京都大学
KYOTO UNIVERSITY

京都大学大学院理学研究科附属天文台
岡山天文台

突発天体（新星など）の爆発直後の分光観測

2024-11-17 11:00 ~ 11:40

田口健太 (京都大学宇宙物理学教室・岡山天文台)

第4回新天体捜索者会議

おしながき

- **突発天体 (新星など) の爆発直後の分光観測例 (← 世話人に頂いたお題)**
  - 爆発直後の II 型超新星の分光観測例 (SN 2013fs)
  - 爆発直後の新星の分光観測例
    - 高温の輝線スペクトル (例: T Pyx, V1405 Cas)
      - 軟 X 線で観測された例も (YZ Ret)
    - 伴星からの星風 (2021 年の RS Oph の爆発)
- その他
  - 測光観測で見つかる興味深い超新星の例
    - IIb 型超新星のショック・ブレイクアウトの瞬間 (SN 2016gkg)
    - 爆発直後に Ia 型超新星が一瞬明るくなった例 (SN 2020hvf)
    - 後期になってから急に明るくなりスペクトルも変化した超新星の例 (SN 2023aew)
  - 重力波源の可視光対応天体の特定が出来ないか?
  - 新星と矮新星の見分け方

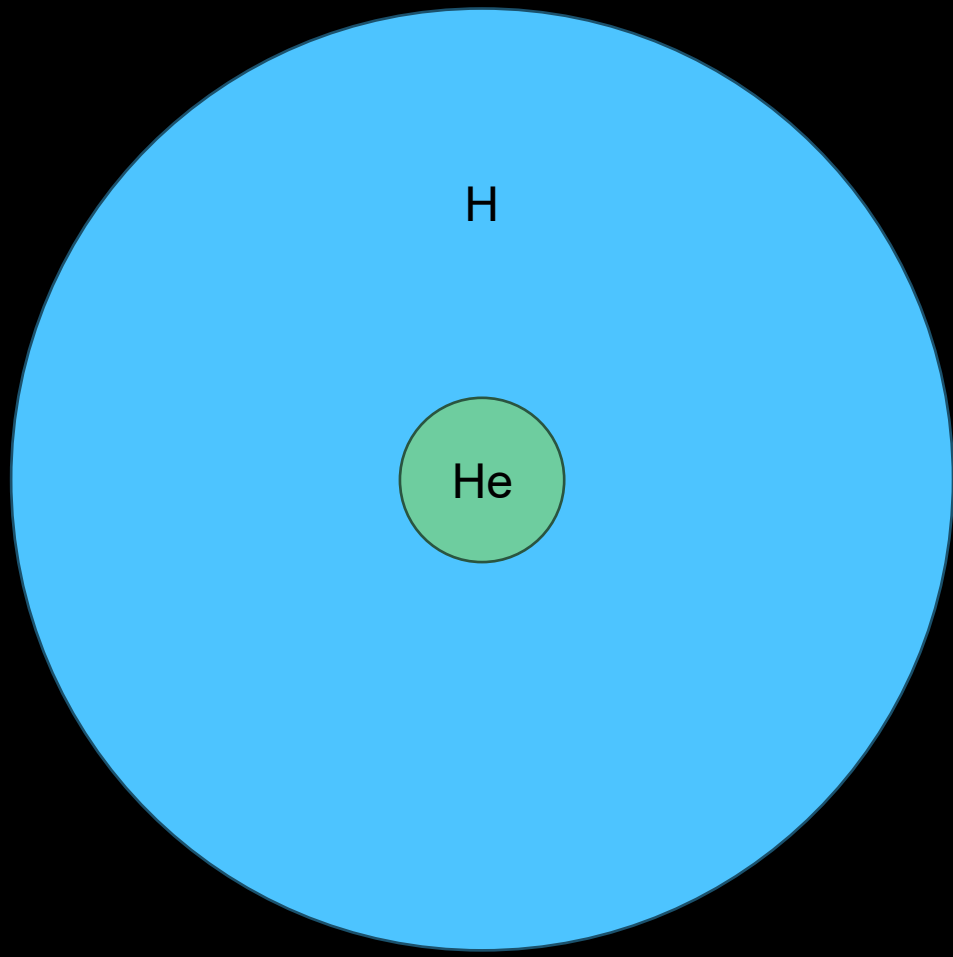
重力崩壊型超新星: II 型、Ib 型、Ic 型超新星 (Ia 型以外の超新星)

- 主系列星 (太陽など): 中心部で H を He に核燃焼することで輝く

- 大質量星末期: どんどん重たい元素になる
  → **Fe まで核融合反応が進むと、超新星爆発**
  → 星全体が吹き飛ぶ

- スペクトルでは 3 種類に大別される
  - **II 型**: スペクトル中に水素が見られる
    (IIb 型: II 型と Ib 型の中間のスペクトル)
  - **Ib 型**: 水素が見られず、ヘリウムが見られる
  - **Ic 型**: 水素もヘリウムも見られない

  (Ib/Ic 型: 何らかの原因で外層を失った後に爆発?)



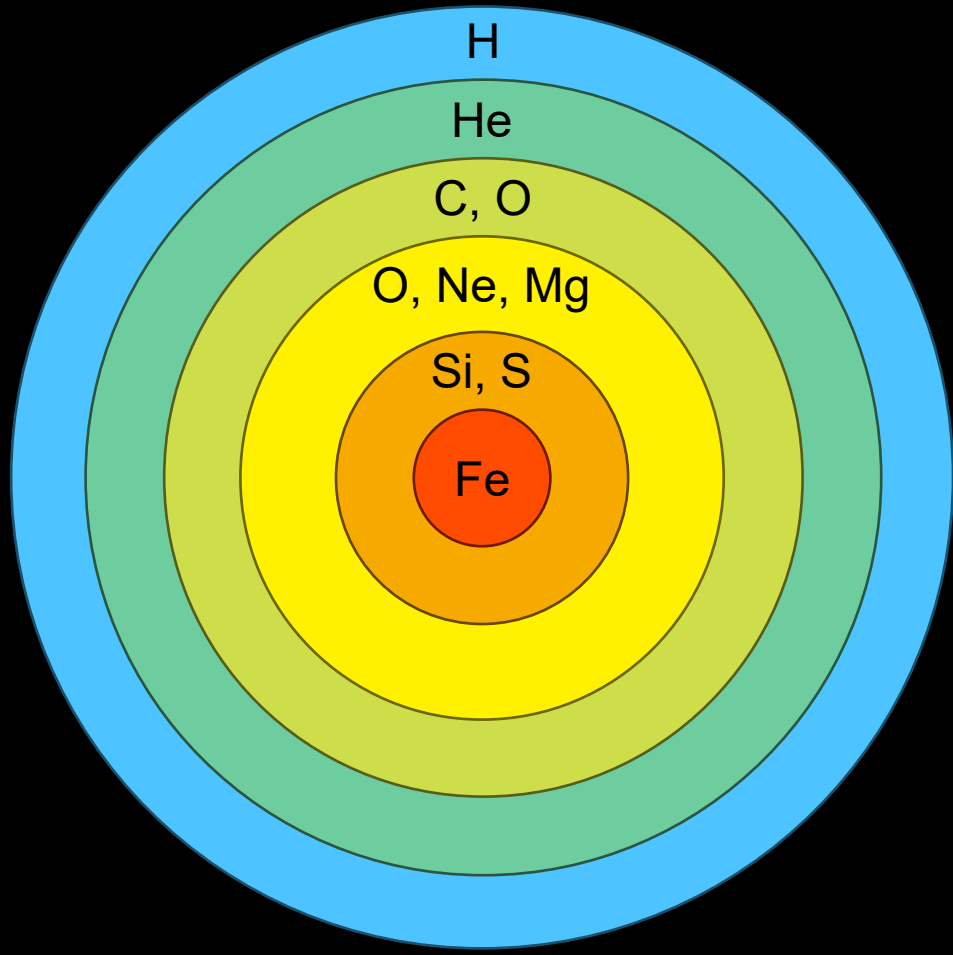
重力崩壊型超新星: II 型、Ib 型、Ic 型超新星 (Ia 型以外の超新星)

- 主系列星 (太陽など): 中心部で H を He に核燃焼することで輝く

- 大質量星末期: どんどん重たい元素になる
  → **Fe まで核融合反応が進むと、超新星爆発**
  → 星全体が吹き飛ぶ

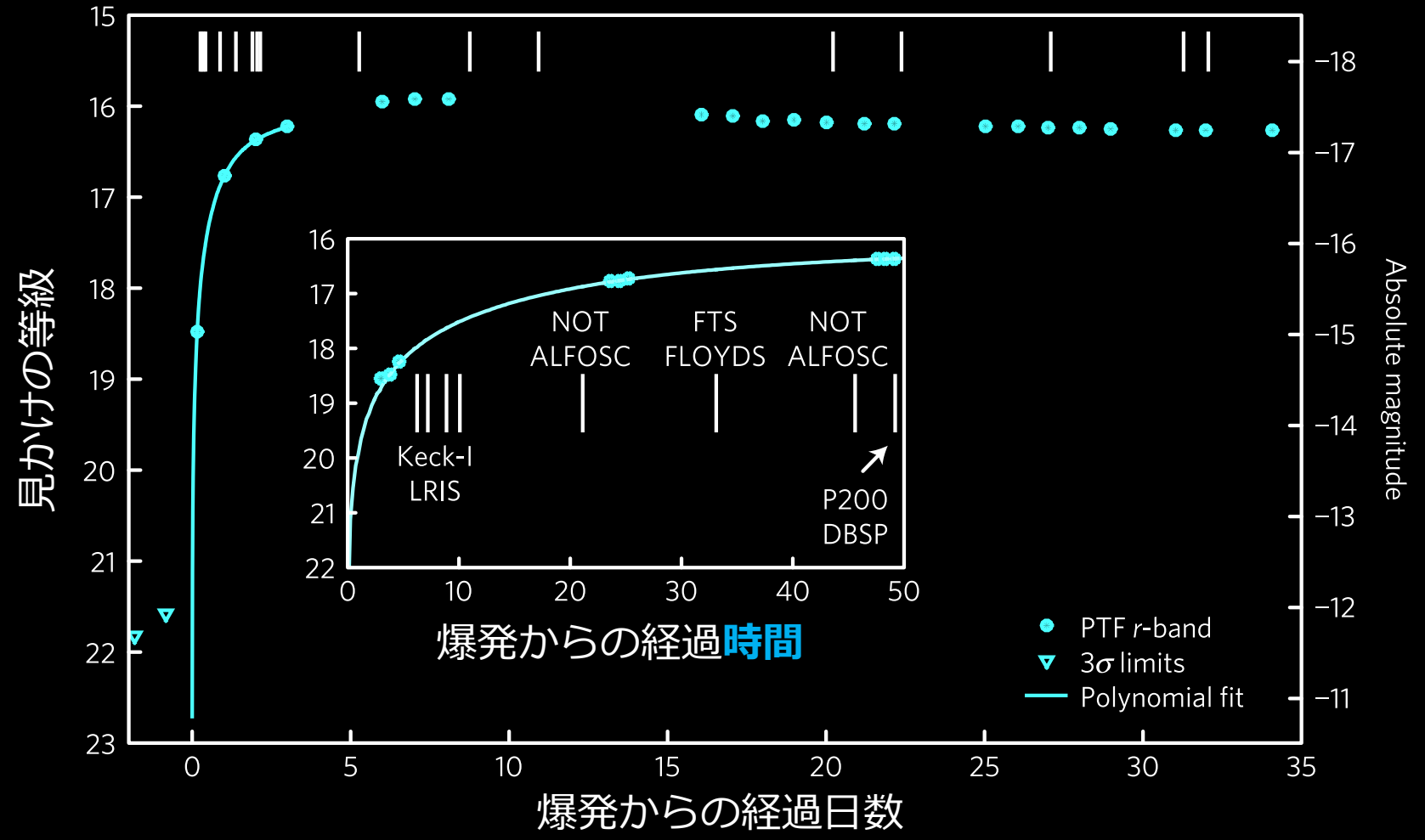
- スペクトルでは 3 種類に大別される
  - **II 型**: スペクトル中に水素が見られる
    (IIb 型: II 型と Ib 型の中間のスペクトル)
  - **Ib 型**: 水素が見られず、ヘリウムが見られる
  - **Ic 型**: 水素もヘリウムも見られない

  (Ib/Ic 型: 何らかの原因で外層を失った後に爆発?)



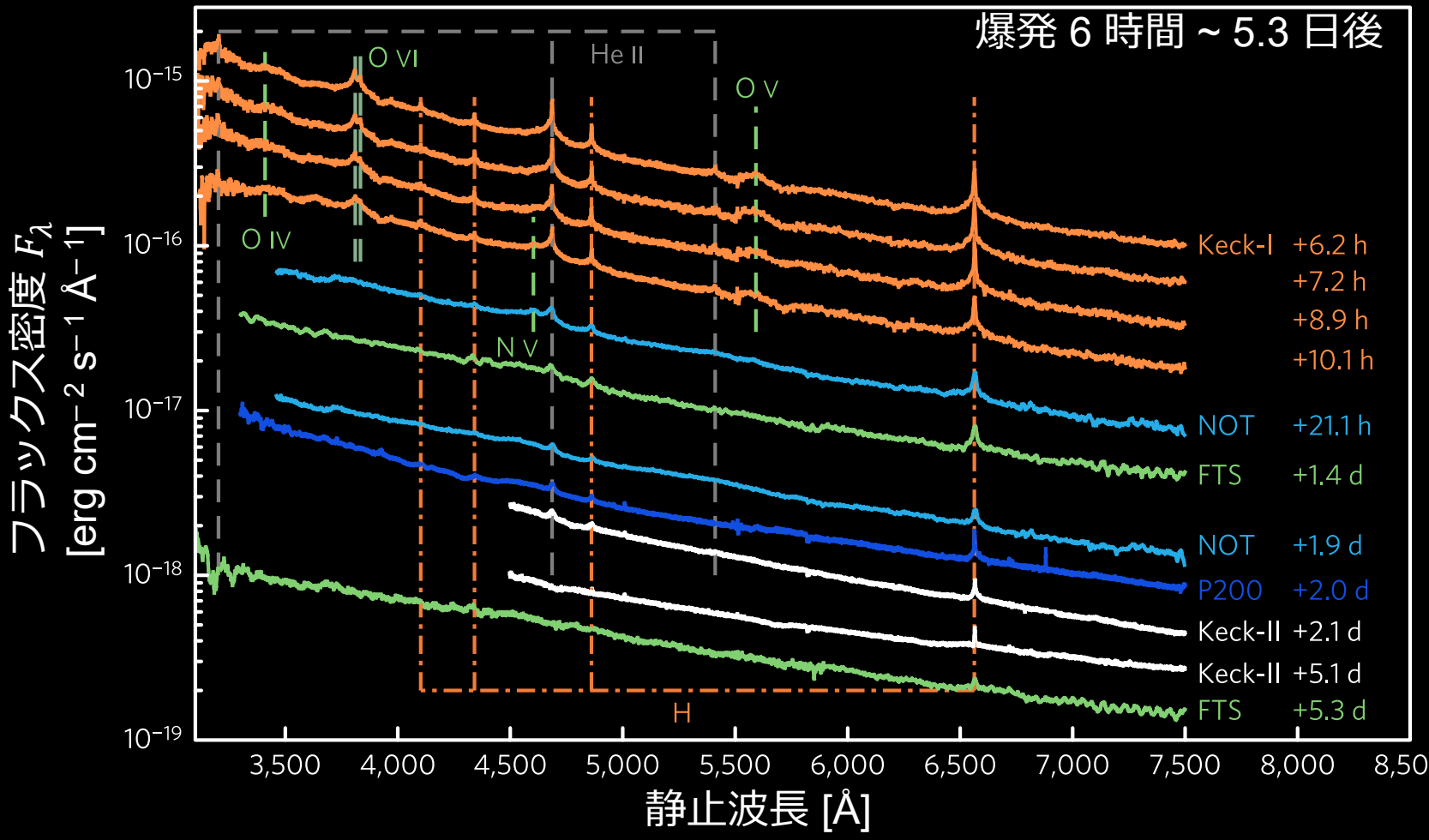
爆発直後の II 型超新星の分光観測例 (SN 2013fs; Yaron et al. 2017)

- 発見直後の分光観測が行われた稀有な例



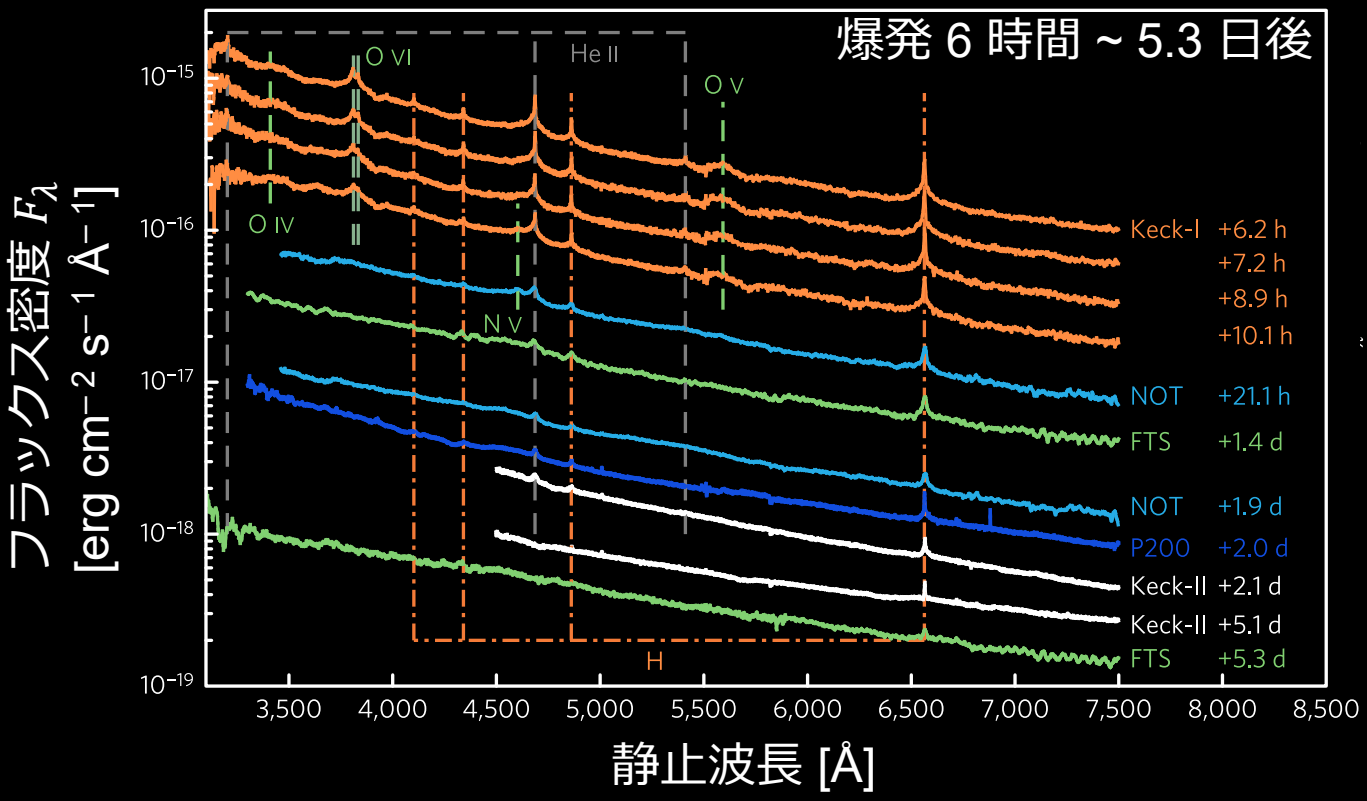
爆発直後の II 型超新星の分光観測例 (SN 2013fs; Yaron et al. 2017)

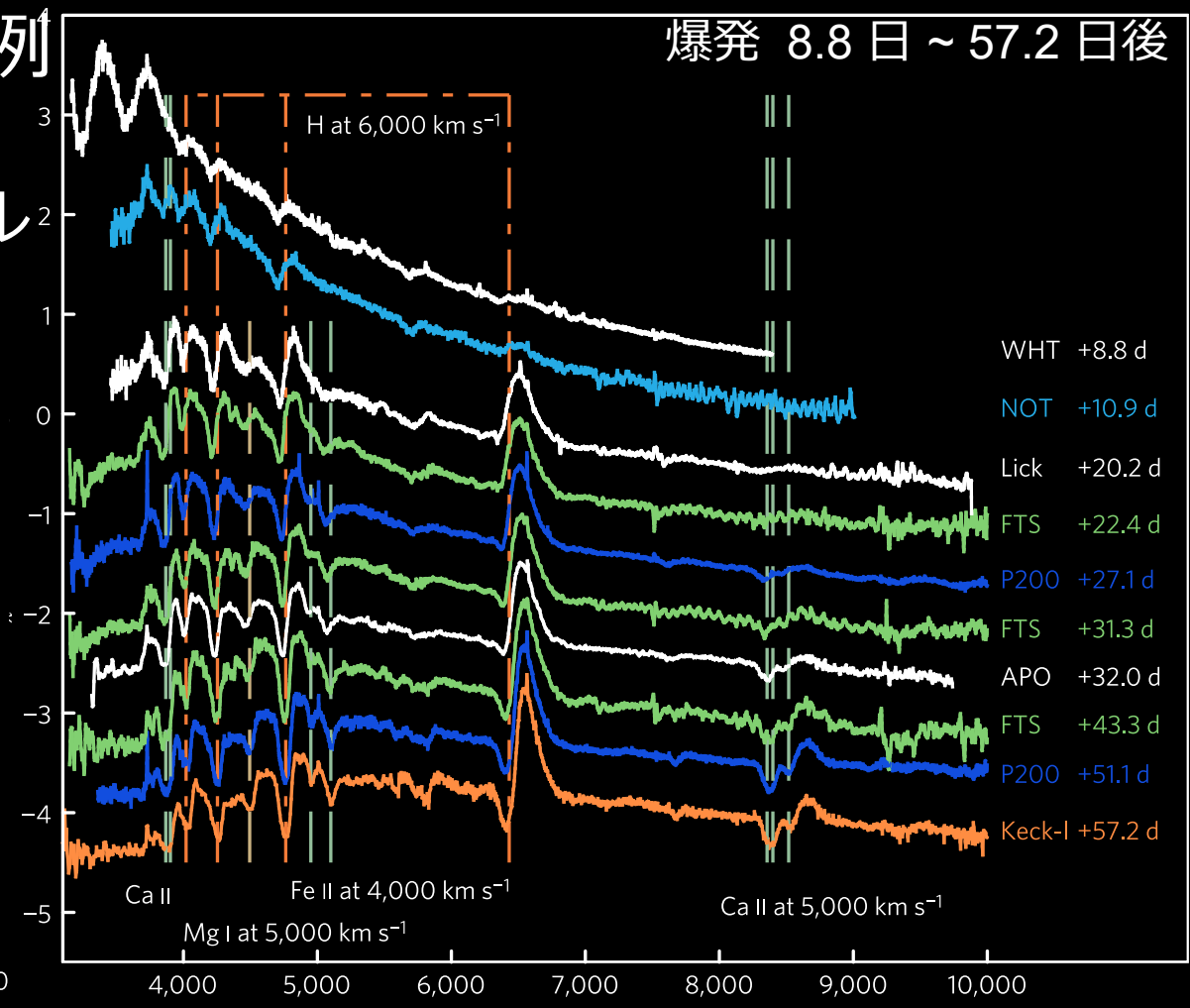
- 発見直後の分光観測が行われた稀有な例



爆発直後の II 型超新星の分光観測例 (SN 2013fs; Yaron et al. 2017)

- 発見直後の分光観測が行われた稀有な例
  - 爆発直後: **O VI など高階電離の細い輝線**
  - 1週間後: 通常の線の太い超新星スペクトル

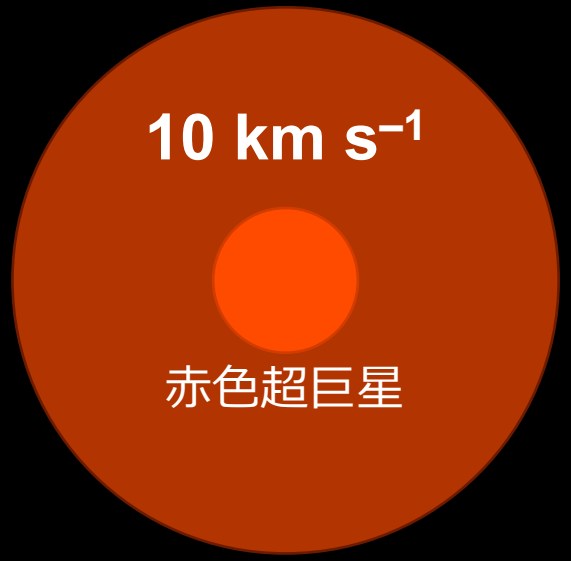




爆発直後の II 型超新星の細い輝線の解釈

- 超新星爆発直後の高温の放射に照射された「**濃い星周物質**」
  - 超新星爆発する前の星が出していた低速 (Doppler 幅が小さい) の星風

- **赤色超巨星からの星風**: 約 10 km s^{-1} くらい
  → 3 年くらいで 10^{14} cm くらいまで広がる
  (だいたい太陽から土星くらいまでの距離)



- **超新星爆発**: 10000 km s^{-1} で飛び散る。
  → 1 日くらいで 10^{14} cm くらいまで広がる

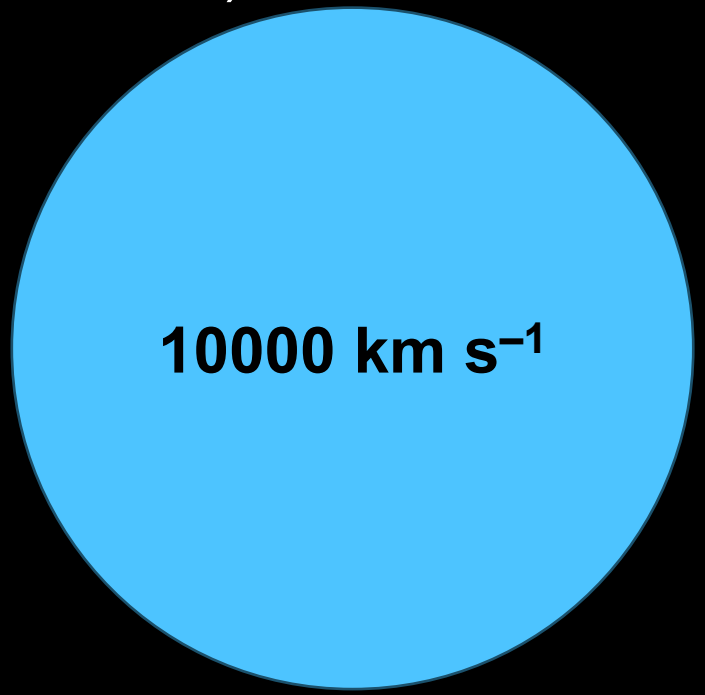
→ **1日以内に分光観測すれば、超新星爆発を起こす数年前の活動が分かる**
  - その後は超新星爆発に飲み込まれて見えなくなってしまう

爆発直後の II 型超新星の細い輝線の解釈

- 超新星爆発直後の高温の放射に照射された「**濃い星周物質**」
  - 超新星爆発する前の星が出していた低速 (Doppler 幅が小さい) の星風

- **赤色超巨星からの星風**: 約 10 km s^{-1} くらい
  → 3 年くらいで 10^{14} cm くらいまで広がる
  (だいたい太陽から土星くらいまでの距離)

- **超新星爆発**: 10000 km s^{-1} で飛び散る。
  → 1 日くらいで 10^{14} cm くらいまで広がる



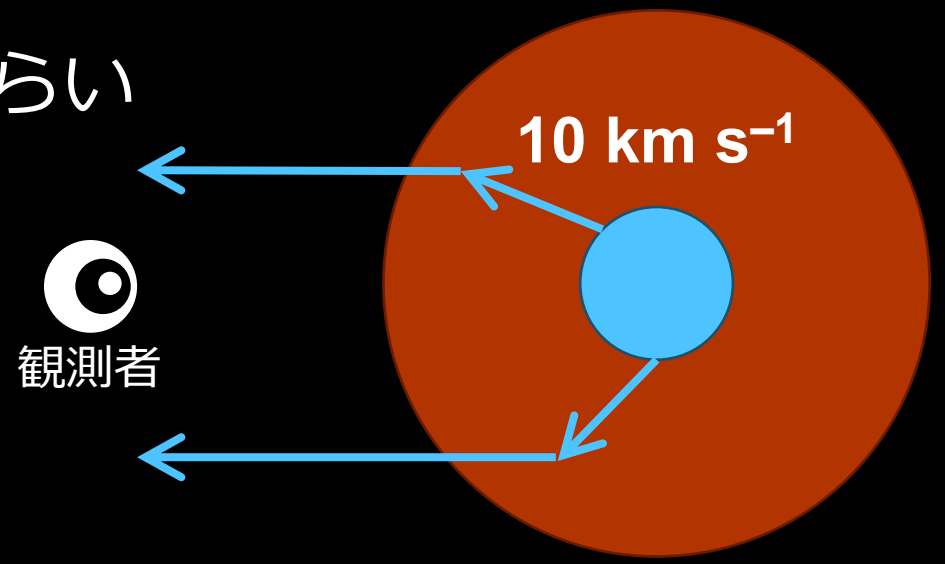
→ **1日以内に分光観測すれば、超新星爆発を起こす数年前の活動が分かる**
  - その後は超新星爆発に飲み込まれて見えなくなってしまう

爆発直後の II 型超新星の細い輝線の解釈

- 超新星爆発直後の高温の放射に照射された「**濃い星周物質**」
  - 超新星爆発する前の星が出していた低速 (Doppler 幅が小さい) の星風

- **赤色超巨星からの星風**: 約 10 km s^{-1} くらい
  → 3 年くらいで 10^{14} cm くらいまで広がる
  (だいたい太陽から土星くらいまでの距離)

- **超新星爆発**: 10000 km s^{-1} で飛び散る
  → 1 日くらいで 10^{14} cm くらいまで広がる



→ **1日以内に分光観測すれば、超新星爆発を起こす数年前の活動が分かる**
  - その後は超新星爆発に飲み込まれて見えなくなってしまう

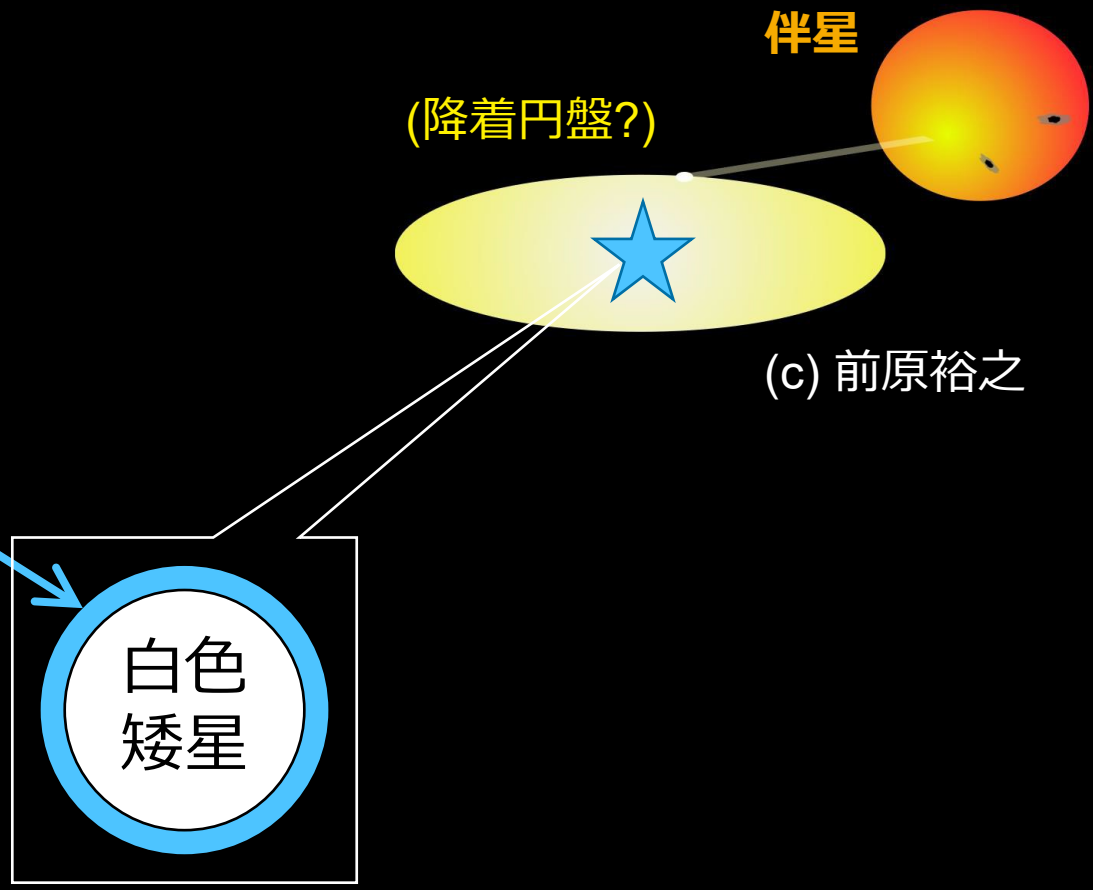
爆発直後の新星の分光観測?

- 新星爆発初期でも、**新星爆発 (光球面) は広がっておらず、高温**
  → 新星爆発の初期段階は、2 つの点で II 型超新星と似ていそう
    - 新星爆発に飲み込まれる前に伴星が出していた星風が見えるかも (例: RS Oph)
    - 初期の高温の光球面からの放射が見えるかも (例: T Pyx, V1405 Cas, YZ Ret)

- 詳しくは以下のスライドで

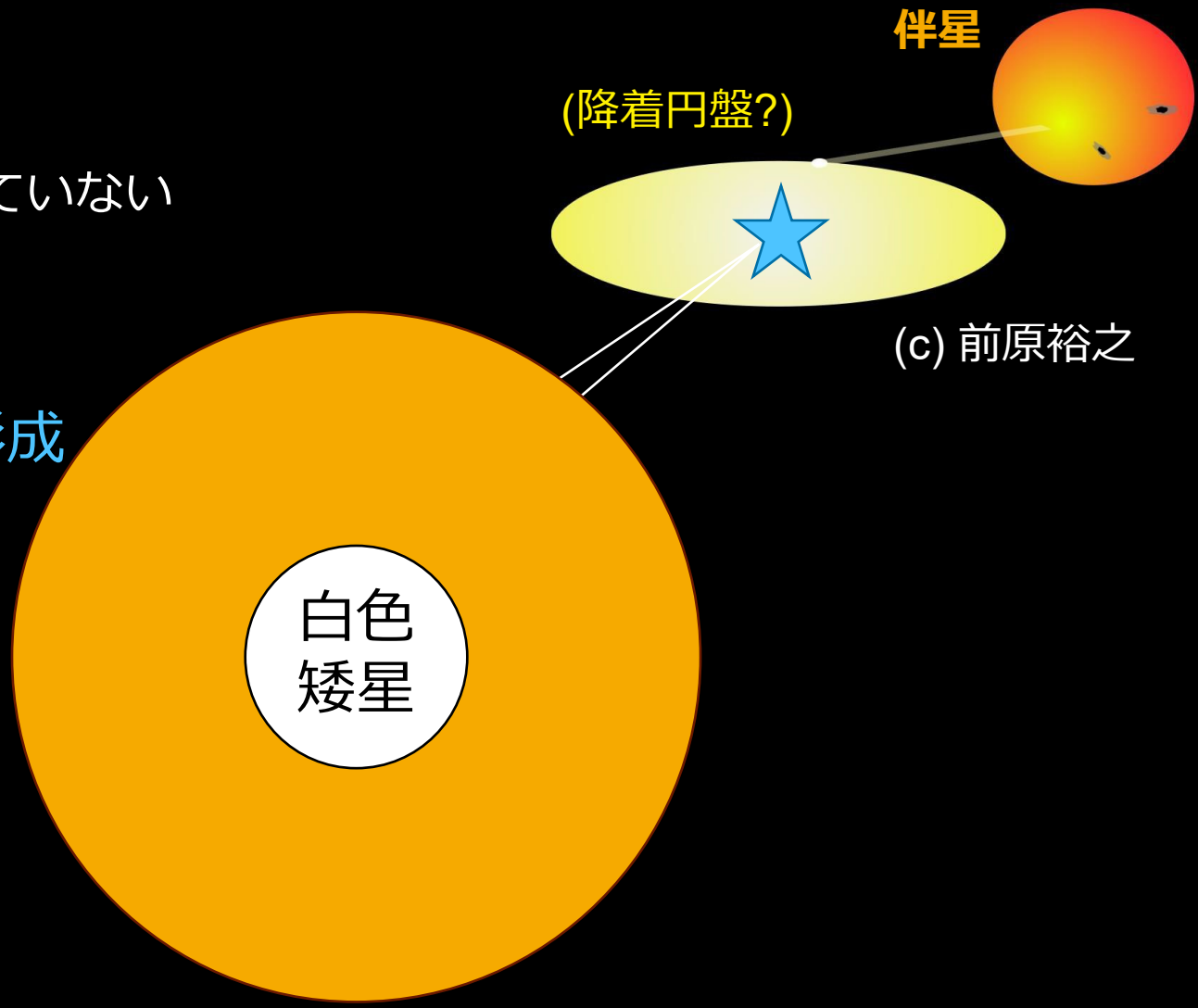
新星爆発のメカニズム: 熱核暴走反応

- 近接連星系
  - **白色矮星 (主星)**
    - 水素を燃やし尽くした → 核融合反応はしていない
  - 晩期型星 (伴星)
- 水素ガスが伴星から白色矮星に降着
  → 白色矮星表面に水素に富んだ表層を形成
- 伴星からガスが降着すればするほど
  → 水素層の密度が上昇
  → 白色矮星表面で核反応が復活
  → 熱核暴走反応を起こして明るくなる
  → 爆発に至る

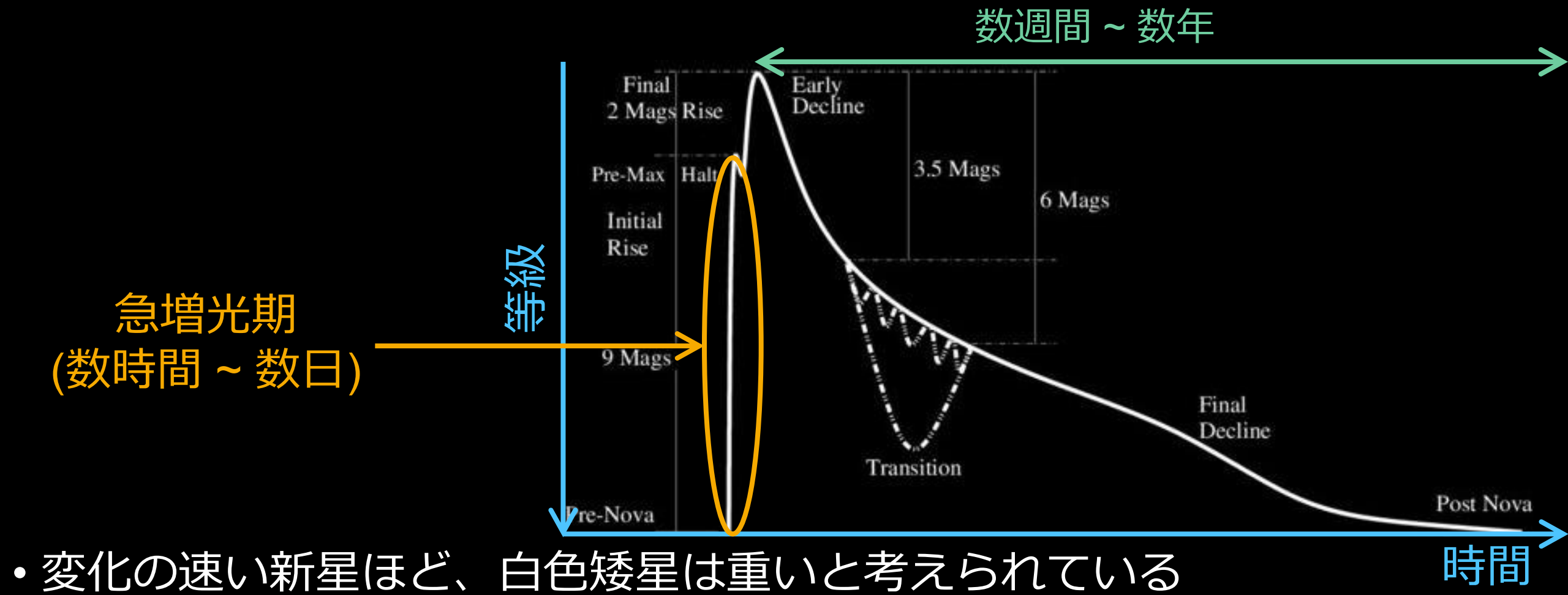


新星爆発のメカニズム: 熱核暴走反応

- 近接連星系
  - **白色矮星 (主星)**
    - 水素を燃やし尽くした → 核融合反応はしていない
  - 晩期型星 (伴星)
- 水素ガスが伴星から白色矮星に降着
  → 白色矮星表面に水素に富んだ表層を形成
- 伴星からガスが降着すればするほど
  → 水素層の密度が上昇
  → 白色矮星表面で核反応が復活
  → 熱核暴走反応を起こして明るくなる
  → 爆発に至る



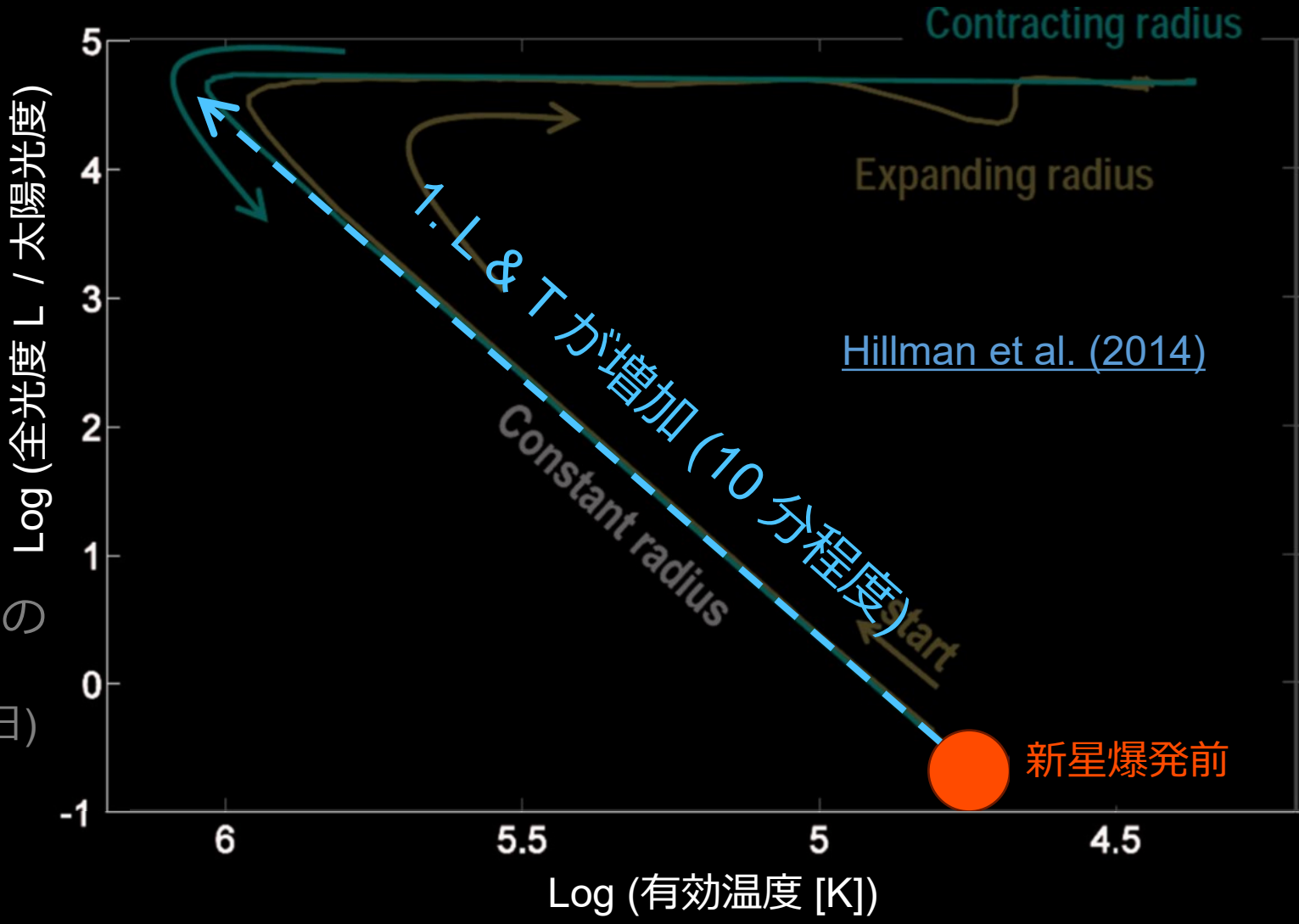
「典型的な」新星の可視光の光度曲線 (Bode & Evans 2008)



- 変化の速い新星ほど、白色矮星は重いと考えられている
  - 稀に RR Tel のように、年単位でゆっくり増光する共生新星も存在する

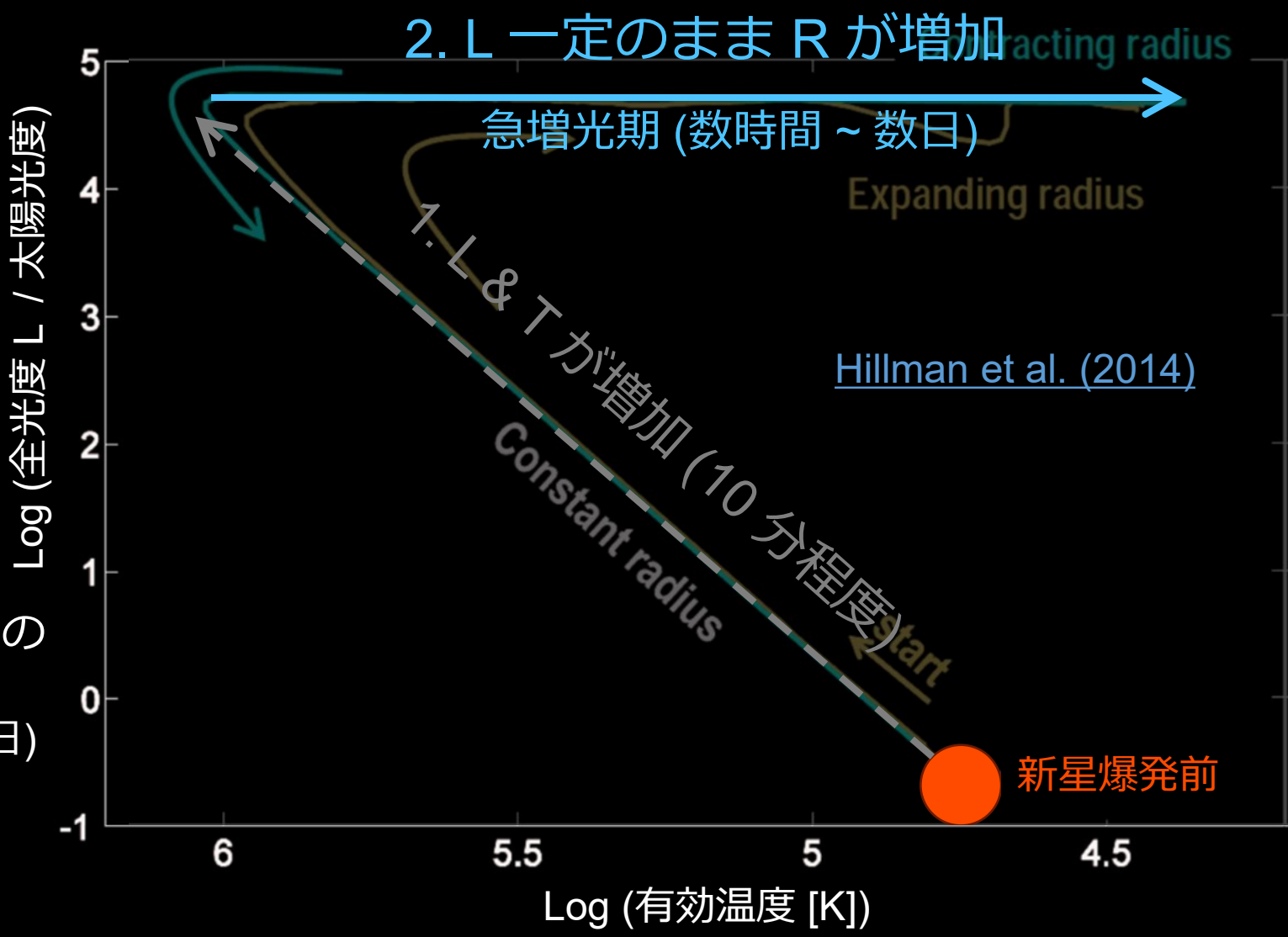
HR 図上での新星の初期進化

- 理論的な説明
  1. 核反応が開始
     → 光度 L と温度 T が一気に増加
     - 10 分くらいなので観測困難
     - この間、半径は変化なし
  2. 光度 L が 10^{38} erg s^{-1} に
     → 輻射圧で白色矮星外層が膨張
     → 全光度を保ったまま半径が増加
     → 温度が低下する
     → 軟 X 線、紫外線、可視、と輻射の中心が変化する
     = 可視光の急増光期 (数時間 ~ 数日)
- **急増光期の新星は極大期より小さく高温の火の玉**



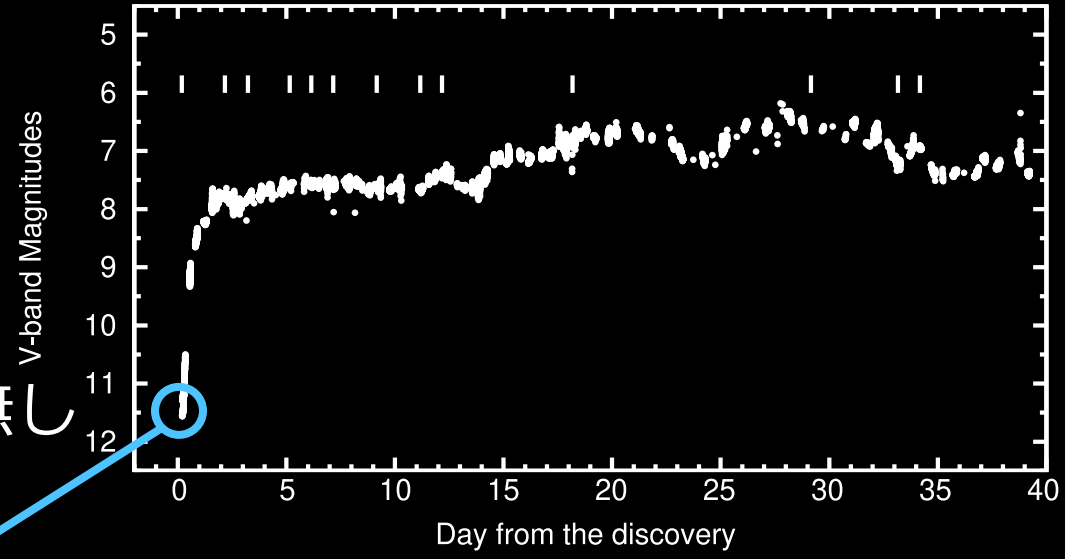
HR 図上での新星の初期進化

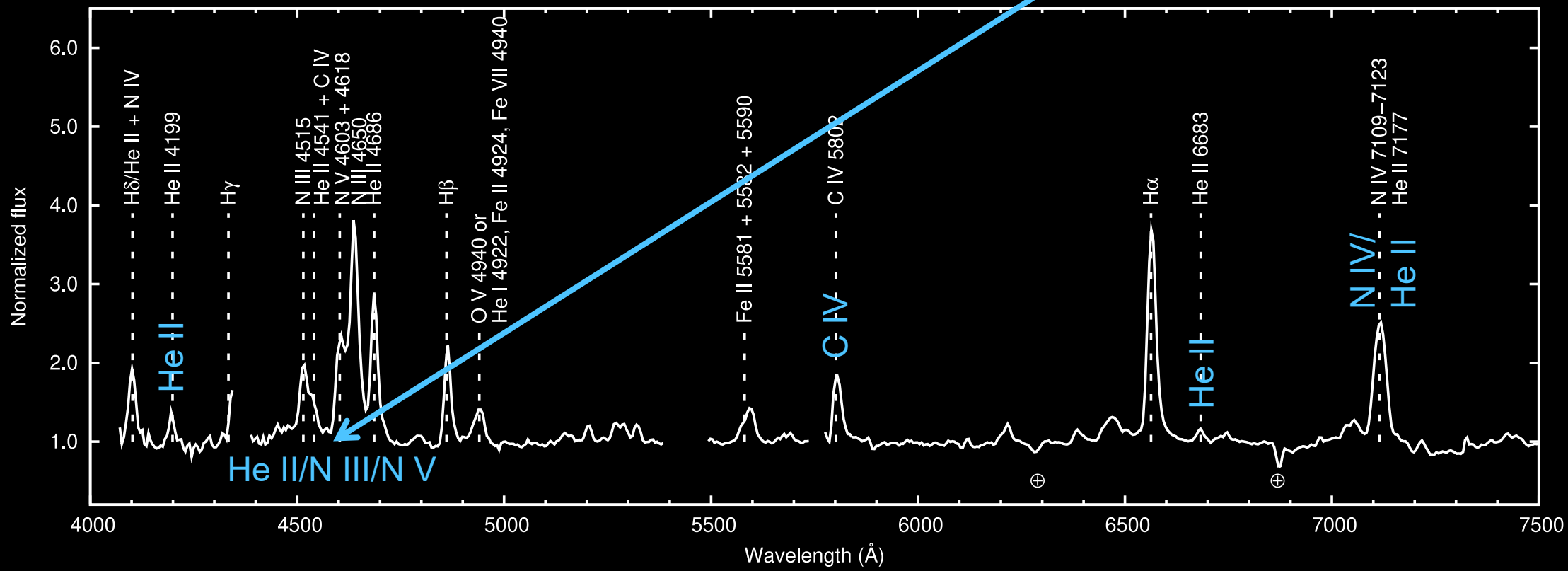
- 理論的な説明
  1. 核反応が開始
     → 光度 L と温度 T が一気に増加
     - 10 分くらいなので観測困難
     - この間、半径は変化なし
  2. 光度 L が 10^{38} erg s^{-1} に
     → 輻射圧で白色矮星外層が膨張
     → 全光度を保ったまま半径が増加
     → 温度が低下する ($L \propto R^2 T^4$)
     → 軟 X 線、紫外線、可視、と輻射の中心が変化する
     = 可視光の急増光期 (数時間 ~ 数日)
- **急増光期の新星は極大期より小さく高温の火の玉**



先駆的な観測例: 2011 年の T Pyx (Arai et al. 2015)

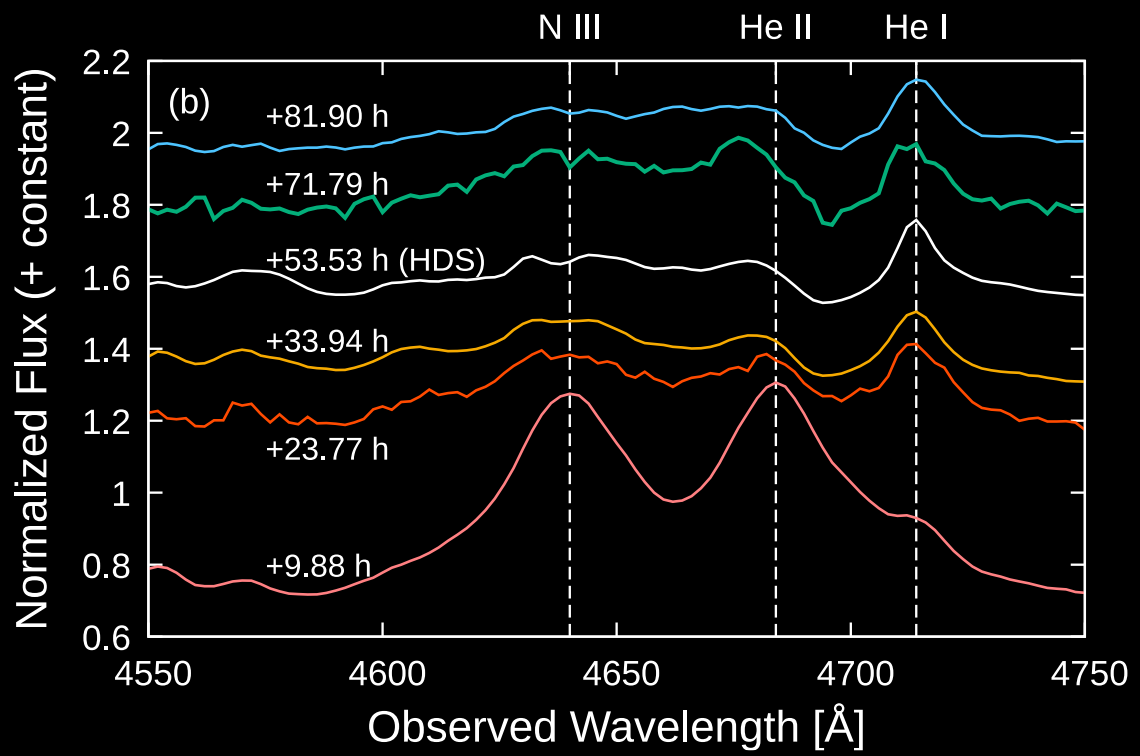
- **高階電離の輝線スペクトル** (SN 2013fs 似)
  - 極大付近で見られる P Cygni 型の吸収成分は無し
  - 2011 年爆発のうち、最初の一本のみ

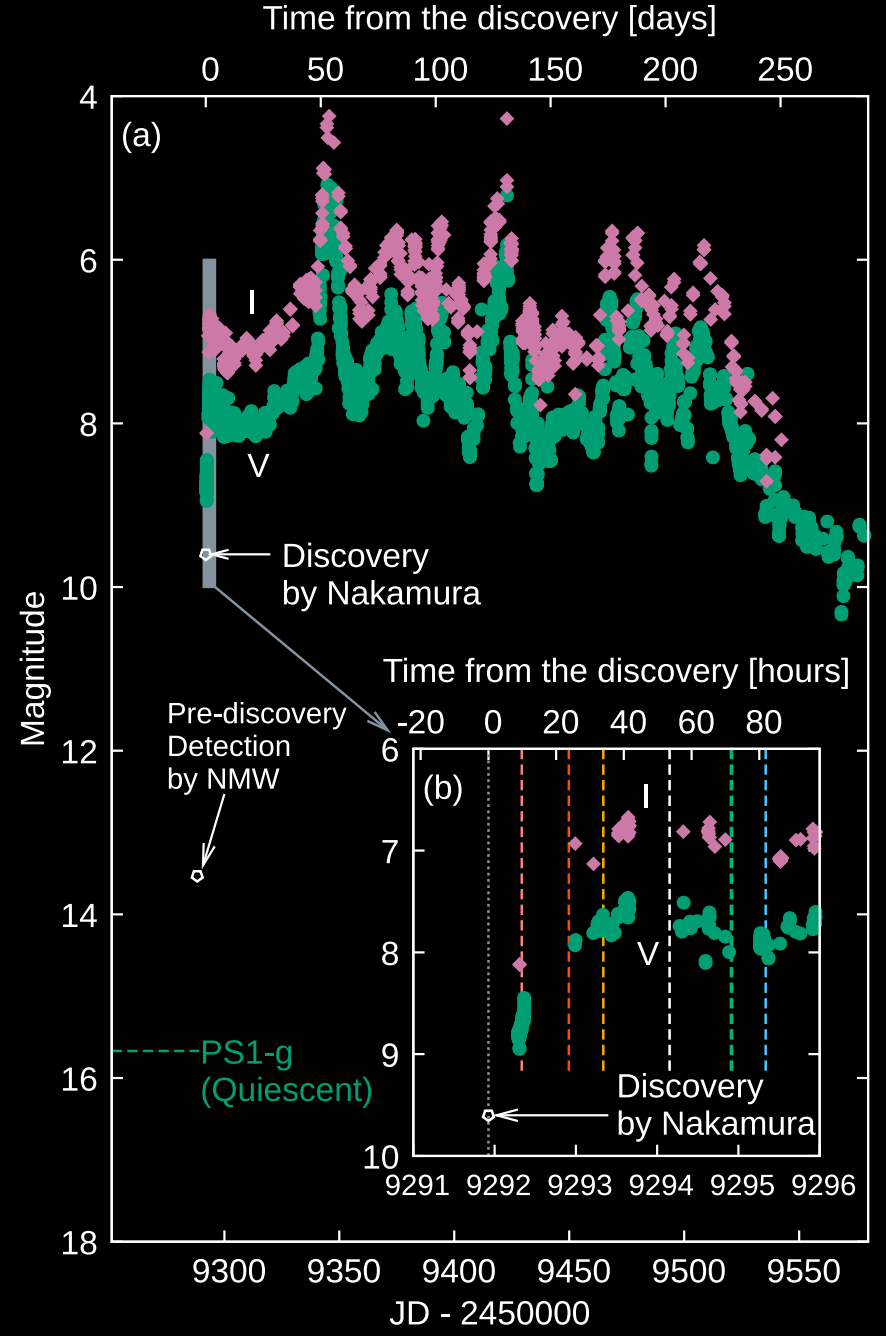




2匹目のドジョウ: V1405 Cas (2021)

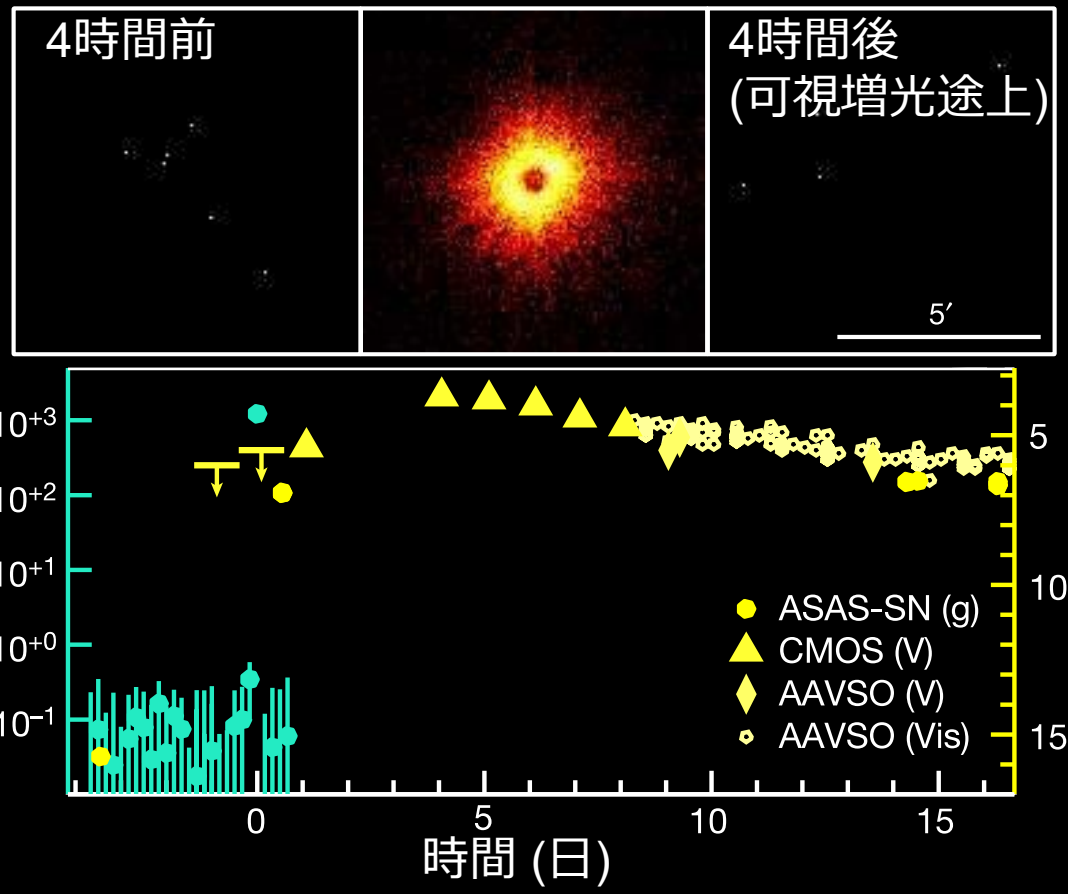
- **発見当日のスペクトルのみ高い電離度の輝線**
  - N III および He II
  - **→ 新星初期は極大期よりも高温と確認 (T Pyx 同様)**
    - T > 20000 K (Taguchi et al. 2023)



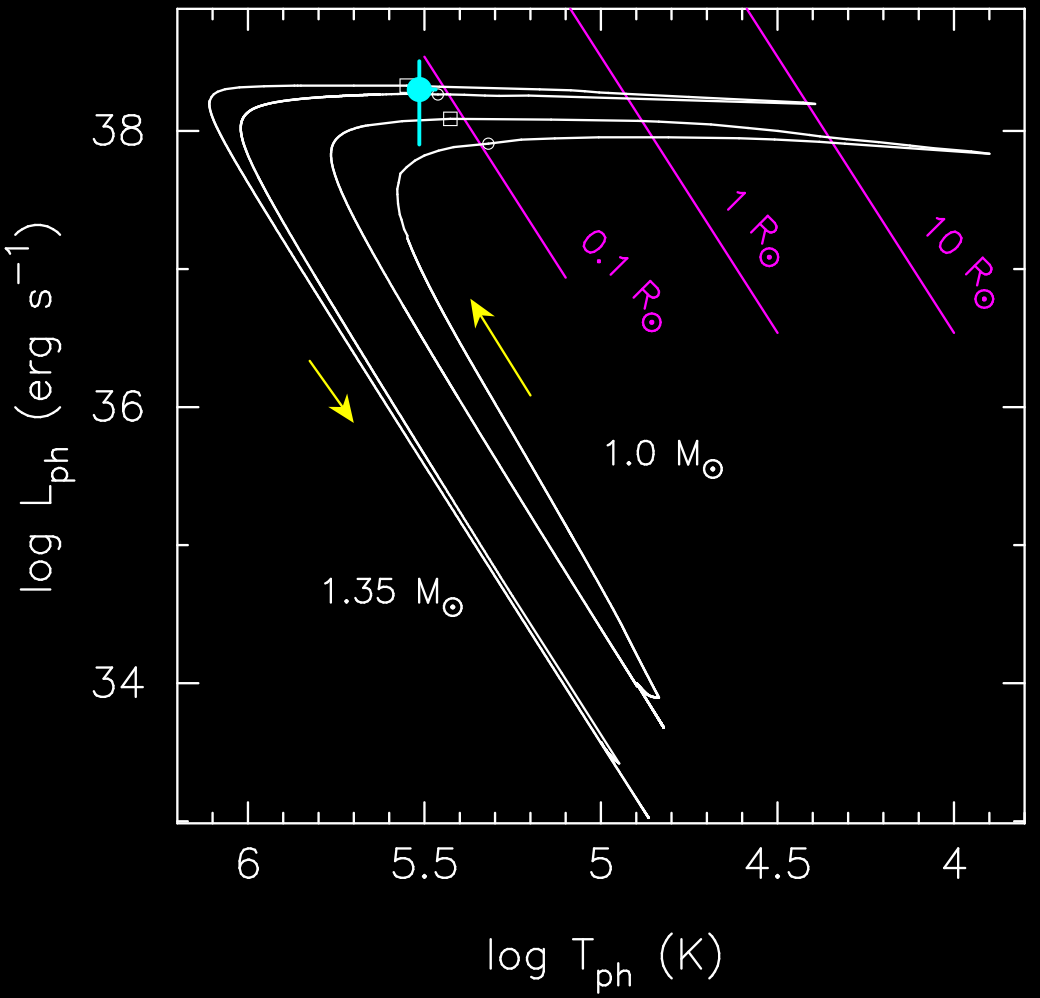


YZ Ret (2021年) の可視光増光直前の軟 X 線フラッシュ (by eROSITA; König et al. 2022)

- eROSITA: 4 時間毎に軟 X 線で観測
  → **可視光急増光の直前に軟 X 線で一瞬輝く**

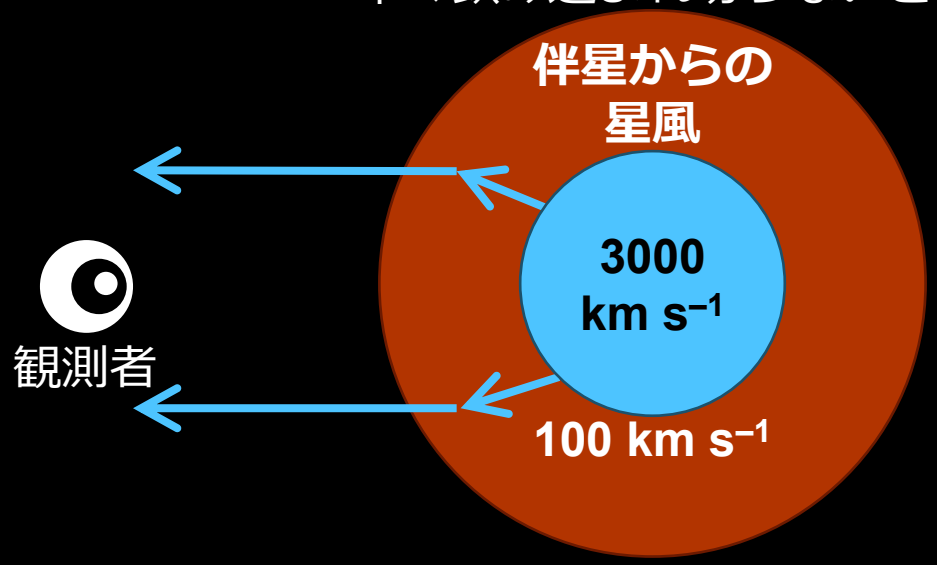


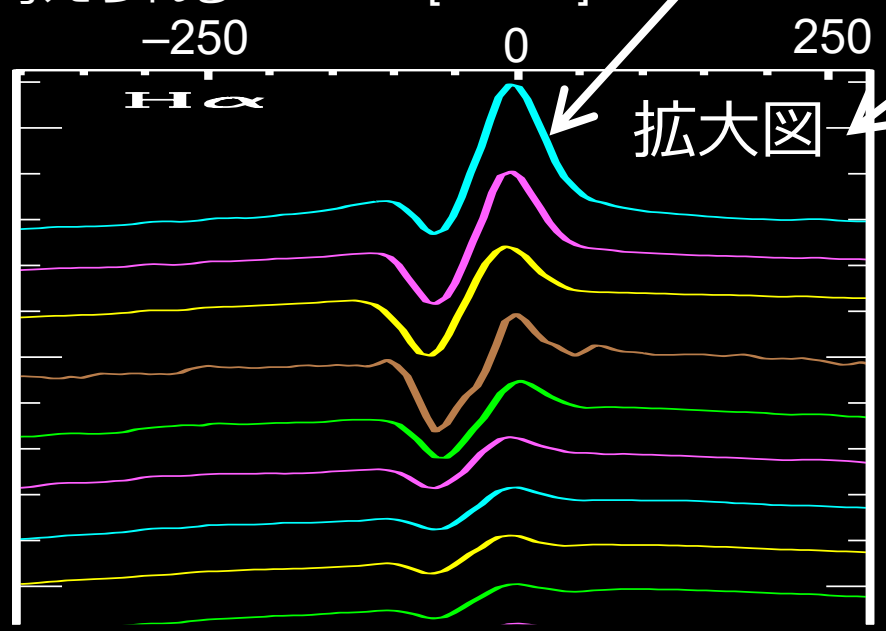
- Kato et al. (2022) のモデル

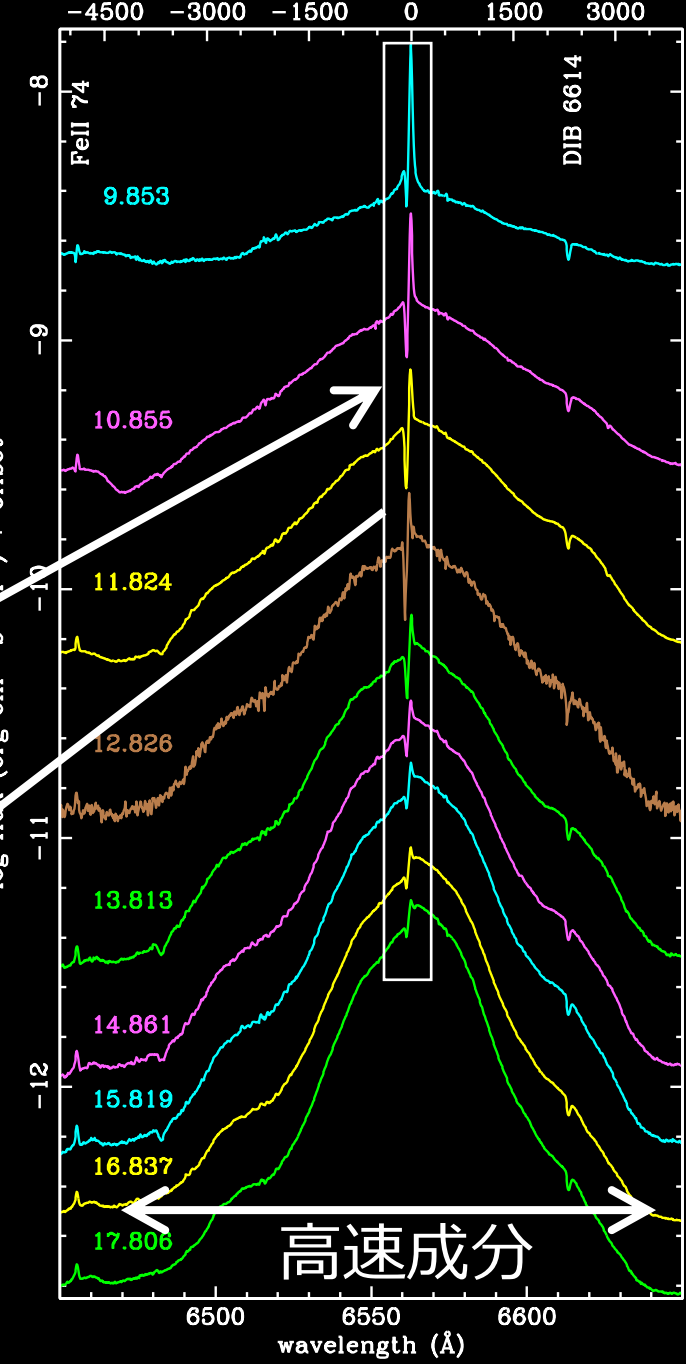


RS Oph の 2021 年のスペクトル (Munari et al., arXiv:2109.01101)

- Hα 輝線: 低速・高速、2 つの成分が見られる
  - 初期は P Cygni 型の細い (低速、100 km s^{-1}) 輝線が目立つ
  - 徐々に太い (高速、3000 km s^{-1}) 輝線も強くなる
  - 1週間経過しても細い成分は残存
    - RS Oph の伴星は星風がかなり濃い赤色巨星
      → 中々飲み込まれ切らないと考えられる







新星爆発直後の温度変化とスペクトルまとめ

- **急増光期: 小さく高温の放射**
  - 急増光期中は理論 (HR 図) 的に、新星爆発の光球面は小さく極めて高温
  - 観測例が長らく少なかったが、最近ようやく確かめられるように
    - 可視光の分光観測例
      - T Pyx (Arai et al. 2015)
      - V1405 Cas (Taguchi et al. 2023)
      - Gaia22alz (Aydi et al. 2020、増光に 1 年以上かける共生新星だが)
      - V4370 Oph (Uemura et al., submitted)
    - YZ Ret の可視急増光直前の軟 X 線でのフラッシュ (by eROSITA; König et al. 2022)
  - **しかしまだ、急増光から極大期までの移行を連続的に分光した例は無い**
    - 新星爆発の理論の詳細を詰めるために、ここも重要だと思う
- 爆発に飲み込まれる前の**伴星からの星風・連星系からの質量損失**
  - RS Oph (Munari et al., arXiv:2109.01101)

おしながき

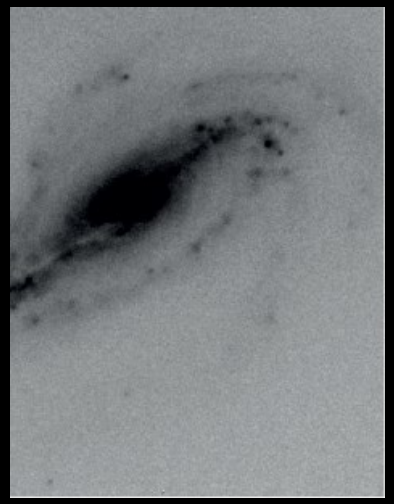
- **突発天体 (新星など) の爆発直後の分光観測例 (← 世話人に頂いたお題)**
  - 爆発直後の II 型超新星の分光観測例 (SN 2013fs)
  - 爆発直後の新星の分光観測例
    - 高温の輝線スペクトル (例: T Pyx, V1405 Cas)
      - 軟 X 線で観測された例も (YZ Ret)
    - 伴星からの星風 (2021 年の RS Oph の爆発)
- その他
  - 測光観測で見つかる興味深い超新星の例
    - IIb 型超新星のショック・ブレイクアウトの瞬間 (SN 2016gkg)
    - 爆発直後に Ia 型超新星が一瞬明るくなった例 (SN 2020hvf)
    - 後期になってから急に明るくなりスペクトルも変化した超新星の例 (SN 2023aew)
  - 重力波源の可視光対応天体の特定が出来ないか?
  - 新星と矮新星の見分け方

ショック・ブレイクアウトの瞬間 (IIb 型超新星 SN 2016gkg; Bersten et al. 2018)

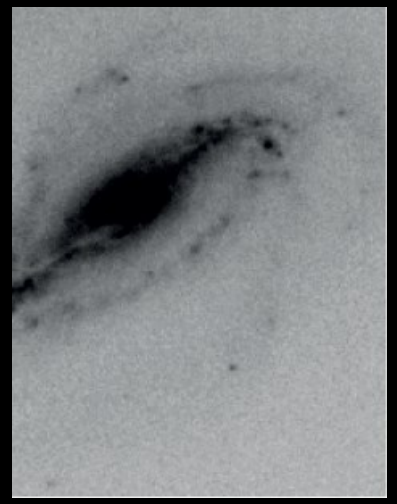
- アルゼンチンのアマチュア天文家の発見
  - 自宅の 40 cm 望遠鏡に搭載した新しいカメラの試験中、偶然超新星が出現

  → ショック・ブレイクアウトの瞬間を捉えた！

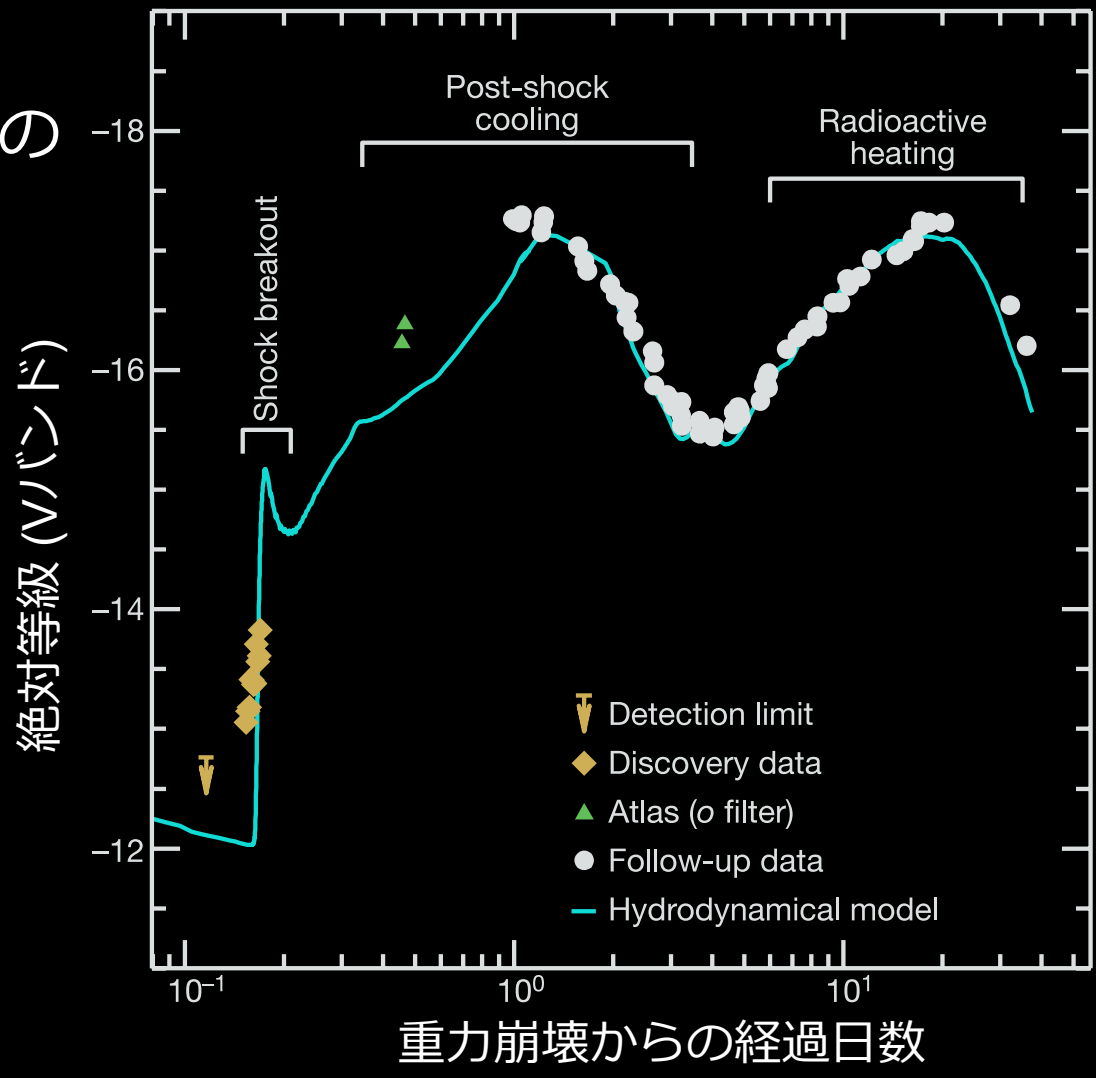
  (超新星爆発に伴う衝撃波が恒星表面を破った瞬間)
- 運が良いとこういう発見が出来るかも?



2016-09-20 04:44 UT



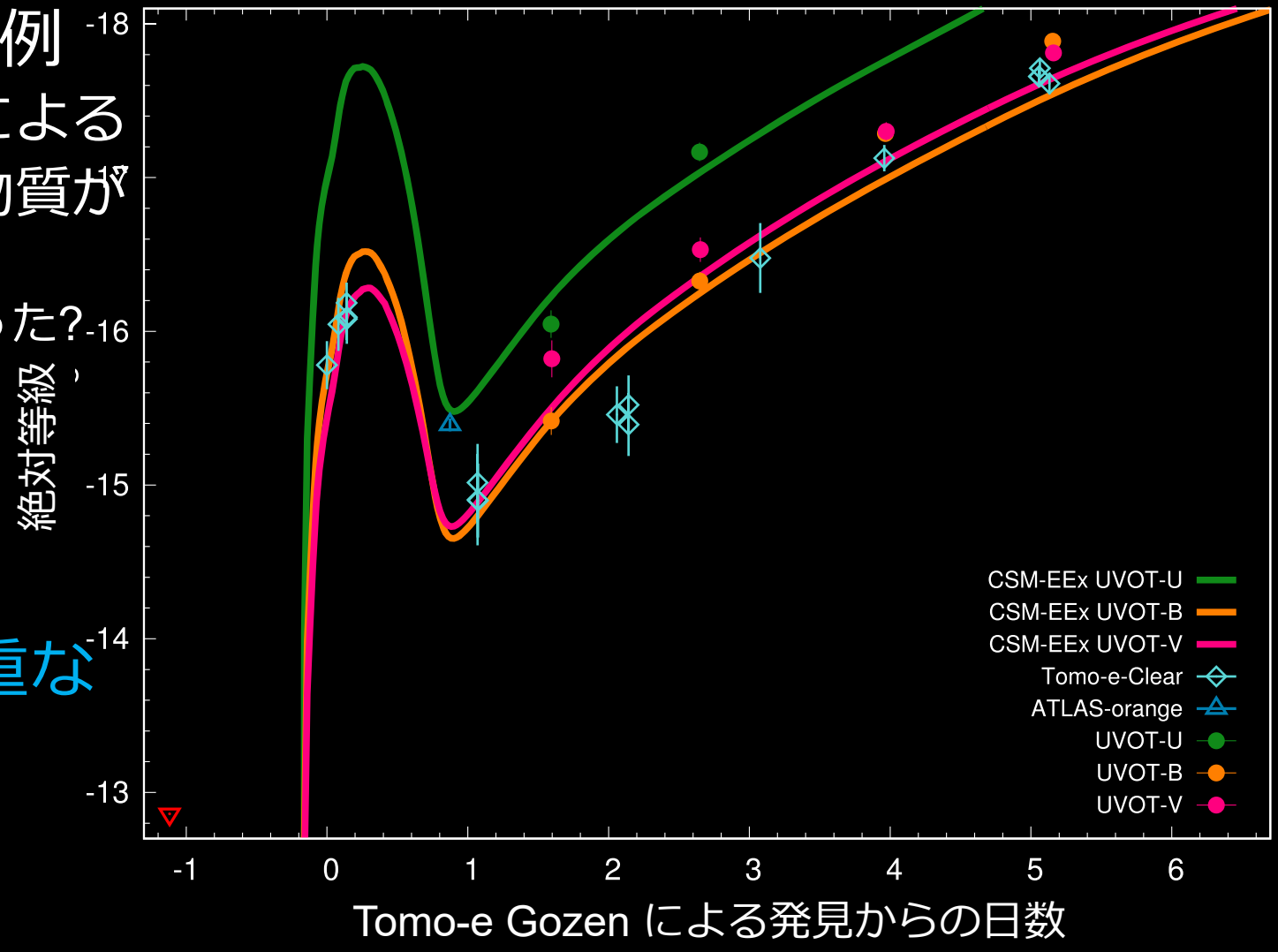
2016-09-20 05:57 UT



Ia 型超新星 SN 2020hvf (Jiang et al. 2021)

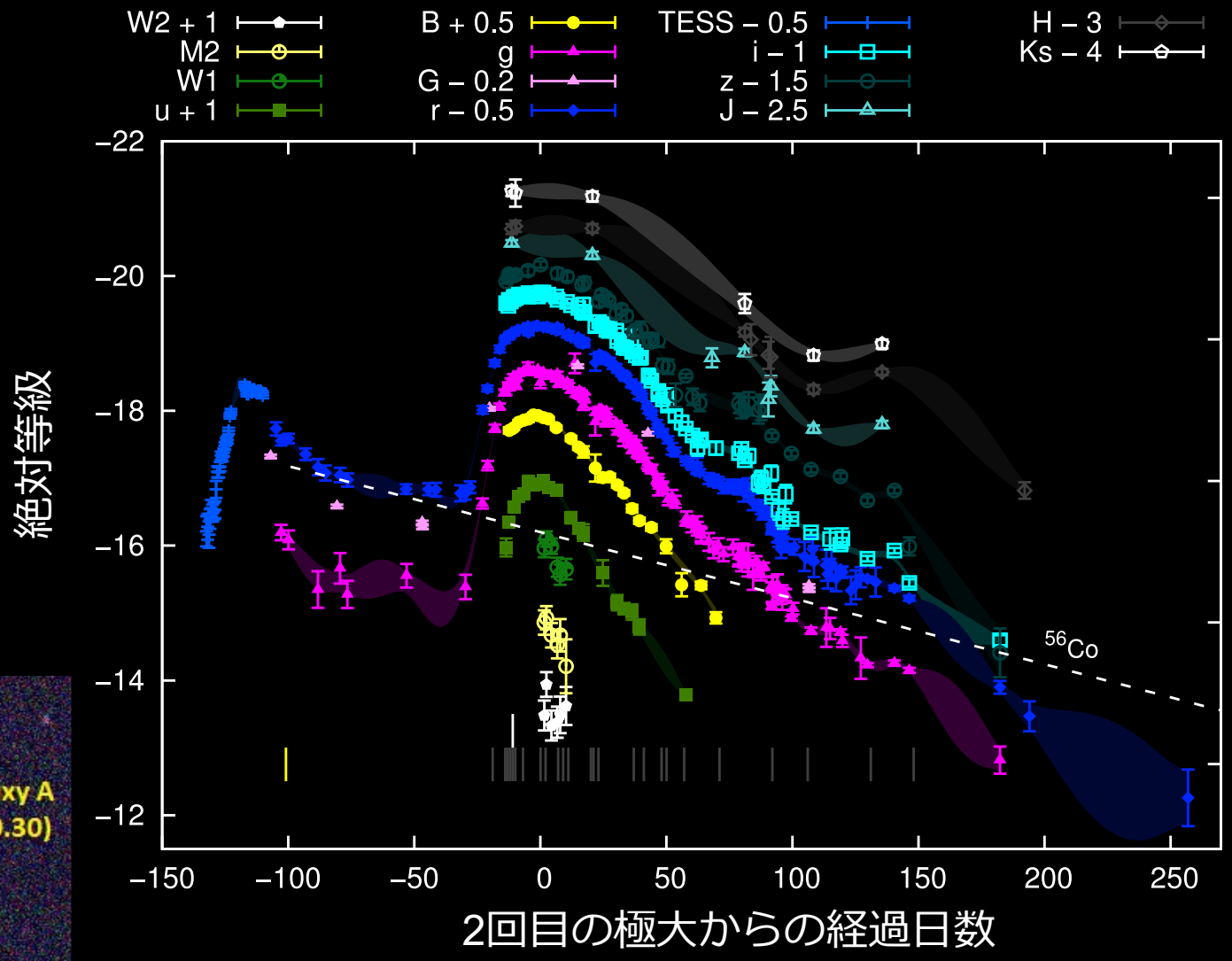
- 超新星爆発直後に明るくなった例
  - 東大木曽観測所 Tomo-e Gozen による
  - 0.01 $M_\odot$ ($M_\odot$: 太陽質量) 程度の物質が爆発前から周囲に存在した?
    → 超新星爆発とぶつかって明るくなった?
- **初期の測光データも貴重！**
  - スペクトルはもっと貴重

→ 発見報告が遅れたとしても貴重なデータになるかも



後期になって特異な変動を示す超新星の例: SN 2023aew (Kangas et al. 2024)

- 1度目の「超新星爆発」
  - 最初は IIb 型超新星と判定された
    → その後は注目されず
- 4か月後、2度目の「超新星爆発」
  - Ic 型のスペクトルを示した
    → 一気に観測されるように
- **この光度曲線の正体: 未解明**
- こんな天体を見つけたら報告?

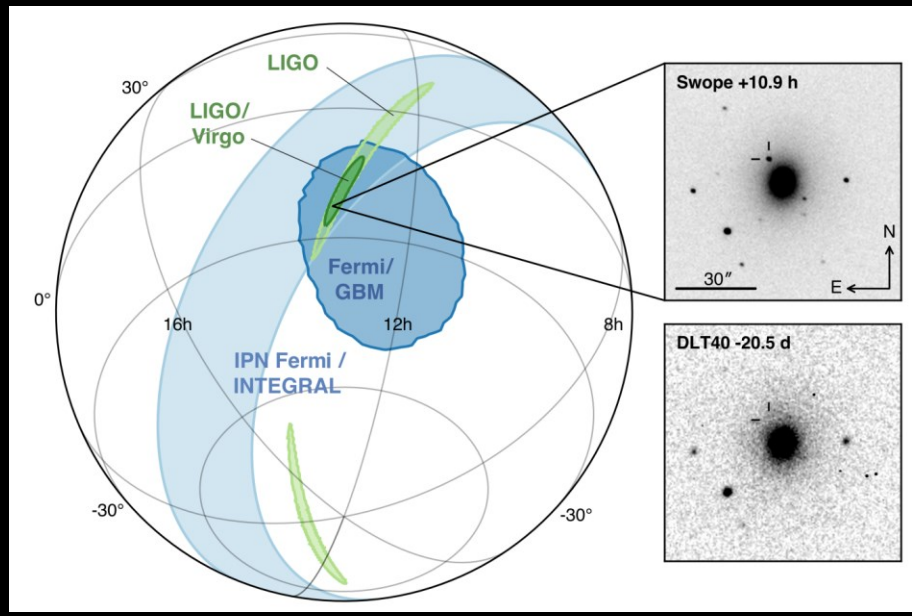


銀河の外れに位置しており、
2つの超新星が偶然同じ所に
発生したとは考えにくい

重力波源 × 電磁波観測

- GW 170817 (連星中性子星合体に伴う重力波)
  - GRB 170817A (ガンマ線バースト)
  - AT 2017gfo (キロノバという可視光突発天体)
- 重力波と可視光からは、別々の情報が分かる
  - 重力波 → 合体前後の連星の質量など
  - 可視光 → 温度・組成・...
- 重力波は解像度が悪い！
  → **可視光サーベイ**で対応天体を発見することが必須

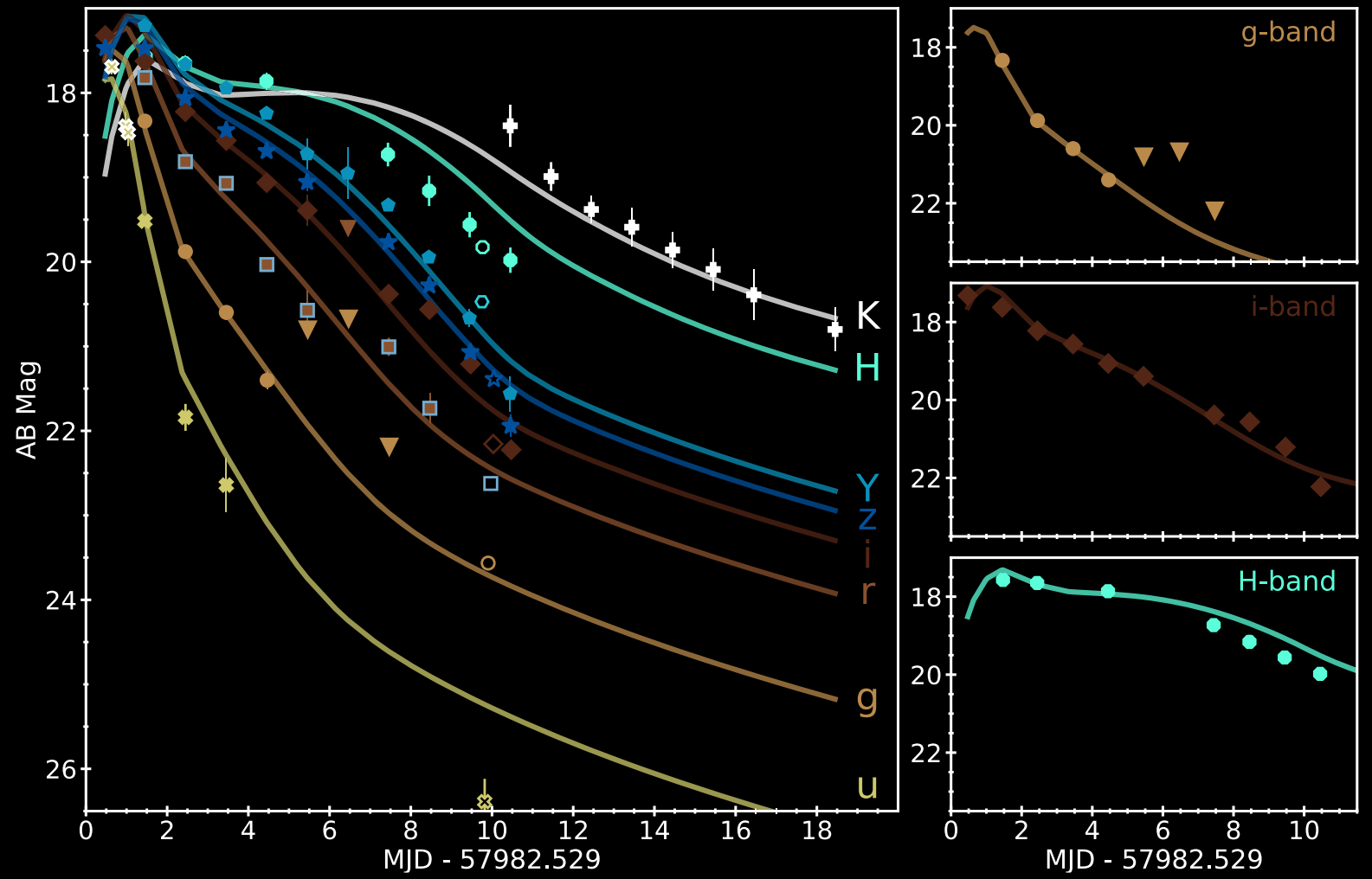
Abbott et al. (2017)



- 現状、可視光で対応天体が特定されたのは GW170817 の 1 天体のみ
  → 更なる観測例が求められている
    - 中性子星とブラックホールの合体による電磁波対応天体が見つかれば史上初の快挙となる

GW170817 の光度曲線 (Cowperthwaite et al. 2017)

- 可視光では1週間くらいで暗くなってしまう

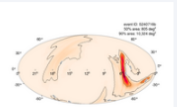
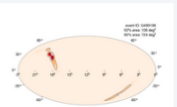
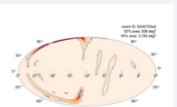
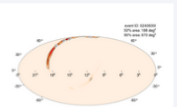
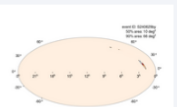


LIGO/Virgo/KAGRA による重力波アラート

- Grace DB (https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O4/) にて公開
  - 気になる方は見に行ってみてください

GraceDB Public Alerts Latest Search Documentation Login

Please log in to view full database contents.

Event ID	Possible Source (Probability)	Significant	UTC	GCN	Location	FAR	Comments
S240716b	BBH (>99%)	Yes	July 16, 2024 03:49:00 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 4.0307e+07 years	
S240705at	BBH (>99%)	Yes	July 5, 2024 05:32:15 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 4.4755e+07 years	
S240703ad	BBH (>99%)	Yes	July 3, 2024 19:13:55 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 2.6751e+05 years	
S240630t	BBH (>99%)	Yes	June 30, 2024 10:17:03 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 16736 years	
S240629by	BBH (91%), NSBH (8%)	Yes	June 29, 2024 14:52:56 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 100.04 years	

新星と矮新星の見分け方 (極大等級)

- 新星: **極大での可視絶対等級は –6 ~ –9 等くらい**
  - → 典型的な見かけの極大等級 (星間吸収が無い場合)
    - M31: 18.5 ~ 15.5 くらい
    - 銀河系内: 仮に 10 kpc (約 30000 光年) だとして、+9 ~ +6 等くらい (近いものはもっと明るい)
  - 「星間吸収が無い方角なのに 12 等」とかだと、新星の可能性は低い
    - 100 kpc くらい離れていることになる (銀河系を飛び出してしまう)
    - しかし、増光途中 (今後もっと明るくなる天体) の可能性もあるので注意
  - いて座・さそり座・へびつかい座とかだと、星間吸収で (どこまでも) 暗くなれる
    - 星間吸収計算の便利ツール: https://ned.ipac.caltech.edu/extinction_calculator
- 矮新星: どんだけ明るくても +1 等よりは暗い (by 磯貝さん)

新星と矮新星の見分け方 (爆発前の天体の特徴)

- **矮新星: 青い**
- 新星: 色々考えられる
  - 降着円盤が強い場合は青い
  - 伴星が強い場合は赤い
  - 共生星の場合もある
  - 銀河中心方向だと、本当は青くても星間赤化で赤くなるものも多い

新星と矮新星の見分け方 (例: V1405 Cas の場合)

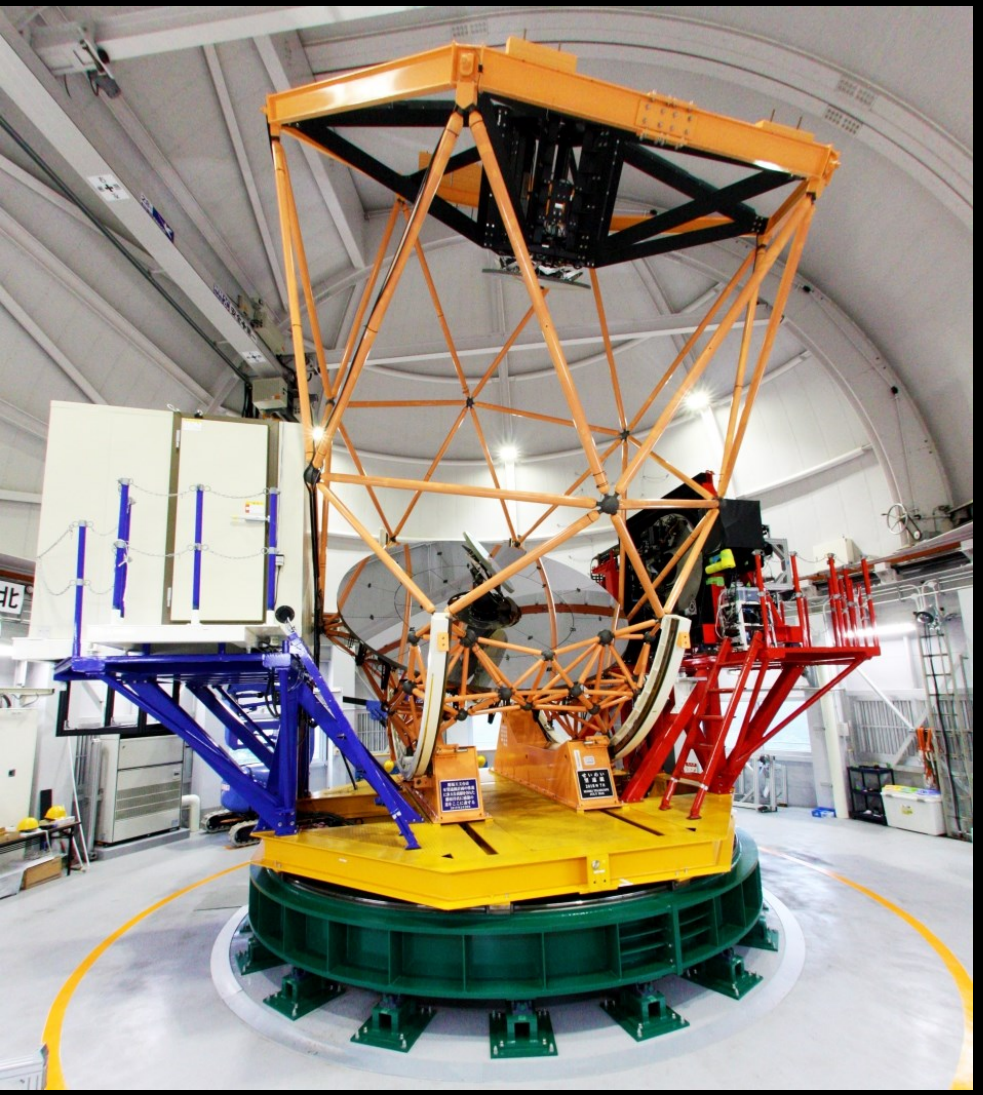
- 爆発前: g ~ 15.7, r = 15.5, i = 15.4 等 (Pan-STARRS のカタログデータ)
  → 結構青い (色からだと矮新星・新星どちらも考えられる)

- 発見等級: 9.6 等 (中村さん)
- 距離: 1.7 kpc (Gaia による年周視差!)
  → 見かけの等級と絶対等級の差は 11 くらい

→ **発見の時点で絶対等級は 0 より明るく、矮新星っぽくない**
  → PNV として報告された
    - 実際は星間吸収により更に 1 等くらい明るいのが正しい

- 爆発前の天体の年周視差が Gaia で求められている場合は分かりやすい

エクスカーション: せいめい望遠鏡



- 口径 3.8 m (国内最大) の光学望遠鏡
  - すばる望遠鏡 (8.2 m) は日本の物だがハワイ在住
- 技術的挑戦
  - 扇型の**分割鏡**
  - 超精密研削による鏡加工
  - 軽い架台

  → **秒速 4 度くらいで回転する (結構爆速)**
- 科学的目標
  - 突発天体現象 (新星、超新星、重力波源、...)
  - 太陽系外惑星

  などなど色々ある。