

ヘリウム激変星 SDSS J1411の 多色測光から探る再増光のメカニズム

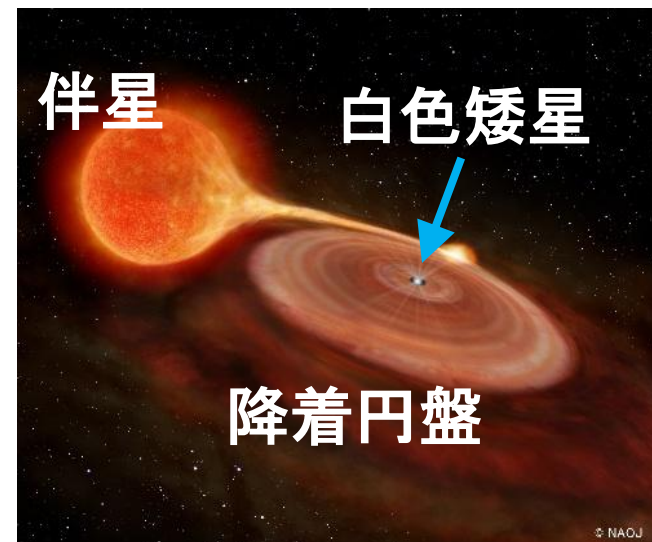


磯貝 桂介 京都大学 岡山天文台 研究員

小路口直冬, 若松恭行, 大西隆平, 野上大作 (京都大学),
河合誠之, 谷津陽一, 伊藤亮介, 村田勝寛 (東京工業大),
大島誠人 (兵庫県立大), 佐野康男, 伊藤弘, 清田誠一郎,
笠井潔 (VSOLJ), Geoff Stone, Tonny Vanmunster, Pavol A.
Dubovsky, Elena Pavlenko, 他 VSNET Collaborations

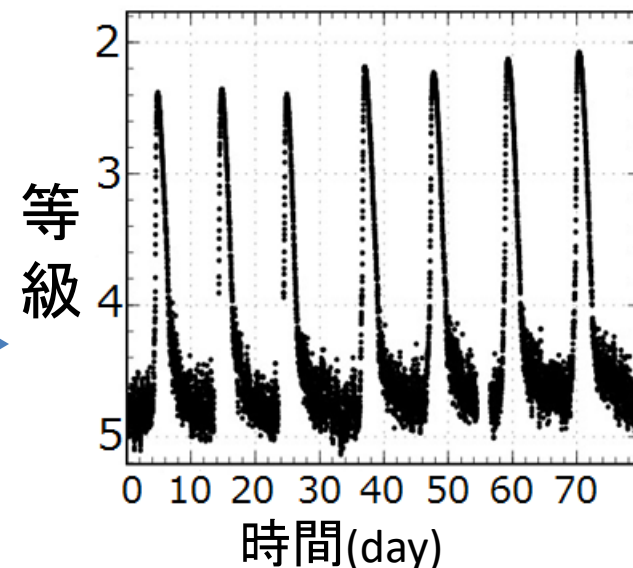
激変星

- 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

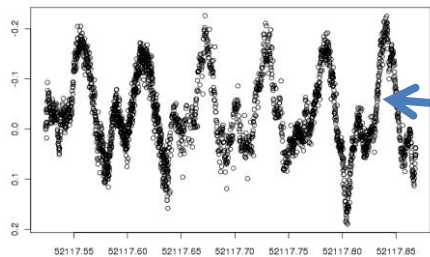
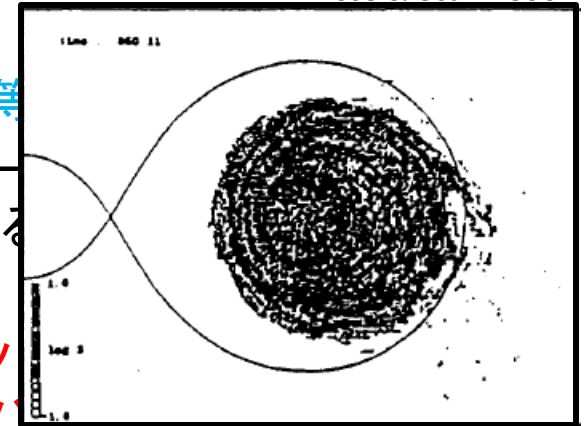
- 激変星のsubclass
- 軌道周期1-9時間ほど
- **outburst**と呼ばれる、数等級の突発的な増光現象を起こし、
数日かけて減光する
- recurrence timeは数週間から数十年



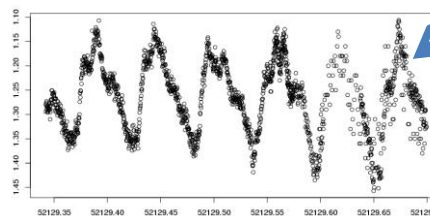
WZ Sge型矮新星

- 低頻度(数年～数十年に一度)で大規模な増光(7～8等)
- 質量比(=伴星/主星)が小さい(主星まわりのロシュロー
円盤が大きく広がることができ、大規模なoutburstになる)
- 特徴はoutburst中に見られる微小変動:
円盤が「2:1共鳴半径」に達することで起きる早期スーパーハンプ
円盤が「3:1共鳴半径」に達することで起きるスーパーハンプ

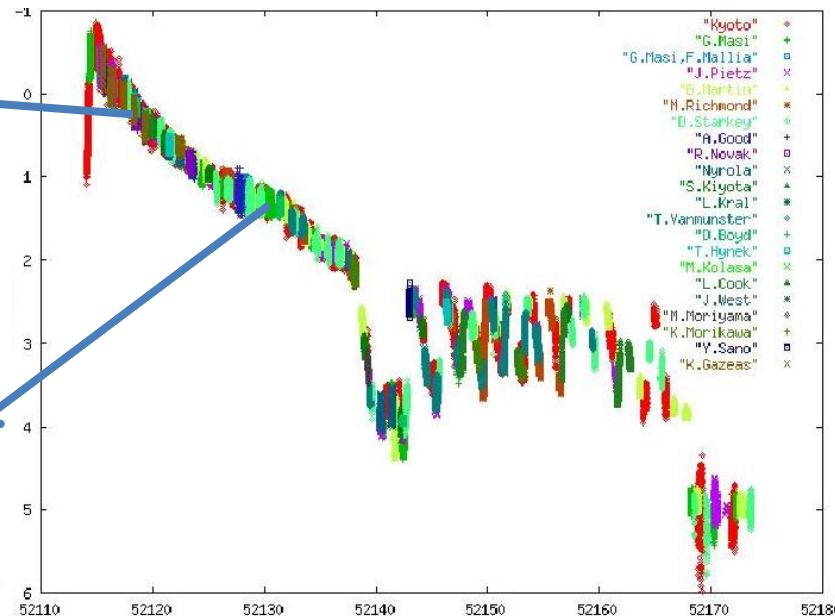
Hirose & Osaki 1990



早期スーパーハンプ

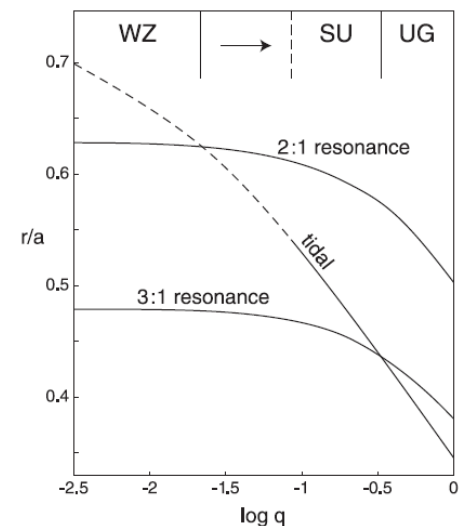


スーパーハンプ



2001年のWZ Sgeのsuperoutburst
(Ohshimaさんのスライドより)

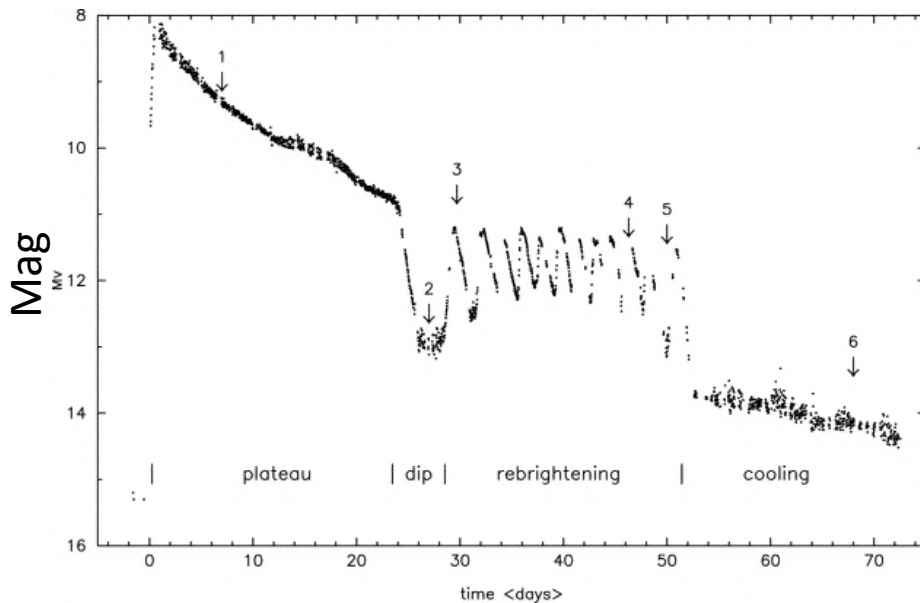
半径／連星間距離



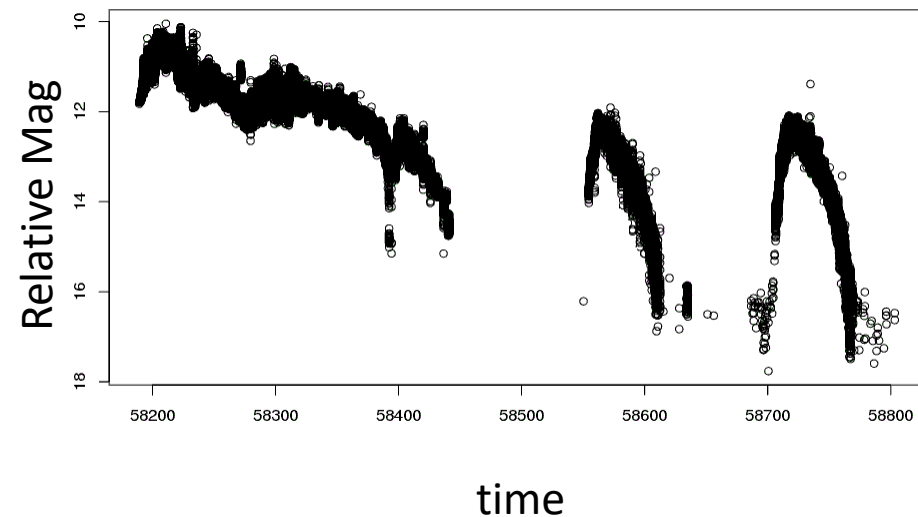
質量比(=伴星/主星)
(Osaki and Meyer, 2002)

今回のテーマ: 再増光

- WZ Sge型矮新星やX線連星はsuperoutburst後に再増光を示す。しかし機構は未解明。

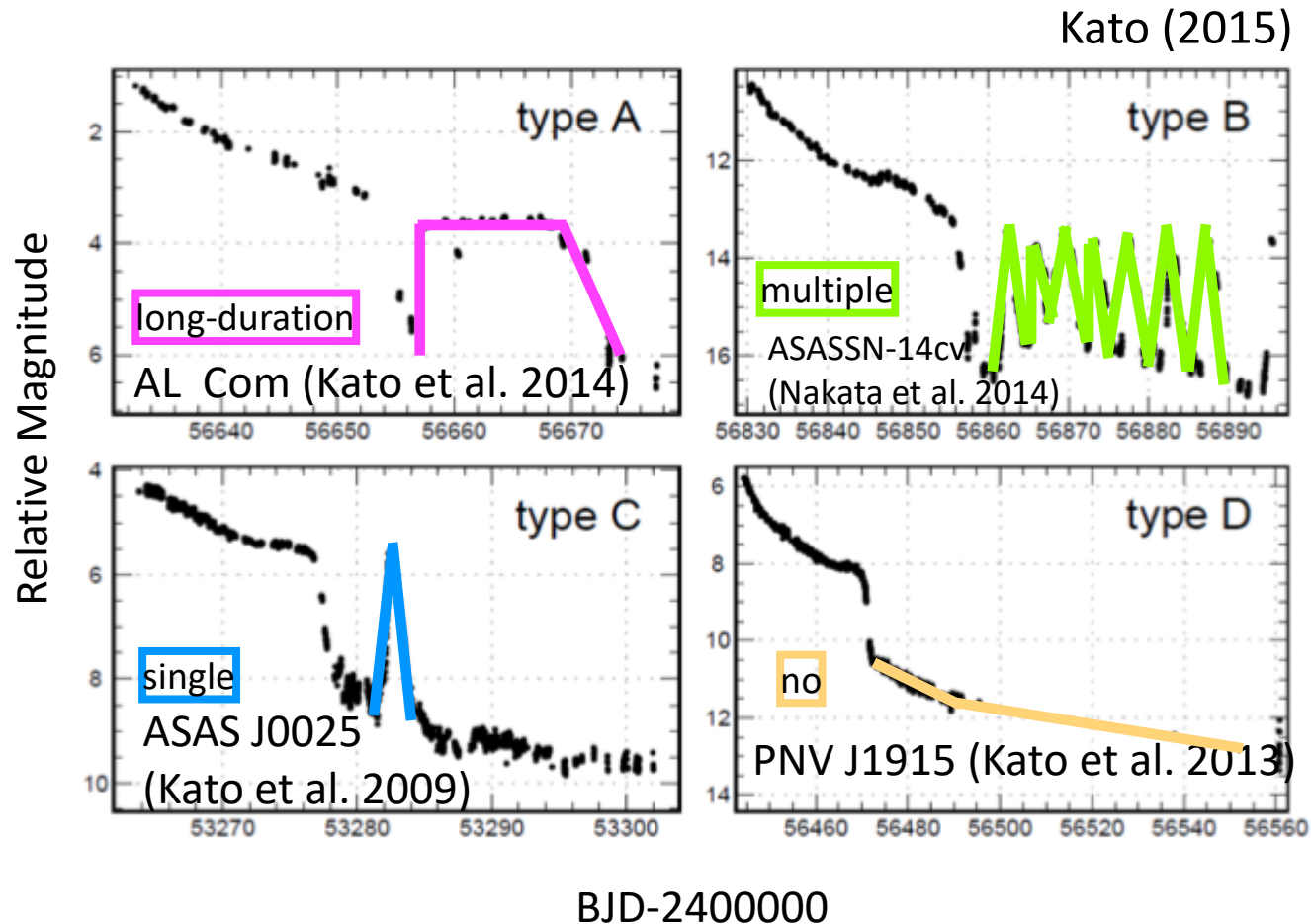


矮新星 WZ Sge (Godon+ 2004, data from VSNET)



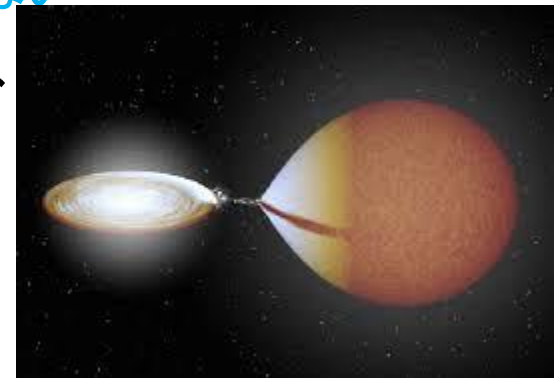
ブラックホール連星 ASASSN-18ey
(Niijima+ in prep., data from VSNET)

再増光のタイプいろいろ



再増光の仕組み

- 基本的にはoutburstと同じで円盤が光っているが、
何故outburst直後にまた明るくなるのかが謎。
 - 次の2つの説がある
 - 伴星からの質量輸送率が増加 (Hameury et al. 2000)
 - 粘性の増加によるアウトバースト
(Osaki, Meyer, Meyer-Hofmeister 2001)
 - 前者のEnhanced Mass Transfer説は疑問が多い
 - 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)
- ただし、描像が簡単だからか信じている人は多い

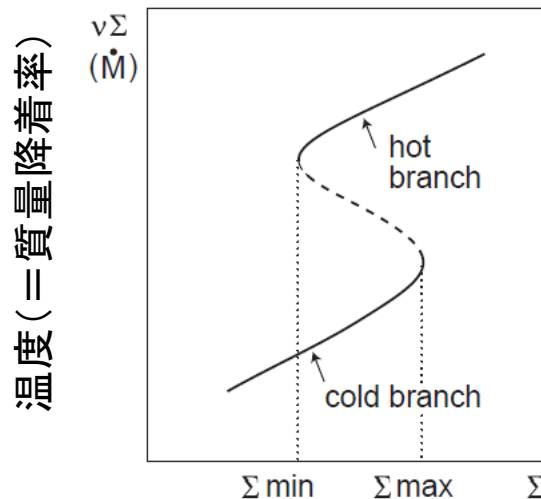


Outburstの仕組み

(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。

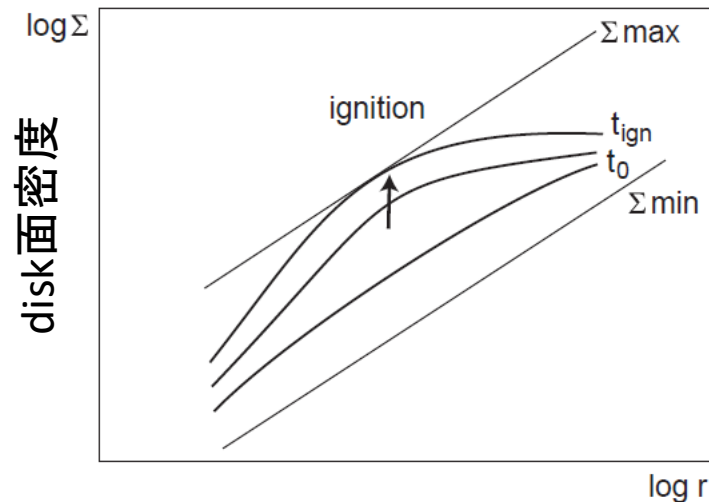
(Osaki, Meyer and Meyer-Hofmeister 2001)



(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)

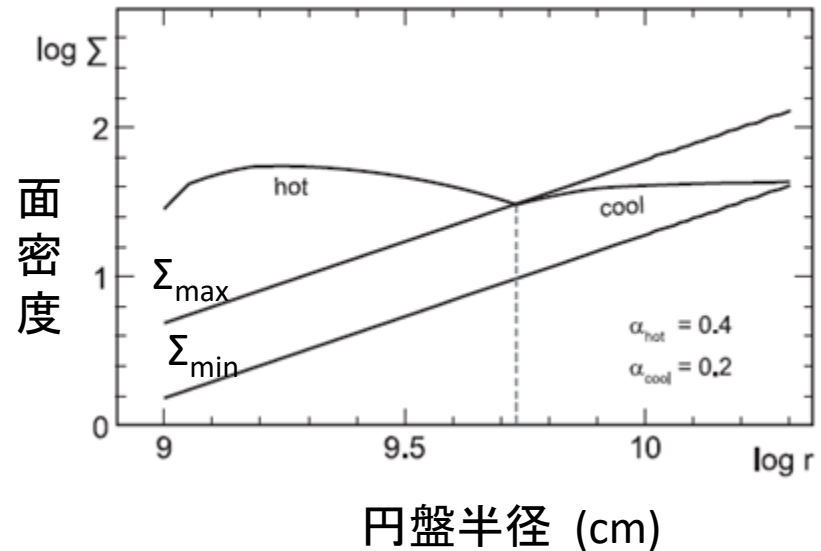
半径 r

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

粘性の増加による再増光

(Meyer & Meyer-Hofmeister, 2015)

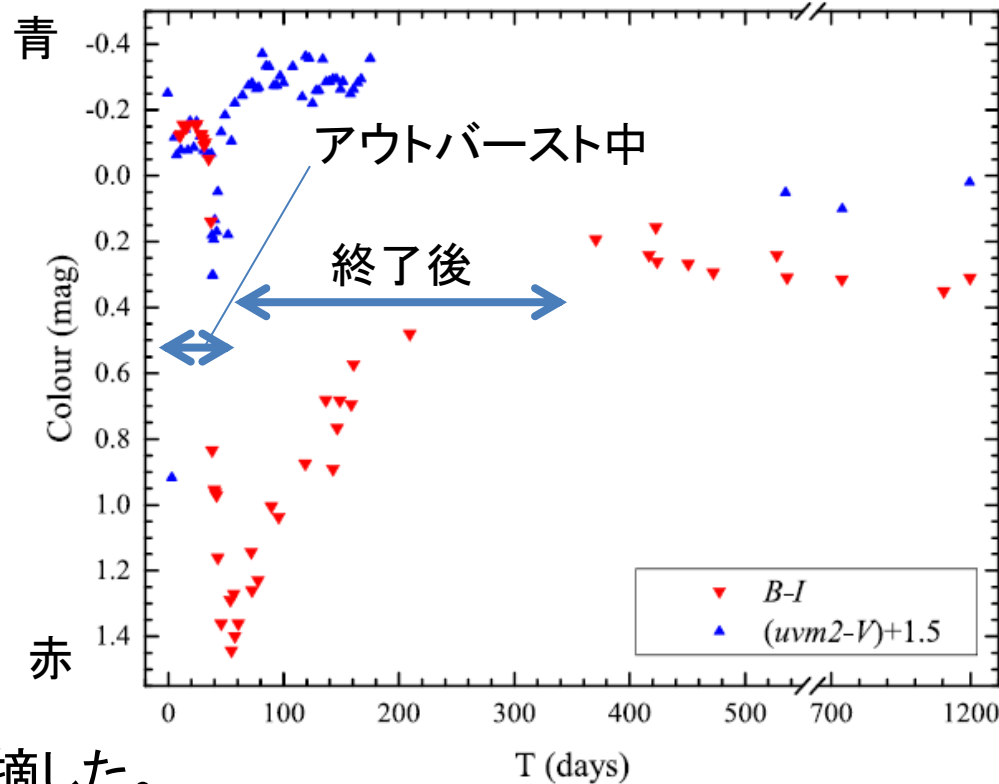
- outburstは円盤外側から次第に終了していく (cooling waveと呼ばれる)。
- しかし、内側の面密度が $\Sigma_{\max}$ を超えていると円盤内側はcool stateにはなれず、cooling waveは反射され再増光を起こす。
- 実際にcooling waveが反射されるかは、
 - $\Sigma_{\min}$ の $\Sigma_{\max}$ の差
 - waveの伝わる速度 $\propto C_s^\alpha$ C_s : 音速に依存する。
- 粘性が増加すれば $\Sigma_{\min}$ の $\Sigma_{\max}$ の距離は縮み、waveの伝播速度も上がる。
- superoutburst直後は円盤全体の乱流で、ダイナモ効果によって粘性が増加(してるかも)
- つまり、粘性が増加することで再増光を起こしやすくなっている？
- ただし、再増光を起こすたび規模は小さくなるため、観測を再現するにはどこからか質量を与えてやる必要がある。



Mass Reservoir Model (Kato et al. 1998)

Neustroev et al. 2017

- WZ Sge型のsuperoutburst
終了後に赤い状態が続く
様子が観測されている
(e.g. Matsui et al. 2008)
- 円盤外縁部に低温のmass
が残っているのでは？
- 外縁部にたまった質量が
内側へ降り注ぐことで再増光を
何度も起こしているのでは。
Kato+ 1998は3:1共鳴半径の
外側に貯まったdiskの存在を指摘した。
- 再増光の前後でMass Reservoirの
減少を観測できるだろうか？

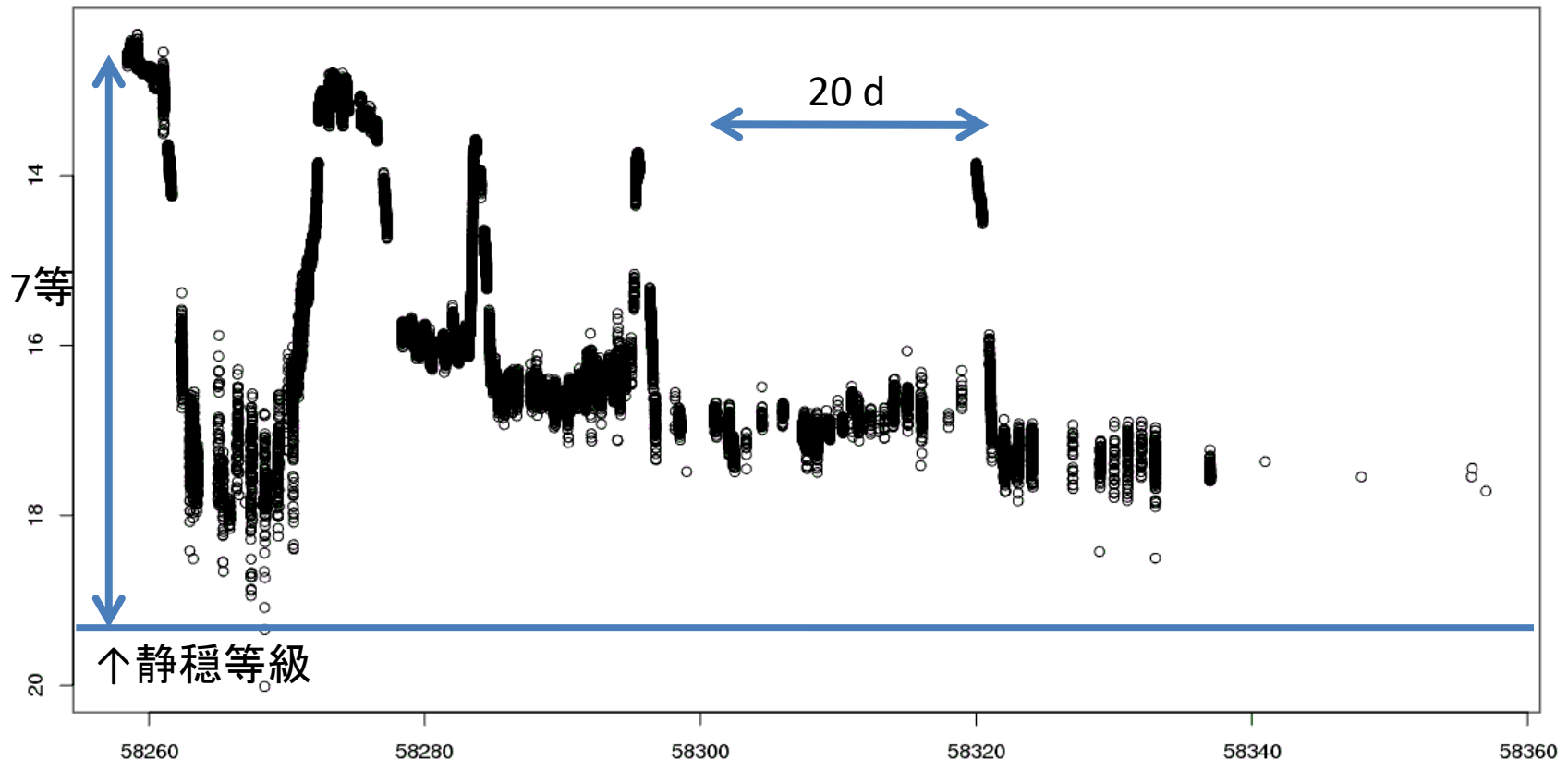


Inner hot region

Outer cool disk (=Mass Reservoir)

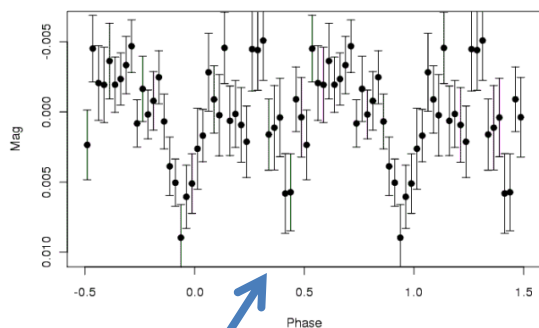
激変星 SDSS J1411の観測

- ヘリウム激変星 SDSS J1411の観測で、
“Double superoutburst” + 複数再増光が観測された

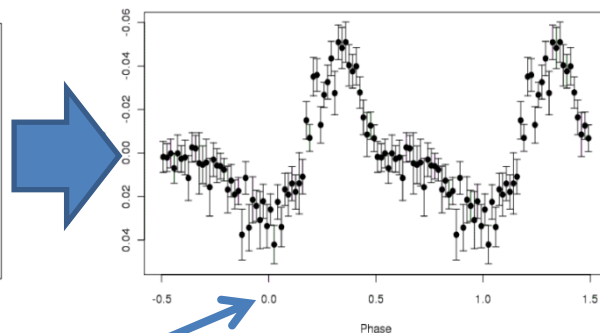


Double Superoutburst

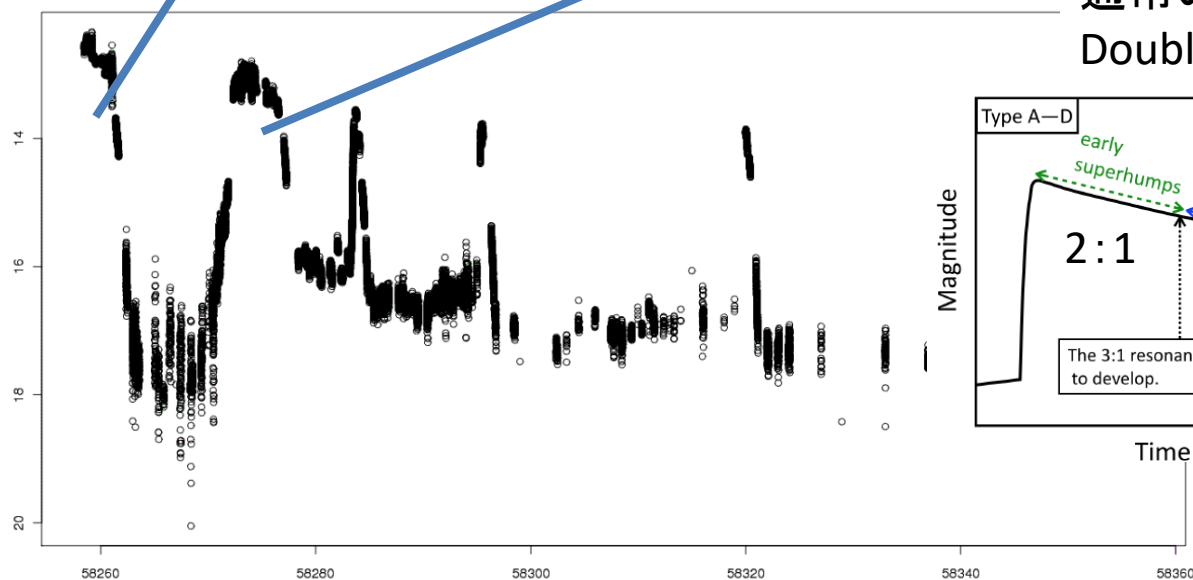
2:1共鳴による
早期スーパーハンプ



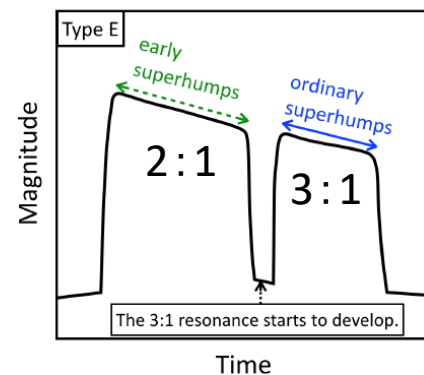
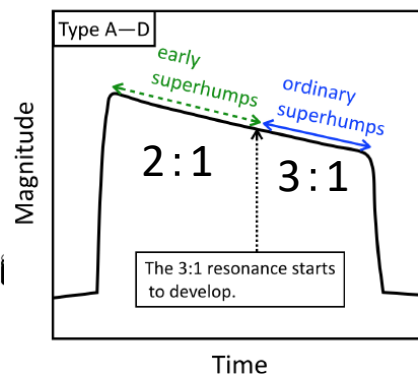
3:1共鳴による
スーパーハンプ



質量比が小さいと
スーパーハンプの
成長に時間がかかり、
Dipが発生すると考えられている。
3:1共鳴の成長時間 $\propto 1/q^2$ (Lubow 1991a,b)



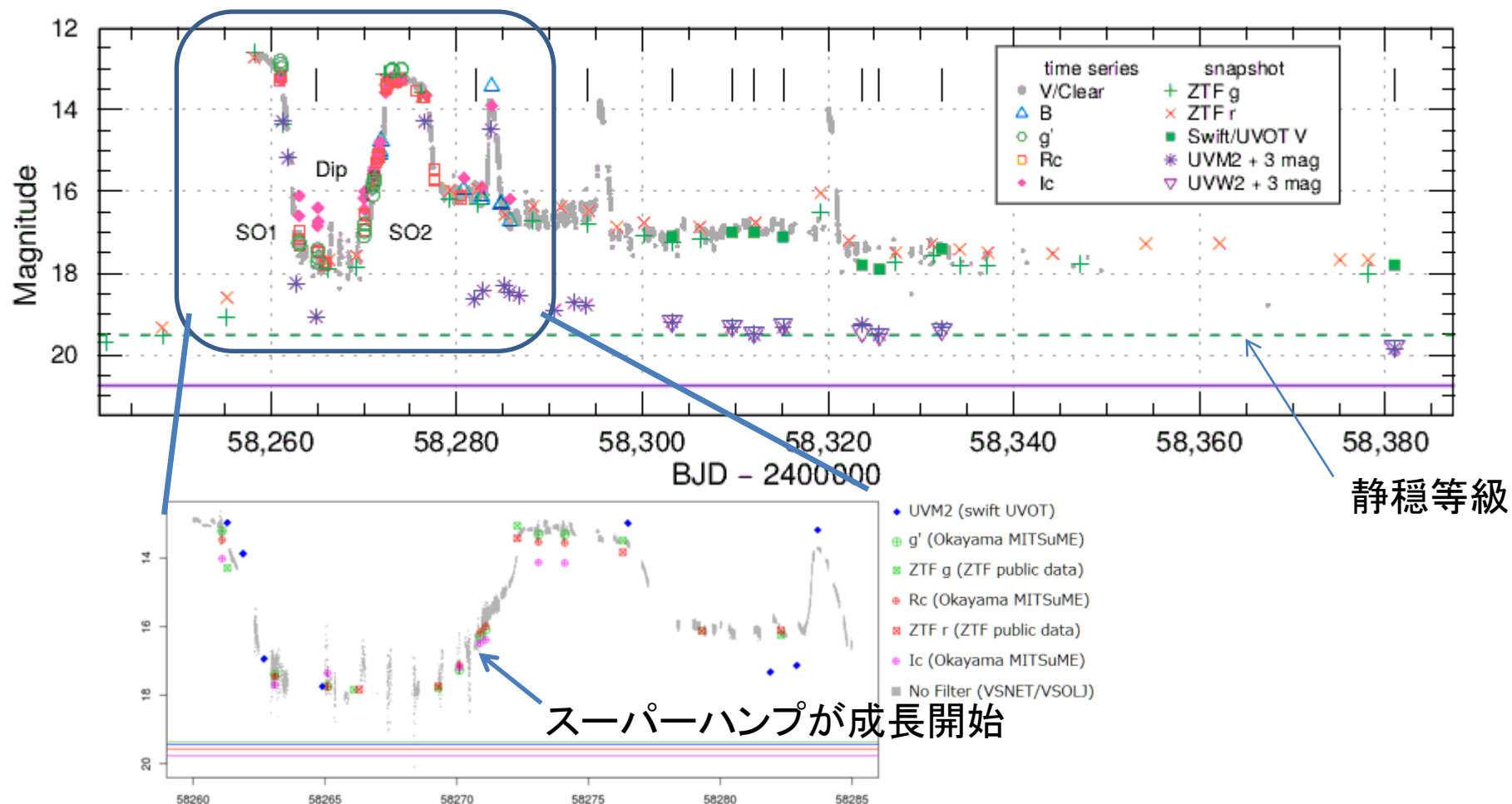
通常のWZ Sge型superoutburstと
Double Superoutburstsの違い



Kimura et al. 2016c

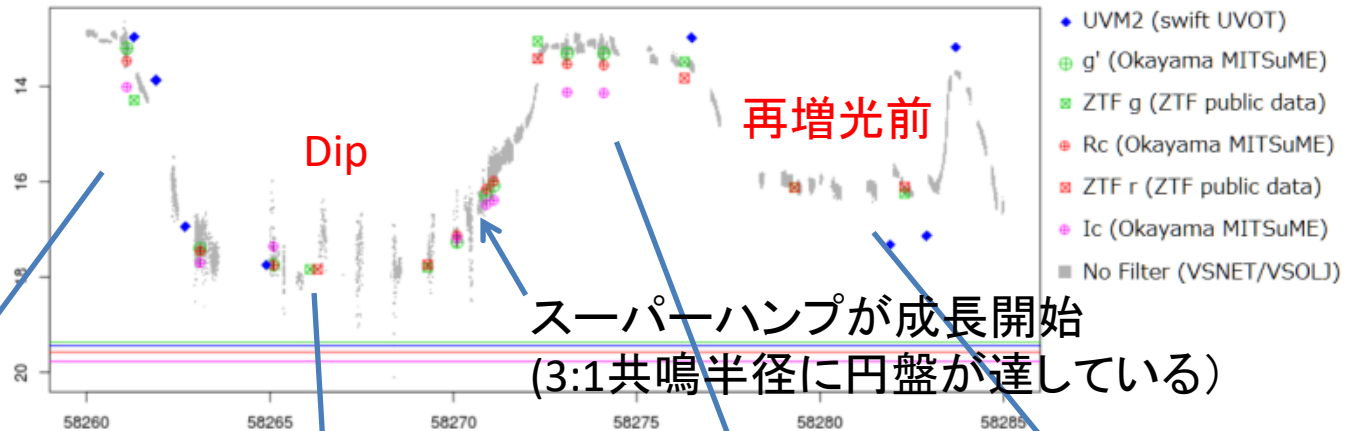
多色観測の結果

- OISTERを通じた東工大 岡山MITSuMEの3色同時
+ ZTFのpublic data (g, r, i band)
+ swiftのUV (一部 U, B, V)



円盤はどう変化するのか？

- Double superoutburstのdipを紫外+可視多色で撮ることに成功した唯一の例。
- 円盤半径は以下のように変化していると考えられる



2:1共鳴半径まで
hot stateが広がった
大きな円盤

inner hot disk/主星
+ outer cool

massを失い2:1共鳴終了。一旦減光する。
(円盤外縁部は3:1共鳴半径以上)

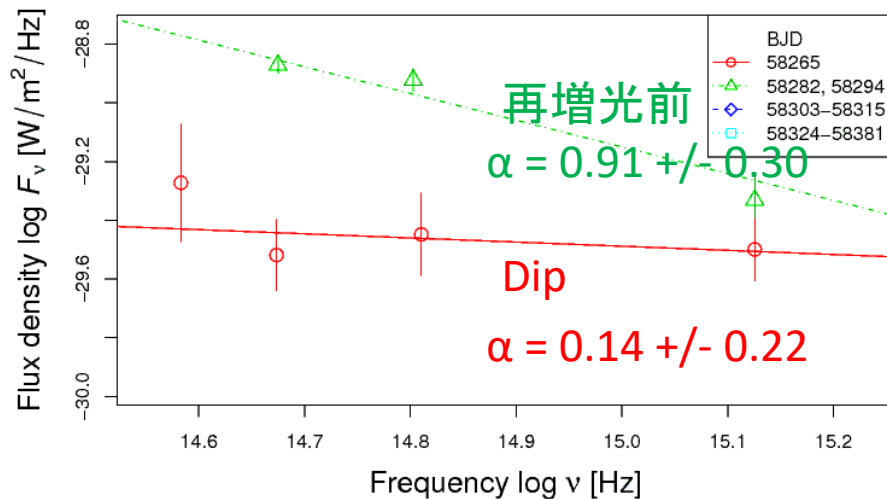
3:1共鳴半径までhot state
が広がった大きな円盤

3:1共鳴終了。
どんな状態か？

スペクトル指数

- ただし、SED解析をするにはデータが心もとない
 - 多色といいつつ可視 + 紫外の3~6色だけ
 - 観測期間によってフィルター・装置が異なる
- 色指数の代わりにスペクトル指数 α を使う。

スペクトル指数の定義: Flux density $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$

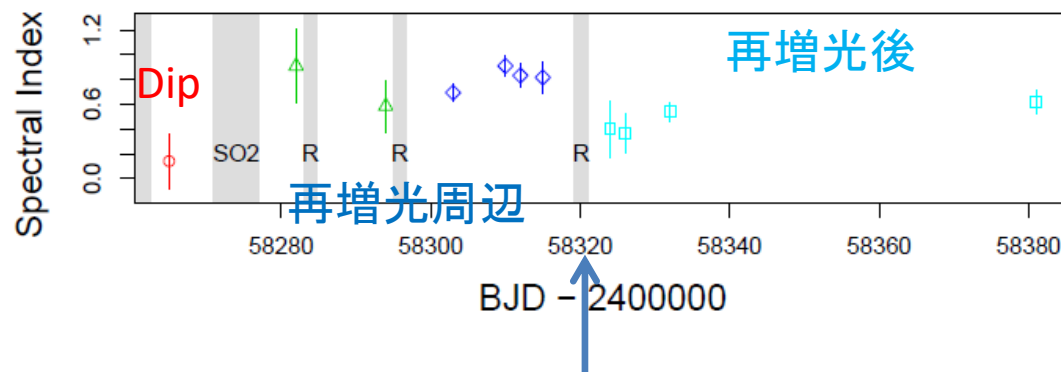
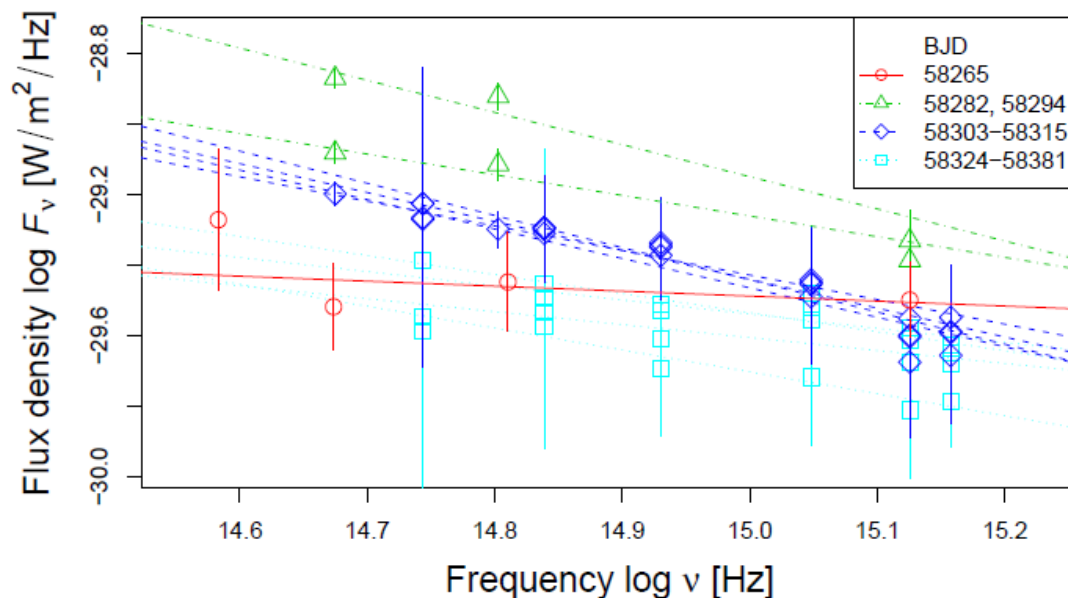


傾きが色、切片が明るさを意味している。
Black Bodyを仮定すると、それぞれ
温度、面積に対応する。

Dipに比べて、再増光前は色が赤く明るくなっていることが分かる。

色指数と等級で
評価するのとあまり変わらないが、
多少は情報量が増えてうれしい。

スペクトル指数(全体)



最後の再増光

α の値一覧

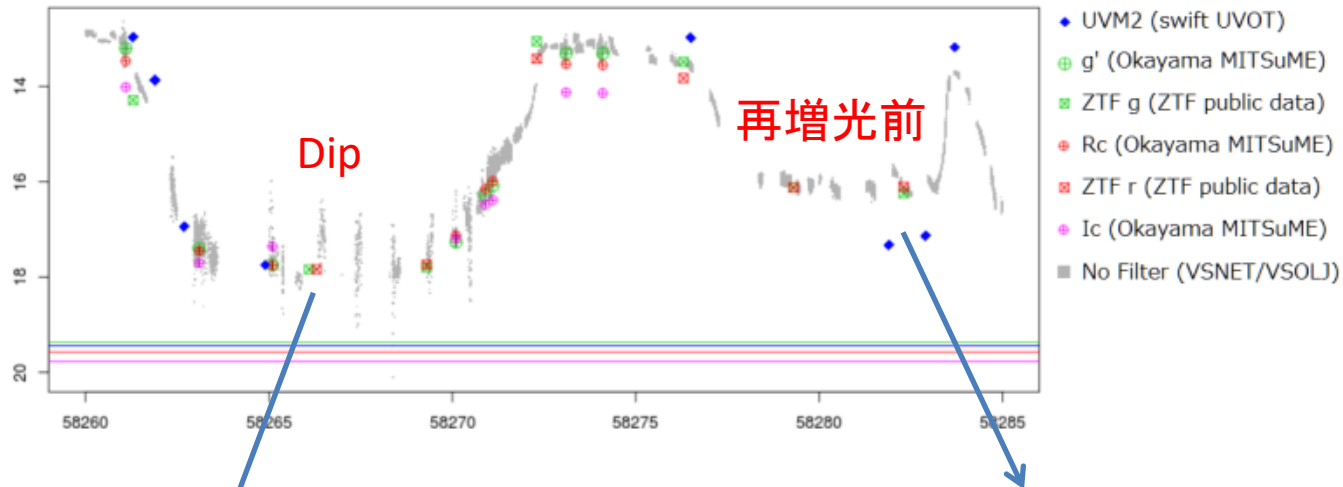
Date*	α	$\bar{\alpha}^+$	Phase
264.98	0.14(22)	0.14(22)	dip
282.13	0.91(30)		
294.14	0.59(21)		
303.20	0.696(67)	0.789(42)	between rebrightenings
309.65	0.911(85)		
312.09	0.834(93)		
315.16	0.82(12)		
323.66	0.40(23)		
325.52	0.37(16)	0.540(54)	after the last rebrightening
332.22	0.539(79)		
380.98	0.620(90)		

最後の再増光の前後で
優位な色の変化が見られた。

Enhanced Mass Transferが
正しいとすると、最後の
再増光によって質量輸送が
止まったことになる。

貯まったmassを使い果たしたと
解釈するのが自然。
つまり、赤くなる原因は円盤。

dip中vs 再増光前はどうか



inner hot disk/主星
+ outer cool

色が赤く、
かつ明るく変化

a little hotter?

2:1共鳴終了直後。
円盤外縁部は3:1共鳴半径より
大きく広がっている。

3:1共鳴終了直後。マスの多くは主星に降り注いで
おり、2:1共鳴終了直後ほど円盤は広がってないはず。
にも関わらず低温成分が広がっているのは、
dipに比べて円盤全体が少し温かいと考えられる。

粘性が一時的に上昇するというモデルによく一致する結果。
ではdipと再増光前の違いは何か？⇒superhumpの有無
3:1共鳴による離心変形が粘性増加の原因か？

まとめ

- 再増光には2つのモデルがある
 - 伴星からの質量輸送率が上昇するモデル
 - 粘性が増加した円盤 + 大きく広がった低温の円盤
- OISTERを利用することで、再増光前後を多色モニターすることができた(矮新星観測史上3,4例目くらい)
- 再増光前後の多色観測から、
dip中より温度の高い円盤が大きく広がっている
ことを示唆する結果が得られた。
- すなわち、後者のモデルを支持する結果となった。