

# WZ Sge型矮新星で見られる fading tailの分光観測

磯貝 桂介（京都大学/東京大学）

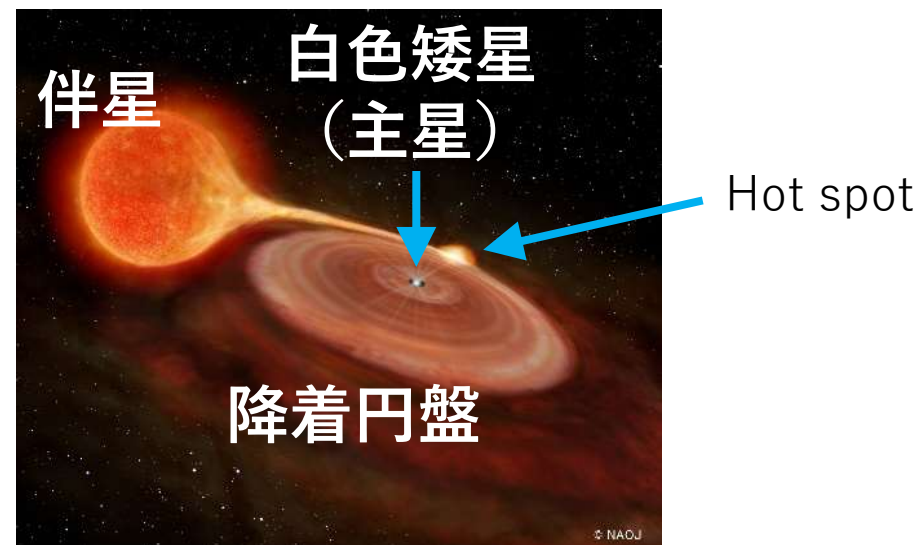
加藤太一、野上大作、小路口直冬、反保雄介（京都大学）

成田憲保、福井暁彦（東京大学）


他MuSCAT1/MuSCAT3 team,、VSNET/VSOLJ collaborations

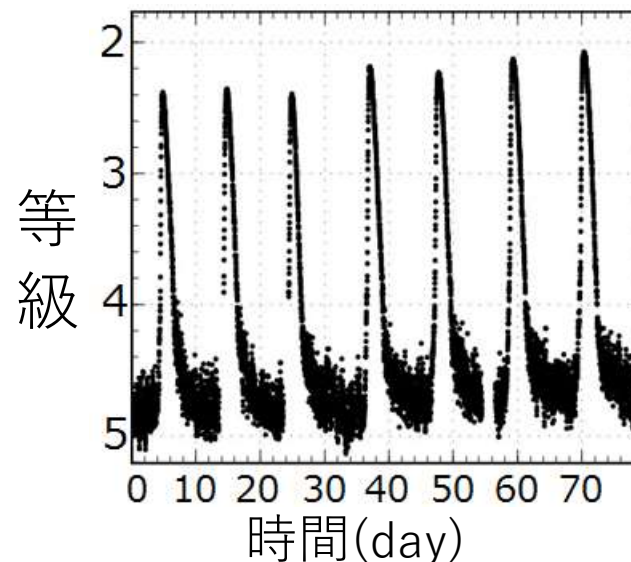
# 激変星

- 主星に**白色矮星**を持つ**近接連星系**
- 伴星からガスが流れ込み**降着円盤**を形成



# 矮新星

- 激変星のsubclass
- 軌道周期1-9時間ほど
- outburst**と呼ばれる、数等級の突発的な増光現象を起こし、数日かけて減光する
- recurrence timeは数週間から数十年

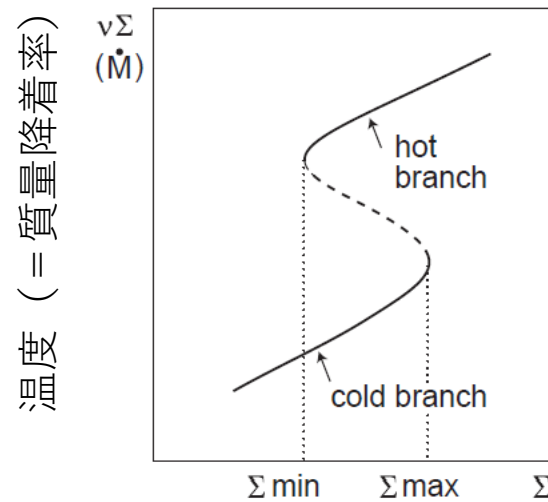


# Outburstの仕組み

(Thermal Instability Model; Osaki 1974, Hoshi 1979)

- 円盤に質量が十分たまと、水素電離が始まり円盤の粘性が上がることで温度が上昇する。

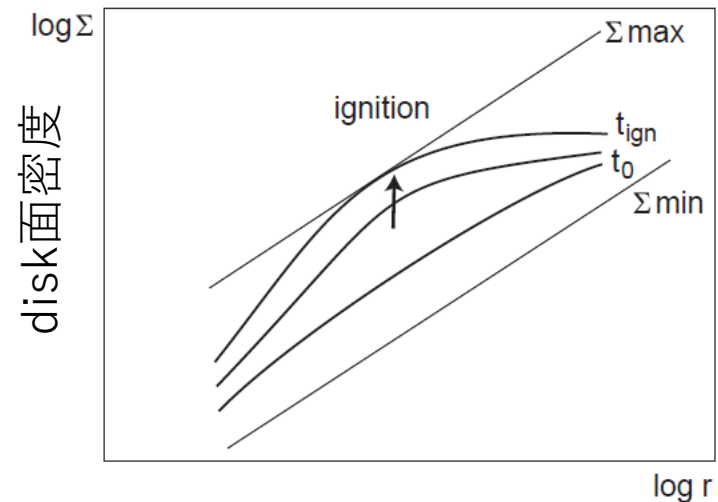
(Osaki, Meyer and Meyer-Hofmeister 2001)



(a)

diskの面密度

ある半径rにおける熱平衡曲線  
(粘性加熱率と放射冷却の釣り合い)



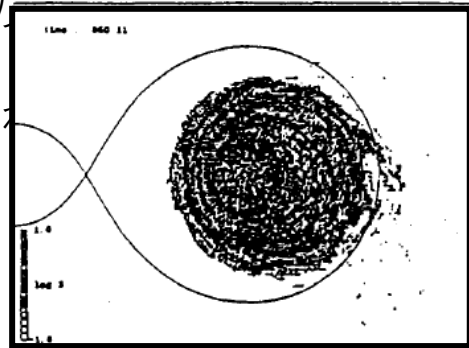
(b)

半径r

各半径での  $\Sigma_{\max}$  と  $\Sigma_{\min}$

# WZ Sge型矮新星

- WZ Sge型矮新星
  - アウトバースト頻度が特に低い（数年～数十年に一度）
  - アウトバーストが矮新星の中で最大規模（振幅7～8等、1～2ヶ月継続）
  - normal outburstはほぼ無し
- 基本的には通常のアウトバーストと同じで、一定の質量輸送率でアウトバーストが説明可能
- WZ Sge型は円盤内のガスと伴星の共鳴現象による大規模なアウトバーストになる（増光中はスーパーハンプと呼ばれる）

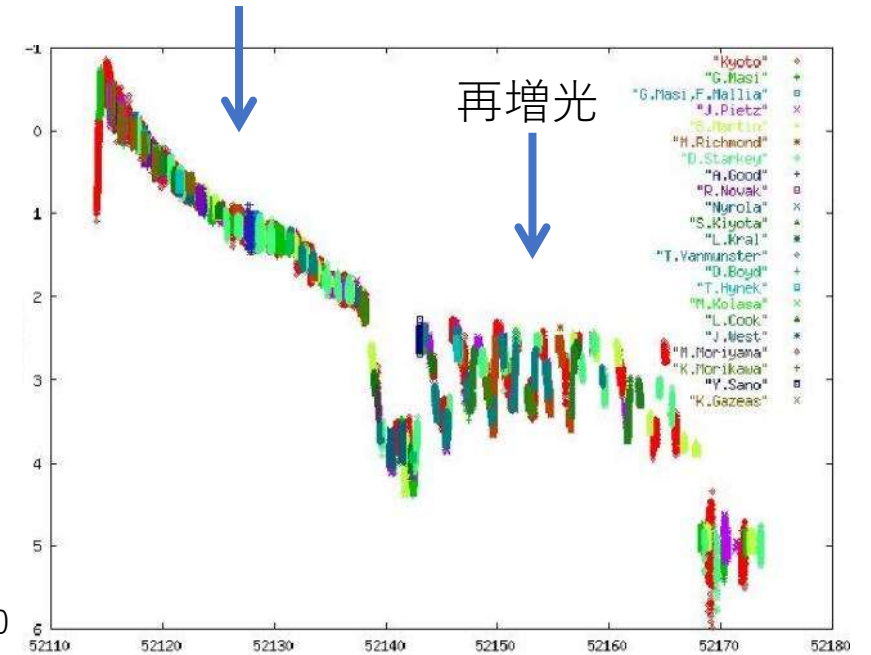


れる)

Hirose & Osaki 1990

- 増光頻度（≡発見数）が低く、未解明の現象も多く見られる
  - 再増光など、一部の現象では伴星からの質量輸送率の変化が原因ではないかと提案されているが、観測的な証拠はない（e.g. Hameury+ 2000）
- 矮新星の統一理解のため、変光メカニズムの観測的な検証が求められている

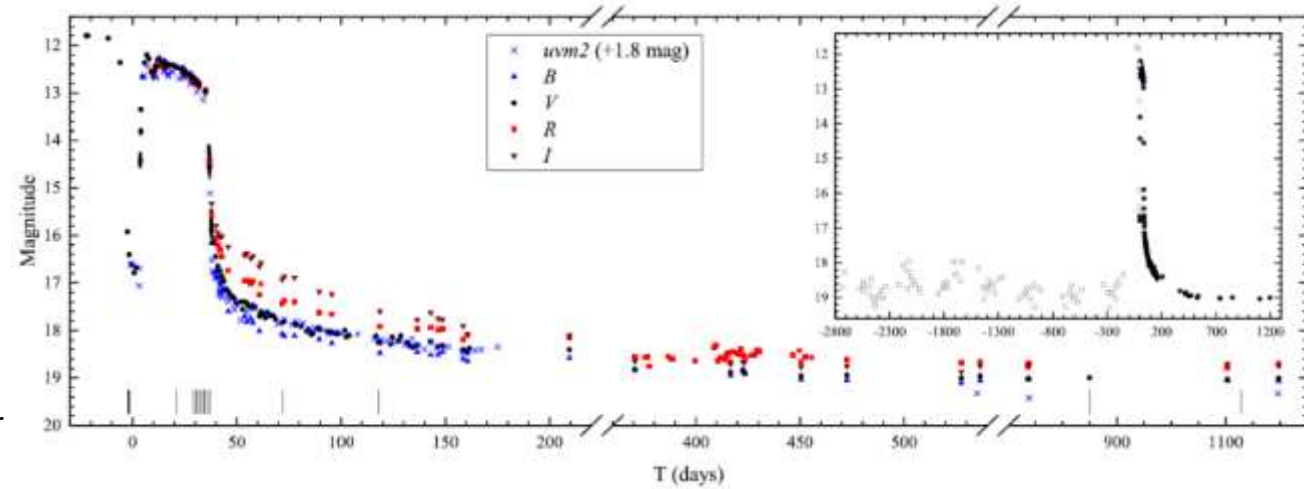
## メインアウトバースト



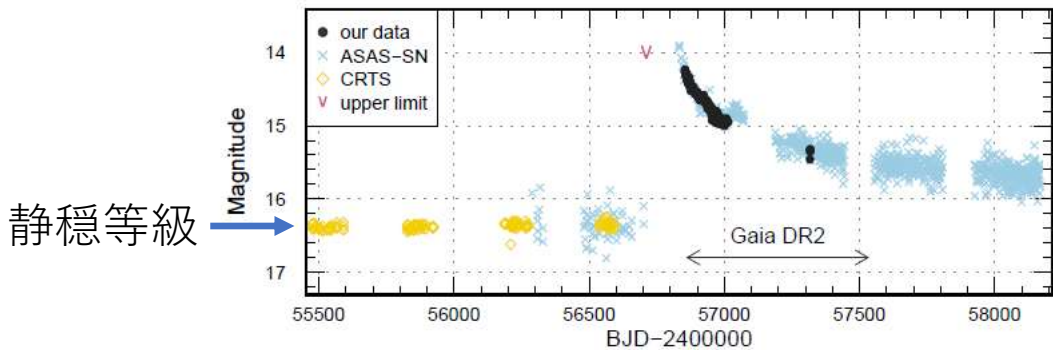
WZ Sgeの2001年のアウトバーストの光度曲線 (Ohshimaさんのスライドより)

# Fading tail

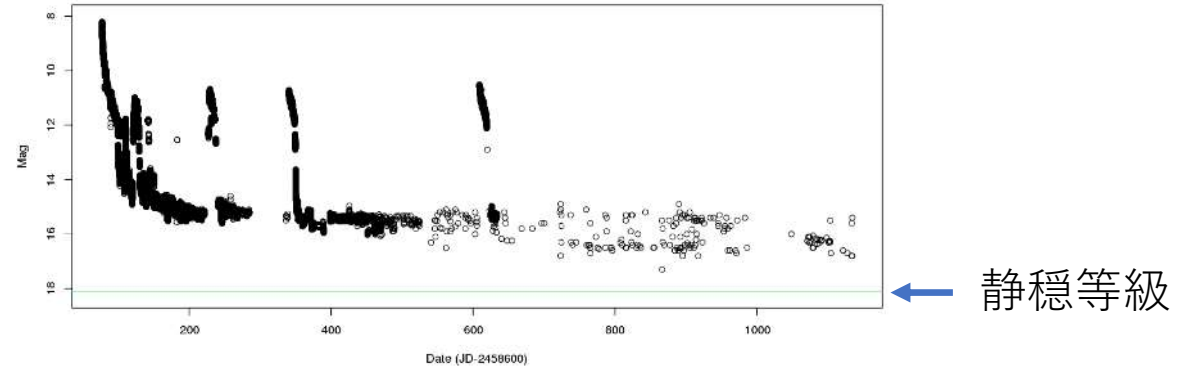
- アウトバースト終了後、増光前より1~2等程度明るいまま、1~数ヶ月程度かけて次第に静穏等級へと戻っていく現象
  - 主星が冷えたり、円盤が増光前の状態に戻ったりが原因？
- 長いものでも2年程度だが、下図の2天体は3年以上経った現在でも増光前の等級に戻っていない
  - もしかしたら質量輸送率が変化している？  
測光・分光観測により光度変動を詳しく調べた。



WZ Sge型矮新星J1222-3115の光度曲線  
500~700日のあたりで完全に  
静穏等級に戻っている (Neustroev+ 2017)



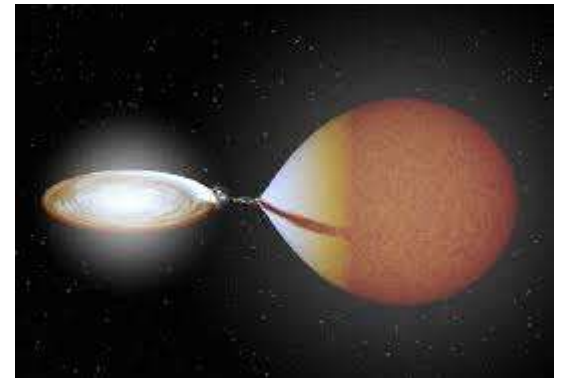
ASASSN-14dxの光度曲線  
(Isogai+ 2018)  
アウトバーストのメイン部分は観測が欠損  
しており、fading atialのみが見えている



V3101 Cygの光度曲線  
(Tampo+ 2022)

# 質量輸送率は変化するのか？

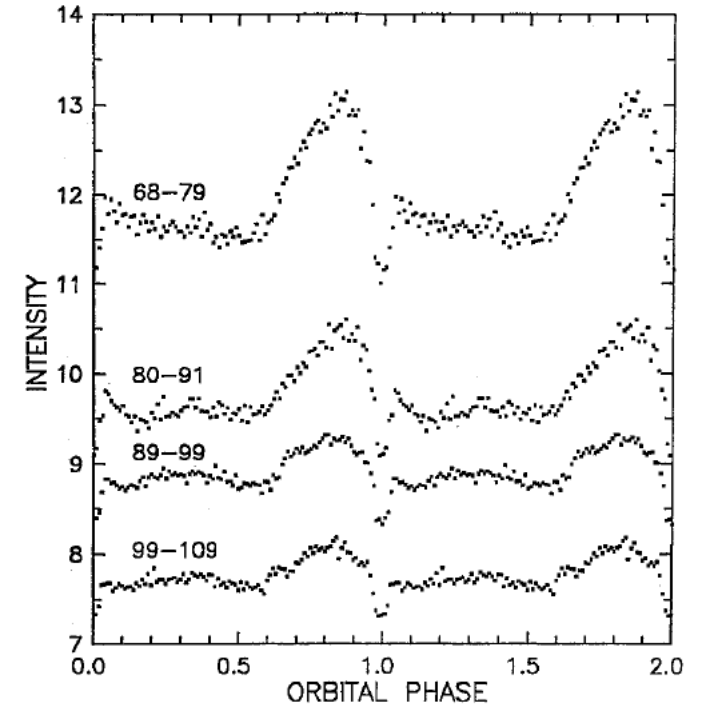
- 激変星の変光メカニズムに関して、昔から質量輸送率の変化で説明するモデルはよく提案されている。しかし、
  - 質量輸送率が増加している様子は観測されていない
  - 伴星が照射を受けることで起きると説明されるが、照射を受けたところで質量輸送率は増加しない
    - 理由1) L1点は円盤の影に隠れている
    - 理由2) 少し離れた場所は加熱されるが、コリオリ力が邪魔でL1点までは容易にたどり着けない(Osaki & Meyer, 2003, 2004)



<http://users.uoa.gr/~kgaze/>

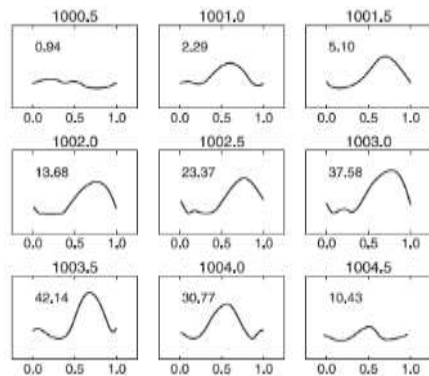
# Fading tailでの軌道運動の観測例

- 別天体ではfading tailでのhot spotの光度変化は調べられている
- Patterson+ (2002)はWZ Sgeのfading tailでsuperhumpと軌道運動の2つのシグナルを検出。  
hot spotの光度が非常に上がっていて、  
質量輸送率が最大60倍になっていると主張。
- しかし、Osaki & Meyer (2003)は、そのような変動はsuperhumpで説明可能だとして、  
質量輸送率増加の証拠にはならないと反論した。
  - High inclinationな系では軌道位相によってsuperhumpの見え方が代わり（左下図）、合成すると右下図のようになる。  
実際、Patterson+ (2002)のデータでは常にsuperhumpも見えていた。

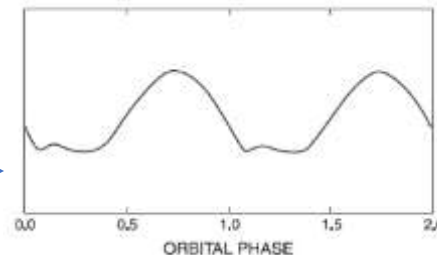


WZ SgeのFading tailを軌道周期で畳んだもの。  
肩の数字は増光日を0としたときの日付

(Patterson+ 2002)

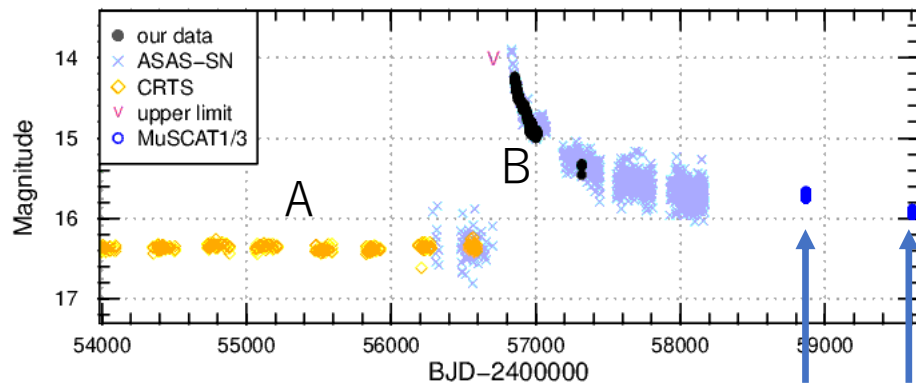


9日分の  
Superhumpを  
軌道周期で畳む



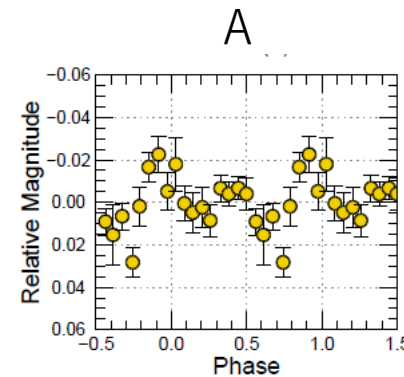
# ASASSN-14dxの軌道運動

- ASASSN-14dxは2014年のアウトバーストから静穏等級に戻っていない
- CRTSのサーベイデータから、増光前の軌道変動が検出されている
- アウトバースト終了直後の半年のデータでも同様のprofileの軌道運動が検出されているが、**振幅は7倍**となっている。
- superhumpは見えていないので、**実際に質量輸送率が増加**している？
- このdouble peakの変動は**本当にhot spot由来**なのか？ (hot spotは普通single peak)

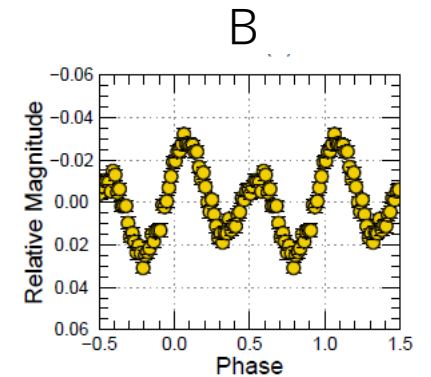


ASASSN-14dxの光度曲線  
アウトバーストのデータは  
取り逃している

2019年12月、2022年1月に  
**測光・分光観測を実施**



増光前の  
軌道運動

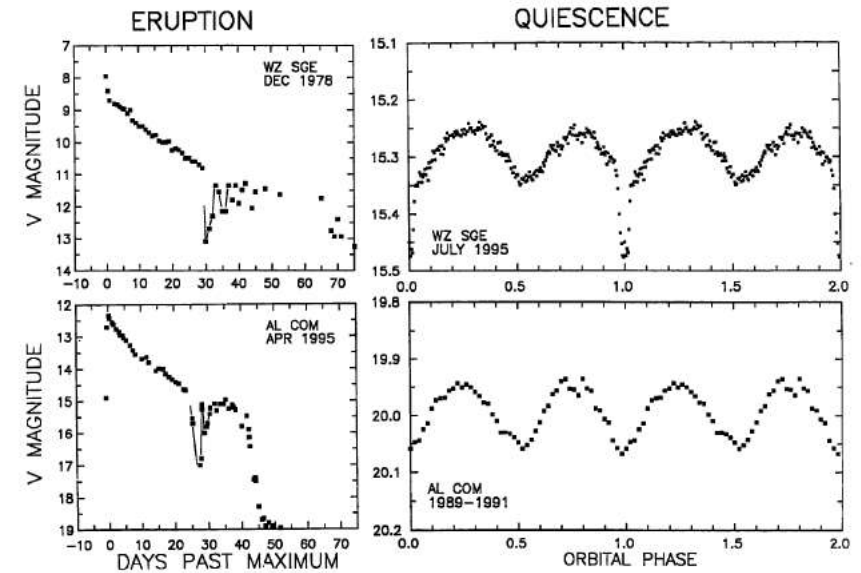


増光後、半年間の  
平均軌道運動



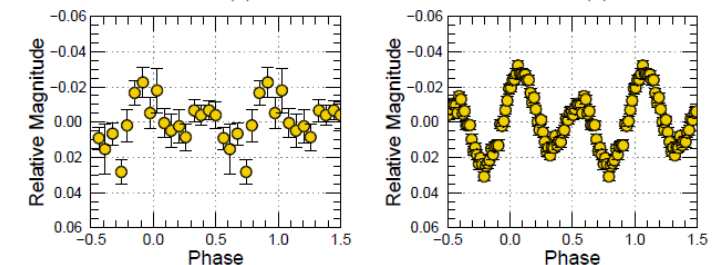
# WZ Sge型矮新星の静穏時の変光

- 静穏時（≠ fading tail）のWZ Sge型矮新星では double peakの軌道運動が観測されている（特にhigh inclinationの系）
- 特徴的なdouble peakの原因は
  - 光学的に薄い降着円盤を貫通して、hot spotが裏側にいるときも明るく見える (Skidmore+ 2000)
  - 円盤内の密度波とhot spot等による4つの衝撃波が相互作用をしている (Kokonov+ 2015)
- いずれにせよメインの光源はhot spot
- ASASSN-14dxは静穏状態ではないもののよく似たdouble peakの変動を示している。
- 14dxは食がなく位相が確認できないので分光・測光準同時観測をすることで double peak = hot spot由来なのかを確認した。



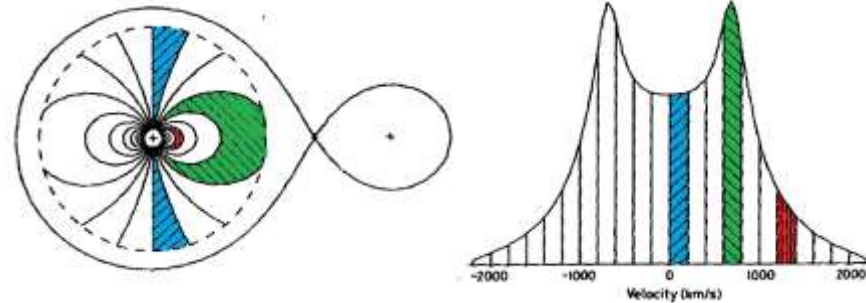
アウトバーストの光度曲線と増光前の静穏状態の軌道運動  
(上: WZ Sge、下図: AL Com)

(Patterson+ 1996)



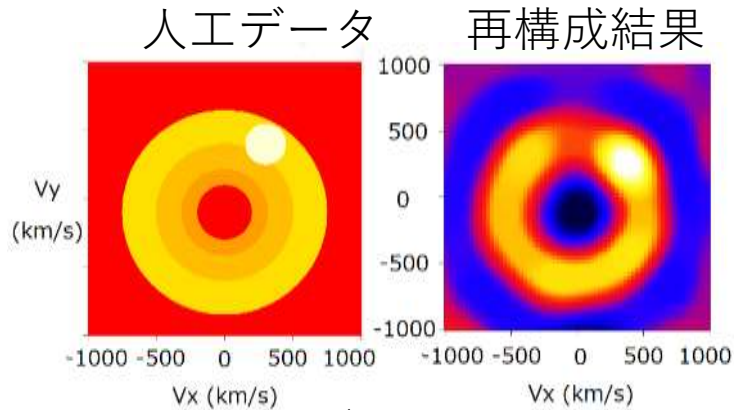
# Doppler Tomography (Marsh & Horne 1988)

- Tomography = 断層撮影法。  
CTスキャンのように、連星系を  
いろいろな方向から分光観測し、  
輝線プロファイル変化から  
速度空間上での輝度構造を推定する。
- Uemura et al. 2015で  
開発されたコードを使用

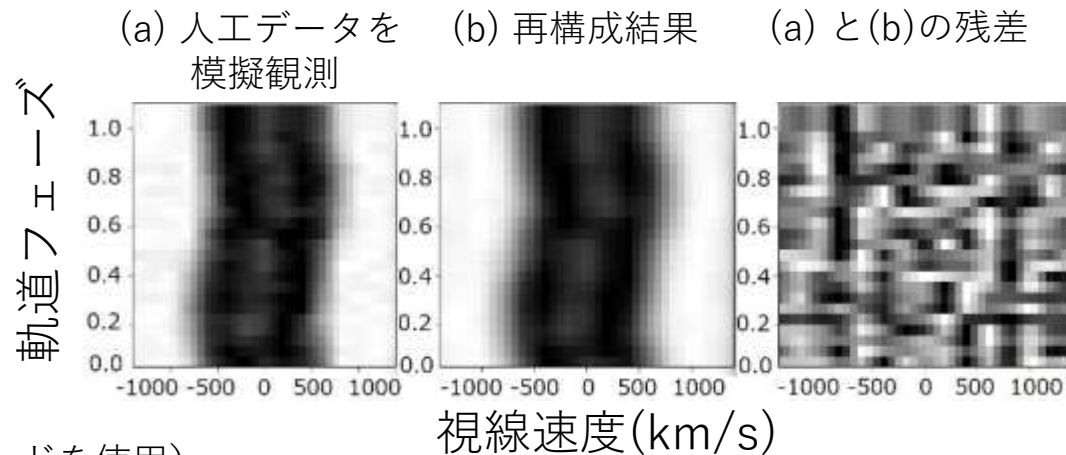


下から円盤を見たとき、「等視線速度線」は上図のようになる。 → 円盤由来の輝線は double peak の形で観測される (Hellier 2001)

Doppler Tomographyの例：

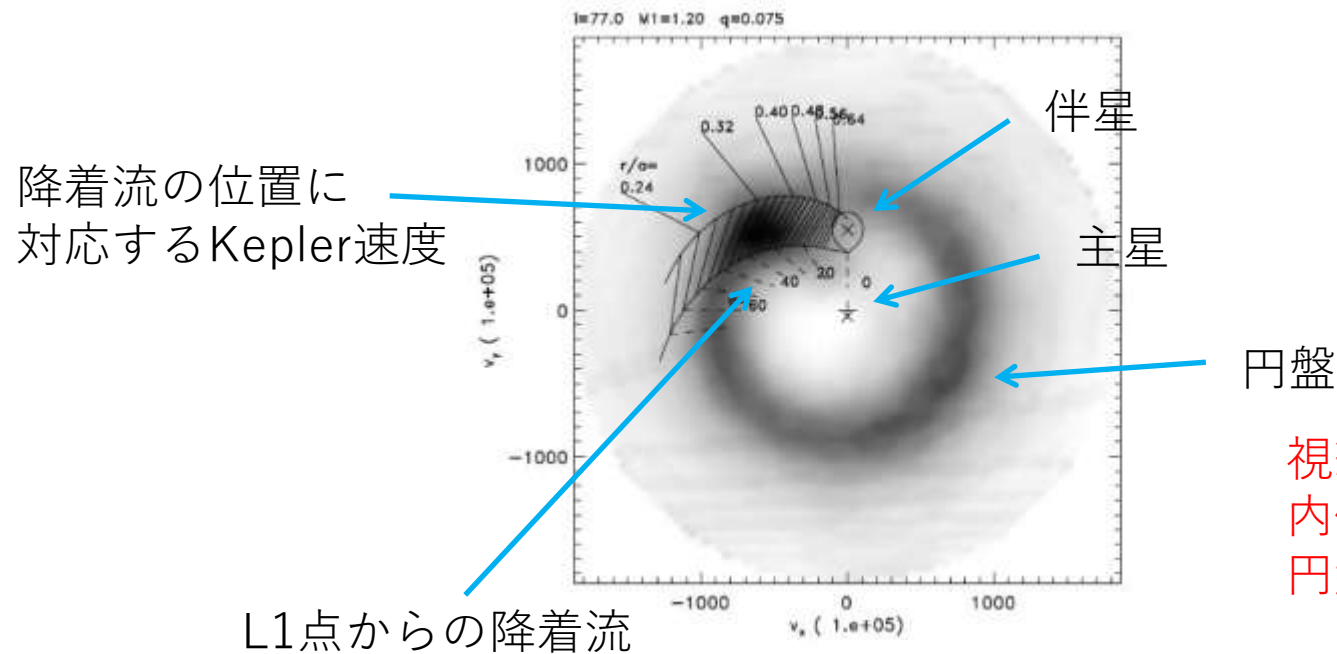


(Uemura et al. 2015のコードを使用)



# Doppler tomographyで何が見えるか

- WZ Sge（プロトタイプ天体）の静穏時の観測では円盤とhot spotが観測されている



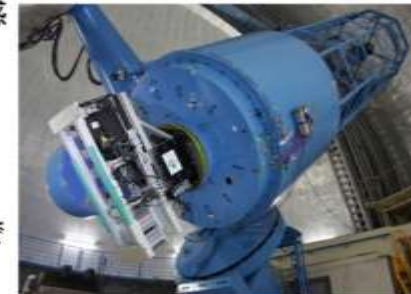
WZ Sgeの静穏時のスペクトル (Spruit and Rutten 1998)

# MuSCATによる多波長観測

- せいめいと同一敷地内にある188cm 望遠鏡に搭載された3色同時撮像装置**MuSCAT**とHawaiiの2m望遠鏡の**MuSCAT3**で準同時観測を実施

## MuSCAT: トランジット観測を目的とした3色撮像カメラ

- **M**ulticolor **S**imultaneous **C**amera for studying **A**tmospheres of **T**ransiting exoplanets
- $B'_{2}$  (400-550nm)、 $R'_{2}$  (550-700nm)、 $Z_{s,2}$  (800-920nm) の3バンドで同時撮像
- 1k CCD x 3台、視野6.1分角
- 主目的: 太陽系近傍のトランジット系外惑星の**発見確認**および**特徴付け**
- 科研費(基盤A、代表: 成田憲保)をベースに、2013年度より設計・製作を開始
- 2014年12月にファーストライト
- 2015B期よりPI持込装置としてopen useで運用開始、2016A期より一般公開



福井さん発表スライド



成田さん発表スライド

2019年12月

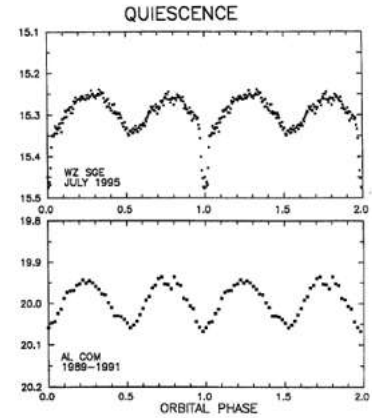
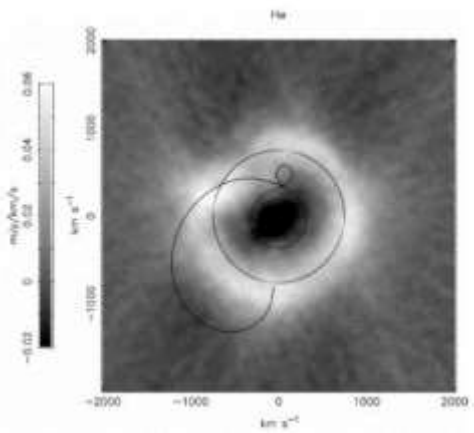
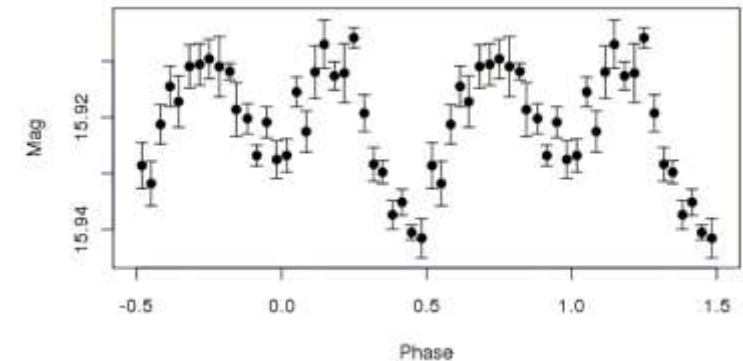
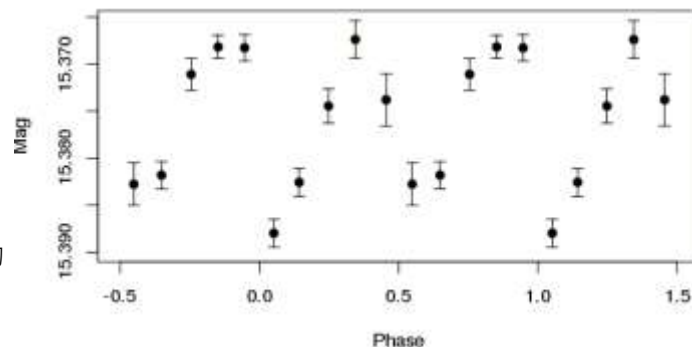
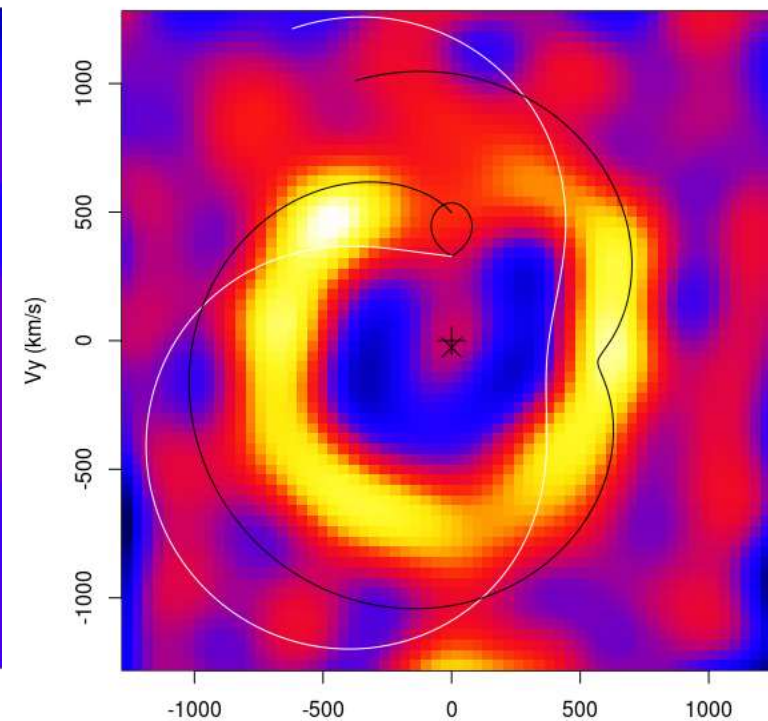
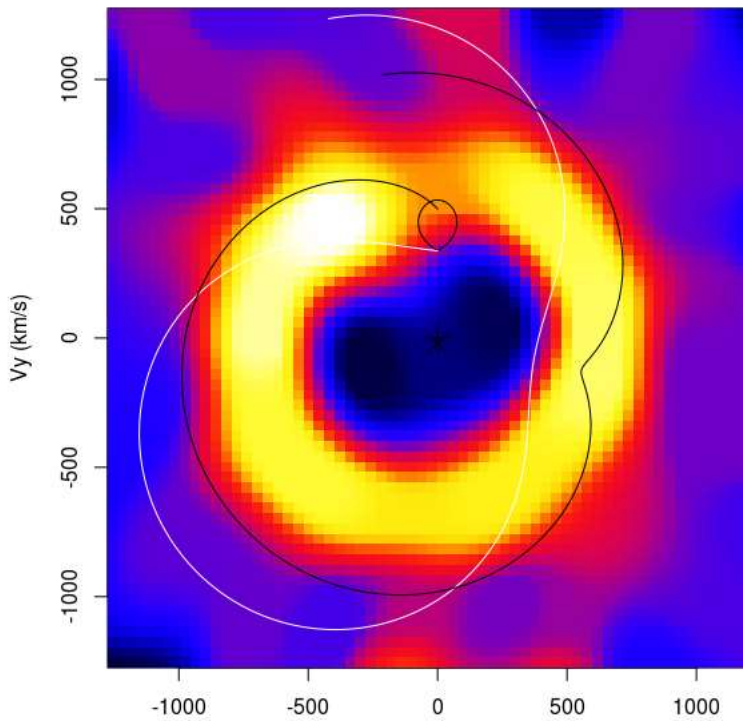
2022年1月

# 観測結果

- H $\alpha$  の連続分光データを Doppler tomography で解析し、hot spot の位相を特定 (plot に使用した連星パラメータは WZ Sge 型の典型的な値)
- 光度変動の hot spot の位相が一致しているのが確認できた

domap of a14dx on 2019/12

domap of a14dx on 2022/01



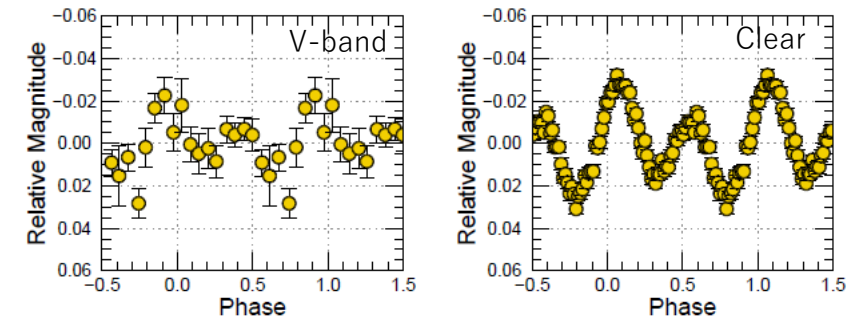
Cf. WZ Sge の静穏状態の H $\alpha$  の Doppler Map (Skidmore+ 2000)

Cf. WZ Sge/AL Com の光度変動 (Patterson+ 2002)

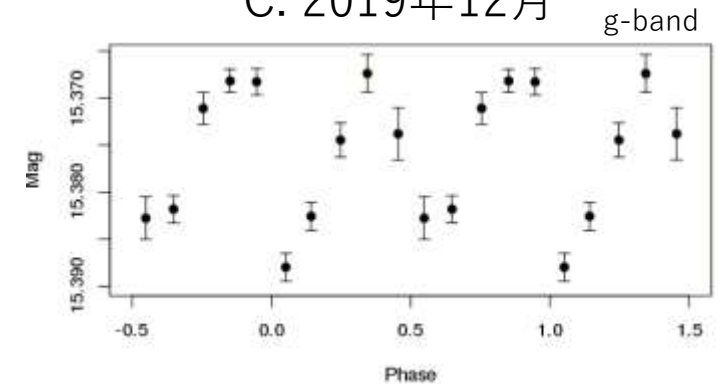
# 観測結果2

- 多色測光データから、変動がhot spotとして矛盾のない色かを調べる
- 残念ながら観測は曇天時が多く、色変化を十分な精度で捉えることは出来なかった
- g, r, (i), zの3~4色データをblackbody fitすると1.1万K程度。
  - 白色矮星やhot spotの温度として標準的な値
- 一部のWZ Sge型矮新星ではアウトバースト後に大きな円盤が広がっていて、赤外超過などは見られることがある。(e.g. Matsui+ 2009)  
今回はそれは見られず、fading tailが明るい原因は円盤ではなさそう。
- 増光前（下図A）を基準にすると、double peakの軌道変動の振幅はBで7倍、C, Dで1.2—1.3倍
- **アウトバースト前後で質量輸送率が変化した初めてのWZ Sge型矮新星？**

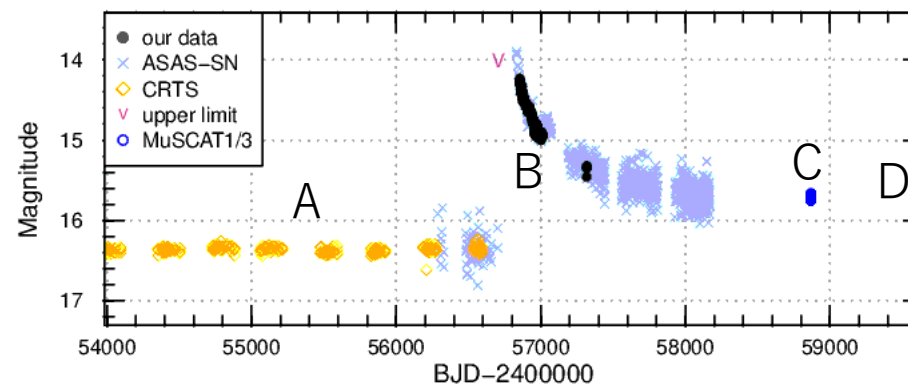
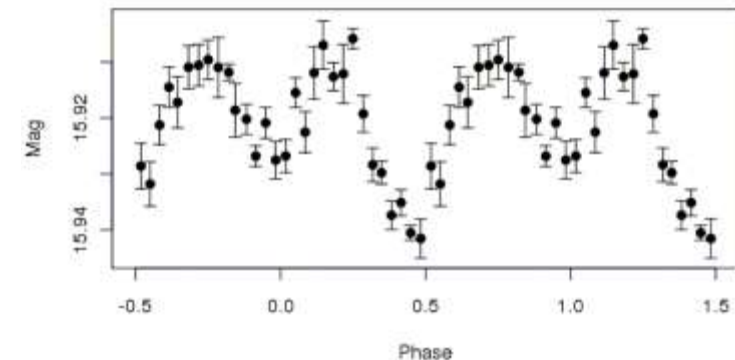
A. Before outburst B. After outburst



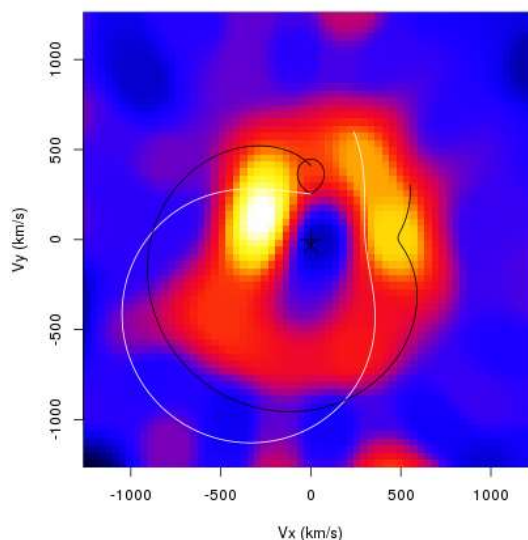
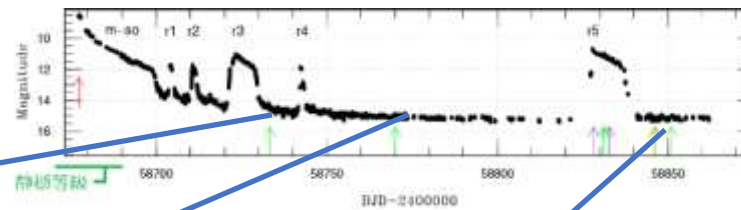
C. 2019年12月



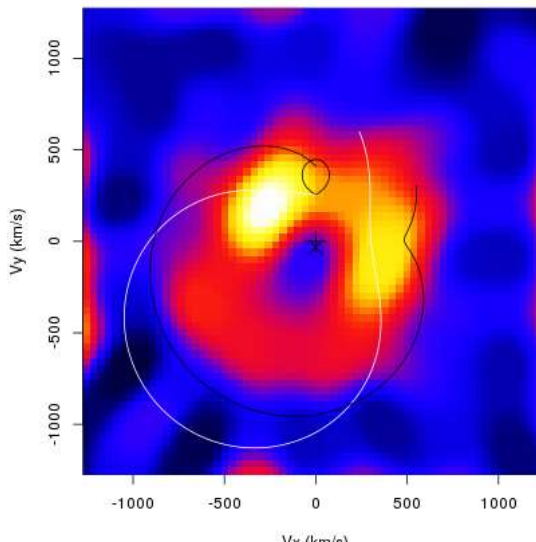
D. 2022年1月



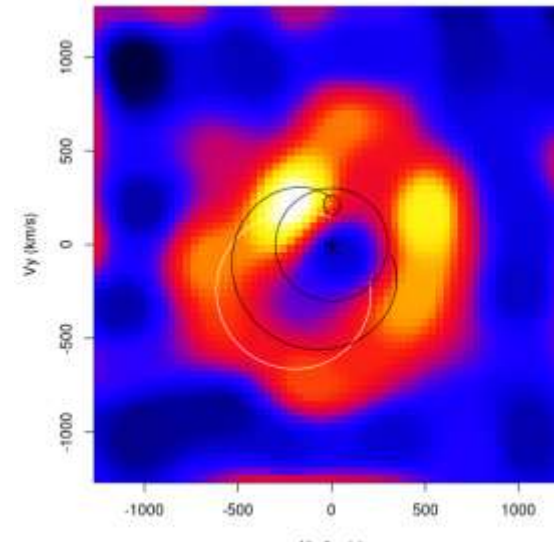
# V3101 Cygでも同様の結果



10月13日



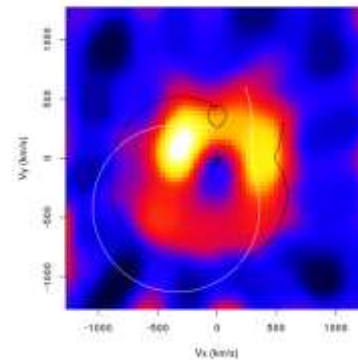
12月28日



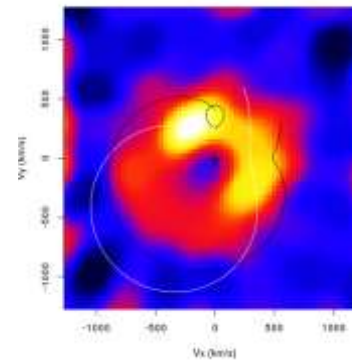
4月28日

若干回転しているが、大きな変化はない。  
軌道周期の誤差による影響は  
0.01 phase (= 4度の回転) 程度。  
早期スーパーハンプのプロファイルから  
目で決めたepochが大きく効いている (右図)。

いずれにせよ伴星から外れており  
hot spotあたり (と反対側) が輝いている。



-0.05 phase



+0.05 phase

# V3101 Cyg のMuSCATによる多色測光

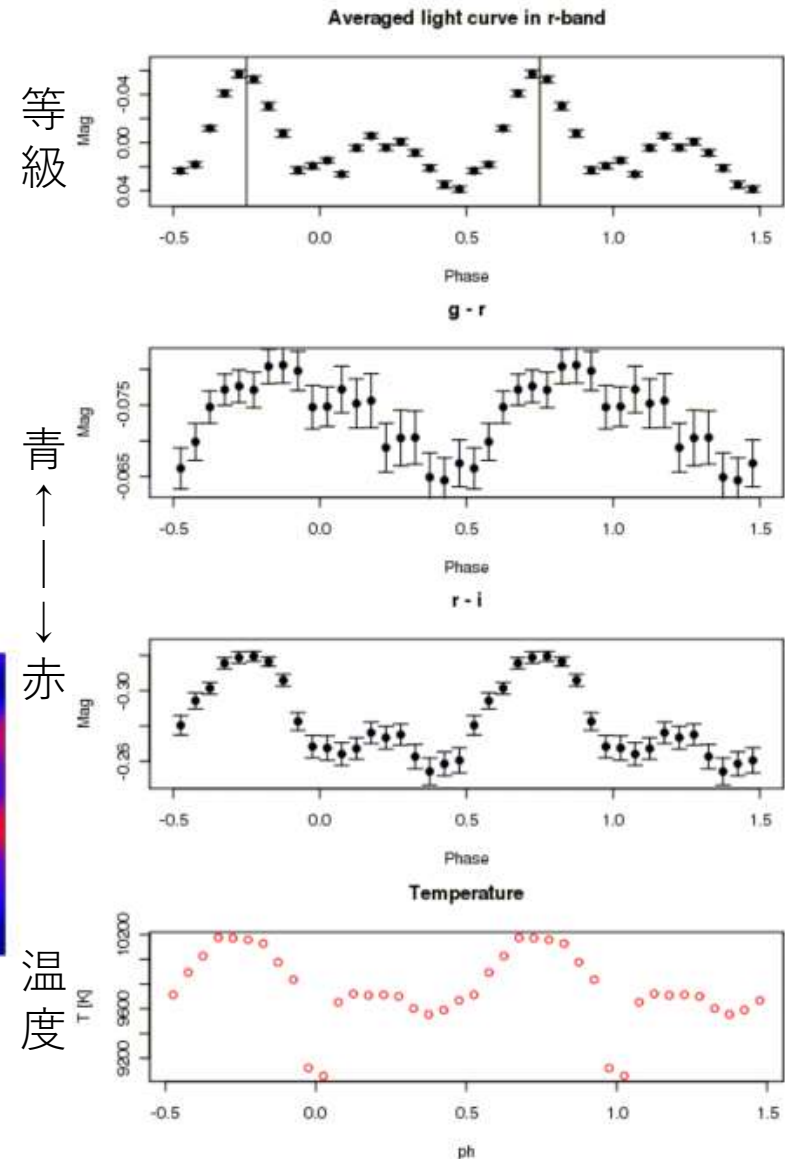
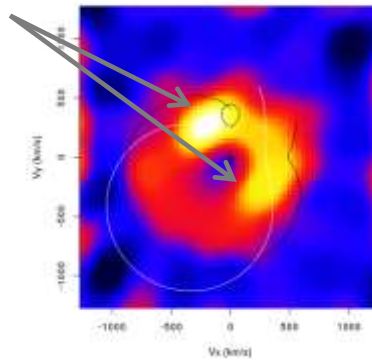
- 2019年9月4日～12月28日のうち5日間、岡山188cmのMuSCAT (g, r, z)とテネリフェ152cmのMuSCAT2(g, r, l, z)で同時多色測光観測を行い、軌道周期に一致する周期変動を調べた。

- 明るいときに色は青くなっており、光度変動の起源は高温成分

- 光度変動のダブルピークとDoppler Mapの2つのspotが同じ位相を持つことを確認

- 照射によって加熱された伴星は数千K程度だがhot spotは10000--15000Kなのでそれらしい温度

- 位相を+0.05ズラすと光度曲線のpeakもhot spotとして矛盾ない位置に来る





# まとめ

- WZ Sge型矮新星では、アウトバースト終了後、1ヶ月～2年ほど静穏状態より明るいfading tailが見られる
- Fading tailではsuperhump由来の軌道変動が見られることがある
- ASASSN-14dx/V3101 Cygはfading tailが3年以上継続。軌道変動も見られるが、superhumpは検出されず、fading tailなのか、何かしらのstate transitionが発生したのか不明だった。
- 測光・分光データから、今回の2天体のfading tailで見られるdouble peakの軌道変動は、他のWZ Sge型矮新星の静穏状態と同様にhot spot由来のものと思われる
- 振幅の増加を伴星からの質量輸送率の変化と考えると、ASASSN-14dxでは質量輸送率がアウトバースト終了直後で7倍、6～8年後には1.2—1.3倍になっている
- 今回の観測は天文台時間を使用しました。「とりあえず撮ってみる」という精神で3.8mの望遠鏡を利用できるのは大変ありがたいです。