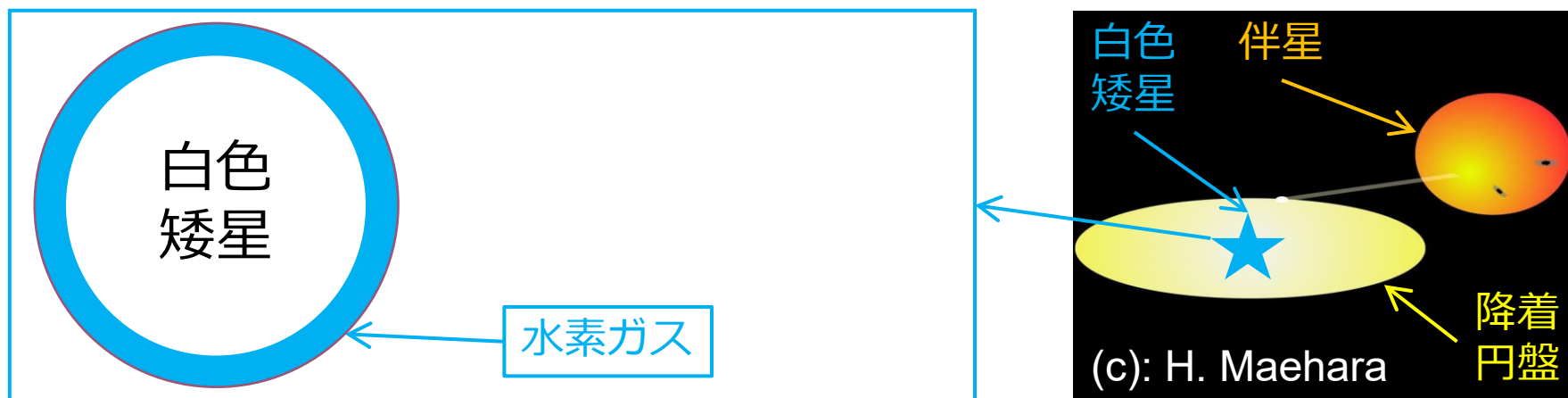
A composite image of two stars, one yellow and one blue, with a nebula in the background. The yellow star is on the left, and the blue star is on the right. The background is a dark blue and purple nebula with many small stars.

1. 古典新星の紹介

(爆発機構・光度曲線・増光メカニズム)

新星 (古典新星、新星爆発) の爆発機構

- **白色矮星** と **晩期型星 (伴星)** の連星系
 - 伴星由来の、水素が豊富なガスが白色矮星表面に降着
- 水素ガスが降着すればするほど、水素ガスの温度・密度が上がる
 - ある臨界質量まで溜まったら、水素の核燃焼に火がつく
 - **暴走的に燃焼が進み (熱核暴走反応) 新星爆発**となる!!
- 爆発終了後、降着が再開 → 将来再び新星爆発!
(複数回の爆発が記録されている新星を**反復新星**と呼ぶ: 10天体ほど存在する、RS Oph など)



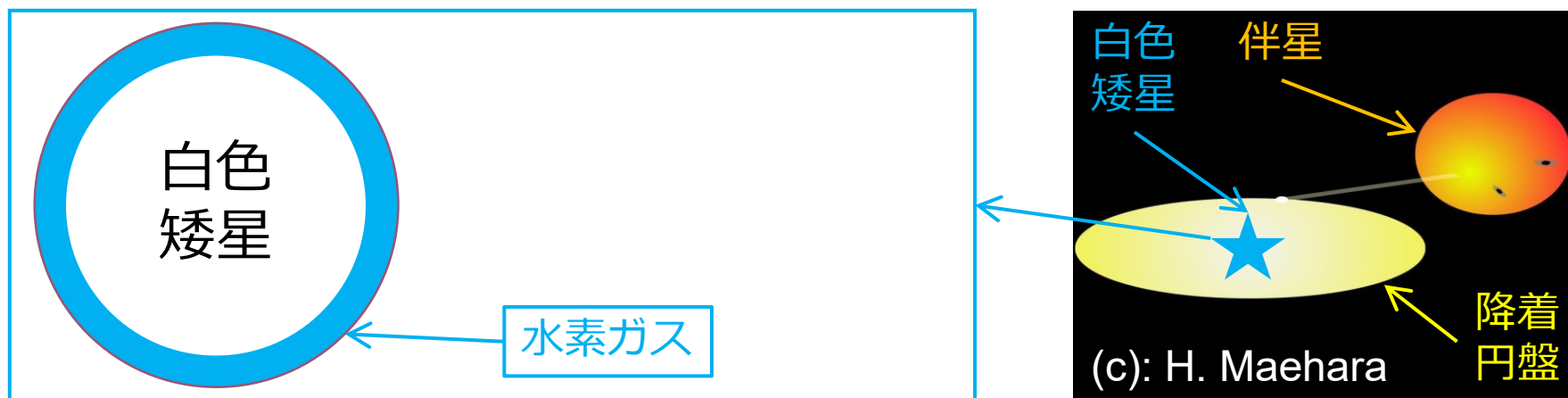
新星 (古典新星、新星爆発) の爆発機構

- 白色矮星 と 晩期型星 (伴星) の連星系
 - 伴星由来の、水素が豊富なガスが白色矮星表面に降着
- 水素ガスが降着すればするほど、水素ガスの温度・密度が上がる
 - ある臨界質量まで溜まったら、水素の核燃焼に火がつく
 - **暴走的に燃焼が進み (熱核暴走反応) 新星爆発**となる!!
- 爆発終了後、降着が再開 → 将来再び新星爆発!
(複数回の爆発が記録されている新星を**反復新星**と呼ぶ: 10天体ほど存在する、RS Oph など)



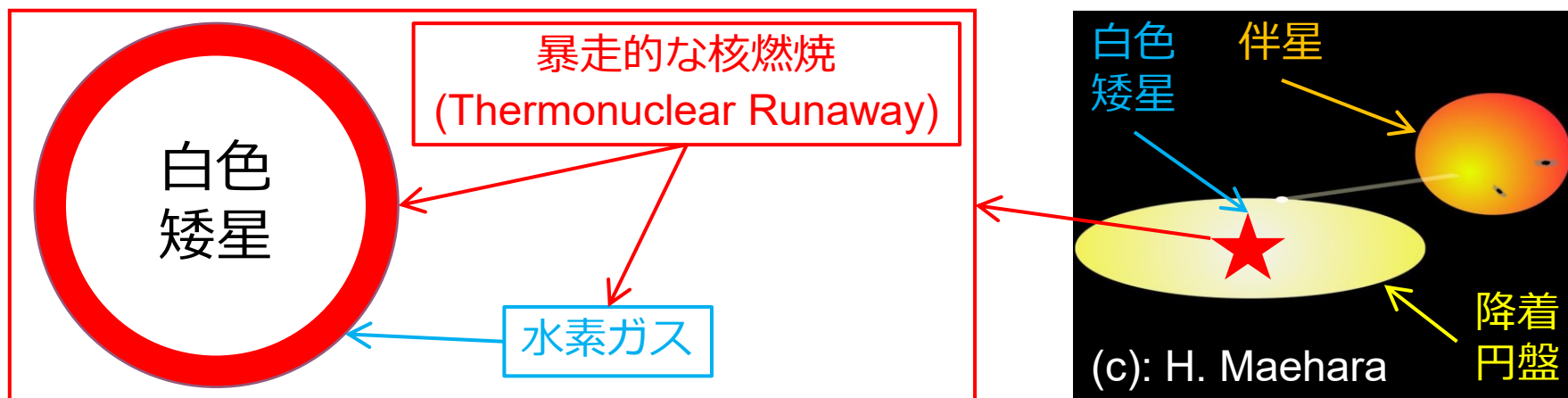
新星 (古典新星、新星爆発) の爆発機構

- 白色矮星 と 晩期型星 (伴星) の連星系
 - 伴星由来の、水素が豊富なガスが白色矮星表面に降着
- 水素ガスが降着すればするほど、水素ガスの温度・密度が上がる
 - ある臨界質量まで溜まったら、水素の核燃焼に火がつく
 - **暴走的に燃焼が進み (熱核暴走反応) 新星爆発**となる!!
- 爆発終了後、降着が再開 → 将来再び新星爆発!
(複数回の爆発が記録されている新星を**反復新星**と呼ぶ: 10天体ほど存在する、RS Oph など)



新星 (古典新星、新星爆発) の爆発機構

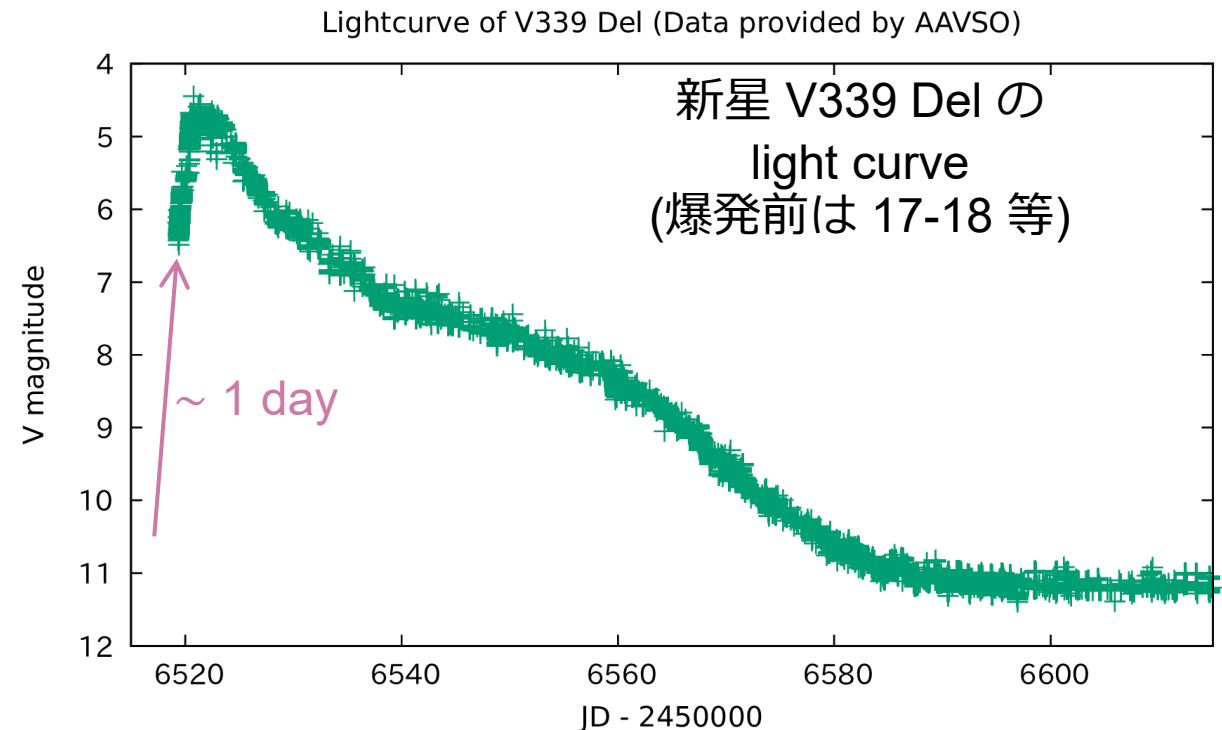
- 白色矮星 と 晩期型星 (伴星) の連星系
 - 伴星由来の、水素が豊富なガスが白色矮星表面に降着
- 水素ガスが降着すればするほど、水素ガスの温度・密度が上がる
 - ある臨界質量まで溜まったら、水素の核燃焼に火がつく
 - **暴走的に燃焼が進み (熱核暴走反応) 新星爆発**となる!!
- 爆発終了後、降着が再開 → 将来再び新星爆発!
(複数回の爆発が記録されている新星を**反復新星**と呼ぶ: 10天体ほど存在する、RS Oph など)



新星の可視での光度曲線

- **最初の1日程度で何等もの急な増光**を示す
 - その後は数週間 ~ 数年のタイムスケールで元の等級まで暗くなる

- **初期の急増光期の分光観測は困難**
 - スペクトルは観測的にも極めて珍しい
 - 反復新星 T Pyx (2011): [Arai et al. \(2015\)](#)
 - 発見 0.19 日 (4.6 時間) 後に分光観測
 - V1405 Cas (2021): ATels [#14471](#), [#14472](#)
 - 発見 0.41 日 (9.8 時間) 後に分光観測
- 急増光は光球面の膨張に対応すると理論的には解釈される (次スライド)



新星の HR 図上での理論的な進化と急増光期の増光メカニズム

1. 爆発前の白色矮星は低温・低光度

2. 核暴走開始後は半径 R はほぼ一定、温度 T_{eff} 、光度 L_{bol} が増加

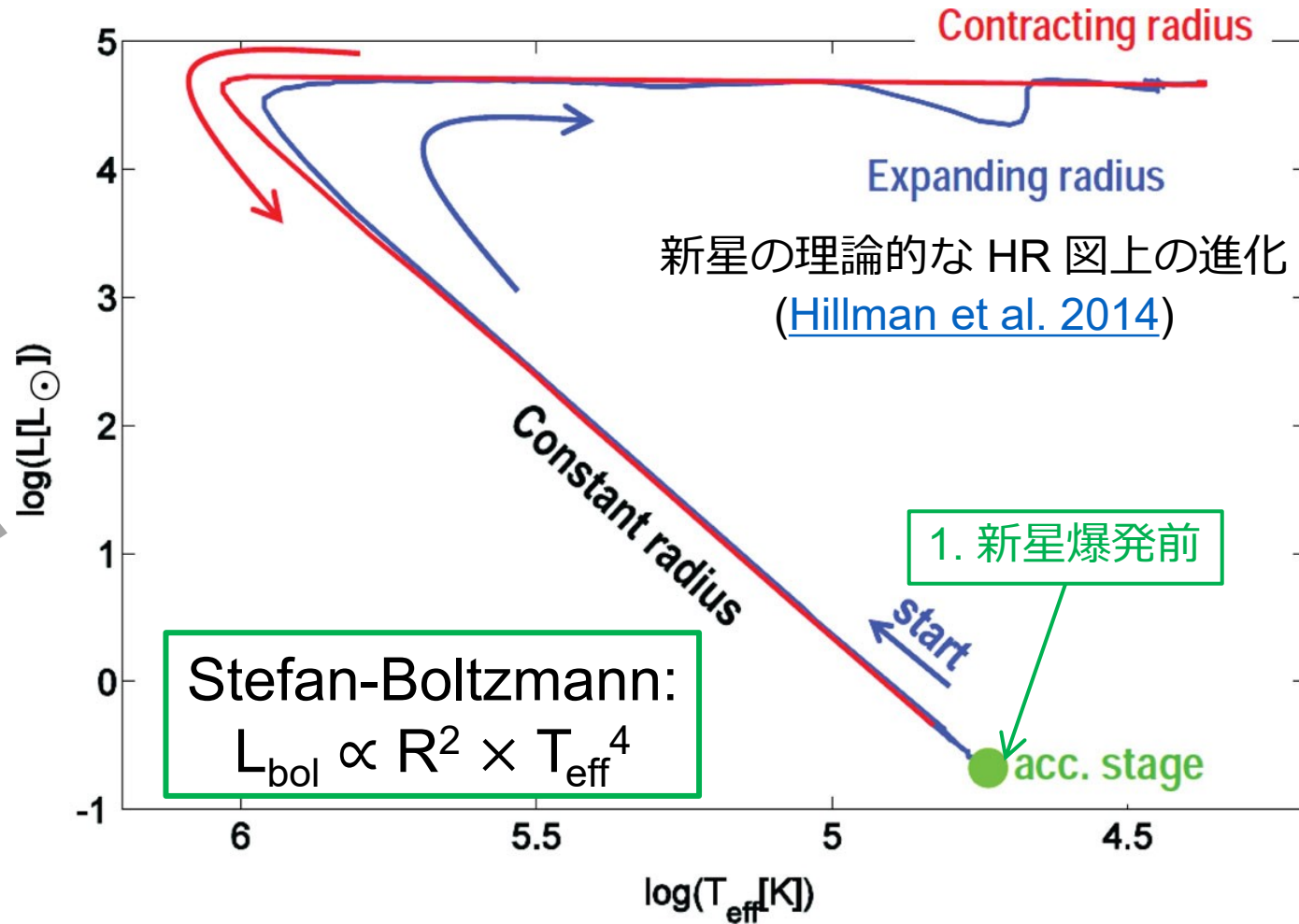
- この部分は order 10 分のタイムスケール
→ 観測は厳しそう

3. 光度 L_{bol} が Eddington 光度 L_{Edd} に到達後は、 $L_{\text{bol}} \sim L_{\text{Edd}}$ を保ちながら、**輻射の効果で光球面 R が膨張**

→ T_{eff} が低下

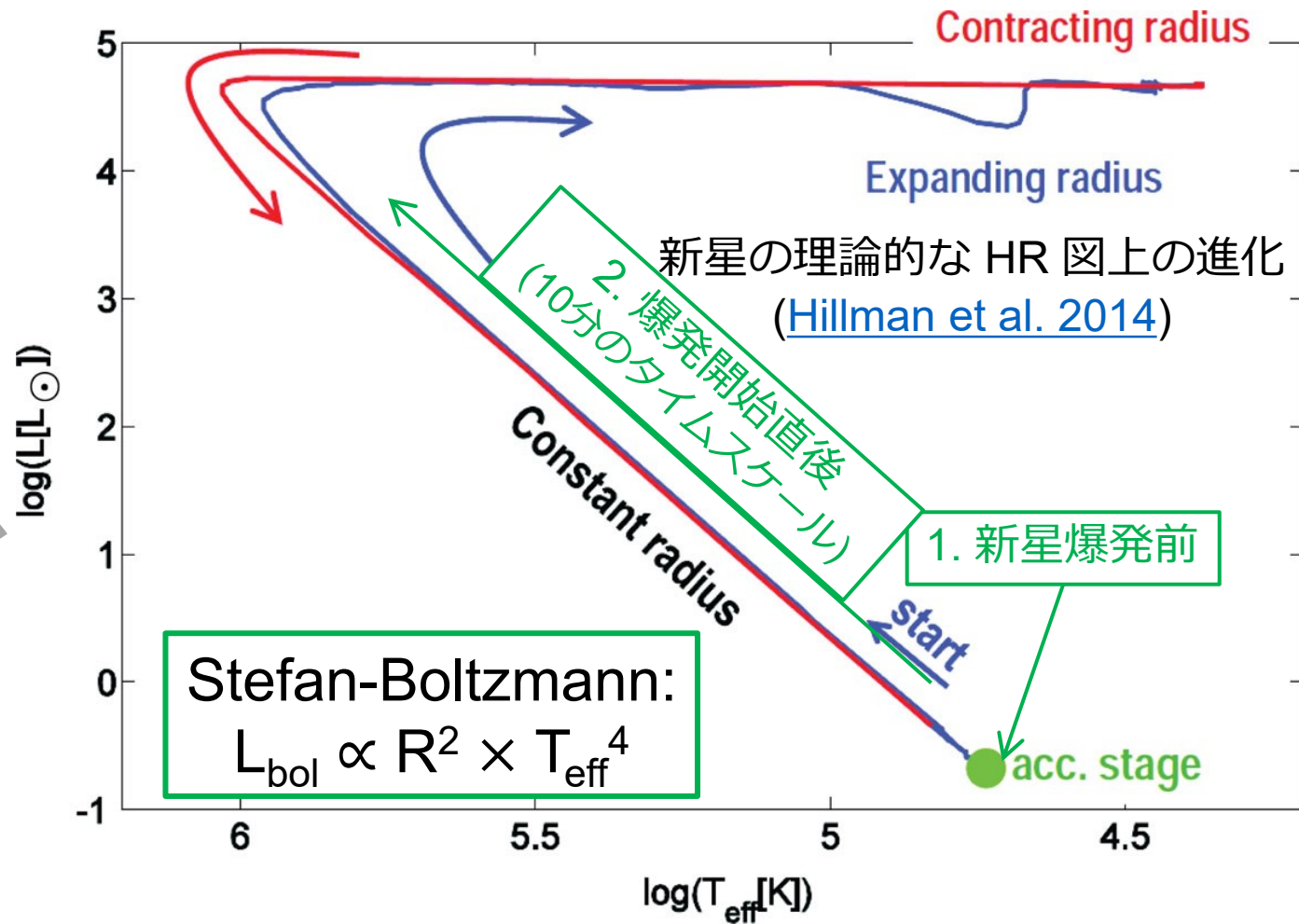
→ L_{bol} 中の可視光の割合が増える
($\sim X$ 線や UV の割合が減る)

→ 可視光で増光！



新星の HR 図上での理論的な進化と急増光期の増光メカニズム

1. 爆発前の白色矮星は低温・低光度
2. 核暴走開始後は半径 R はほぼ一定、温度 T_{eff} 、光度 L_{bol} が増加
 - この部分は order 10 分のタイムスケール
→ 観測は厳しそう
3. 光度 L_{bol} が Eddington 光度 L_{Edd} に到達後は、 $L_{\text{bol}} \sim L_{\text{Edd}}$ を保ちながら、**輻射の効果で光球面 R が膨張**
 - T_{eff} が低下
 - L_{bol} 中の可視光の割合が増える
($\sim X$ 線や UV の割合が減る)
 - 可視光で増光！



新星の HR 図上での理論的な進化と急増光期の増光メカニズム

1. 爆発前の白色矮星は低温・低光度

2. 核暴走開始後は半径 R はほぼ一定、
温度 T_{eff} , 光度 L_{bol} が増加

- この部分は order 10 分のタイムスケール
→ 観測は厳しそう

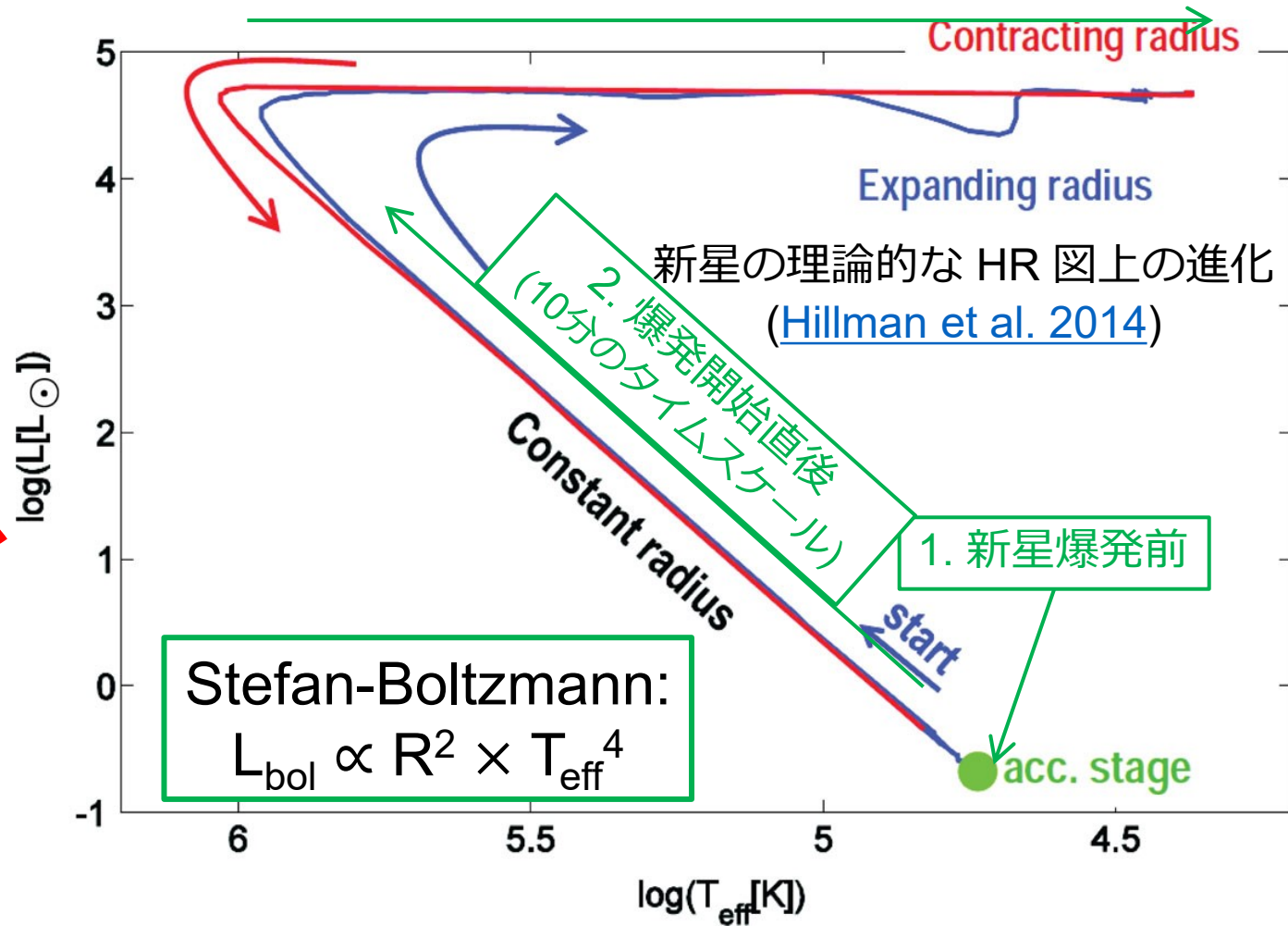
3. 光度 L_{bol} が Eddington 光度 L_{Edd} に
到達後は、 $L_{\text{bol}} \sim L_{\text{Edd}}$ を保ちながら、
輻射の効果で光球面 R が膨張

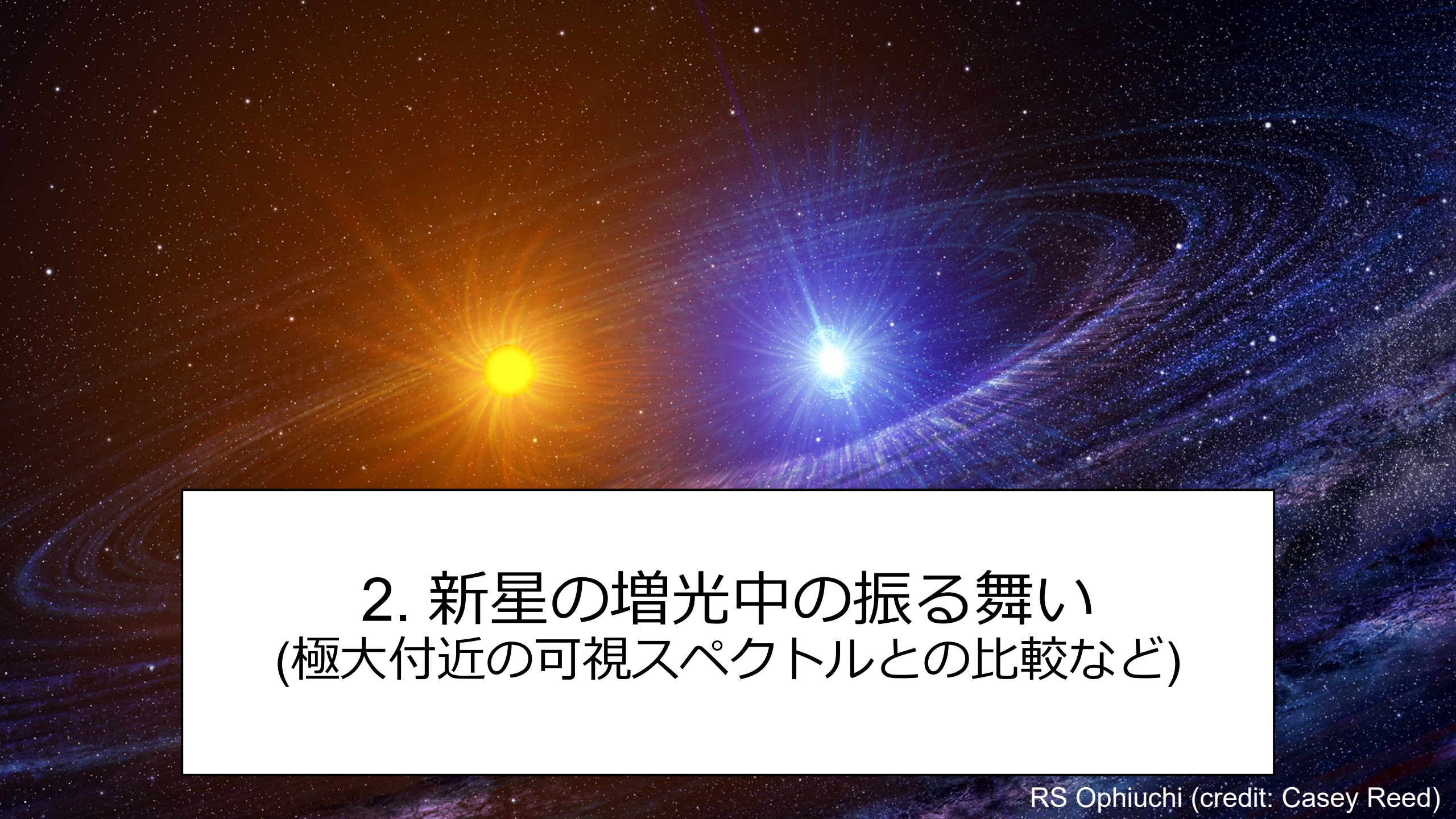
→ T_{eff} が低下

→ L_{bol} 中の可視光の割合が増える
($\sim X$ 線や UV の割合が減る)

→ 可視光で増光!

3. 光球面が膨張 → 温度が低下 → 可視で増光

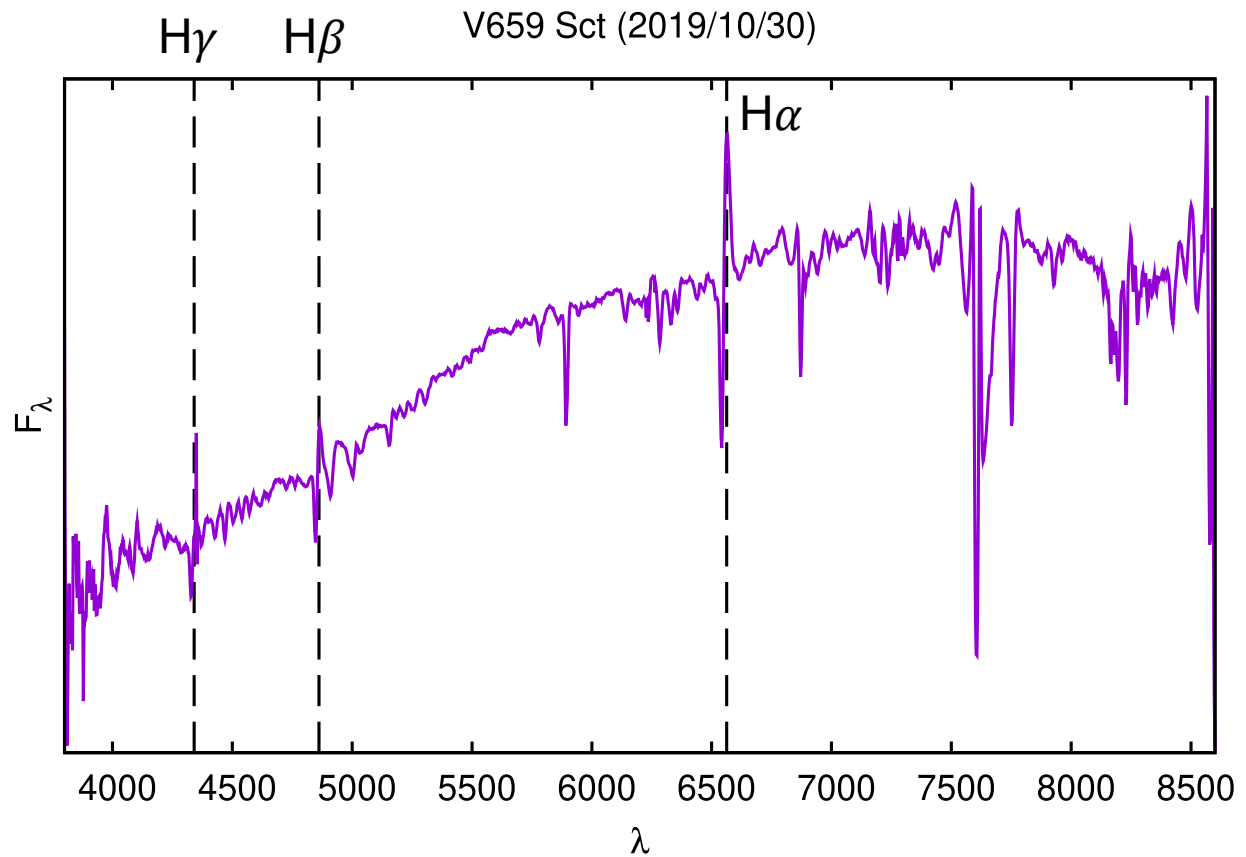
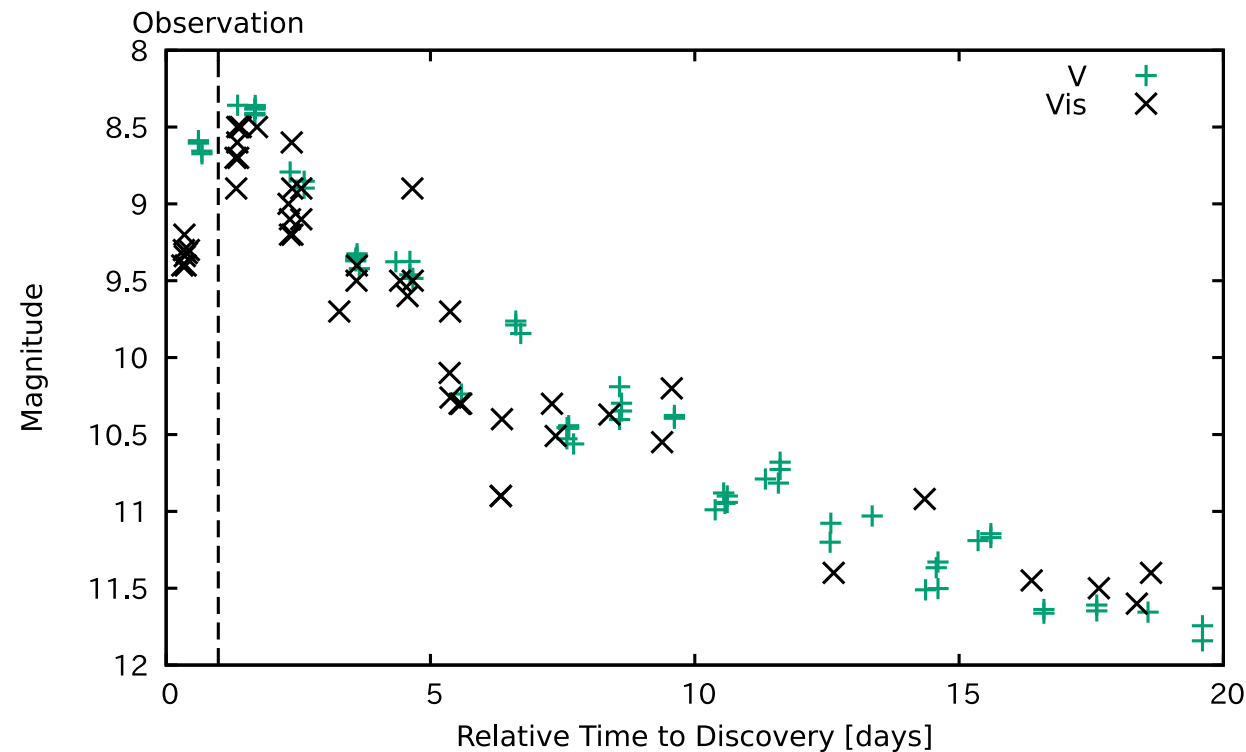




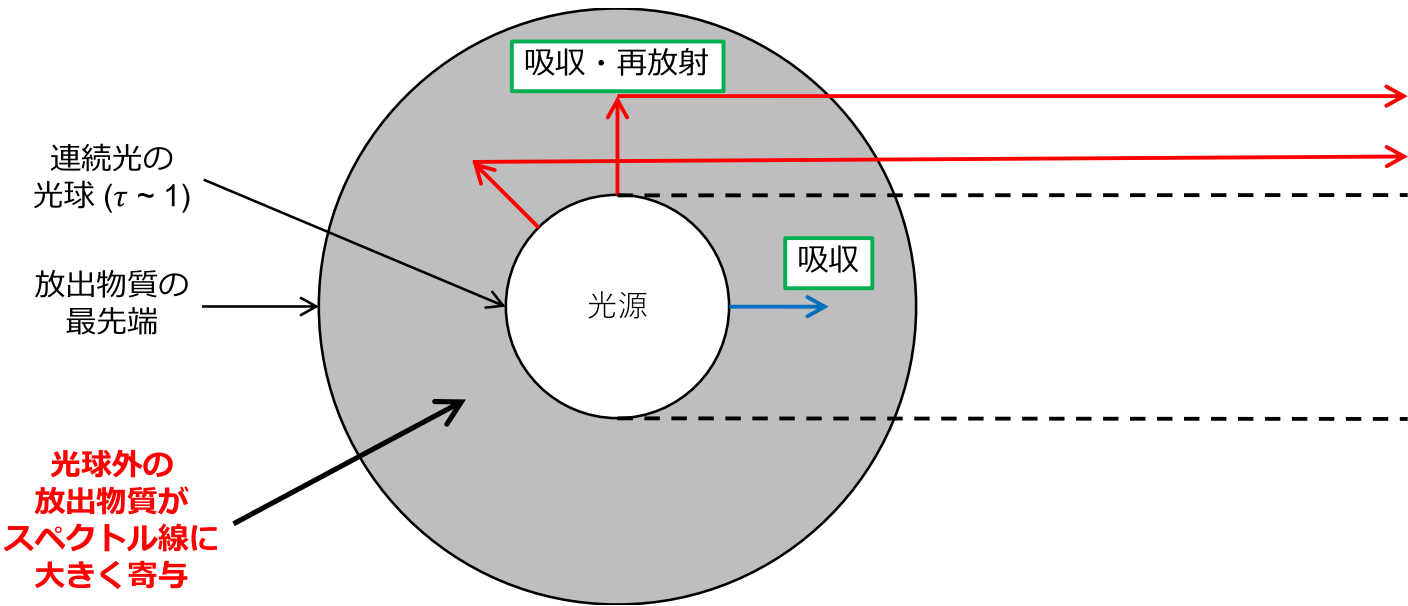
2. 新星の増光中の振る舞い (極大付近の可視スペクトルとの比較など)

新星 V659 Sct (2019) のスペクトル (発見 1 日後: 極大付近)

- 可視の極大等級付近では P Cygni 型の line が良く見られる
 - 青方偏移した吸収成分
 - ほぼ静止波長の輝線成分



新星 V659 Sct (2019) のスペクトル (発見 1 日後: 極大付近)

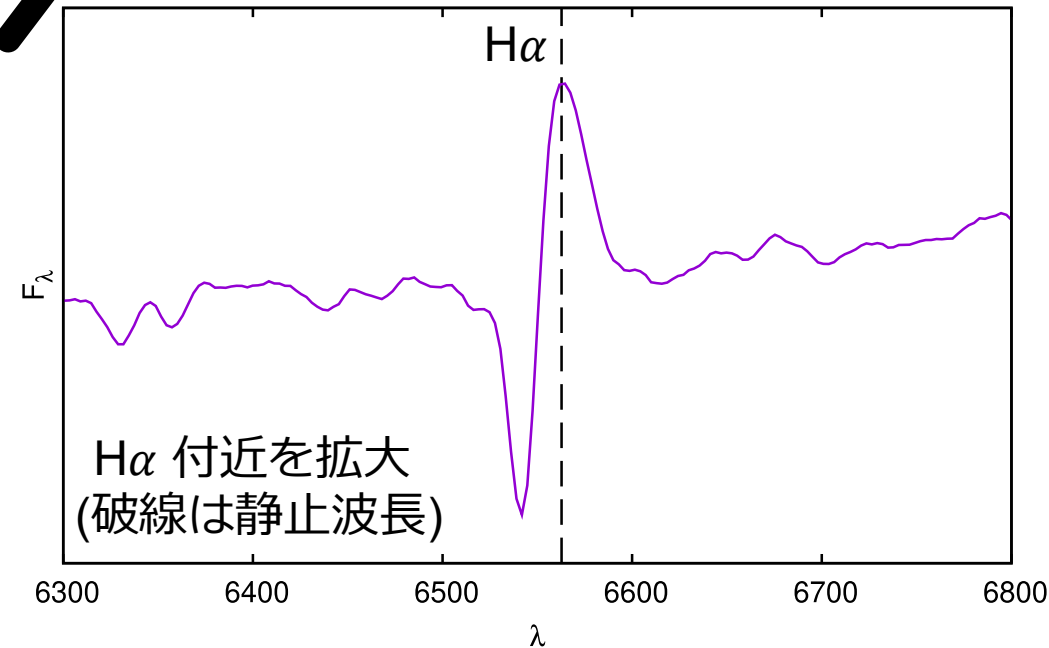


- 可視の極大等級付近では P Cygni 型の line が良く見られる
 - 青方偏移した吸収成分
 - ほぼ静止波長の輝線成分

光球外の放出物質がスペクトル線に大きく寄与

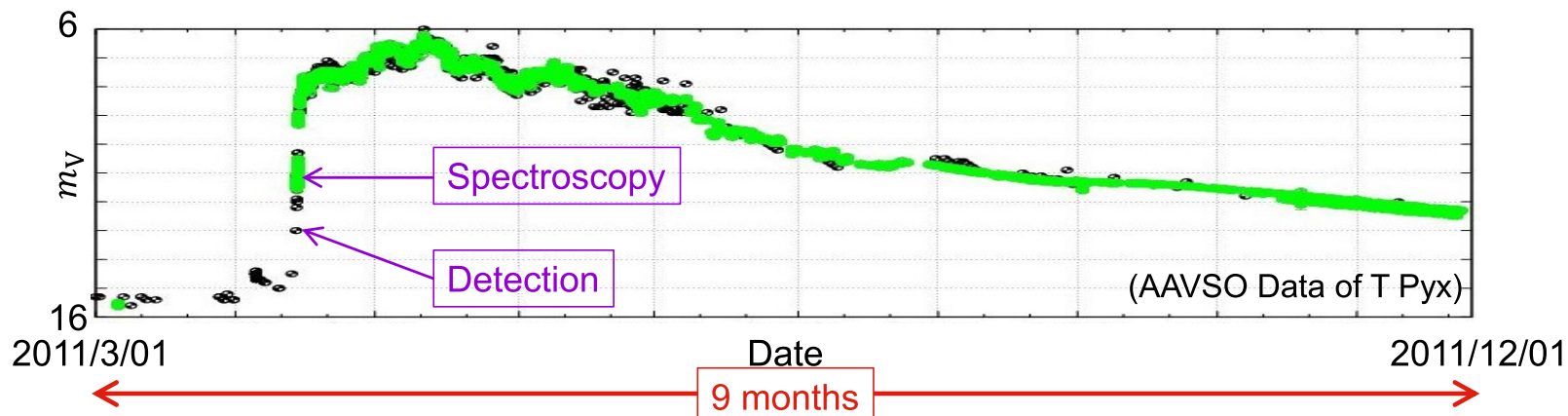
- 連続光の光球面 ($\tau \sim 1$) の外側にも、line に対して光学的に厚い層があり line の吸収・再放射を作る
- この層のガスが外向きの速度を持っている場合、Doppler 効果によって青方偏移した吸収成分と、吸収よりも赤い側に輝線成分が出る

V659 Sct (2019/10/30), nearby H α

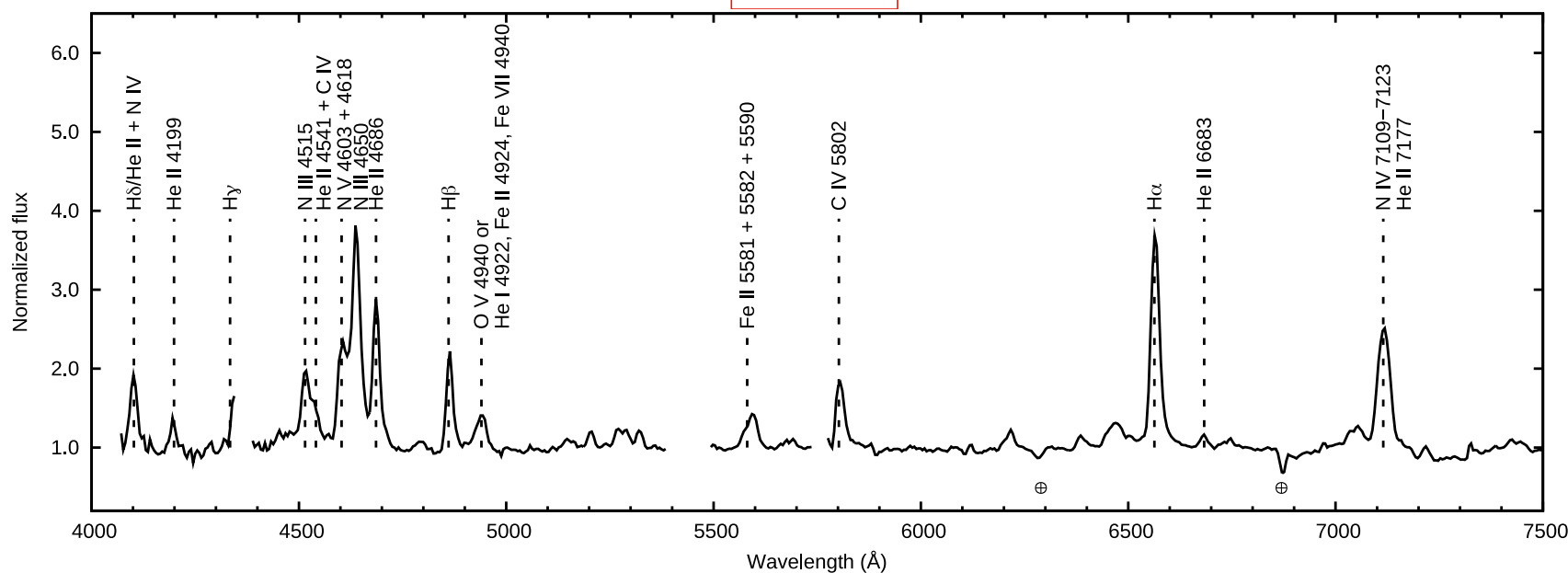


急増光期の反復新星 T Pyx (2011) の分光観測 ([Arai et al. 2015](#))

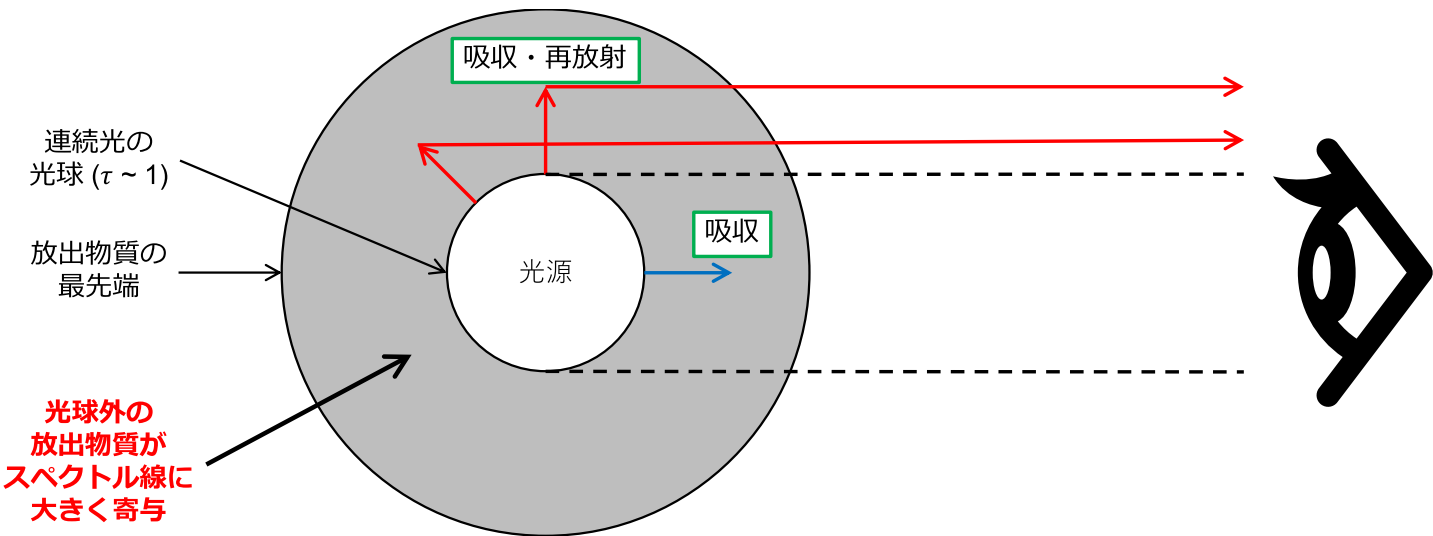
- 発見 0.19 日 (4.6 時間) 後に分光
 - 反復新星であったため、多くの方がモニターしていた



- 特徴
 - 高い電離階数の輝線
 - 極大付近で観測されない
 - 恐らく観測史上初?
 - **P Cygni 型の吸収なし**



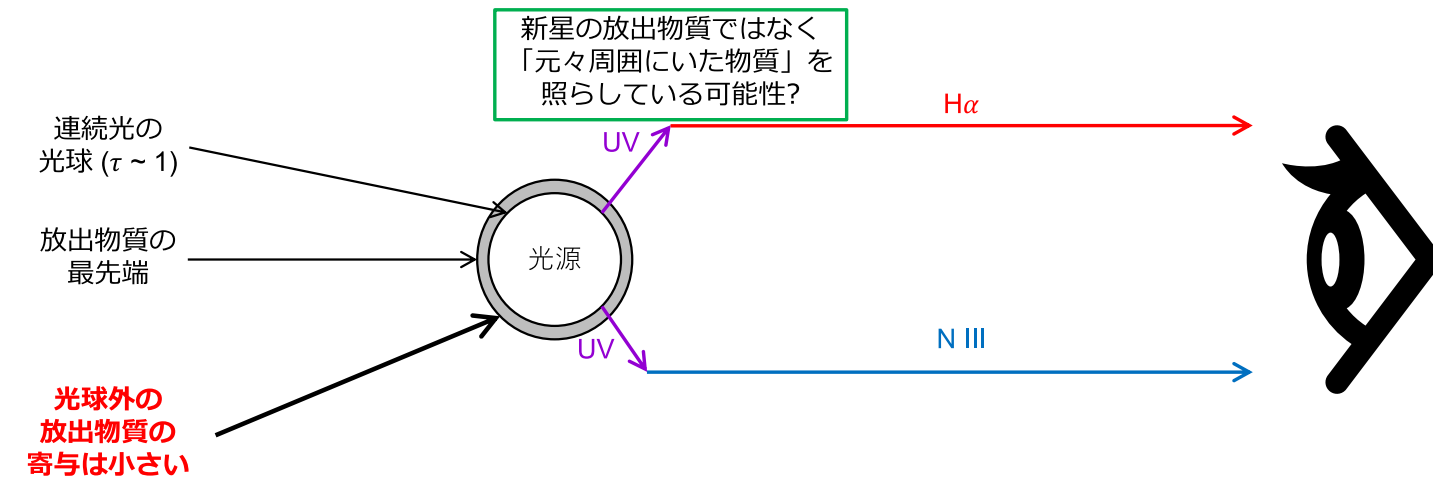
急増光期と極大期のスペクトル形成の比較



• 極大期

- 光球面の膨張はもう終了
- 放出物質の先端は広がり続ける
→ 光球面の外側に十分な量の物質があるため、P Cygni profile になる

• 増光途上



• 光子が周囲の物質を電離する

- 光球面が膨張している最中
→ 有効温度高い → 電離光子が多い
 - 光球面の外側にある放出物質量は少ない (→ no P Cygni)
- 高階電離の輝線スペクトル

cf. 超新星の“Flash Spectroscopy”

Khazov et al. (2016)

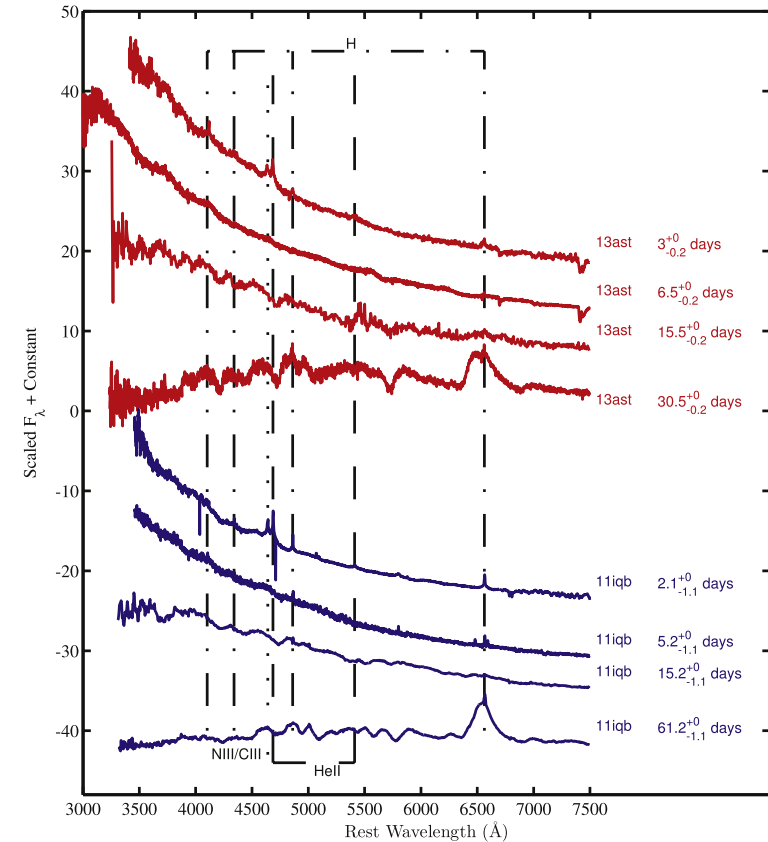


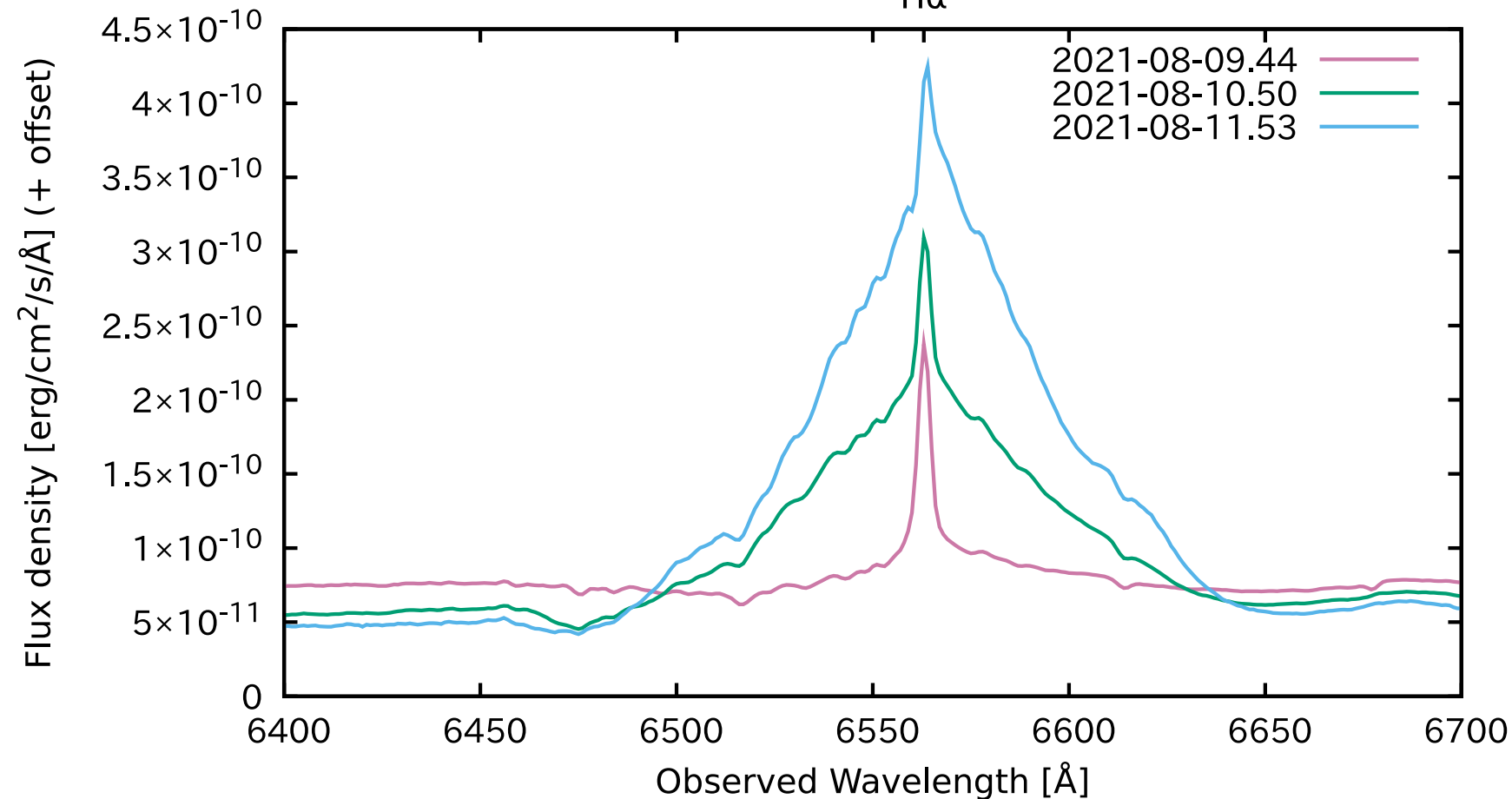
Figure 2. Spectral evolution of two of the FI events. The emission lines disappear within a few days, and P Cygni line profiles develop over time. These well-observed objects would be classified as FI if found prior to day 3 and as BF if found around day 5, demonstrating the evolution of SNe II, and why our measured FI fraction is only a lower limit on the true frequency of SNe having dense CSM. Data from Gal-Yam et al. (2014) and Smith et al. (2015).

- (重力崩壊型) 超新星でも、最初の数日間で、似たスペクトル進化を示す物があると報告されている
 - 最初はととても細い輝線
 - Shock-breakout で出た電離光子が周囲の物質 (CSM) を電離 → 再結合の line が形成される
 - その後、輝線は消え、P Cygni profile が発達する
 - 爆発する星本体が line を形成する
- 細かい line は $\lesssim 10$ days で消える
 - 細かい line が消えない 10 日以内に分光すれば、周囲の物質を調査できるかも?

反復新星 RS Oph

RS Ophiuchi (through clouds)

H α



- 2006 年以来の爆発
 - 発見: 2021-08-08.9201
- **P Cyg profile + 細かい成分**
 - 爆発前から伴星は低速の wind を出していた?
 - 濃い星周環境を示唆
 - 伴星は巨星なので、周囲に物質は存在できそう
- 詳細は下記参照:
 - ATels [#14838](#), [#14858](#)
 - Munari & Valisa (2021) [\[arXiv:2109.01101\]](#)
 - Zamanov et al. (2021) [\[arXiv:2109.11306\]](#)

反復新星 RS Oph

The Large Area Telescope (LAT), one of two instruments on the Fermi Gamma-ray Space Telescope, has independently detected a transient gamma-ray source positionally consistent with the newly detected optical outburst of the recurrent nova RS Oph on 2021 Aug 8, 22:20 UT reported by K. Geary (vsnet-alert 26131, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/26131>), with an estimated visual magnitude of 5.0. Its previous outburst was in 2006, with an average recurrence time of ~ 15 years over eight recorded historical outbursts (Schaefer 2010, ApJS, 187, 275).

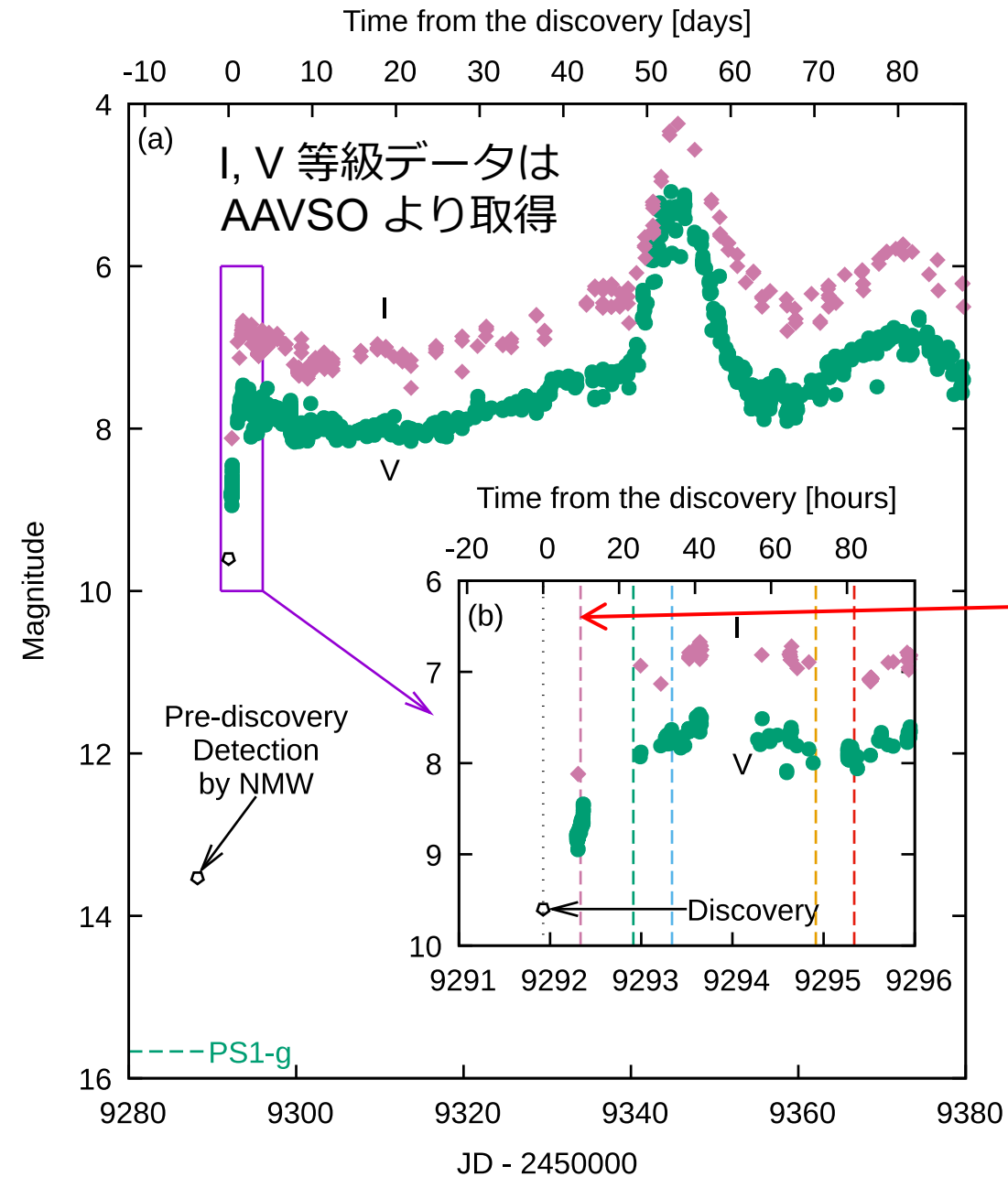
Preliminary analysis indicates its first detection (with ~ 6 -sigma significance) in the last 6-hr interval (18:00-24:00 UT) of 2021 Aug 8, coinciding with the optical discovery, with a ($E > 100$ MeV) flux of $(2.4 \pm 0.8) \times 10^{-6}$ photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ and photon index of 2.3 ± 0.3 (statistical uncertainties only). The gamma-ray onset coincident with the time of the optical discovery is similar to the case of the Fermi-LAT detection of a similar symbiotic-like recurrent nova V407 Cyg 2010 (Abdo et al. 2010 Sci 329, 817; ATel #2487).

- **ガンマ線でも検出**
(ATel [#14834](#))

- **可視の発見と同時**
- **$E > 100$ MeV と、高エネルギー**
 - 新星の放出物質と星周物質の衝突で、衝撃波により粒子加速している?
 - 伴星は巨星なので、大量の物質を放出していそう

V1405 Cas の発見直後観測

- せいめい望遠鏡で**発見 9.88 時間後**分光
 - 発見 23.77, 33.94, 71.79, 81.90 時間後にも分光した
 - ATels [#14471](#), [#14472](#)
- **最初の観測 (発見 9.88 時間後) 時のみ、他より 1 等ほど暗い**
 - 初期の急な増光が終了する以前の観測



V1405 Cas の初期のスペクトル進化

高温の line ← → 低温の line

	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	×	×	○	○	○

- 温度の低下を示唆する line の変化

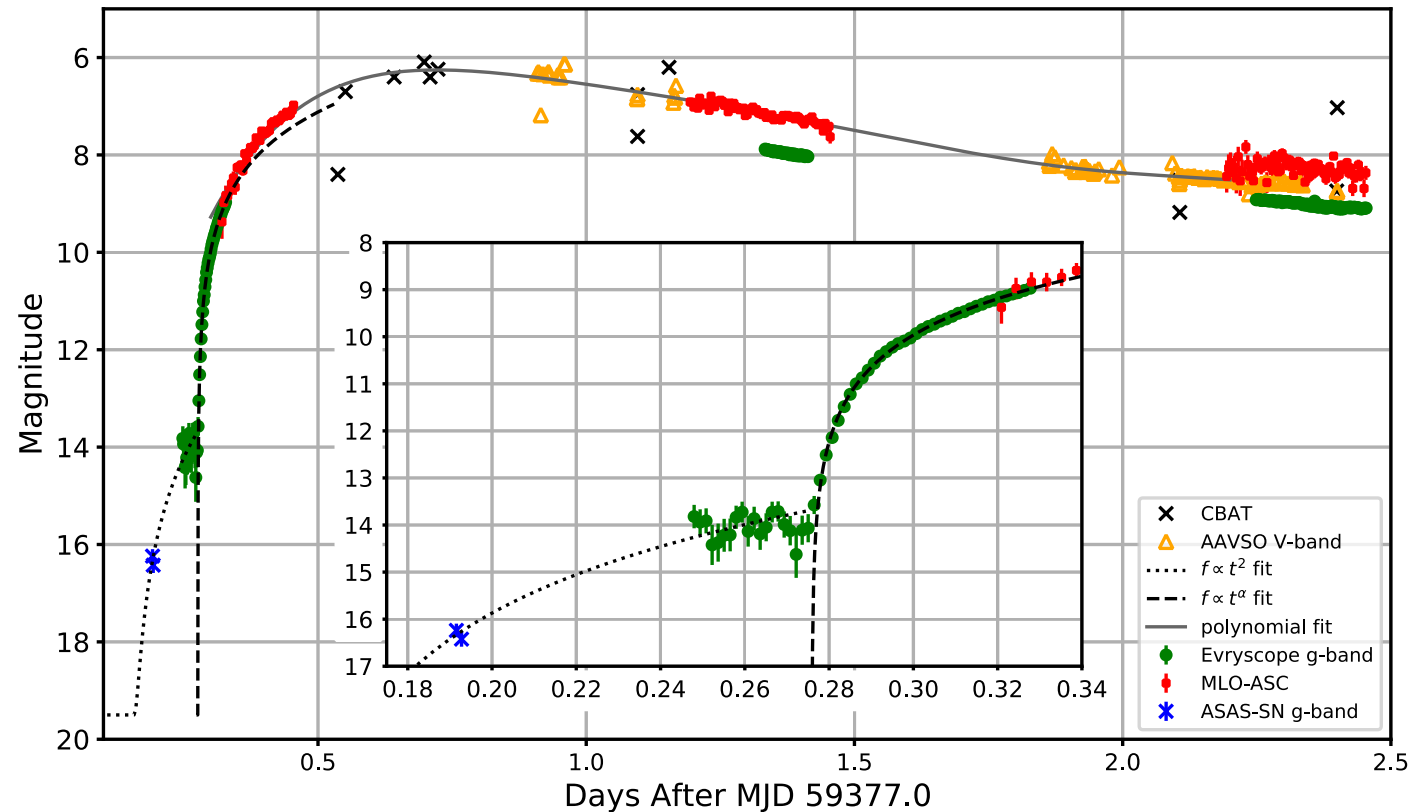
- N III, He II といった高階電離の輝線が検出されたのは T Pyx 以来 2 例目 (把握している限り)

↓
t

新星の急増光期の振る舞いのまとめ


- 新星の急増光期は面白い
 - 光度はほぼ一定のまま光球面が膨張途上
 - 有効温度が減少 → 可視光で増光
 - 電離階数の高い line
 - T Pyx (2011): [Arai et al. \(2015\)](#)、V1405 Cas (2021): ATels [#14471](#), [#14472](#)
 - P Cygni profile を示さないスペクトル?
 - T Pyx (2011): [Arai et al. \(2015\)](#)
 - 新星爆発に伴う放出物質が遠方まで広がっておらず、吸収成分を作れない?
 - 電離光子が爆発前に存在している物質を照射している?
 - 高エネルギー (> 100 MeV) ガンマ線が初期に受かる例 (RS Oph: ATel [#14834](#) など)
 - 新星に伴う放出物質と、周囲の物質との衝突・衝撃波による放射?
- ただし、急増光最中のスペクトルデータは殆どない
 - **この時期の分光観測例を増やしたい!**

新星 V1674 Her の 2 分 cadence の light curve (Quimby et al. [\[arXiv:2107.05763\]](https://arxiv.org/abs/2107.05763))



- 限界等級 14 等で 2 分 cadence の 全天サーベイをしたら写ってた
- 初期のこんなに 詳細な light curve は極めて珍しい
 - いつか Tomo-e でも出来る?

Figure 1. The complete light curve of V1674 Her based primarily on our preliminary Evryscope and ASC observations. The data have been augmented by photometric measurements from the AAVSO, CBAT and ASAS-SN. The Evryscope observations reveal pre-maximum plateau, lasting for ~ 3 hr, that is highlighted in the insert. Details of the various symbols and fits to the light curve are given in the figure legend.



3. 2019 年以来やってきたこととか、
Tomo-e に期待したいこととか

最近ちょっと趣味でやっていること

- ZTF の全アラートにアクセスできるサイト MARS: <https://mars.lco.global/>
 - 等級、増光率などの条件をつけて検索が可能
 - 大量の Bogus を含むが Real/Bogus rate (ZTF 側の「自信度」) でフィルター可
 - リアルタイムで情報が上がっていく

- 複数回検出した天体等を引き出し、既知の小惑星を落とす
 - 矮新星は結構見つかる
 - 超新星もたまに (SN 2021zny など)
 - (新星はまだ: いつか拾えたらいいな...)

- 似た感じの新星探査を Tomo-e でしてみたいなあ

MARS provides access to all public alerts issued by ZTF since the start of the public alert stream on June 1, 2018. Subsets of the alerts, filtered by selectable constraints, may be identified and downloaded, either through this webpage or using the underlying API. Alerts are ingested as they are generated by the ZTF survey and are made available immediately, which is reflected by the "Latest Alert" value below. Users are advised to limit their request frequency to a reasonable time period, preferably allowing at least 5 minutes between requests. In addition to our own [help](#) page, users should refer to the [ZTF website](#) and the [ZTF Alert Archive](#) for documentation on ZTF and the generation of alerts.

The following table lists ZTF alerts in descending order by JD. Use the filters on the right to narrow down the results to interesting candidates. When the results look good, add `?format=json` to the url. You can now access this url to retrieve the full data and use it in your scripts. You can access an alert's previous alerts by visiting `/<id>/` where id is the value of the lco_id key in the json view or by clicking the id link in the table.

See the [help](#) page for descriptions of the table values and available filters.

		Prev		Next		Latest Alert: 2021-10-04 06:04:24 UTC					
id	objectId	time	filter	ra	dec	magpsf	magap	distnr	Δmaglatest	Δmagref	rb
260296516	ZTF18abtmsk	2021-10-04 06:04:24	g	299.51389	-12.74652	15.40	15.54	0.201	0.09	-1.07	0.6
260296517	ZTF18actwqpo	2021-10-04 06:04:24	g	299.48592	-12.82649	14.73	14.66	0.349	-0.09	-1.18	0.6
260296519	ZTF21acftqkl	2021-10-04 06:04:24	g	298.96657	-12.78389	15.43	15.41	0.874		-2.78	0.3

最近ちょっと趣味でやっていること

- ZTF の全アラートにアクセスできるサイト MARS: <https://mars.lco.global/>
 - 等級、増光率などの条件をつけて検索が可能
 - 大量の Bogus を含むが Real/Bogus rate (ZTF 側の「自信度」) でフィルター可
 - リアルタイムで情報が上がっていく
- 複数回検出した天体等を引き出し、既知の小惑星を落とす
 - 矮新星は結構見つかる
 - 超新星もたまに (SN 2021zny など)
 - (新星はまだ: いつか拾えたらいいな...)
- 似た感じの新星探査を Tomo-e でしてみたいなあ

おいでよ かんそくの沼内を検索する

#04research-taguchi-bot

+ 関連ページを追加する

[VSX : Detail for CSS 141018:012842+113051](#)
The Web Site for The International Variable Star Index (VSX)

Test_Taguchi アプリ 19:27
ZTF21acejig
filter = r, UT = Tue, 28 Sep 2021 09:51:22 GMT
(RA, Dec) = (01:49:59.3981, +54:39:27.2426), (l, b) = (+131.406, -7.248)
dc_mag = 15.62, magpsf = 15.86, magap = 15.86
deltamaglatest = None, deltamagref = None

Nearest VS in VSX:
None

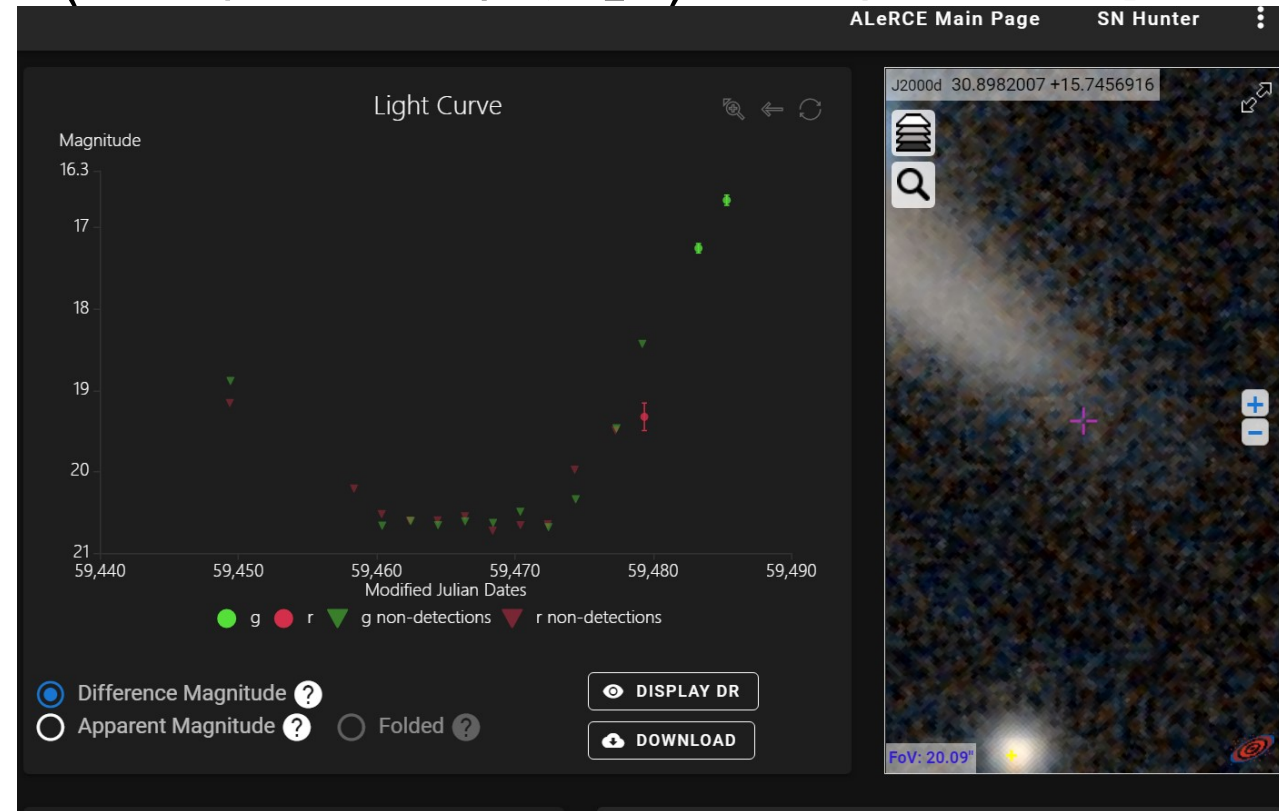
Nearest MP in MPC:
None

Nearest PS1:
None

Nearest Gaia:
None

最近ちょっと趣味でやっていること

- ZTF の全アラートにアクセスできるサイト MARS: <https://mars.lco.global/>
 - 等級、増光率などの条件をつけて検索が可能
 - 大量の Bogus を含むが Real/Bogus rate (ZTF 側の「自信度」) でフィルター可
 - リアルタイムで情報が上がっていく
- 複数回検出した天体等を引き出し、既知の小惑星を落とす
 - 矮新星は結構見つかる
 - 超新星もたまに (SN 2021zny など)
 - (新星はまだ: いつか拾えたらいいな...)
- **似た感じの新星探査を Tomo-e でしてみたいなあ**



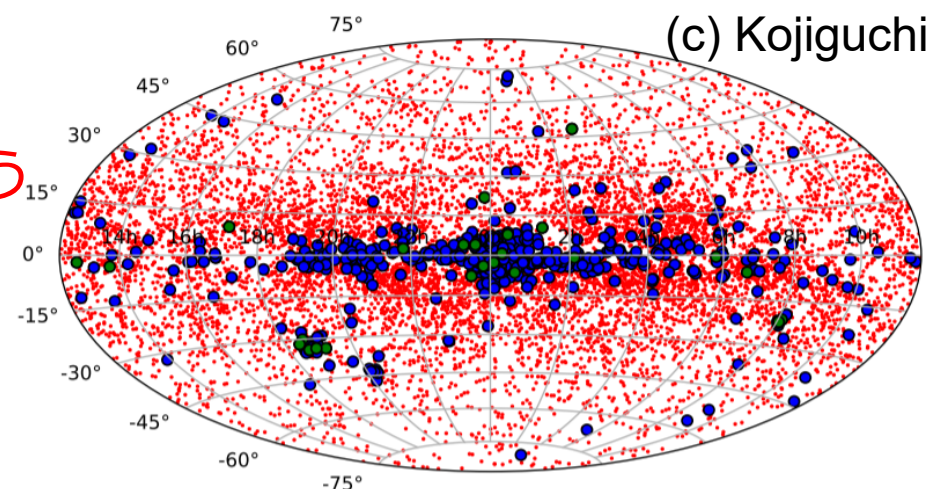
2019 年からやってきたこと + 今後の予定など

- 2019 年からの田口
 - せいめいで下積み
 - 京大 + 岡山の皆さまのおかげで、せいめいには少し慣れました
 - 発見直後の新星 (候補) をいち早く分光するためのプロポーザルを出し (続け) ています
 - 現在は、V1405 Cas の観測結果を纏めたりしています (Taguchi et al. in prep.)
 - 新星の超初期のスペクトルの理論的解釈の研究も進めています...
- 将来的には、Tomo-e でリアルタイムで新星を発見して、同じ夜に岡山で分光できたら、と思っています (一昨年と同じこと言っていますが...)
 - 2023 年 3 月: 京大卒業予定、が迫ってきている... (その後はどうなるのだろうか...?)
- 相談に乗って頂ける方がいらっしゃいましたら、ご連絡して頂きたいです

新星の出現位置

- **ほとんどが銀河面付近に集中**
 - 特に銀河中心が多い
 - 銀河面を高頻度でサーベイできれば、増光途上の新星が検出できるのではないかと期待
- Event rate の見積もり
 - 日本から夜間に銀河中心が見える時間: $\sim 300\text{-}400$ hours / year (晴天率 1/3 くらい)
 - Nova rate ~ 10 novae / year $\rightarrow 1$ nova / 900 hours
(900 h 銀河中心を見れば 1 nova くらい出るはず)
 - \rightarrow **2-3 年頑張れば、夜間の間に新星を見つけられそう**
(暗い新星を含めると、もう少し上がるかも?)
 - 特に、夏場はねらい目?

矮新星, 新星, 反復新星の
出現位置 (銀河座標)



まとめ

- 最近、**新星の爆発直後 (急増光期) が面白い**
 - 電離階数の高い line (T Pyx: [Arai et al. 2015](#); V1405 Cas: ATels [#14471](#), [#14472](#))
 - 光度はほぼ一定のまま光球面の膨張途上なので、有効温度が減少 → 可視で増光
 - P Cygni profile を示さないスペクトル ([Arai et al. 2015](#))
 - 新星爆発に伴う放出物質は光球面より十分遠方に到達しておらず、吸収成分を作れない
 - 電離光子が爆発前に存在している物質を照射している? (cf. 超新星の “flash spectroscopy”)
 - 高エネルギー (> 100 MeV) ガンマ線が初期に受かる例も (RS Oph: ATel [#14834](#) 等)
 - 新星に伴う放出物質と、周囲の物質との衝突・衝撃波による放射?
- **せいめい望遠鏡で、新星候補の即時フォローアップを狙っています**
 - Tomo-e でリアルタイムで発見できないだろうか?