

新星の偏光分光観測

新井 彰

京都産業大学 神山天文台

Email: arai6a@cc.Kyoto-su.ac.jp

新星

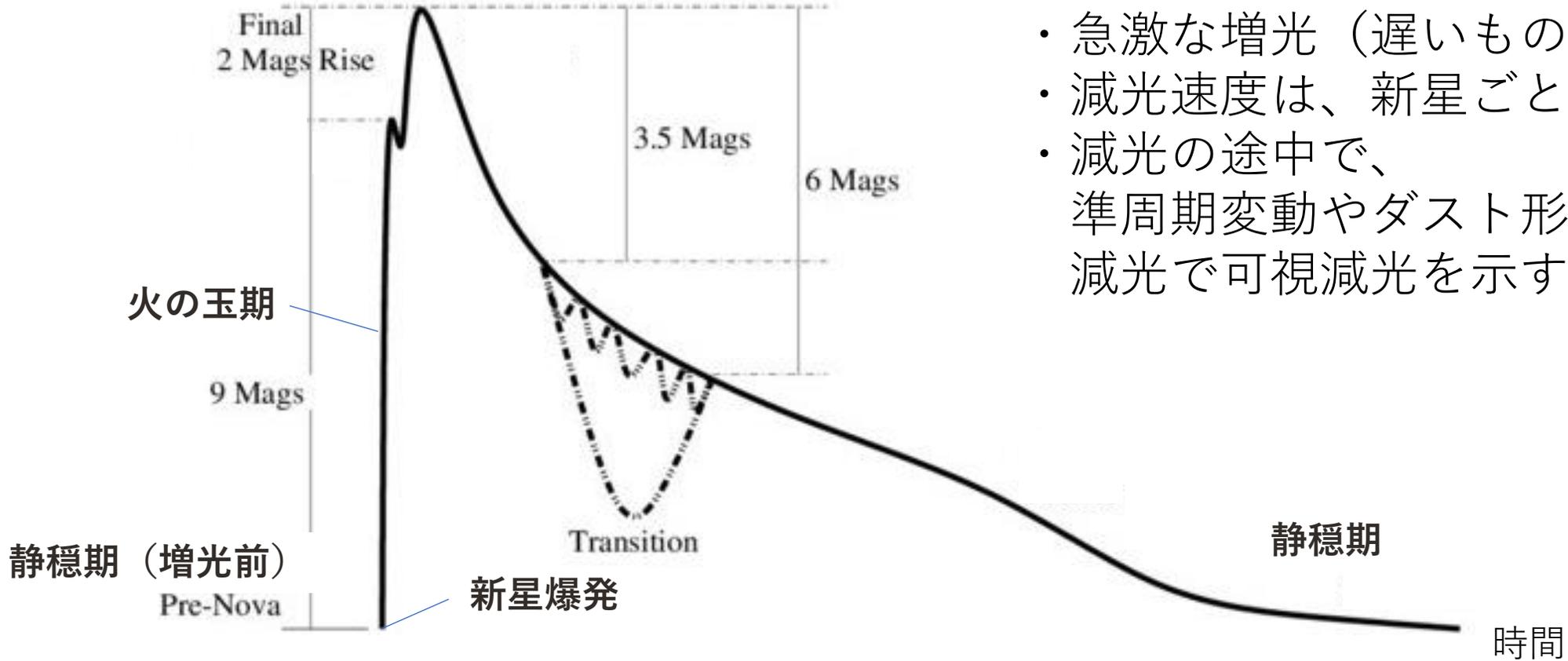
- 激変星の一種
- 近接連星系におけるWD表面の熱核暴走反応によって引き起こされる質量放出を伴う増光現象
- 銀河系の化学進化に寄与

Ejecta mass: $\sim 10^{-6} \text{ Mo to } 10^{-4} \text{ Mo}$ (depends on WD mass)
Ejecta Speed: from $\sim 300 \text{ km/sec}$ to $\sim 8000 \text{ km/sec}$

HARDY

新星の光度曲線

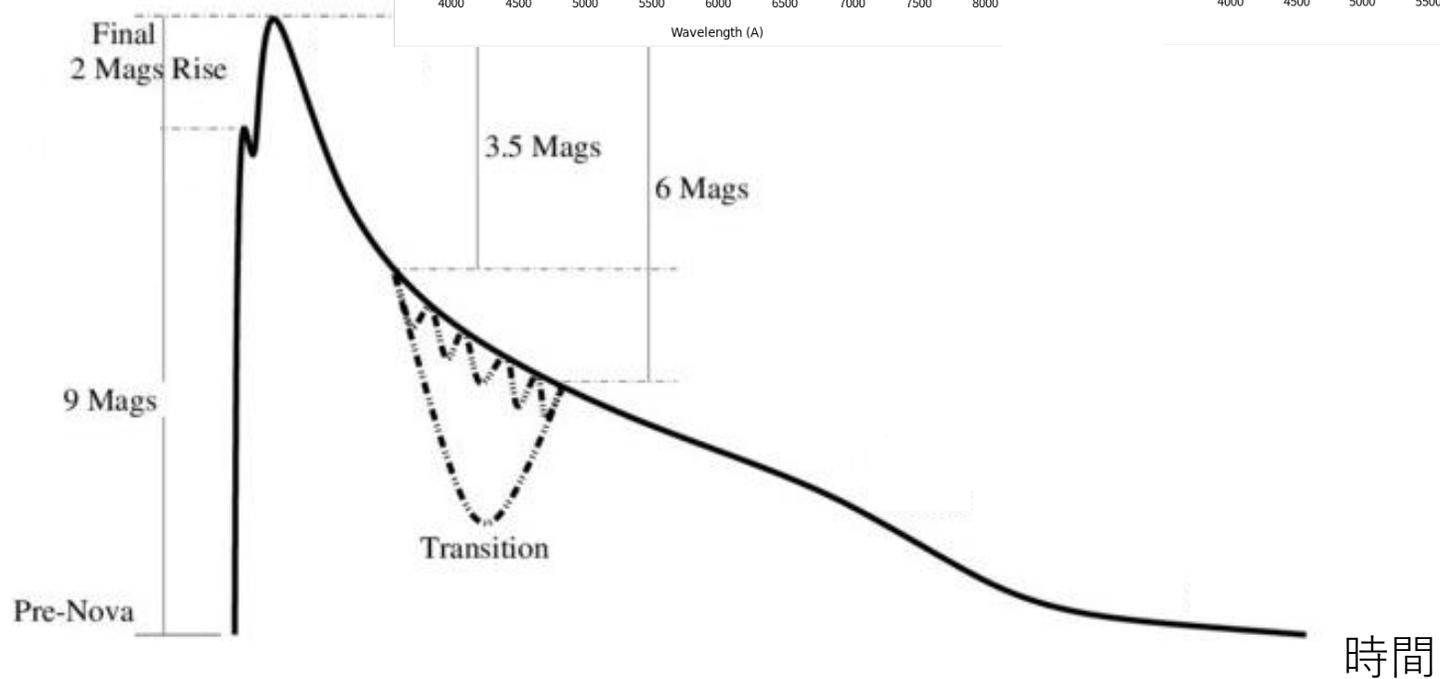
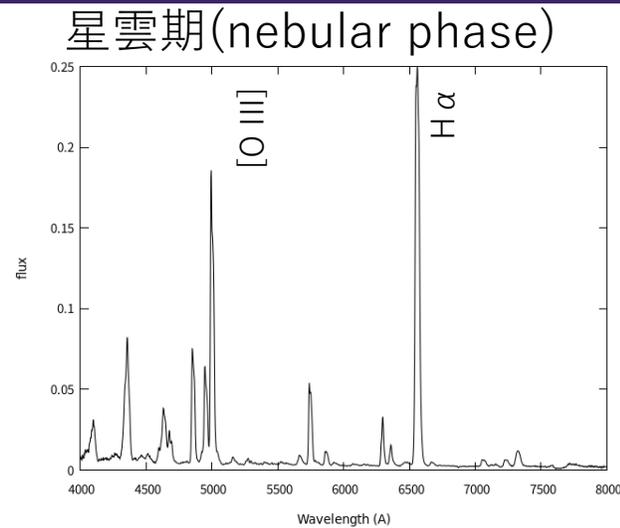
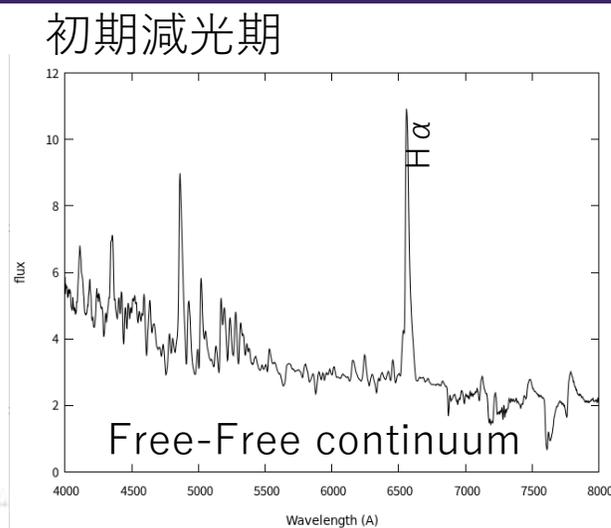
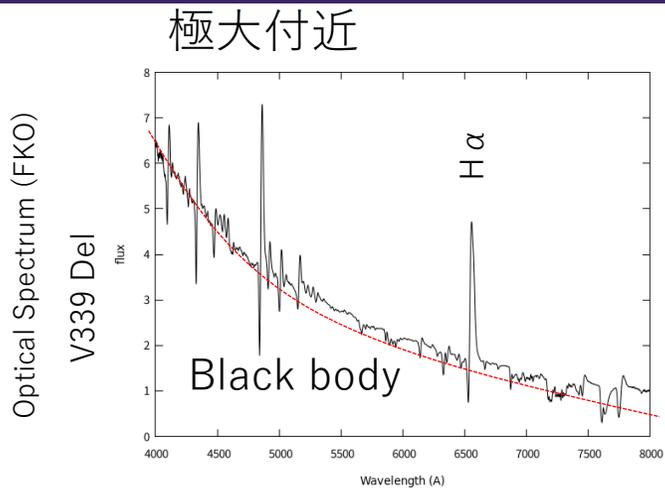
可視極大 (T~10,000 K)



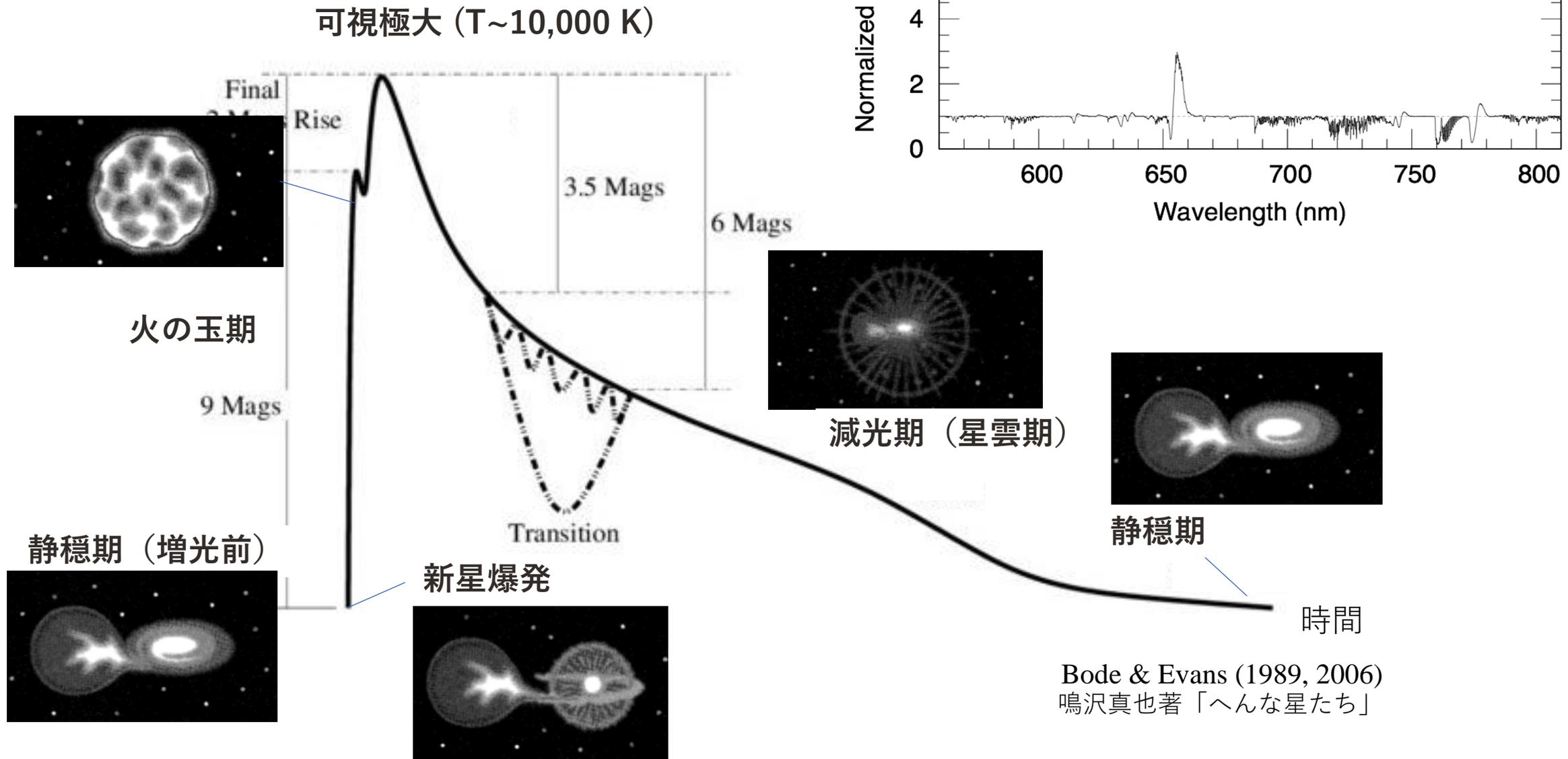
- 急激な増光 (遅いものもある)
- 減光速度は、新星ごとに異なる
- 減光の途中で、
準周期変動やダスト形成による
減光で可視減光を示す天体もある

Bode & Evans (1989, 2006)

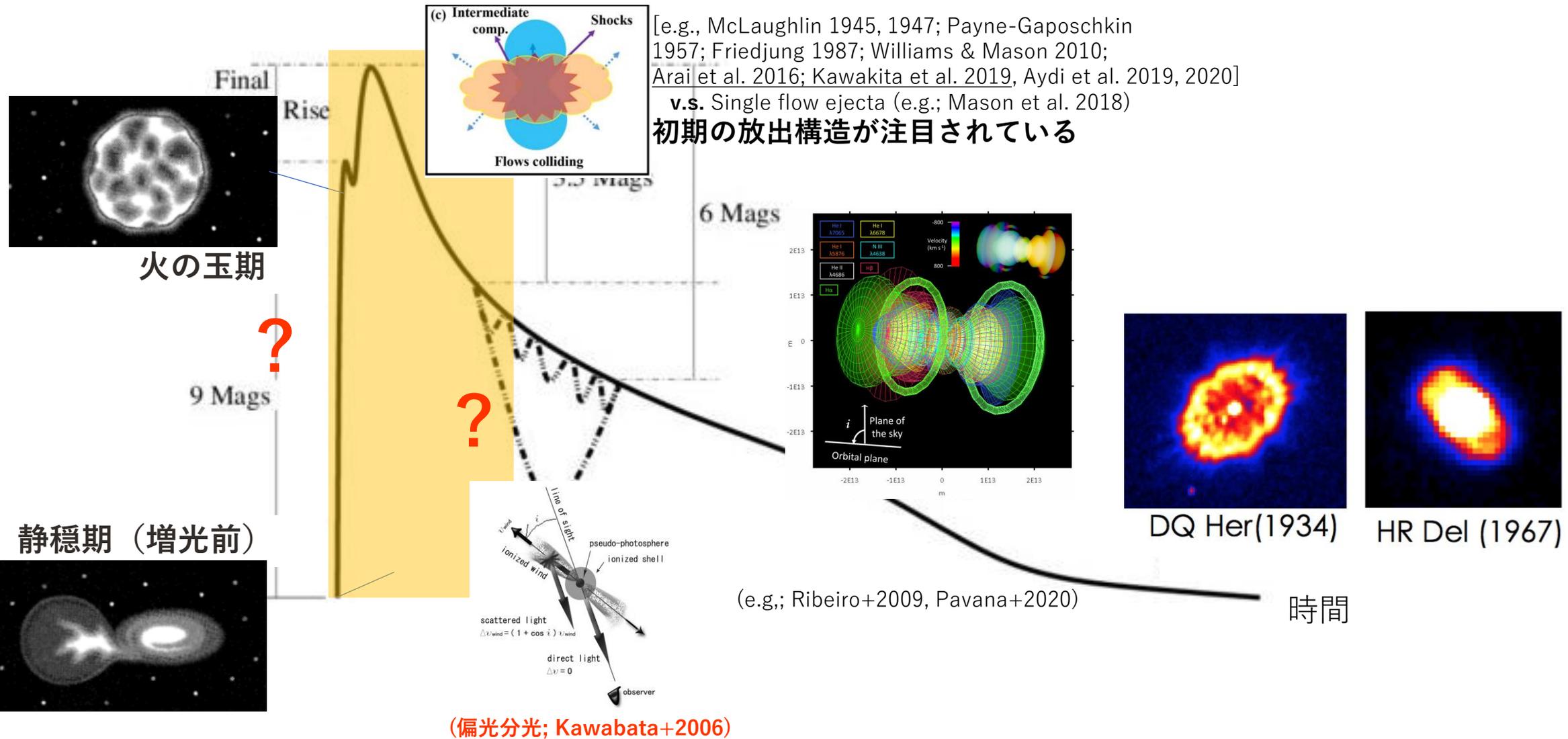
新星のスペクトル変化



新星の光度曲線と構造



新星の光度曲線と構造



なぜ爆発の初期が面白いのか？

- 爆発直後～極大期のジオメトリはよくわかっていない。
→ いつ、どのようにして Bipolar flow になるのか？
- 初期の増光中の放出構造。
 - Wolf-rayet 的な外層 (Arai+2015)
 - 極大前に輝線フェーズあり (e.g., Tanaka+2011, Imamura+2012)
 - イジェクタの構造モデル (e.g.; Hachisu+2016, Li et al. 2017), TNRによる対流モデル (e.g.; Jose et al. 2020) の検証など
- ${}^7\text{Be II}$, ${}^7\text{Li II}$ や CN, C_2 , CO 分子の吸収線から同位体元素の組成が測定できる。
ダスト形成を起こす新星もある (全体の ~25%)。
→ より詳しい放出量を推定するには構造を知りたい



現時点では、球対称を仮定している
新星爆発モデル, TNRモデルの評価

新星の核合成と銀河の化学組成

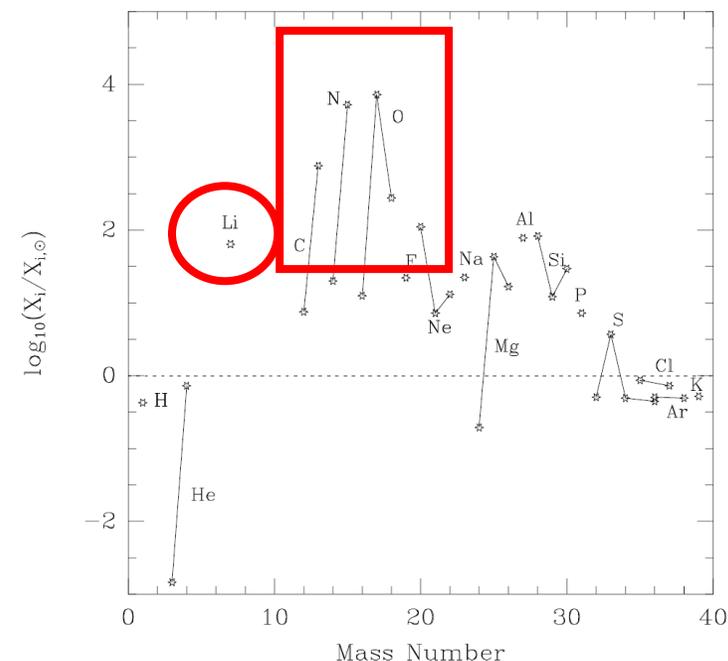
- 銀河の新星発生: $\sim 30 \text{ yr}^{-1}$
- 銀河の年齢: $\sim 10^{10} \text{ yr}$
- 新星の1個あたりのイジェクタ質量: $\sim 2 \times 10^{-5} M_{\odot}$
 $\sim 6 \times 10^6 M_{\odot}$: 銀河のガス & ダストの約1/3000程度

José+(1998)

大部分の元素に関しては、
銀河の化学進化に及ぼす影響は僅か。

しかし、一部の同位体元素(${}^7\text{Li}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$ など)の
組成比は太陽組成の100~1000倍。

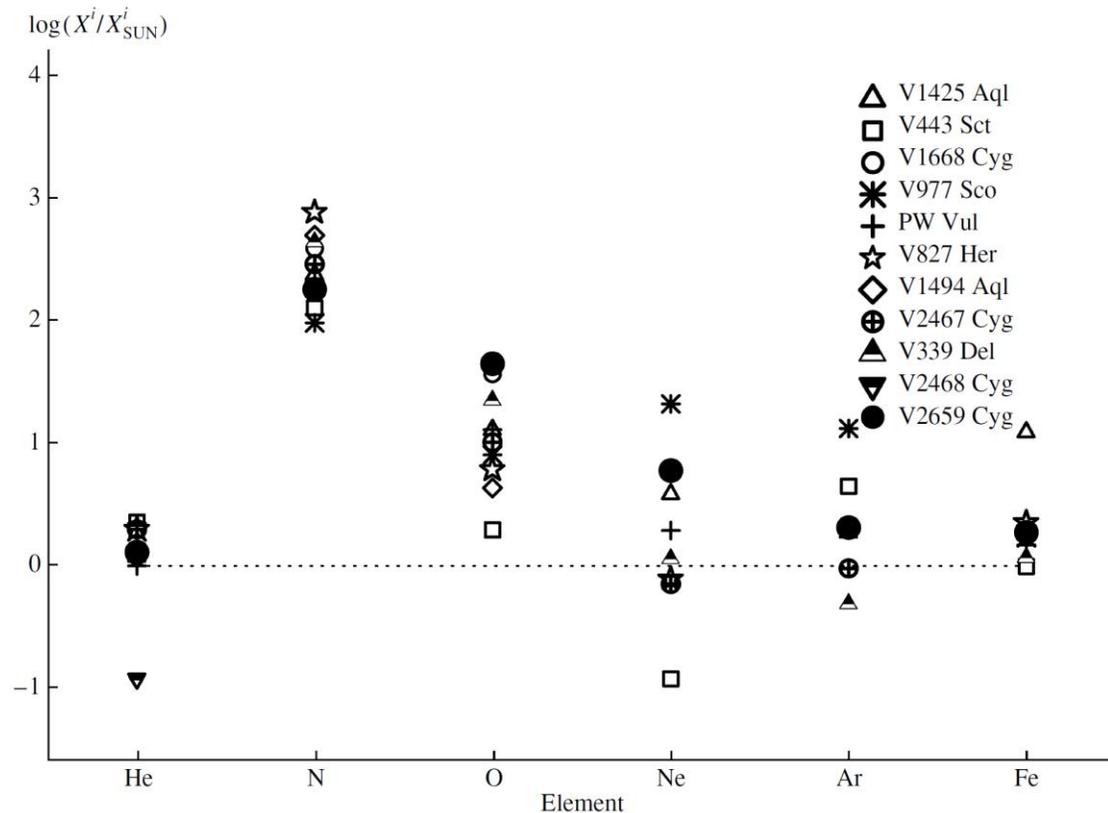
→ 銀河の化学進化に寄与



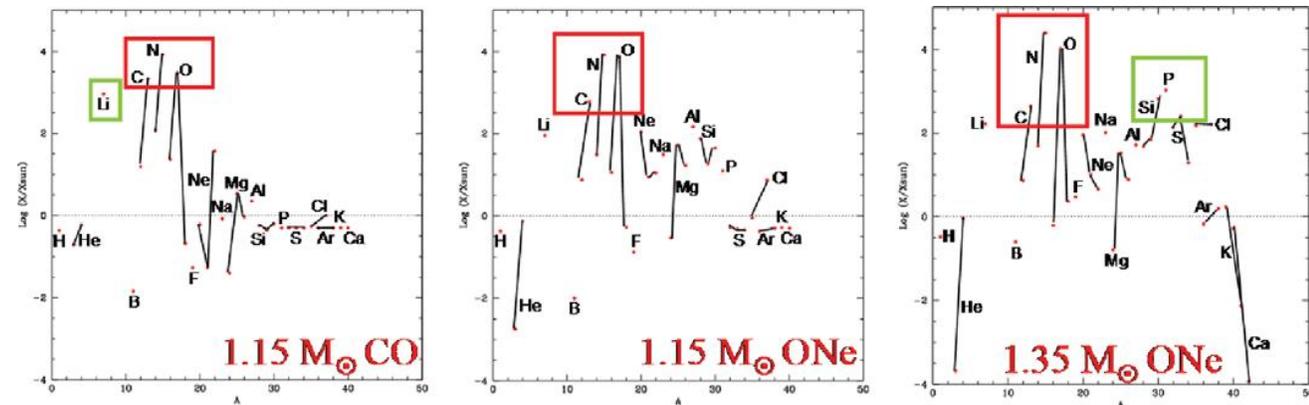
新星の化学組成

- CNOの過剰
- hot-CNO反応によるCNO元素同位体の組成過剰

観測値： Tarasova *et al.* (2016)



理論計算： José *et al.* (2013)



新星による ${}^7\text{Li}$ の合成・放出

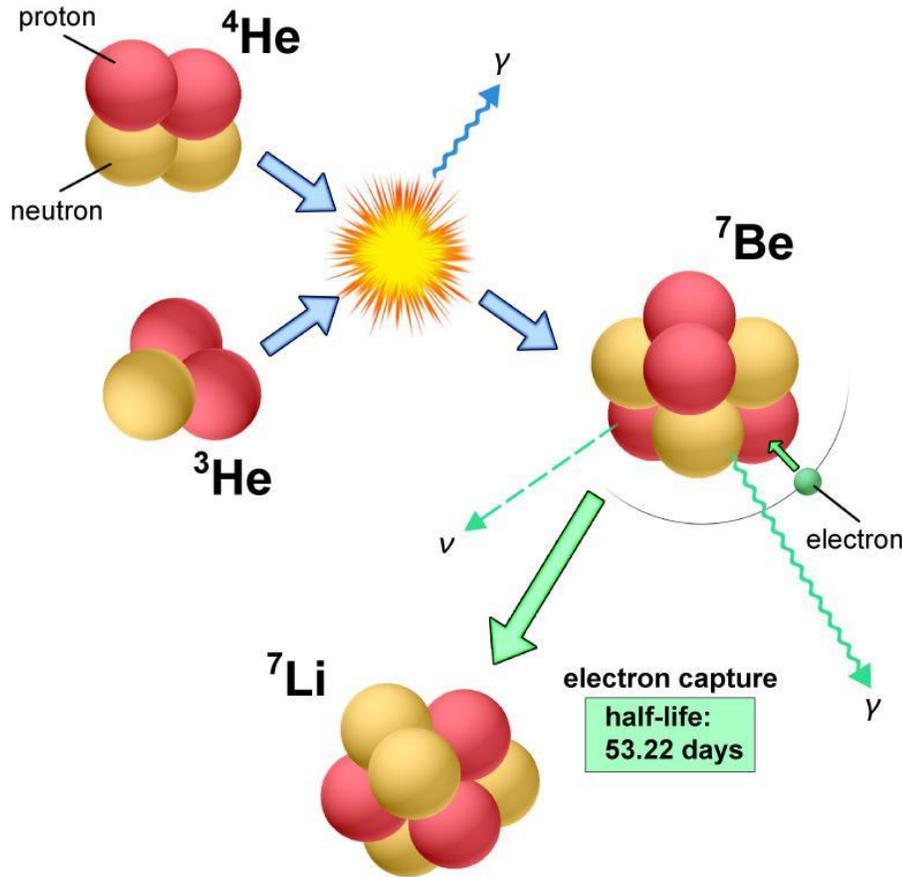
理論的な予言:

Cameron & Fowler (1971), ApJ 164, 111

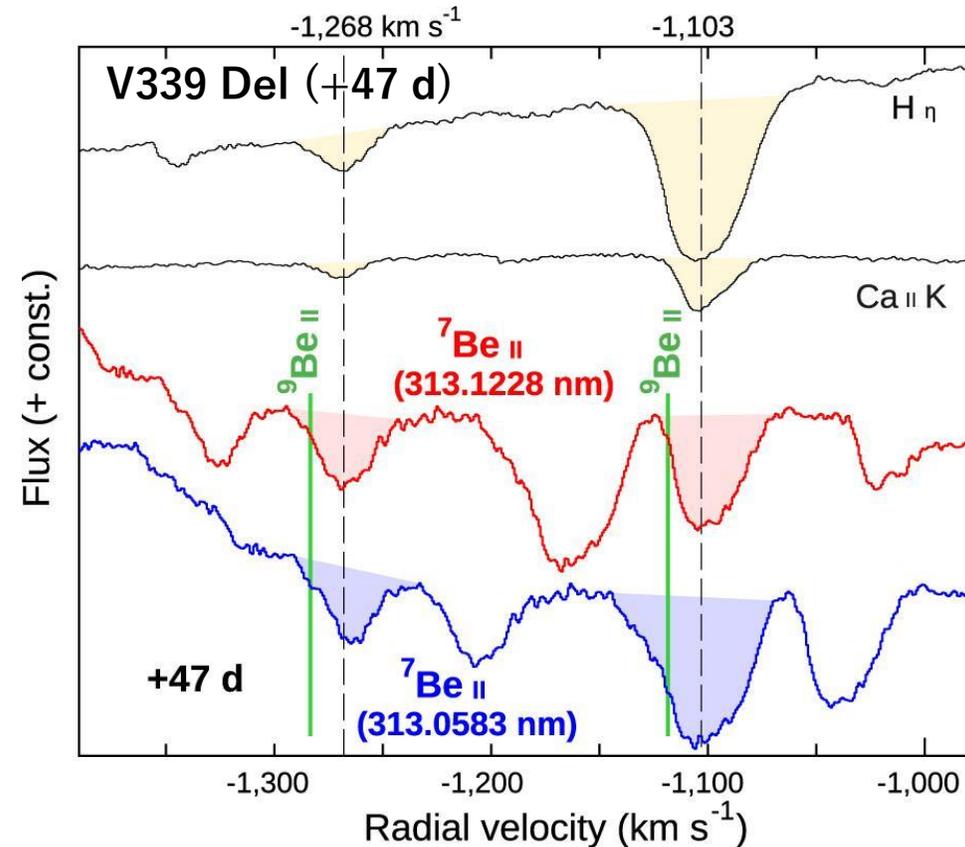
Starrfield+(1987), ApJ 222, 600

Tajitsu+2015, 2016; Izzo+2015, 2018,
Molaro+2016,2020; Selveli+2019; Arai+ in prep.

爆発+7~80d という比較的初期に検出される。

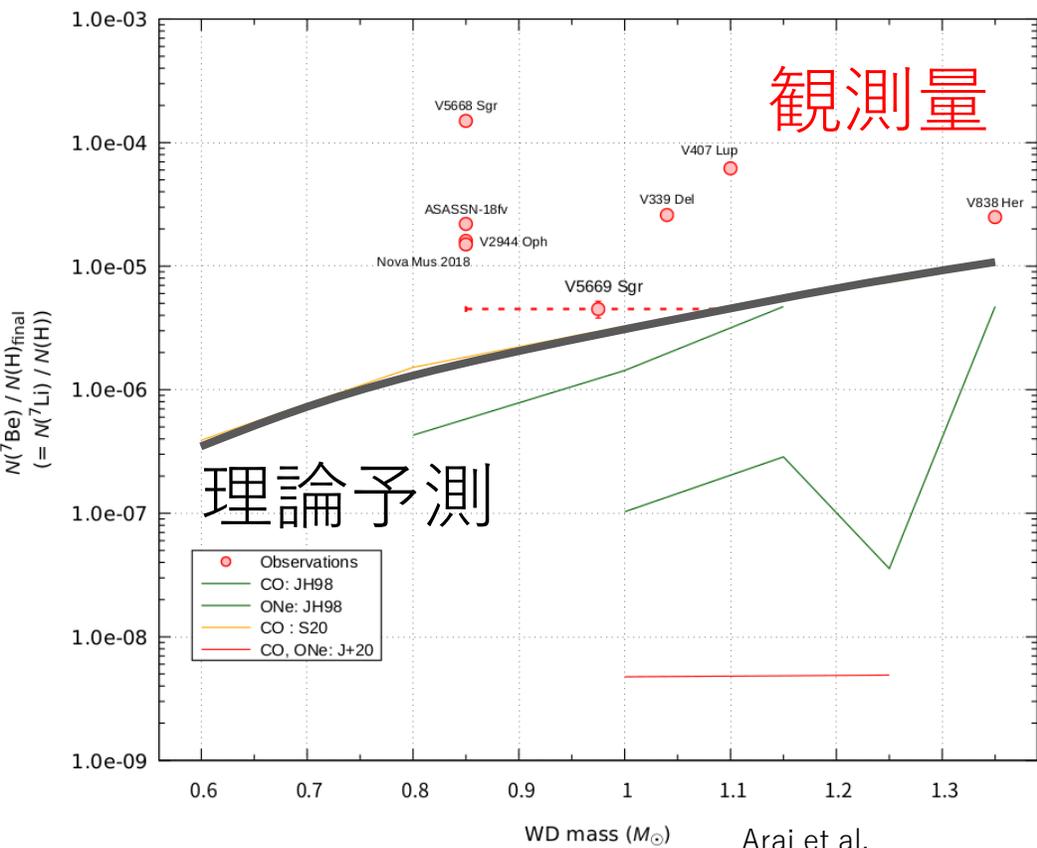


Credit : NAOJ



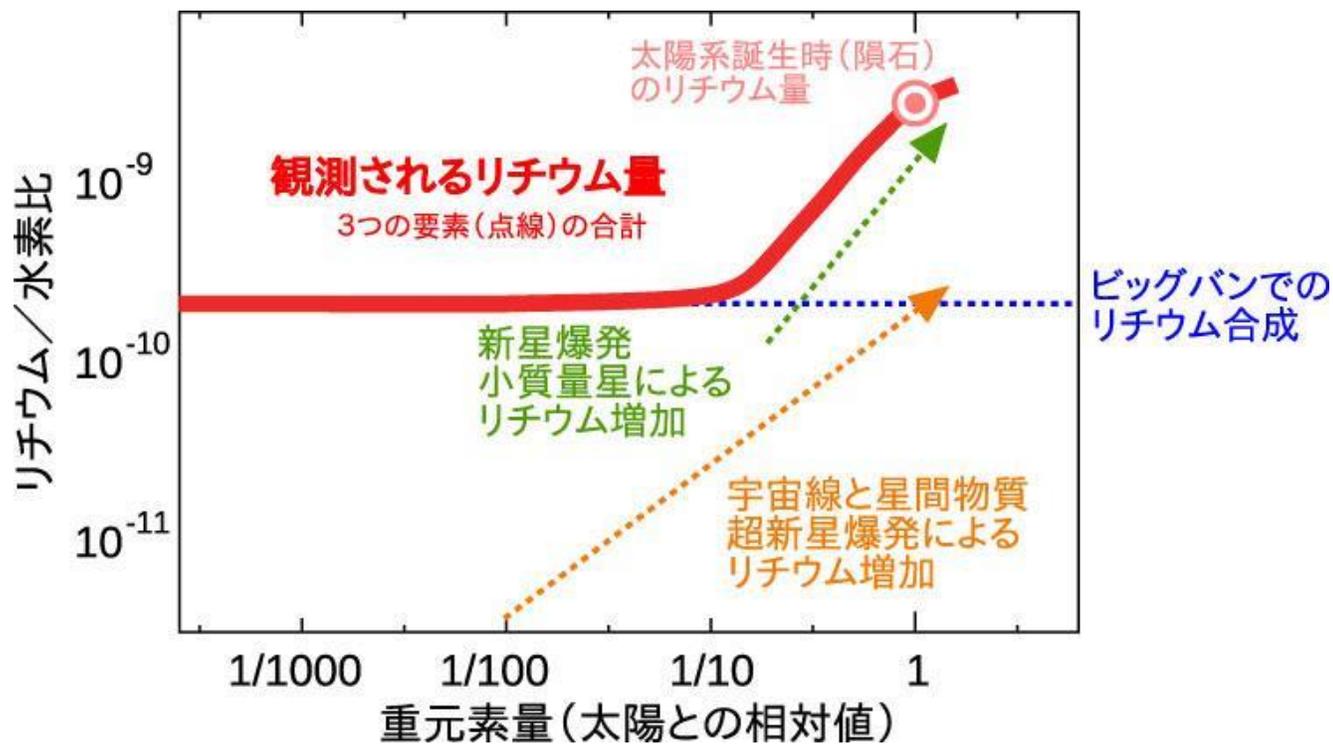
Tajitsu+ (2015), Nature, 518, 381

新星と銀河のリチウム量の進化



Arai et al.
submitted to ApJ.

リチウムの組成比は理論予想よりもかなり多い

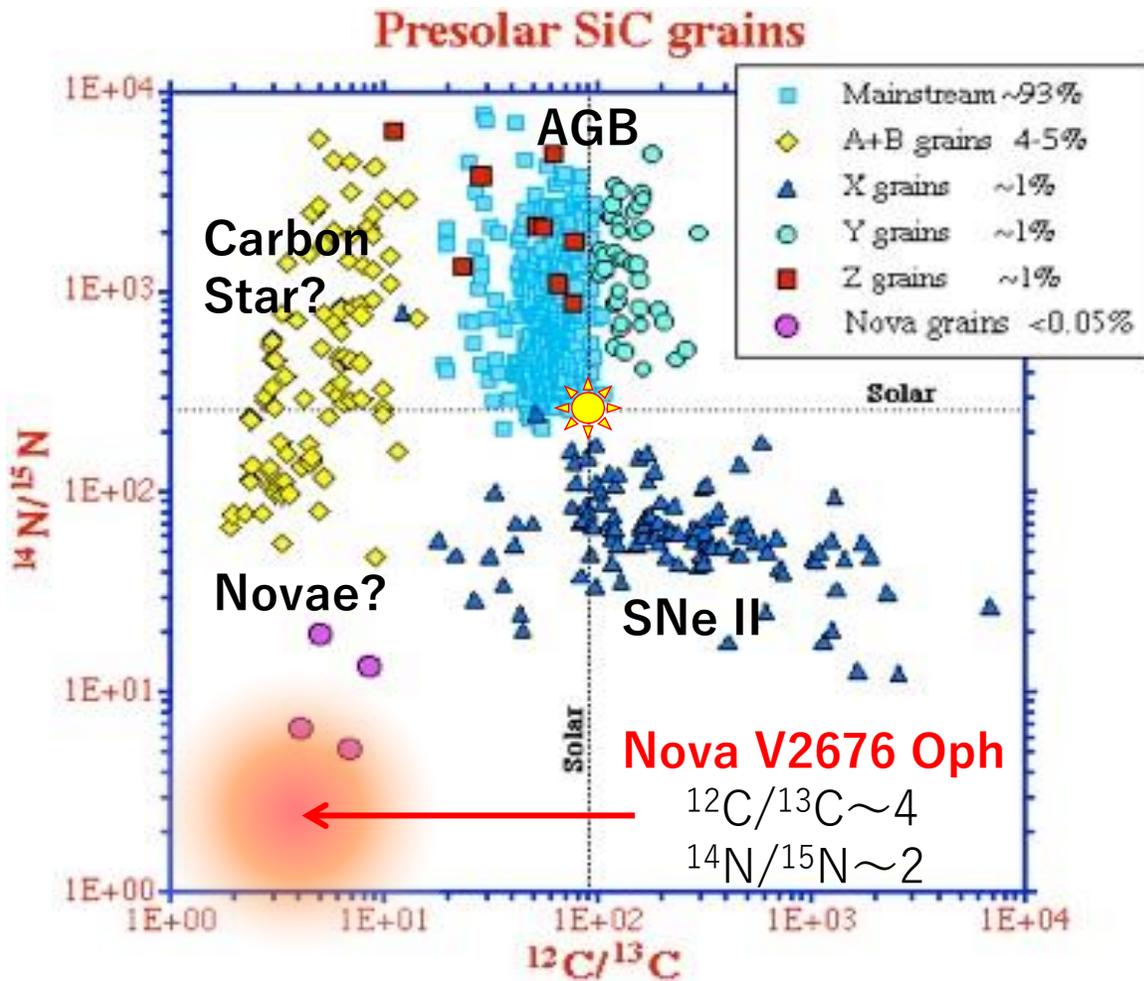


(クレジット: 国立天文台)

<https://www.subarutelescope.org/jp/results/2015/02/18/936.html>

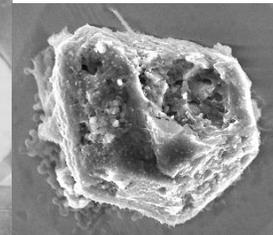
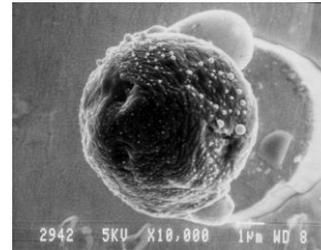
小質量星起源のリチウムは、新星が主要な起源だろう
[e.g.; Cescutti & Molaro 2019, MNRAS, 482, 4372]

炭素・窒素の同位体：プレソーラー粒子との関係



The figure of isotopic ratios of pre-solar grains are quoted from Jose + (2004).

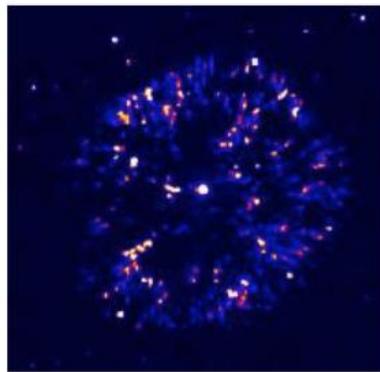
- 爆発初期に現れる分子スペクトルから、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ や $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の同位体組成比が得られる
- プレソーラー粒子と近いものもある
→ 太陽系の起源に関係?
(e.g., Kawakita+2015, Kawakita & Arai 2017)



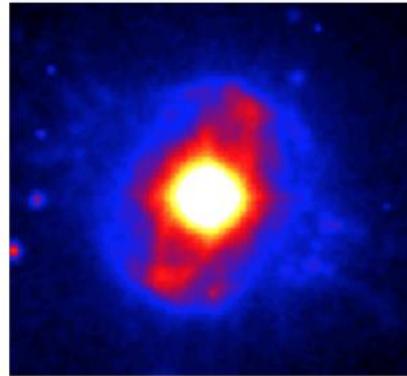
Nova	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	Molecule	References
DQ Her	≥ 1.5	≥ 2	CN	Snedden & Lambert (1975)
NQ Vul	> 3		CO	Ferland et al. (1979)
V842 Cen	2.9 ± 0.4		CO	Wichmann et al. (1990, 1991)
V705 Cas	≥ 5		CO	Evans et al. (1996)
V2274 Cyg	1.2 ± 0.3		CO	Rudy et al. (2003)
V2615 Oph	> 2		CO	Das et al. (2009)
V496 Sct	≥ 1.5		CO	Raj et al. (2010)
	-1.3		CO	Rudy et al. (2009, 2012)
V2676 Oph	-4	-2	C_2 , CN	Kawakita et al. (2015)
V5668 Sgr	-1.5		CO	Banerjee et al. (2016)

新星の爆発放出物

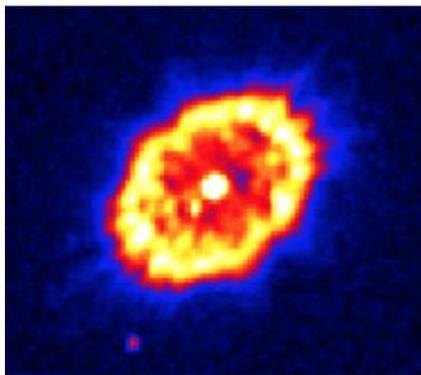
- 多様性に富む爆発放出物の幾何 (爆発後の直接撮像や分光観測より)
- 極大付近でのガンマ線の検出 → 爆発から衝撃波までの時間差を示唆



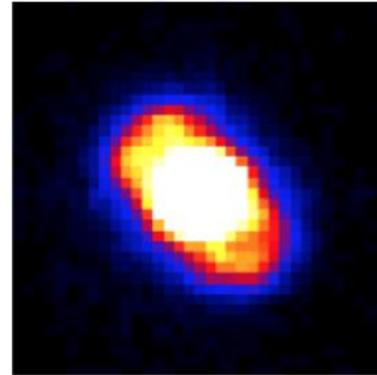
GK Per (1901)



RR Pic (1927)

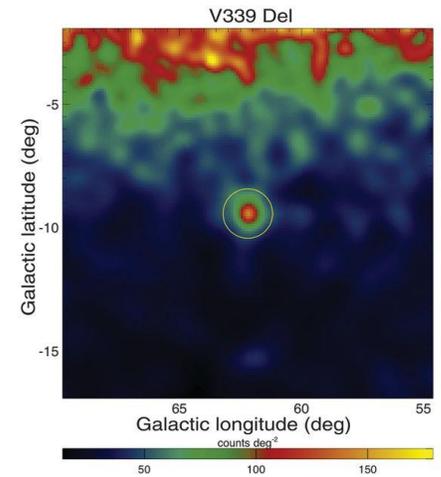
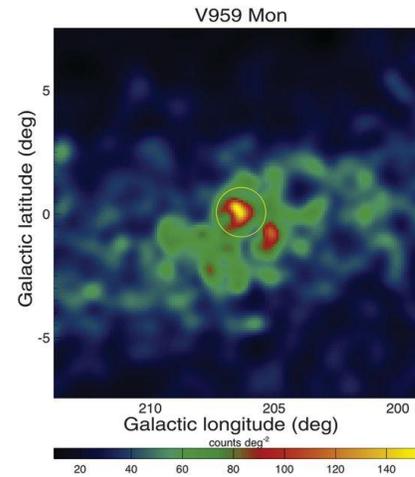
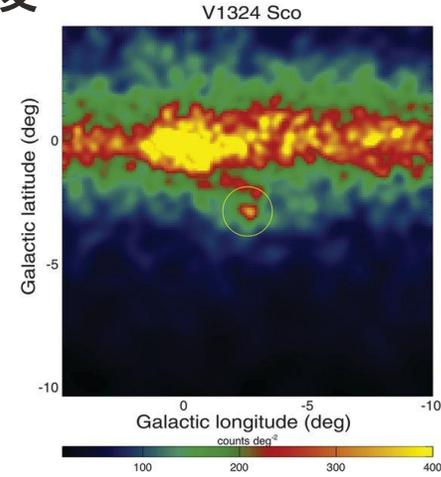
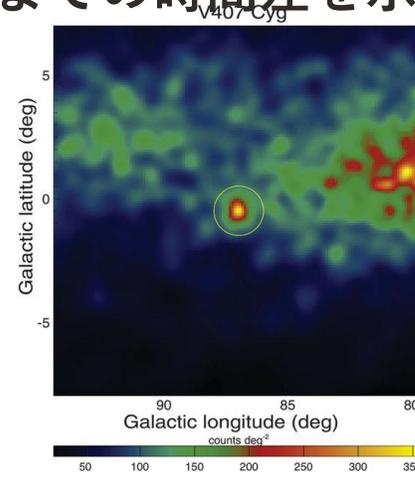


DQ Her (1934)



HR Del (1967)

Gill & O'Brien 1998, 2000; O'Brien & Dunlop 1995

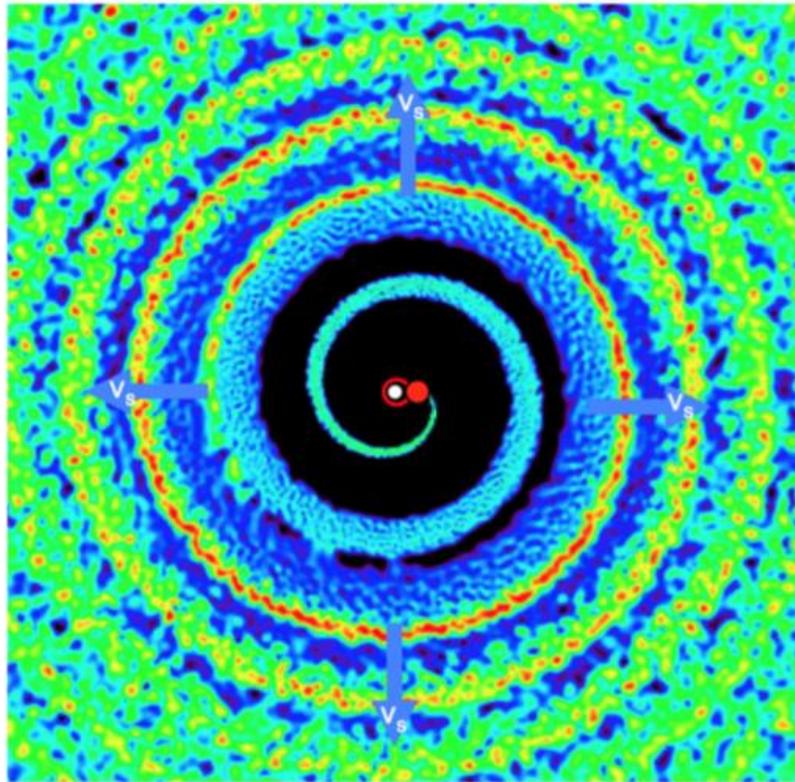


Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

新星の物質放出モデル（2段階放出シナリオ）

Phase I (爆発直後)

L2 (L3) ラグランジュ点から放出される
高密度, 低速度な公転面にスパイラル構造の放出物

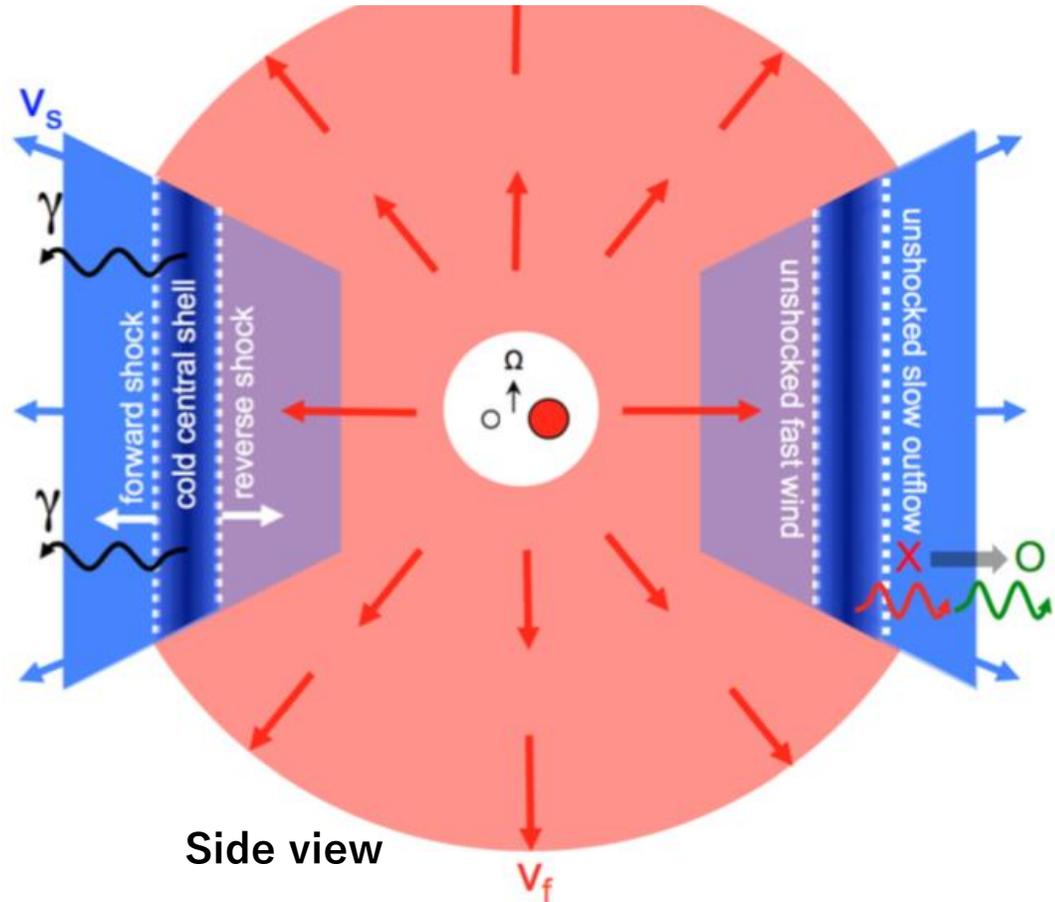


Top view

Li et al. 2017, Nat. Astron., 1, 697

Phase II (可視極大付近)

低密度, 高速度の等方的な放出物
→ 低速度放出物との衝突でガンマ線輝線の放出
+ 温度が冷えてくるとダスト生成

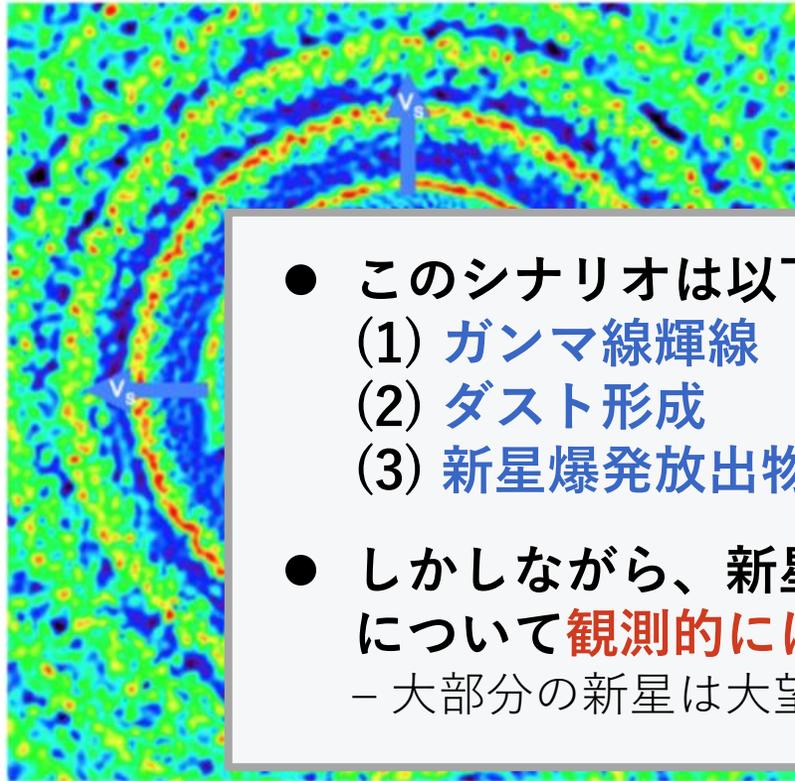


Side view

新星の物質放出モデル（2段階放出シナリオ）

Phase I (爆発直後)

L2 (L3) ラグランジュ点から放出される
高密度, 低速度な公転面にスパイラル構造の放出物

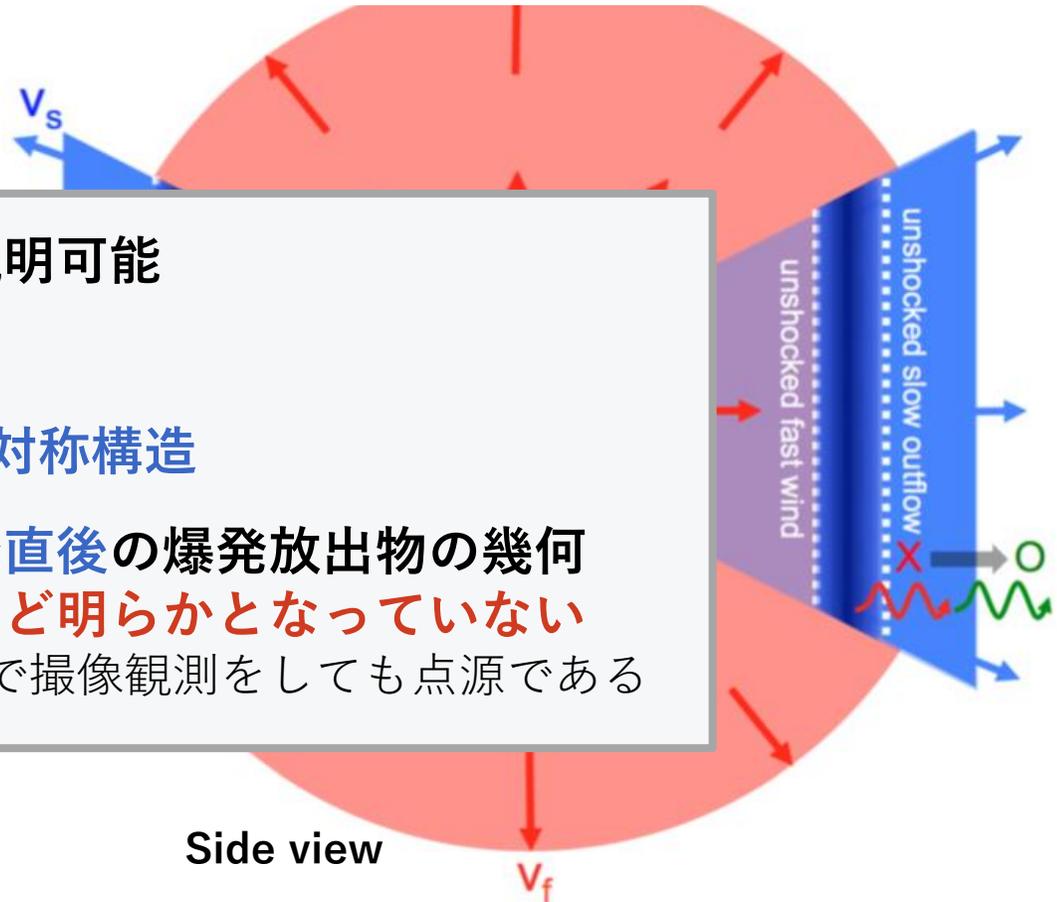


- このシナリオは以下を説明可能
 - (1) ガンマ線輝線
 - (2) ダスト形成
 - (3) 新星爆発放出物の非対称構造
- しかしながら、新星爆発直後の爆発放出物の幾何について観測的にほとんど明らかとなっていない
 - 大部分の新星は大望遠鏡で撮像観測をしても点源である

Top view

Phase II (可視極大付近)

低密度, 高速度の等方的な放出物
→ 低速度放出物との衝突でガンマ線輝線の放出
+ 温度が冷えてくるとダスト生成



Side view

Li et al. 2017, Nat. Astron., 1, 697

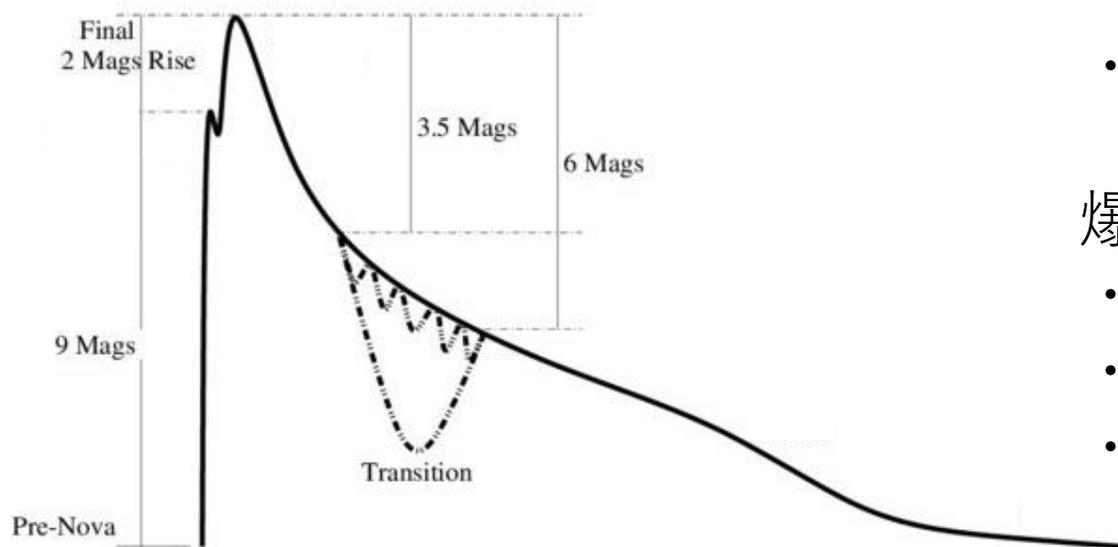
新星の放出物の構造を探る方法

爆発初期

- ・ 干渉計：全体の構造
- ・ 吸収線：視線方向の構造
- ・ **偏光分光：全体構造・視線方向の構造**

爆発中～後期

- ・ **偏光分光：全体像・非対称放出物の構造**
- ・ 星雲輝線の解析 ([O III] など)：全体的な電離ガスの構造
- ・ 直接撮像 (> 10年後)：全体像



偏光分光

干渉計

吸収線

輝線

直接撮像



**偏光分光観測は情報量が多い。
初期の構造を探る上で有用**

新星の偏光分光観測

これまでの新星の偏光分光観測

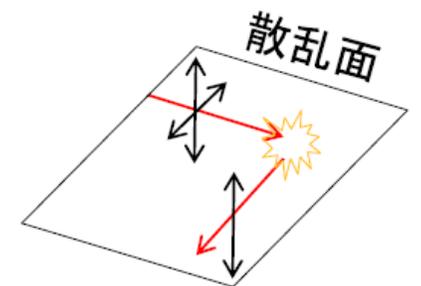
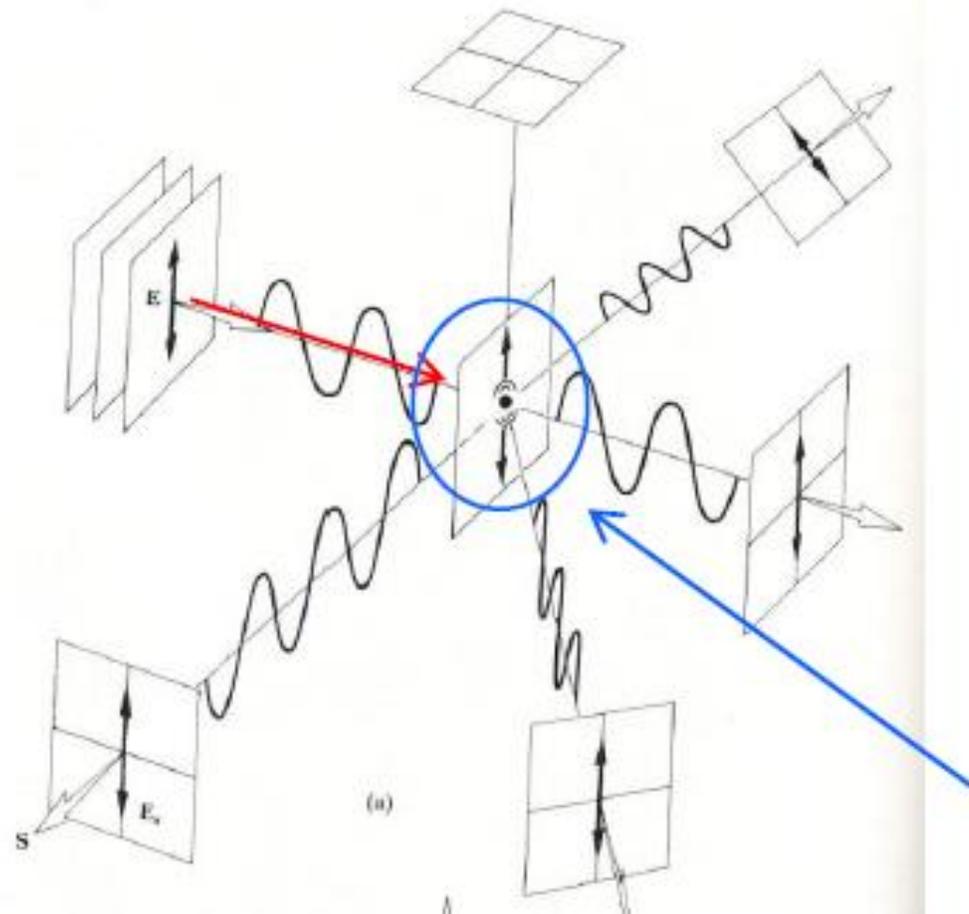
Nova Cyg 1986	Whitney & Clayton (1989), AJ, 98, 297	
BY Cir	Johnson et al. (1997), AJ, 113, 2200	
Nova Cyg 1992	Bjorkman et al. (1994), ApJ, 425, 247	●
V4444 Sge	Kawabata et al. (2000), ApJ, 540, 429	
U Sco, NSgr1998	Ikeda et al. (2000), A&A, 335, 256	
V1494 Aql	Kawabata et al. (2001), ApJ, 552, 782	●
V475 Sct	Kawabata et al. (2006), AJ, 132, 433	●
V339 Del	Kawakita, Ahinnaka, Arai, Arasaki, Ikeda (2019), ApJ, 872, 120	●

偏光の機構

• 双極子散乱

入射光により電気振動子が
励起されて放射

- 電子散乱
- レイリー散乱
- ミー散乱
- 反射・屈折

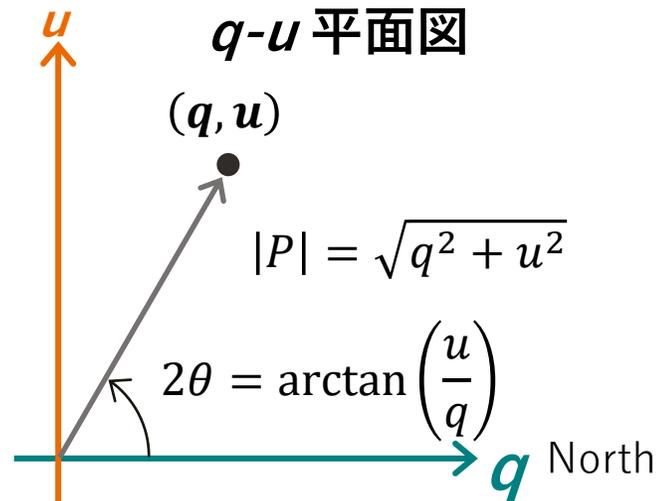
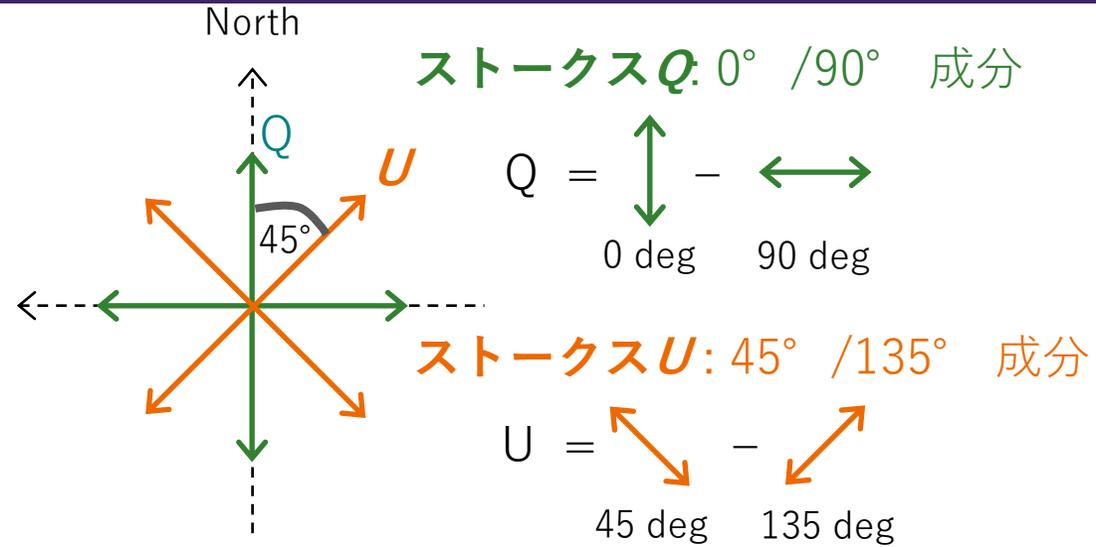
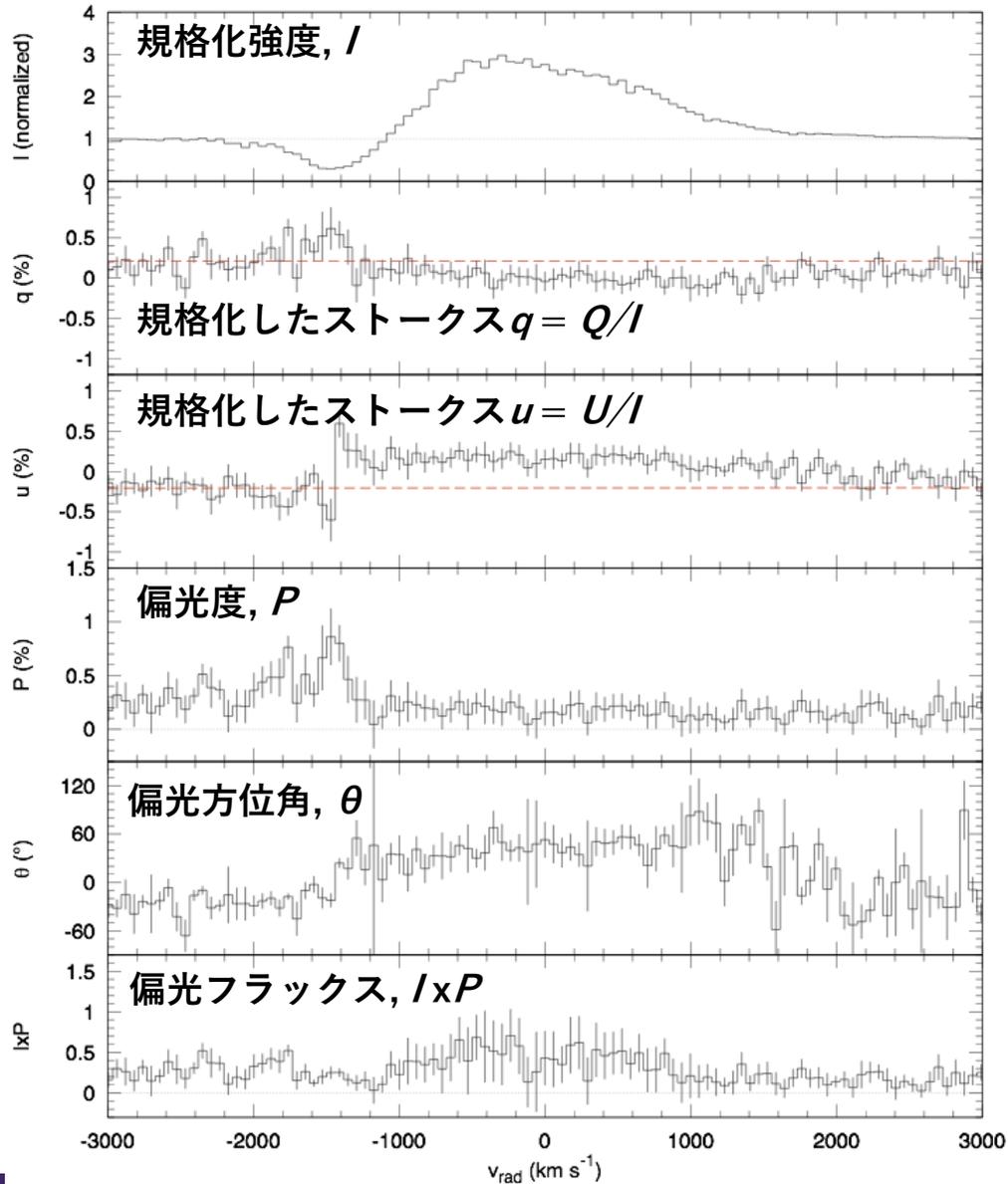


散乱面に垂直
な方向に偏光

電気双極子

川端弘治氏 “偏光観測チュートリアル
一般的事項と可視近赤外観測”(公開資料)より借用

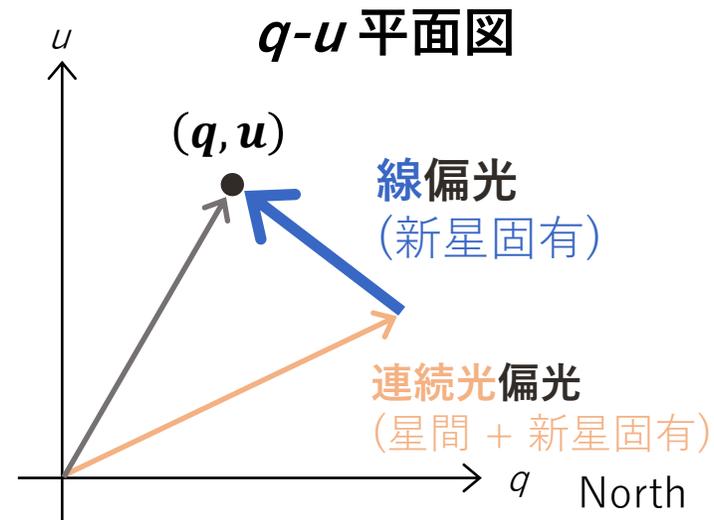
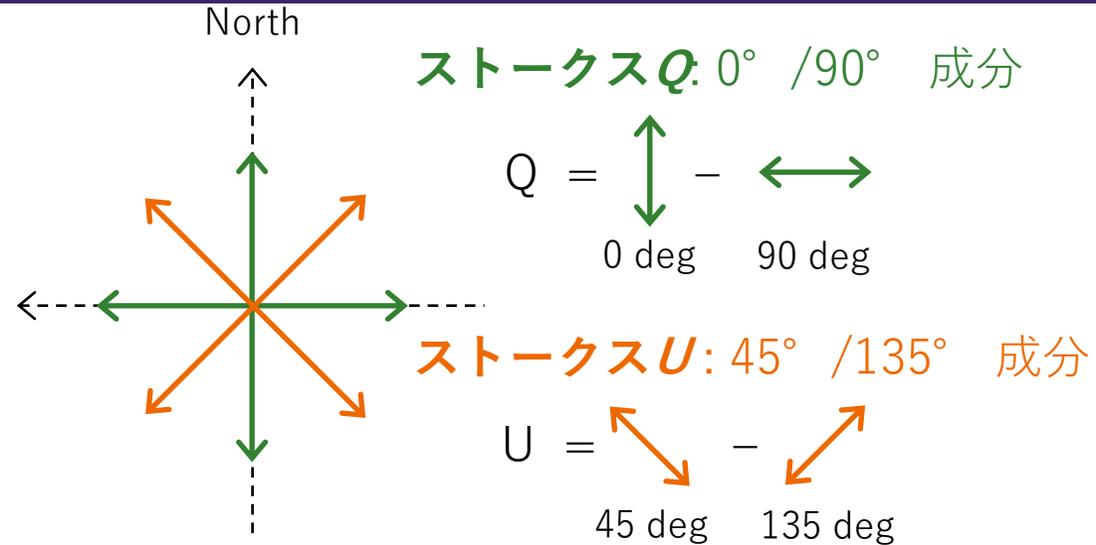
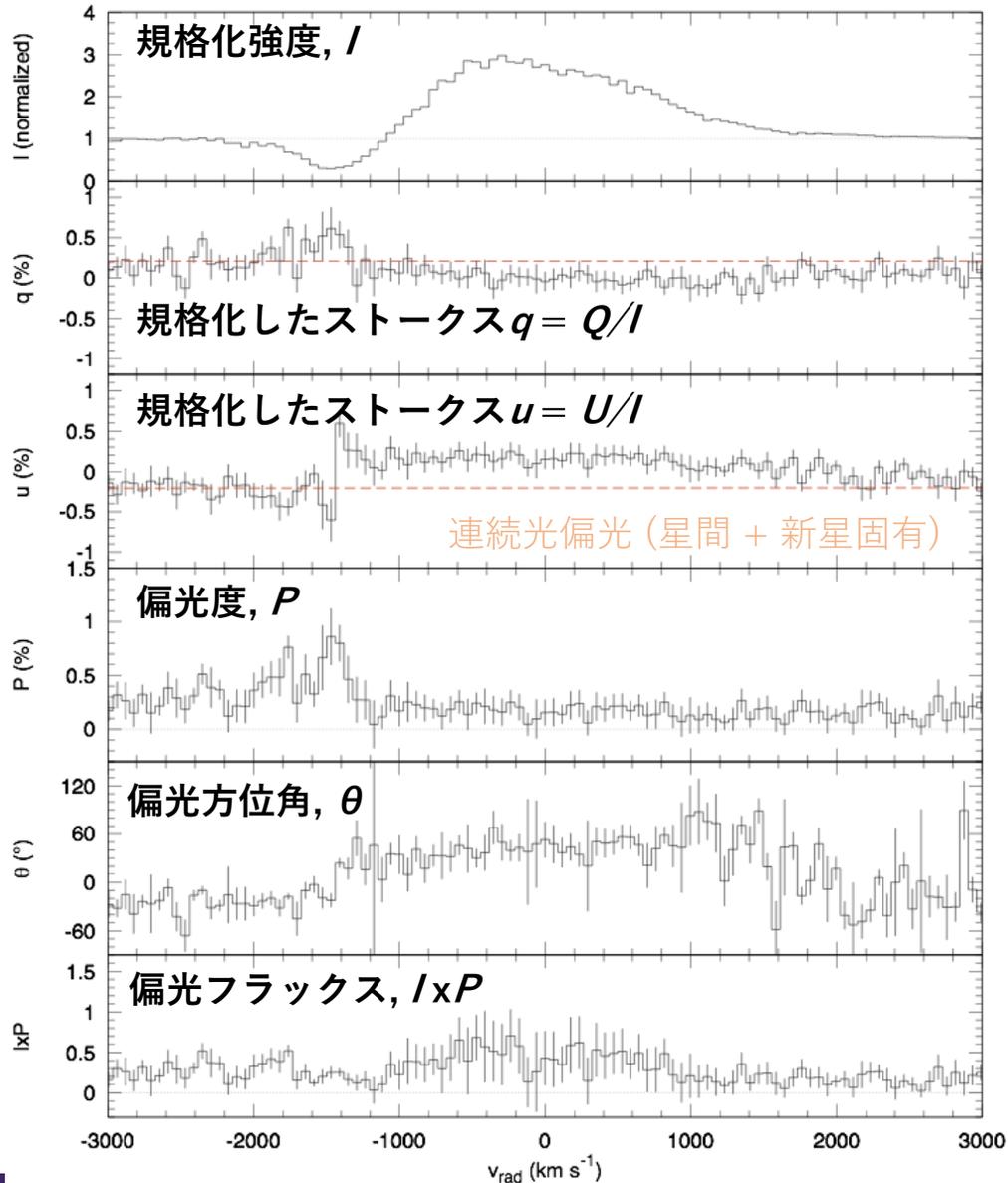
偏光スペクトル： q - u 平面



$q = Q/I$
 $u = U/I$

Kawakita et al. 2019, ApJ, 872, 120

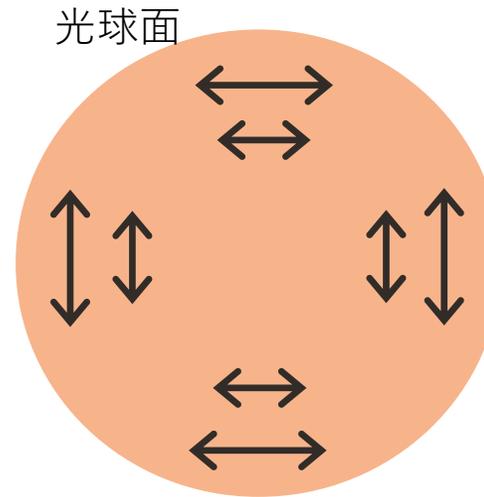
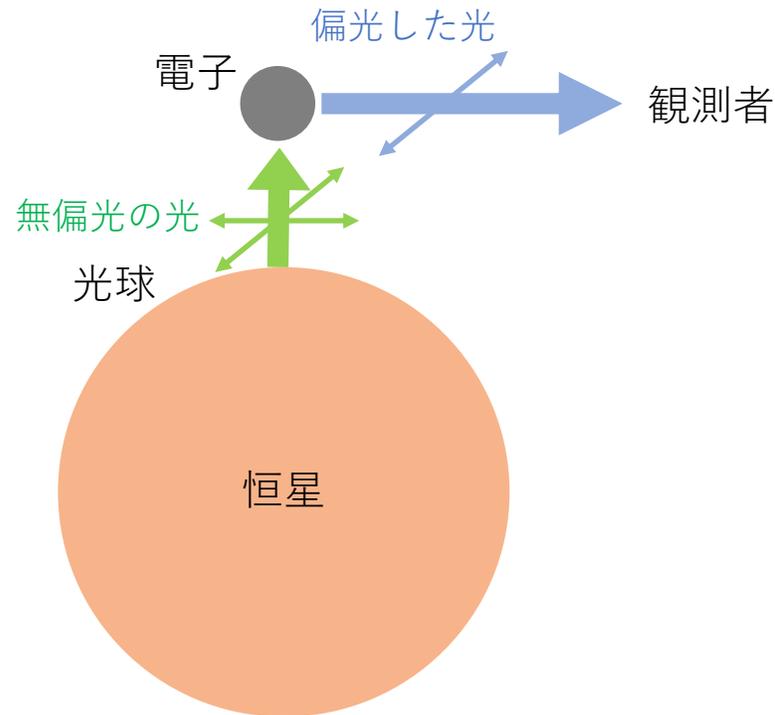
偏光スペクトル： q - u 平面



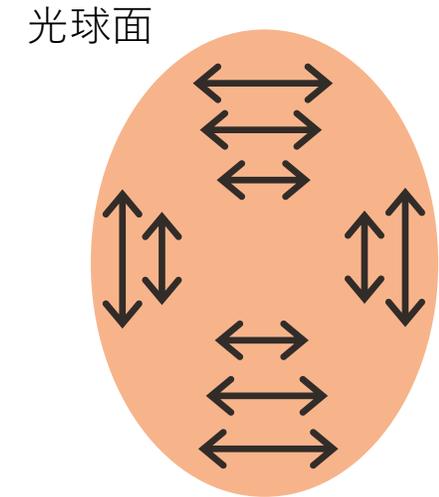
Kawakita et al. 2019, ApJ, 872, 120

連続光の偏光と幾何

光球面付近で生じる電子散乱の模式図



球対称な形状の場合
→ 無偏光



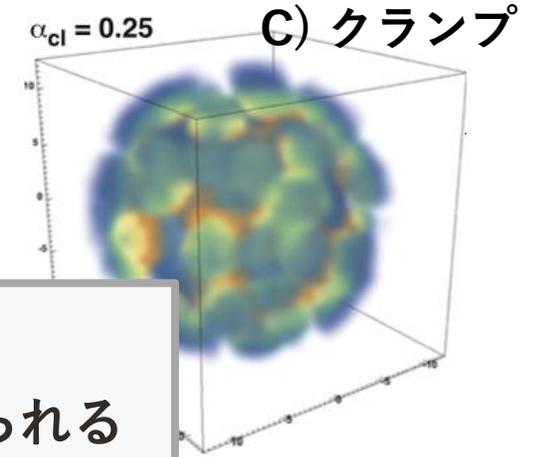
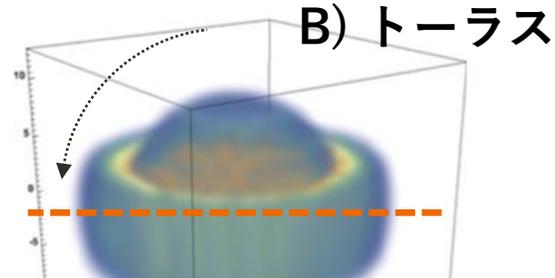
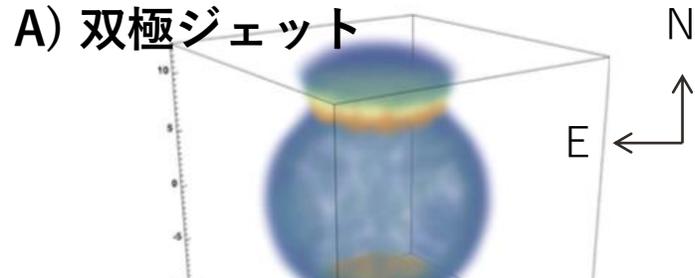
非対称 → 偏光あり

- 新星固有の連続光偏光は有効光球面の非対構造を反映
星間偏光の推定が必要
- 連続光の偏光から爆発直後の新星の光球面の形状を推定する
→ 幾何は偏光方位角と垂直方向に偏る

線偏光と幾何のモデル計算

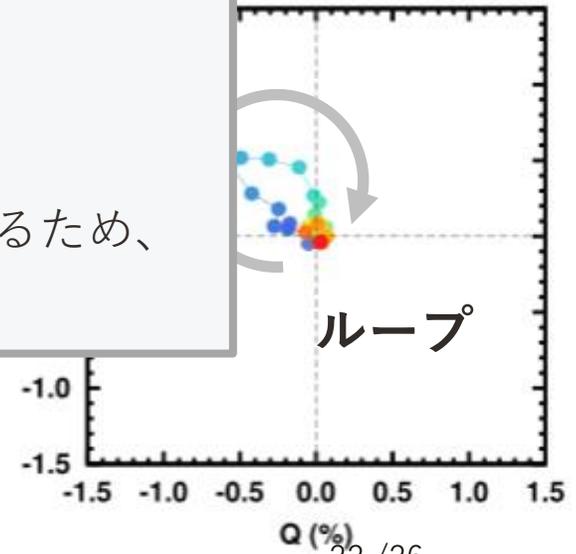
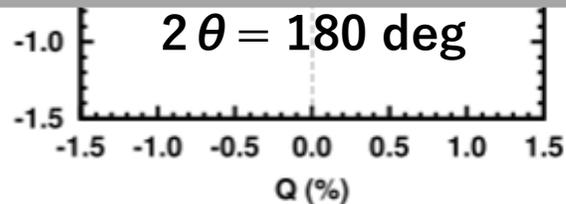
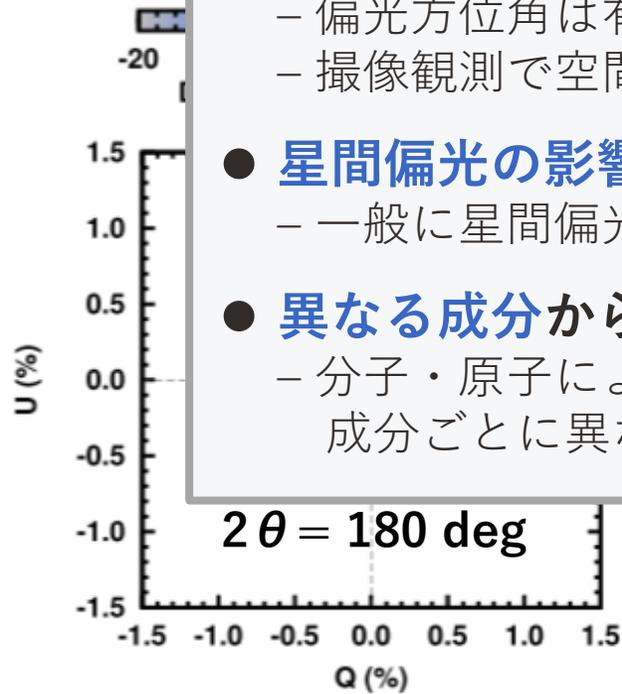
Hoflich (1991), A&A, 246, 481

Recent studies: Tanaka et al. 2012, ApJ, 754, 63; 2017, ApJ, 837, 105



線偏光を用いる利点

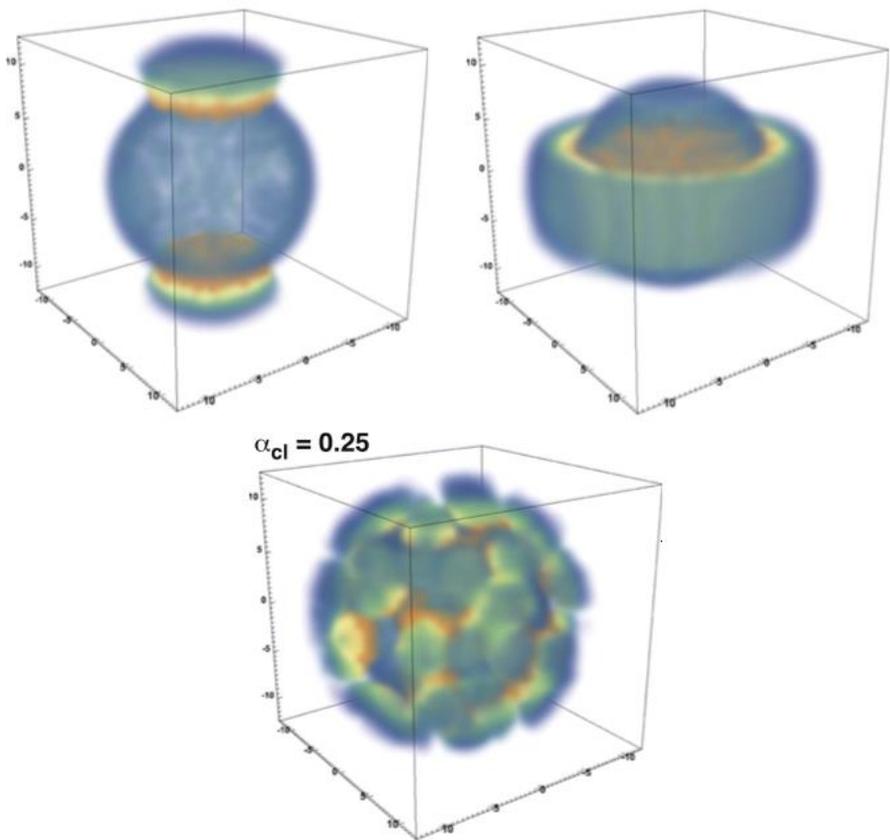
- **光源周囲で卓越する幾何の非対称構造と速度場**が得られる
 - 偏光方位角は有効幾何の方位角を反映
 - 撮像観測で空間分解できない天体についても可能
- **星間偏光の影響を無視できる**
 - 一般に星間偏光の高精度の推定は難しい
- **異なる成分から異なる領域の幾何を推定できる**
 - 分子・原子により、イオン化エネルギーなどが異なるため、成分ごとに異なる領域が見える



偏光分光観測

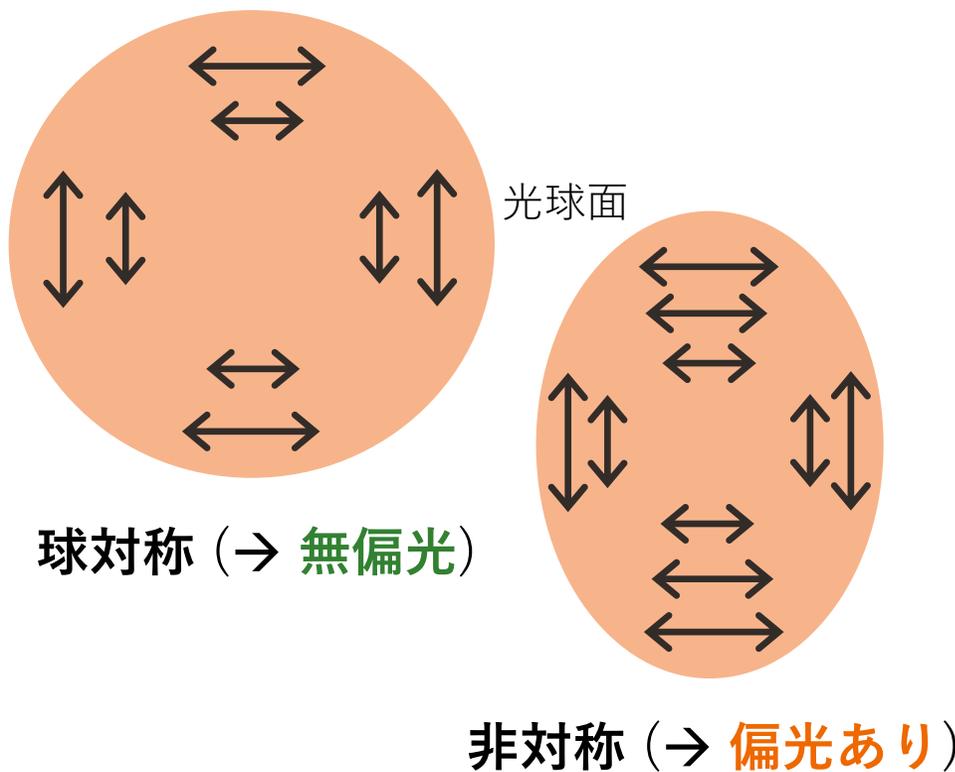
線偏光

光源周囲の物質の幾何と運動を反映

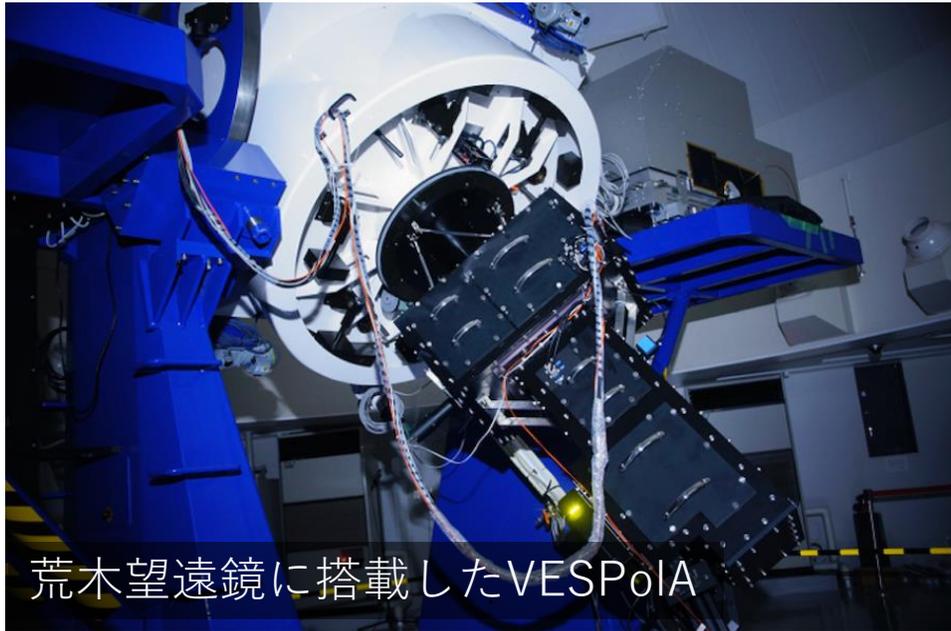


連続光の偏光

光球面の幾何を反映



V339 Delの線偏光分光観測



荒木望遠鏡に搭載したVESPoIA

京都産業大学 神山天文台

Longitude 35° 04' 13"N
Latitude 135° 45' 29"E
Altitude 162 m



VESPoIA (ベスポラ)

Very precious Echelle Spectro-Polarimeter on Araki-telescope

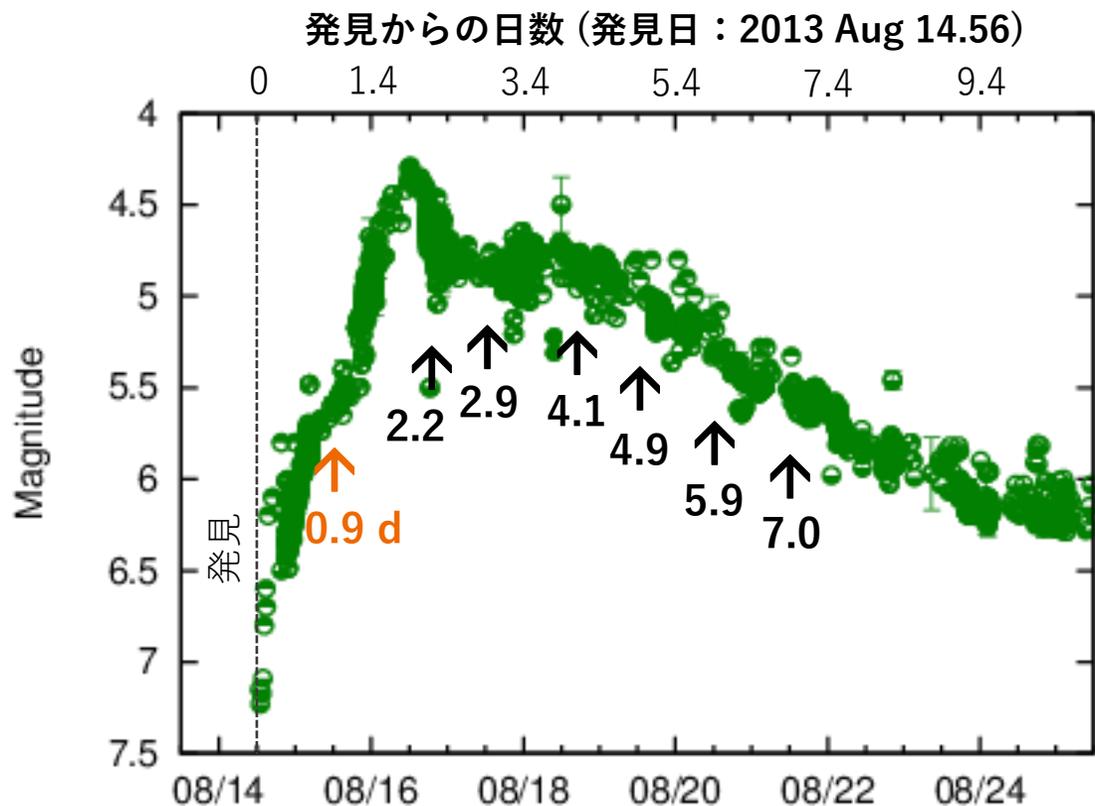
(Arasaki, Ikeda, Shinnaka et al. 2015, PASJ, 67, 35)

特徴

- 高波長分解能 ($R \sim 8000$)かつ高偏光決定精度 ($\delta P < 0.1\%$)で複数成分を一度に取得できる
- 小口径望遠鏡 (神山天文台 1.3m-荒木望遠鏡)を主力望遠鏡とすることで、変光星や突発天体等の時間変動する天体のモニター観測が可能

項目	仕様
波長分解能	$R \sim 8,000$ ($\sim 1 \text{ \AA}$ or $\sim 37 \text{ km/s}$ at $H\alpha$)
波長範囲	$\lambda = 550 - 830 \text{ nm}$
偏光決定精度	$\delta P < 0.1\%$
限界等級 ($\delta P < 0.1\%$, 4 h)	$M_V = 7.8 \text{ mag}$

V339 Delの線偏光分光観測



From AAVSO database

Date in 2013

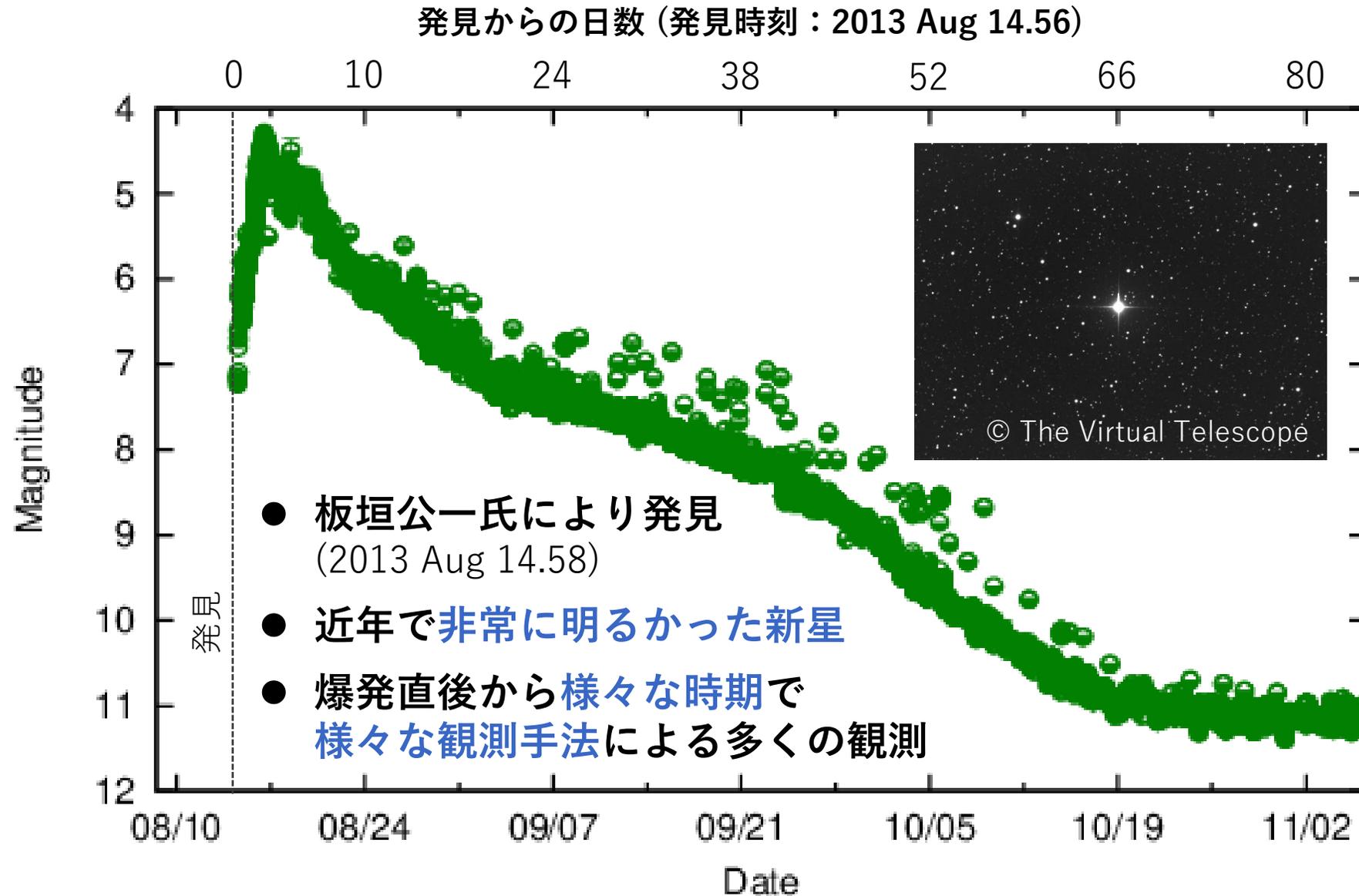
観測開始時刻 (世界時)	発見からの 日数 (日)	積分時間 (s)
2013 Aug 15.49	0.91 d	6,000
2013 Aug 16.73	2.15 d	1,200
2013 Aug 17.51	2.93 d	3,600
2013 Aug 18.69	4.11 d	1,200
2013 Aug 19.49	4.91 d	2,800
2013 Aug 20.48	5.90 d	1,600
2013 Aug 21.53	6.95 d	2,000

Discovery: 2013 Aug 14.56 (by K. Itagaki)

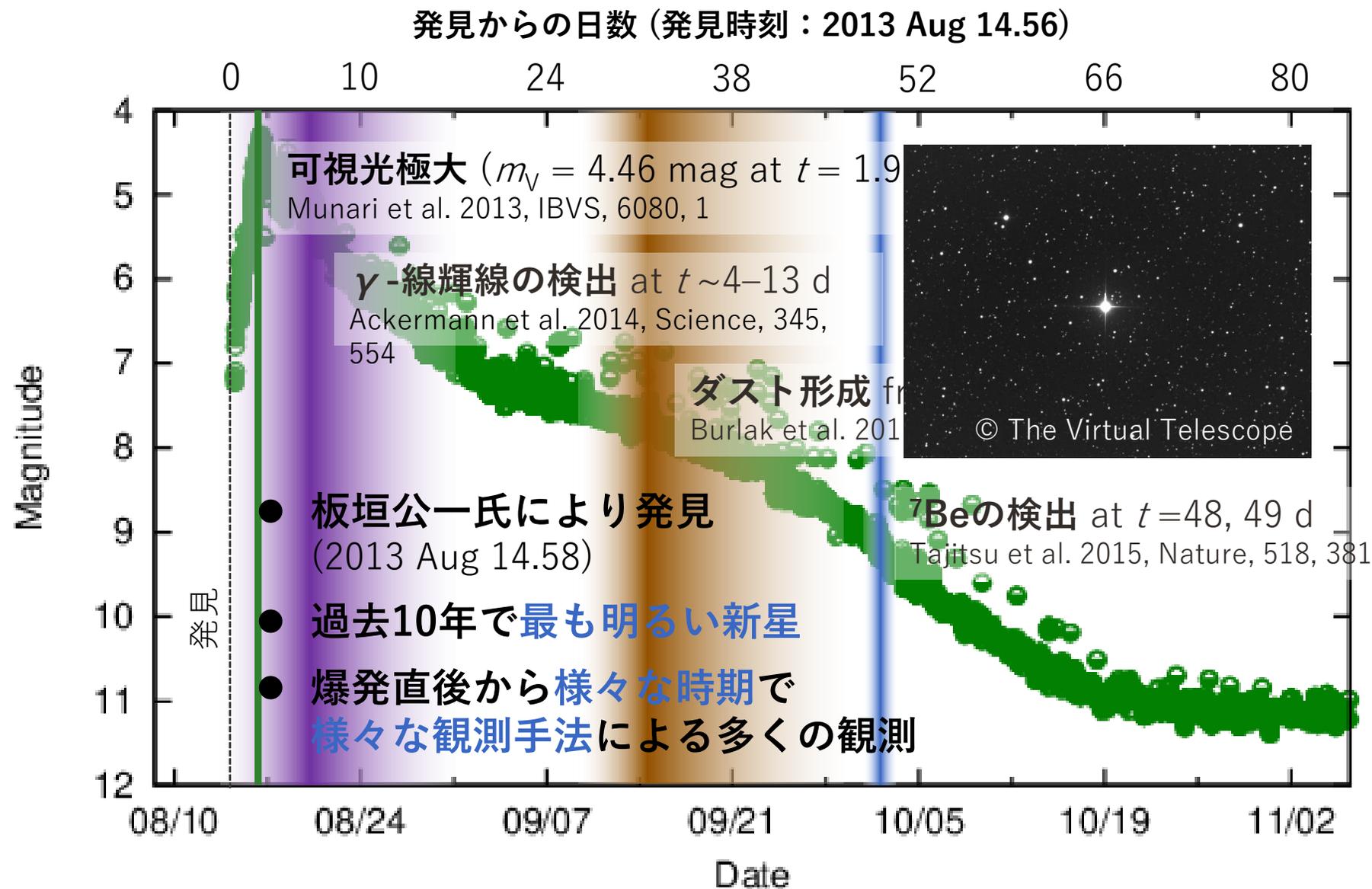
可視極大前の偏光スペクトルは、**新星爆発におけるWD表面でのTNRの様子を**
詳細に研究するにあたり本質的に重要

– 可視極大前は新星の光球面と爆発放出物の最前面とが一致する (火の玉期)

古典新星V339 Del (= いるか座新星2013)

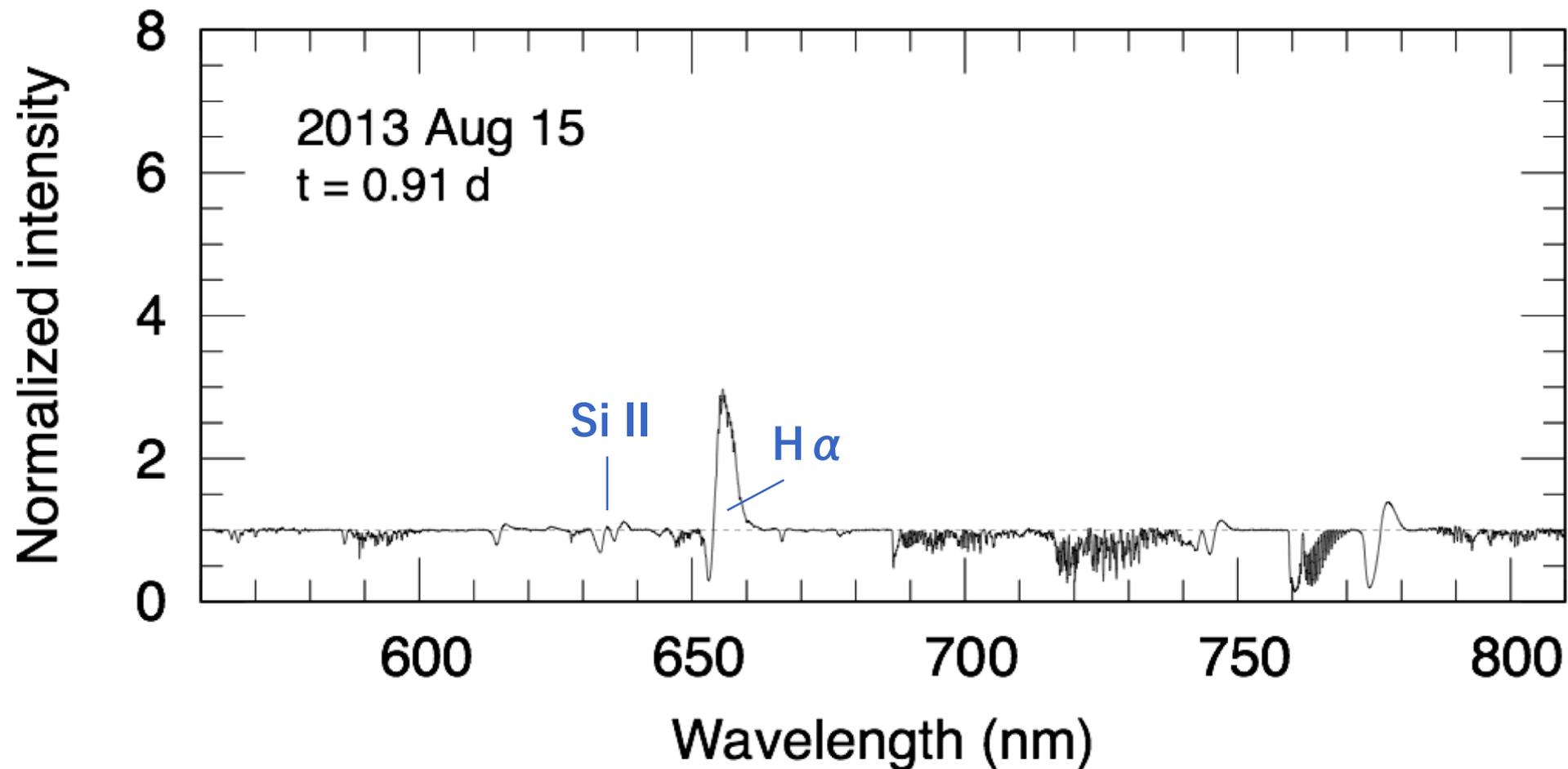


古典新星V339 Del (いるか座新星2013)



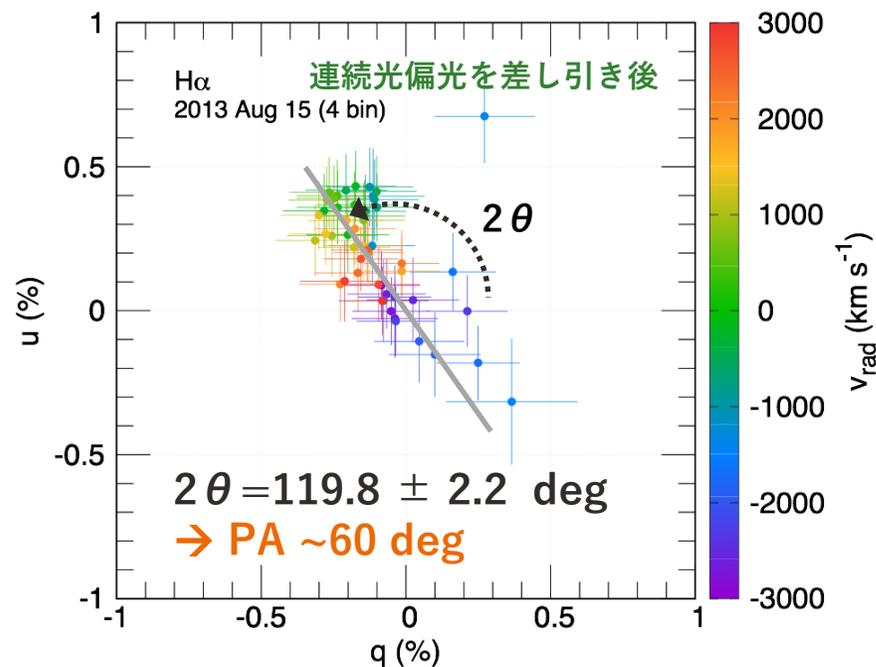
V339 Delの線偏光分光観測

新星 V339 Del

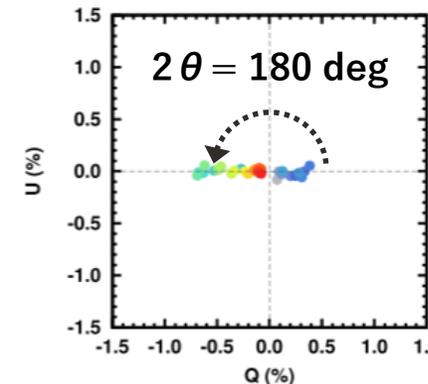
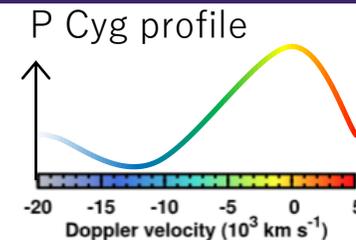
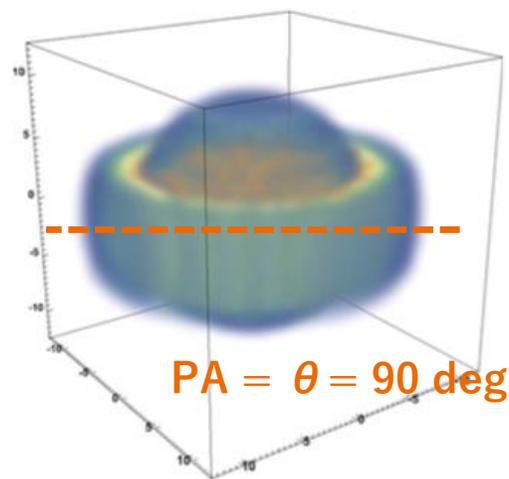


Kawakita, [Shinnaka](#) et al. 2019, ApJ, 872, 120

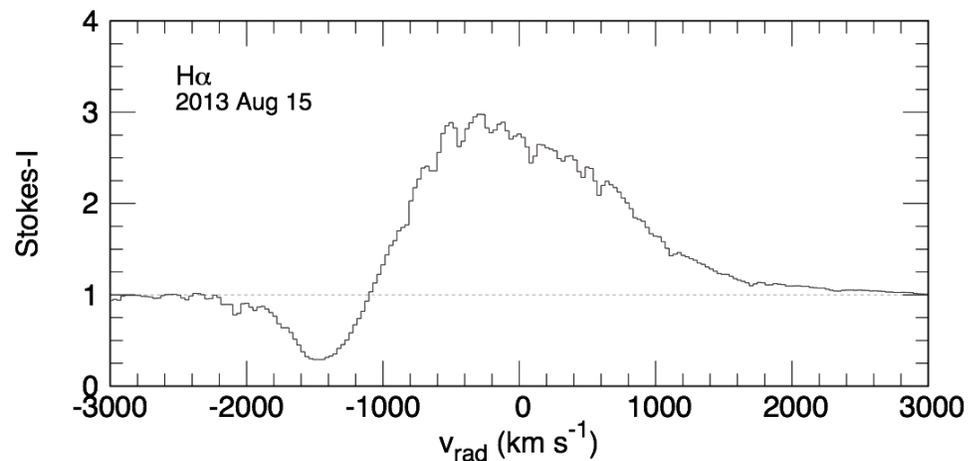
H α 線の線偏光 ($t = 0.91$ d)



B) トーラス

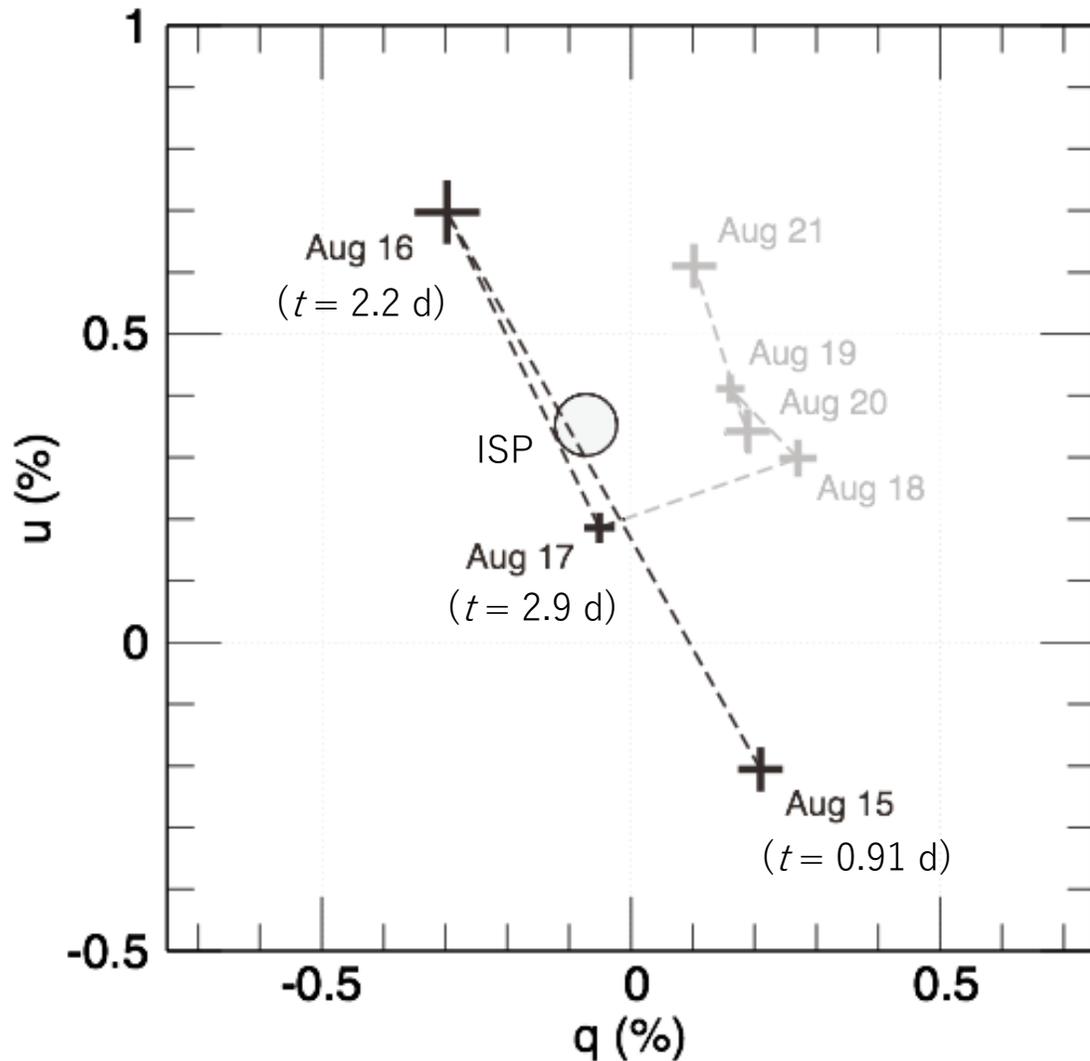


Tanaka et al. 2017, ApJ, 837, 105



- “光球面周囲に膨張するトーラス構造”
が極大前の新星の爆発放出物の幾何として最もありうる幾何構造
- 推定される $PA_{\text{torus}} = 59.9 \pm 1.1$ deg

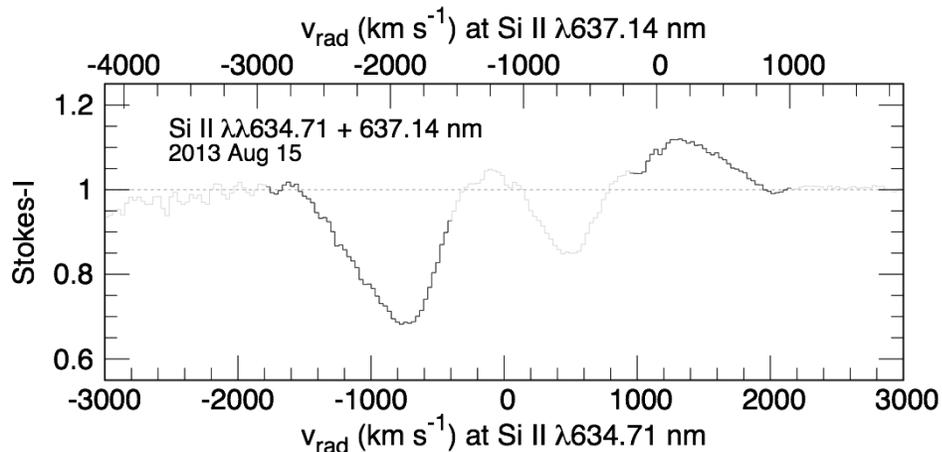
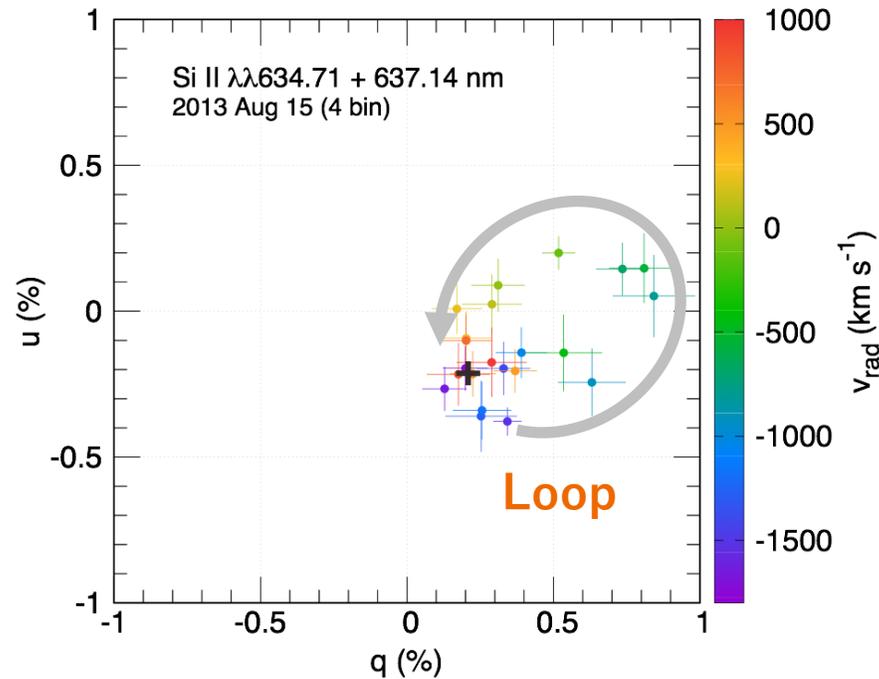
連続光偏光 (H α 波長)



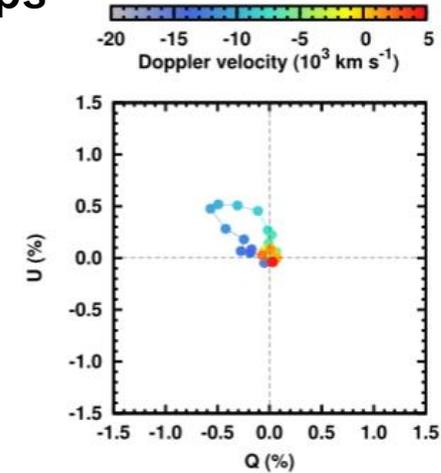
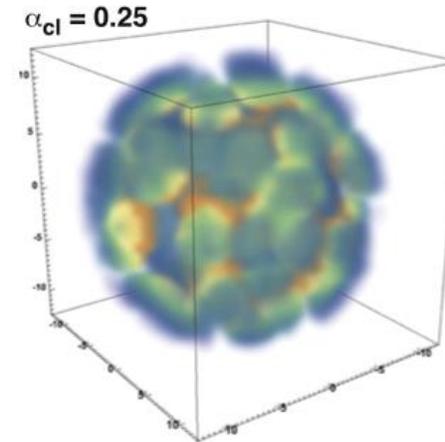
- V339 Delの光球面の有効幾何が日ごとに変化
- 火の玉期 ($t < \sim 3$ d)では、連続光成分の偏光は爆発放出面の幾何を反映
 - この期間は光球面と新星爆発放出物の先端とがほぼ一致
- Aug 15 \rightarrow Aug 16で有効幾何が90度変化 (q-u平面で原点に対して180度移動)
 - Aug 15 ($t = 0.9$ d): $\theta \sim 150$ deg
 - Aug 16 ($t = 2.2$ d): $\theta \sim 60$ deg
 - Aug 17 ($t = 2.9$ d): \sim ISP

V339 DelのRバンド偏光撮像観測から同新星の星間偏光を推定 (Shakhovskoy et al. 2017)
(q, u)_{ISM} = (-0.07%, 0.35%)

Si II線の線偏光 ($t = 0.91$ d)



C) Radii of the clumps

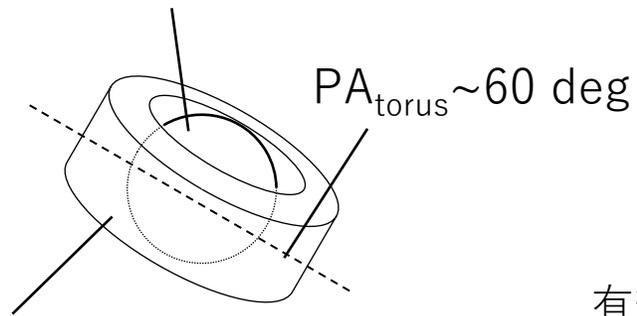


- Si IIは光球面上に**非均質**に存在
 - $T_{\text{photosphere}} = 9,000\text{--}10,000$ K at Aug 15 (Skopal et al. 2014, A&A, 569, A112)
 - Si II (I.P.= 16.3 eV) was **ionized to Si III**
- **新星の光球面は非一様な温度分布を持つ**
→ WD表面での非一様なTNR (熱核暴走反応)

偏光分光観測から推測したV339 Delの幾何

(A) $t = 0.91$ d (2013 Aug 15)

Fast expanding
photosphere



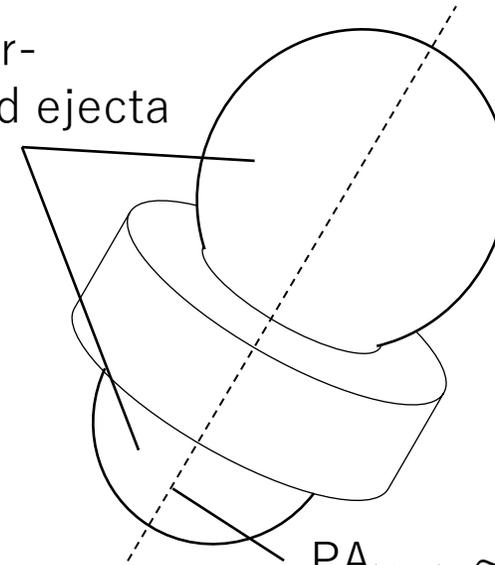
$PA_{\text{torus}} \sim 60$ deg

Slowly expanding torus

Kawakita, Shinnaka et al. 2019, ApJ, 872, 120

(B) $t = 2.15$ d (2013 Aug 16)

Bipolar-
shaped ejecta



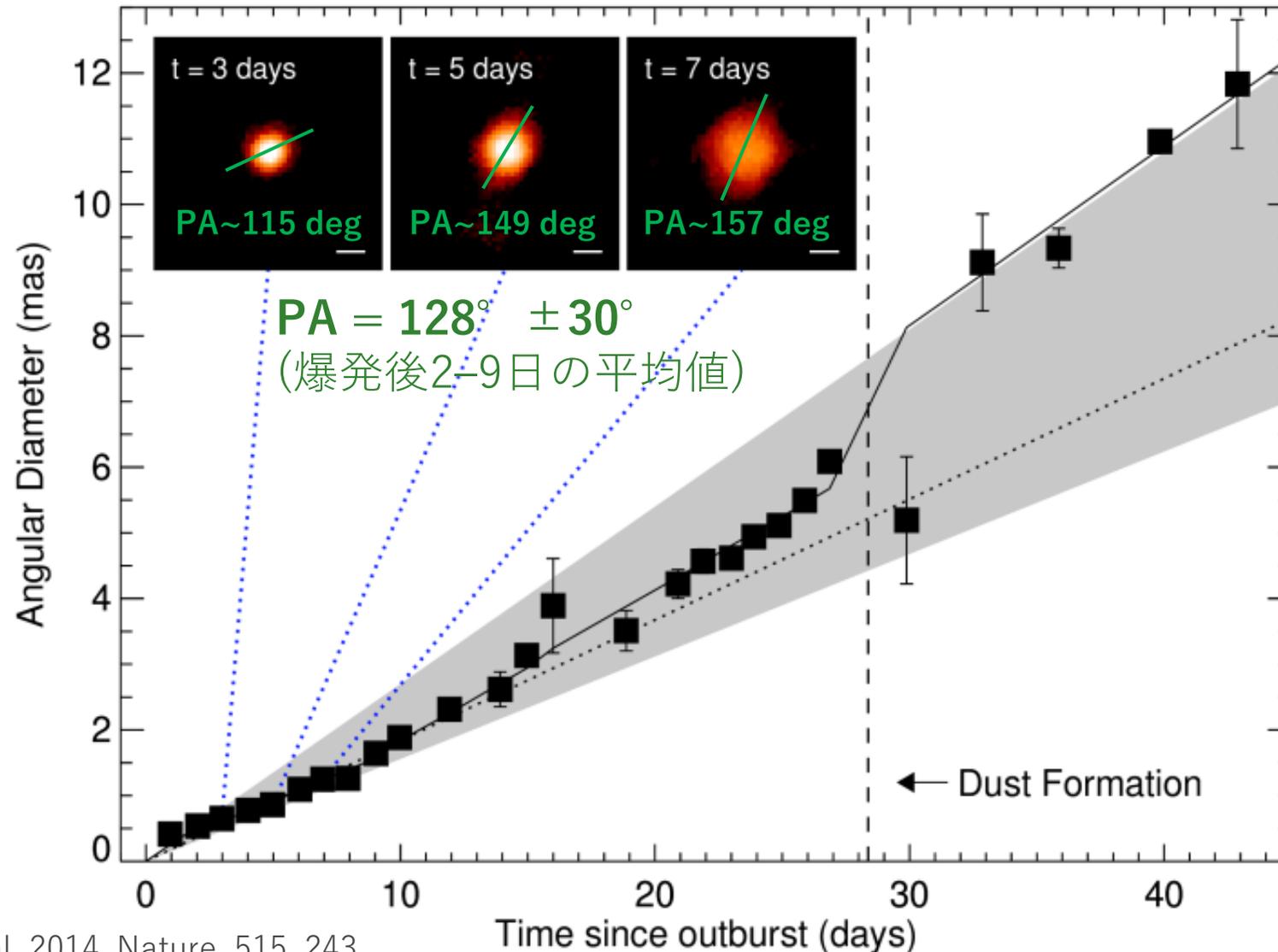
$PA_{\text{bipolar}} \sim 150$ deg

有効幾何が90度変化

- 光球面の幾何が爆発直後は**1日以下の時間スケールで変化している**
 - 可視光極大前はトーラス構造が存在する ($H\alpha$ の線偏光より)
 - $t = 0.91$ d と $t = 2.15$ d で有効光球面が90度回転 (連続光偏光より)
- V339 Delの爆発メカニズムとして**2段階放出モデル** (Li e al. 2017など) を**支持**

V339 Delに見られた爆発初期の非対称構造

CHARAアレイによる赤外線干渉計 (H-band)



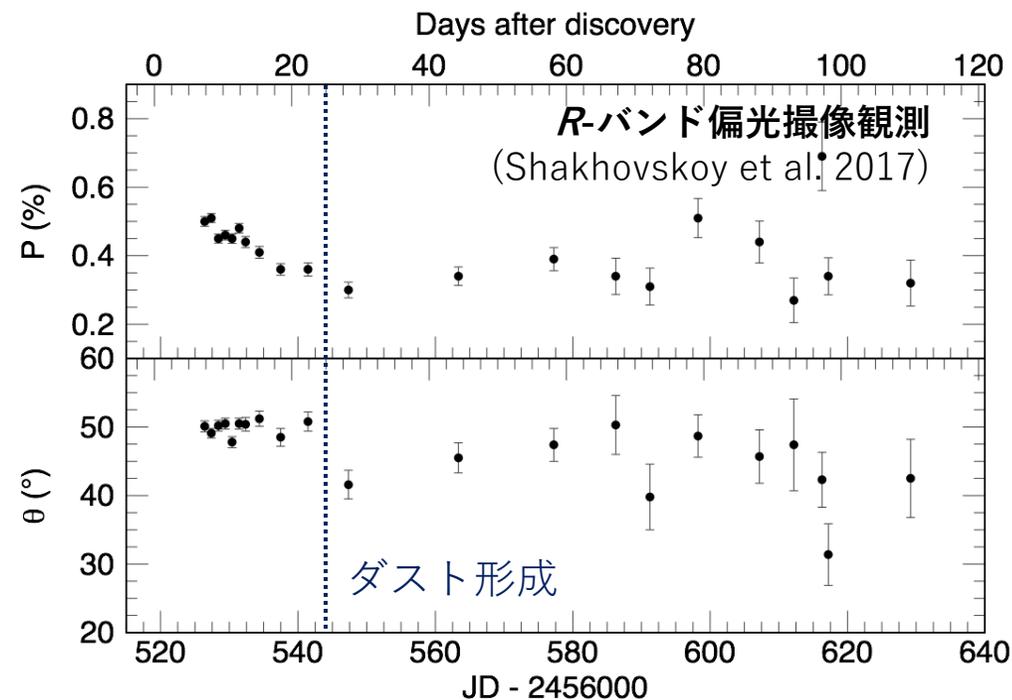
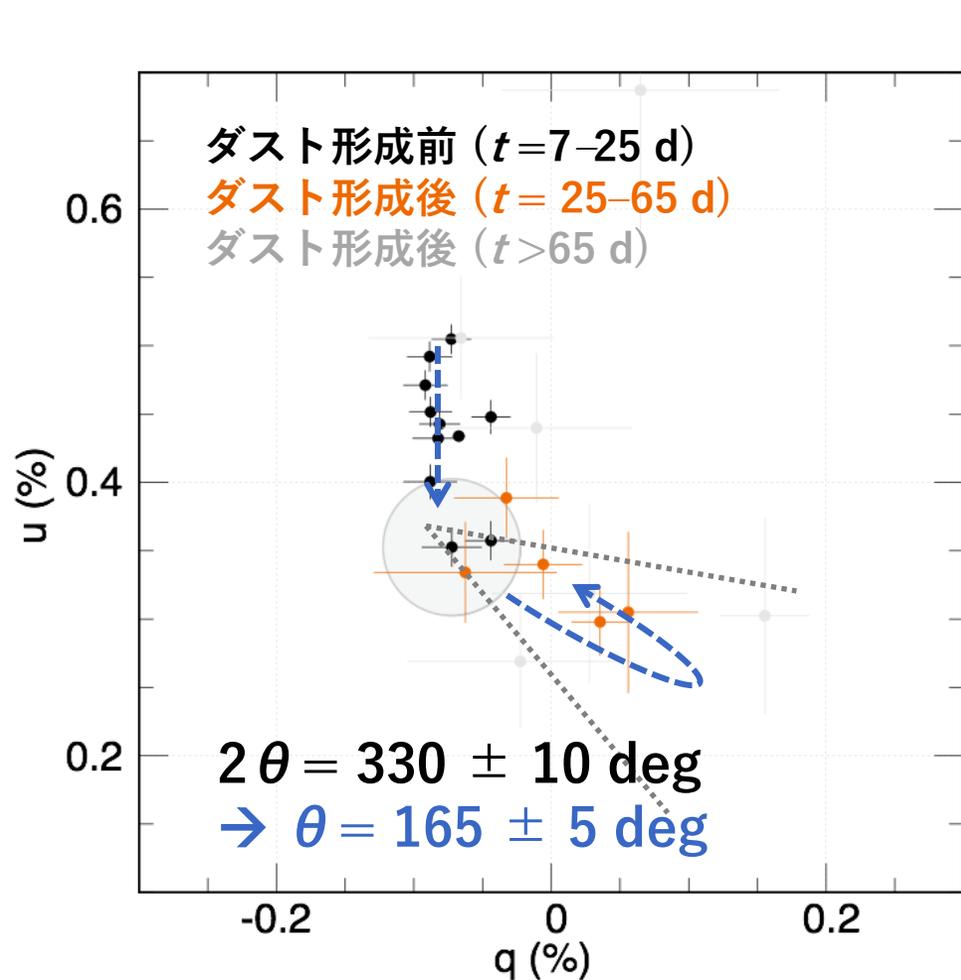
Schaefer et al. 2014, Nature, 515, 243

30 Jan. 2021

連星・変光星研究会 2020

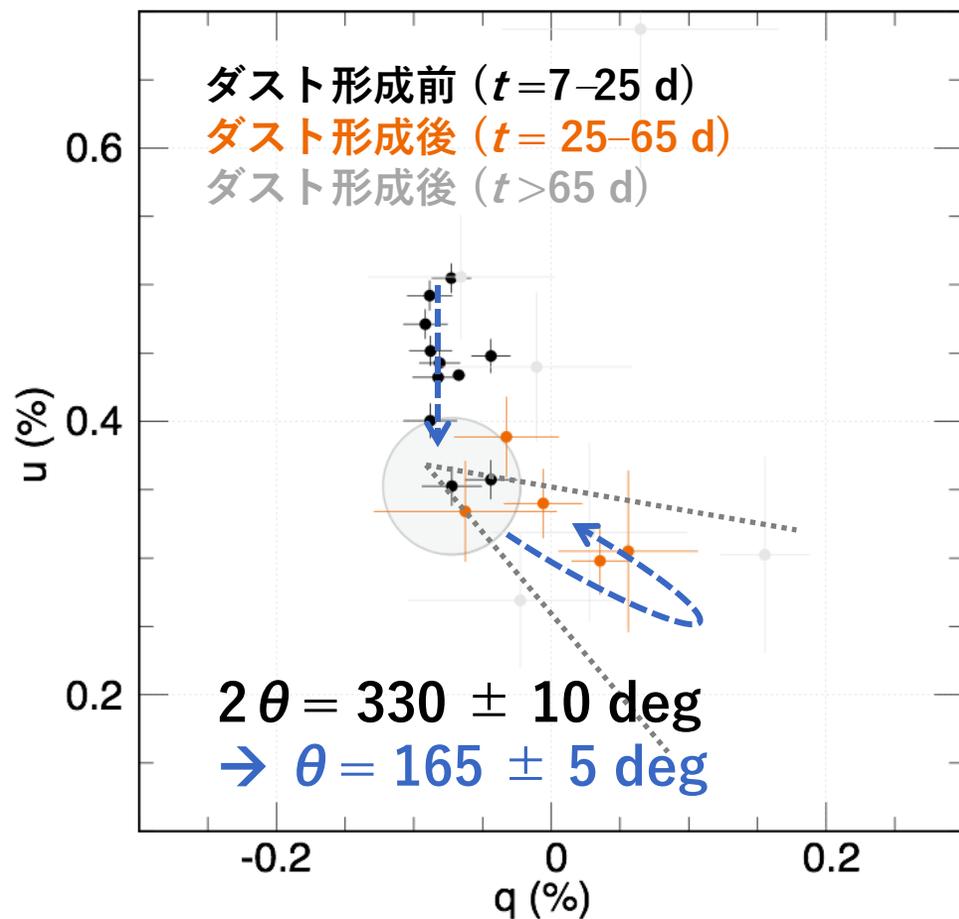
33

議論：ダスト生成領域

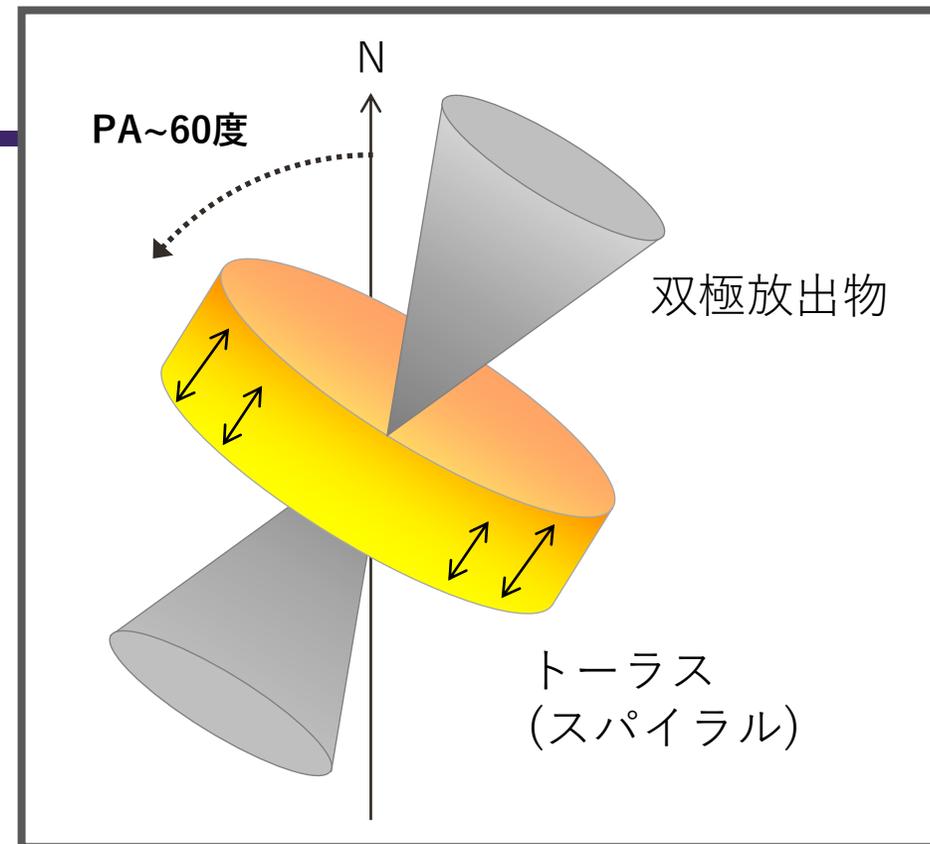


V339 DelのRバンド偏光撮像観測から同新星の
 星間偏光を推定 (Shakhovskoy et al. 2017)
 $(q, u)_{\text{ISM}} = (-0.07\%, 0.35\%)$

議論：ダスト生成領域

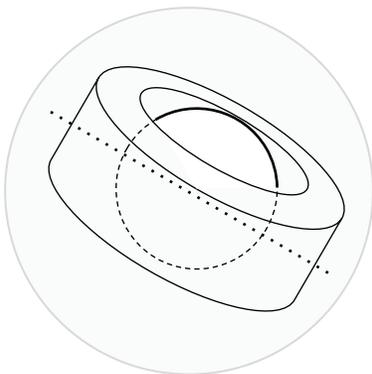
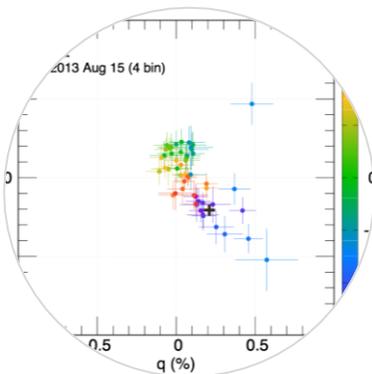
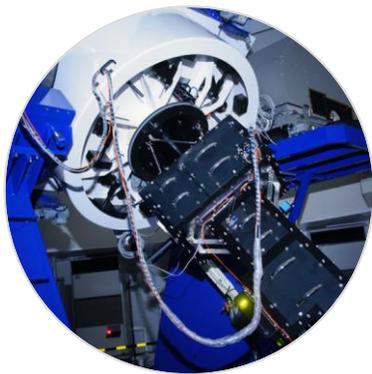


V339 DelのRバンド偏光撮像観測から同新星の
 星間偏光を推定 (Shakhovskoy et al. 2017)
 $(q, u)_{\text{ISM}} = (-0.07\%, 0.35\%)$



- **ダストは $\theta = 165 \pm 5$ deg (PA~75 deg) 方向で生成したようだ**
 – 偏光観測から推定されるトーラス構造 (PA~60 deg) と似た方向
- **スパイラル放出物中での生成を示唆**
 – 低速度成分と高速度成分との衝突でダストが生成する (Derdzinski et al. 2017)

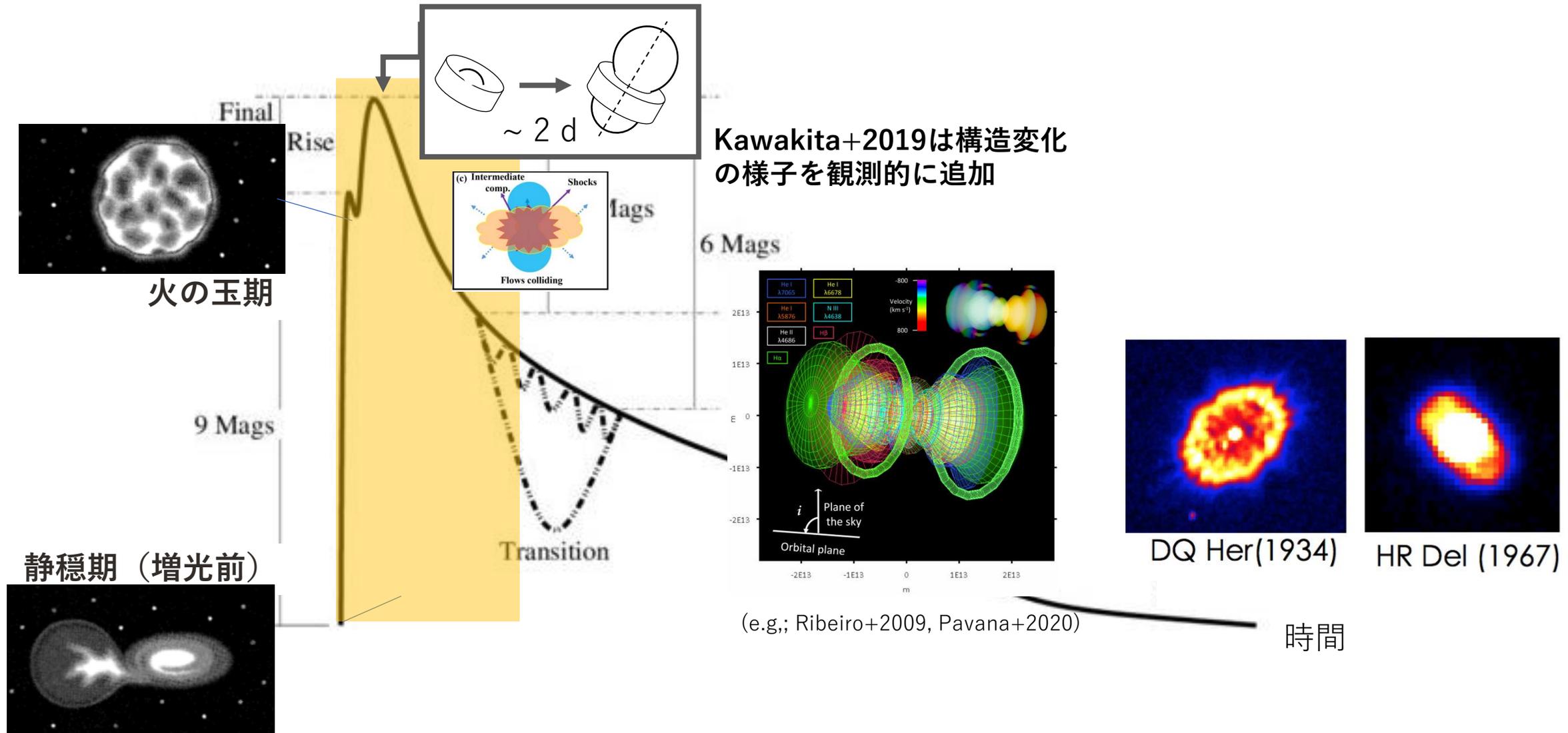
V339 Delの高分散偏光分光のまとめ



まとめ (詳しくは Kawakita et al. 2019, ApJ, 872, 120)

- **“偏光分光観測” が新星の爆発直後の爆発放出物の空間分布を明らかにする非常に強力な手法であることを示した**
 - 爆発直後は視直径が非常に小さく撮像観測による空間分解が困難な天体でも可能
 - ISPを正確に推定できなくても推定可能
- **得られた新星V339 Delの幾何構造**
 - 可視光極大前：トーラス形状 (PA~60 deg、H α 線の線偏光より)
 - 可視光極大後：有効幾何のPAが90度変化 (連続光偏光より)
 - 2段階放出モデル (低速スパイラル放出 + 高速等方放出) を支持
 - WD表面における非均一なTNRを示唆 (Si II線の線偏光より)

新星の光度曲線と構造



先行研究との比較

Bjorkman et al. (1994) for nova Cyg 1992

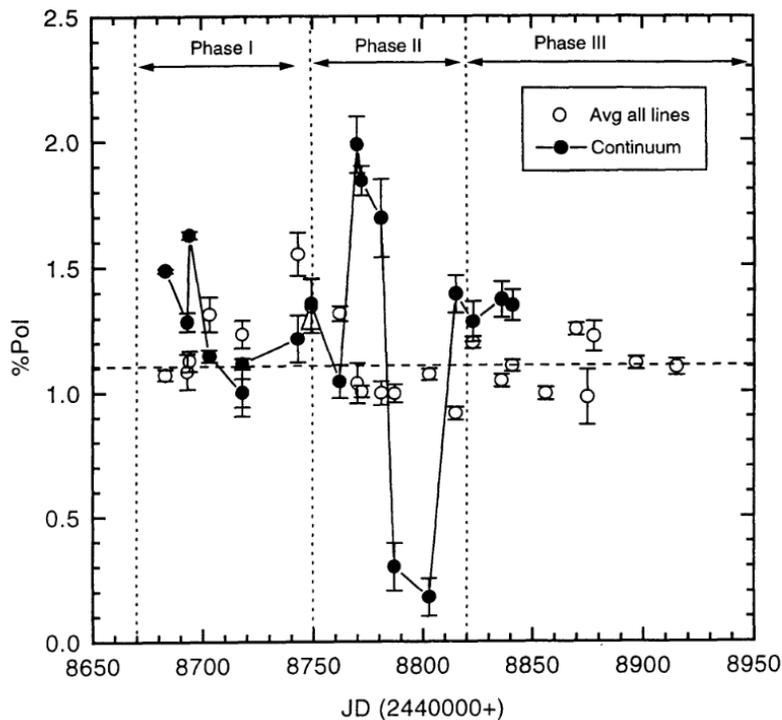


FIG. 2.—Polarimetric variations of the continuum and lines. The continuum points (solid circles) represent the combined data from line-free continuum areas. The line points (open circles) represent the data from all the emission line regions combined. Interstellar polarization, which has not been removed, is approximated by the dashed line. Note that the continuum polarization varies while the line polarization does not. The three phases are described in the text.

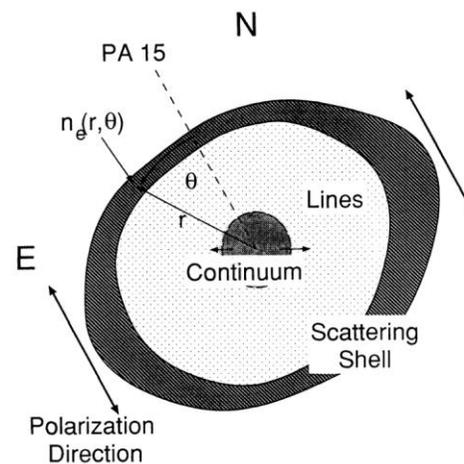
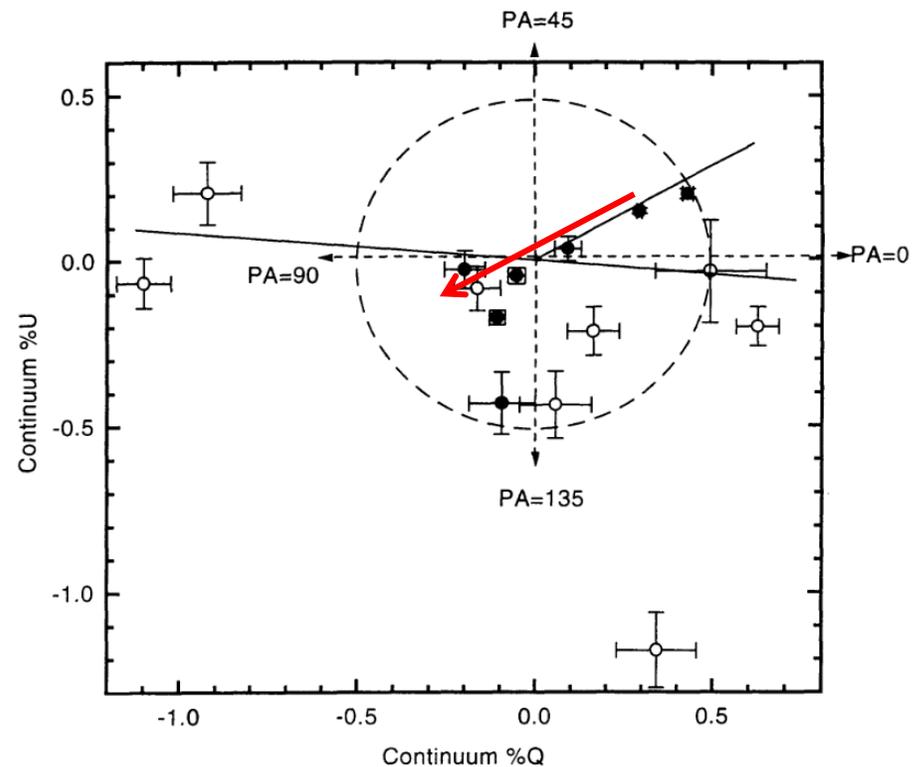


FIG. 4a

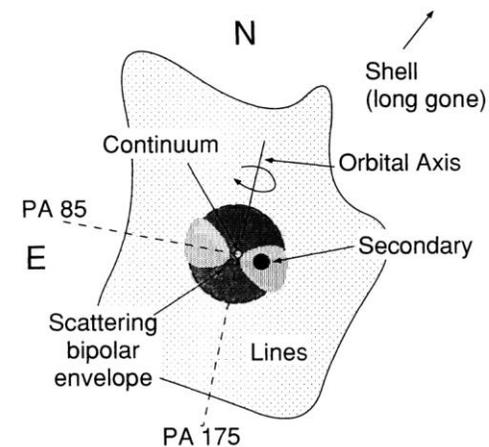
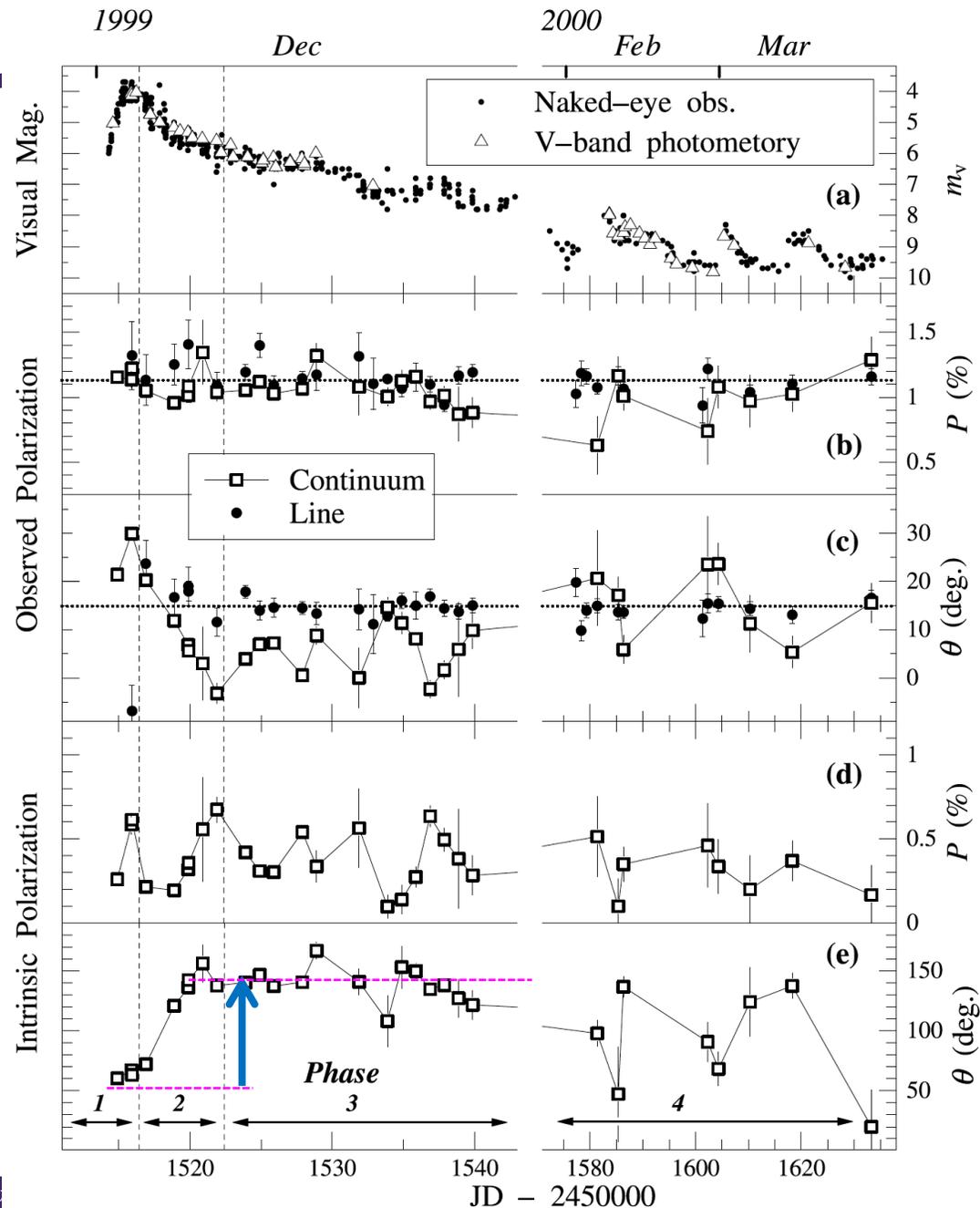
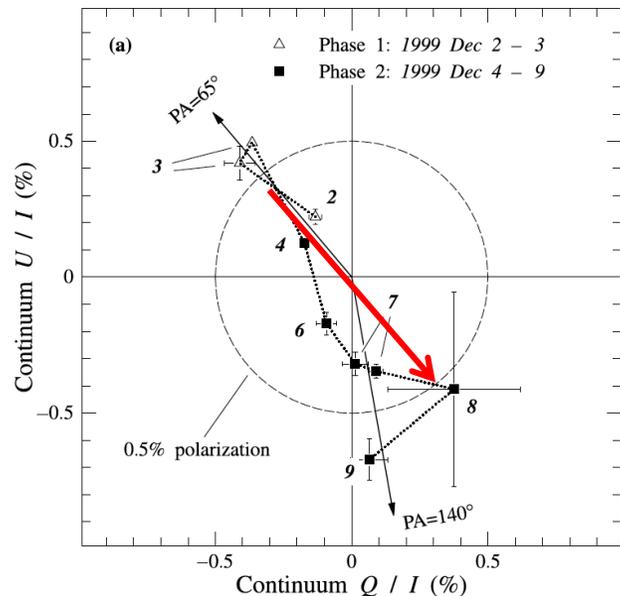


FIG. 4b

先行研究との比較

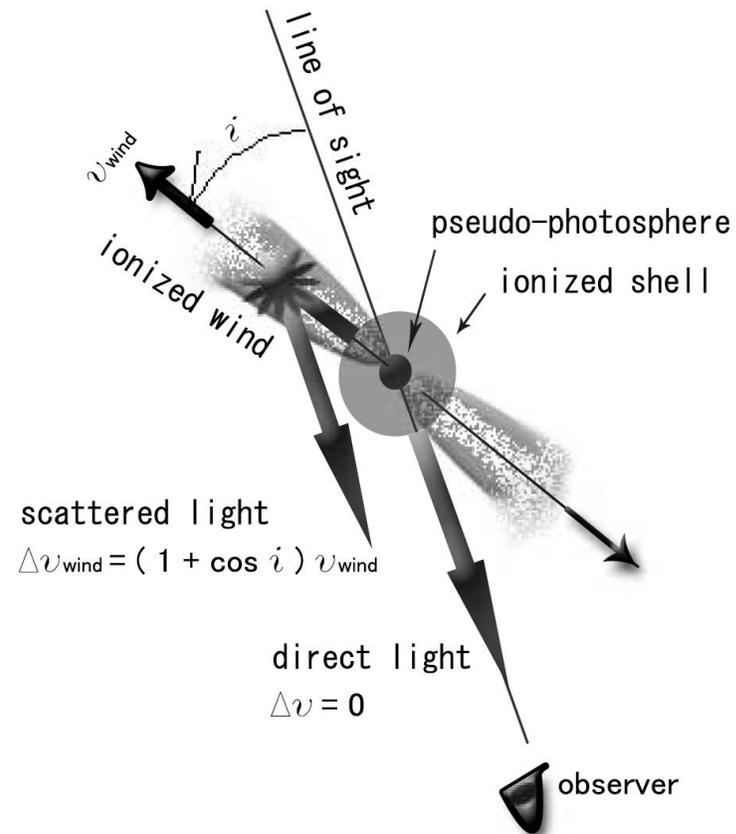
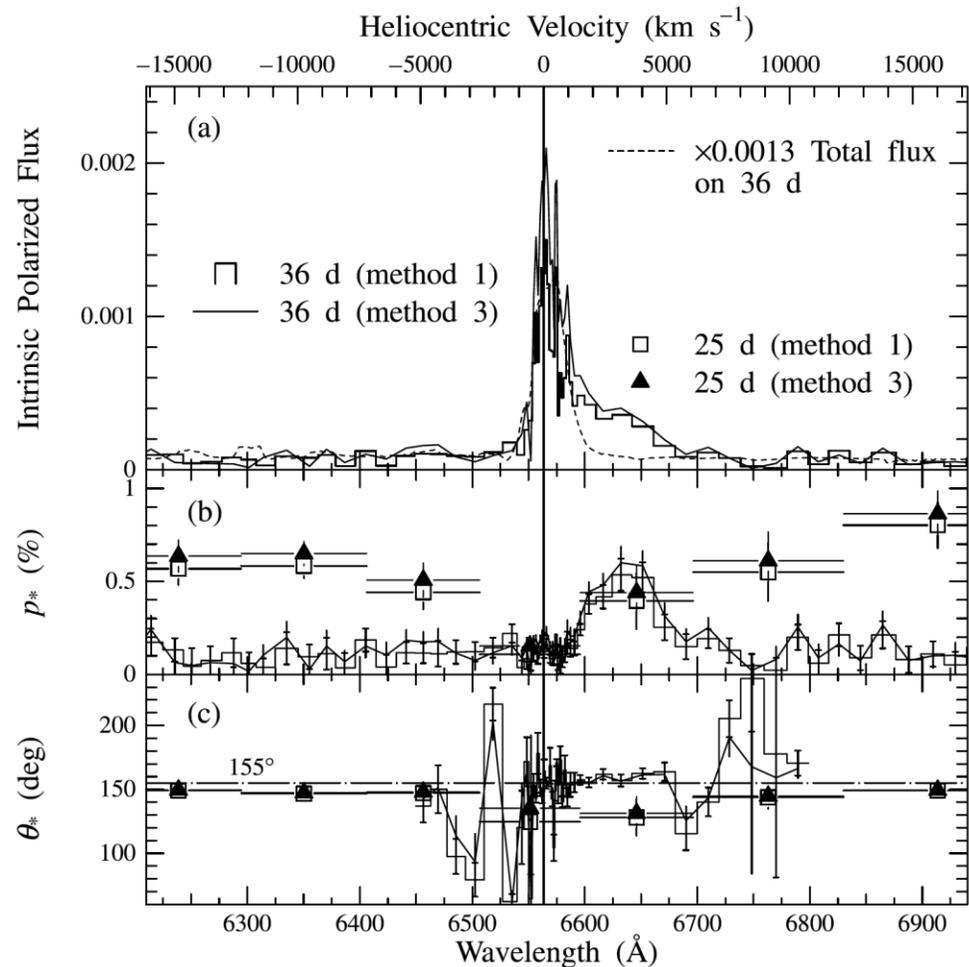
Kawabata et al. (2001) for nova V1494 Aql

連続光の偏光の急激なPAの回転
 → 初期の構造変化を捉えている
 V339 Delの結果と似ている



先行研究との比較

Kawabata et al. (2006) for nova V475 Sct



赤方偏移した偏光成分を検出.
双極上のwindの存在を示唆

新星の偏光分光観測：まとめ

- 偏光分光観測は、干渉計観測と並び、初期の新星のイジェクタの非対称形状を探る強力な手段の1つ
- 観測例が極めて少ない
 - 偏光度が小さいので、高精度で観測可能な、明るい新星にしか実施できない
 - 装置が非常に少ない（ただし、日本にはある）
- 偏光分光観測の展望
 - V339 Delなどで見られた形状進化は、普遍的なのか？
 - 新星放出物の構造モデルの検証
 - ダスト形成領域の制限にも有効である