

長期モニタリング観測による星周ダスト形成の研究

大澤 亮, 上塚貴史, 中田好一 (東京大学)
野沢貴也 (国立天文台), 板由房 (東北大学)
尾中敬 (明星大学・東京大学)

アウトライン

Dust Formation around R Coronae Borealis stars

R Coronae Borealis stars とはどんな天体なのか

アーカイブデータ: OGLE-III observations of R CrB stars in the LMC

ダスト形成に伴う色等級図上での進化

R CrB 型星でのダスト形成に関する考察

Possible Contributions from Tomo-e Gozen

Tomo-e Gozen のサーベイで何ができるのか？

The Great Decline of R CrB

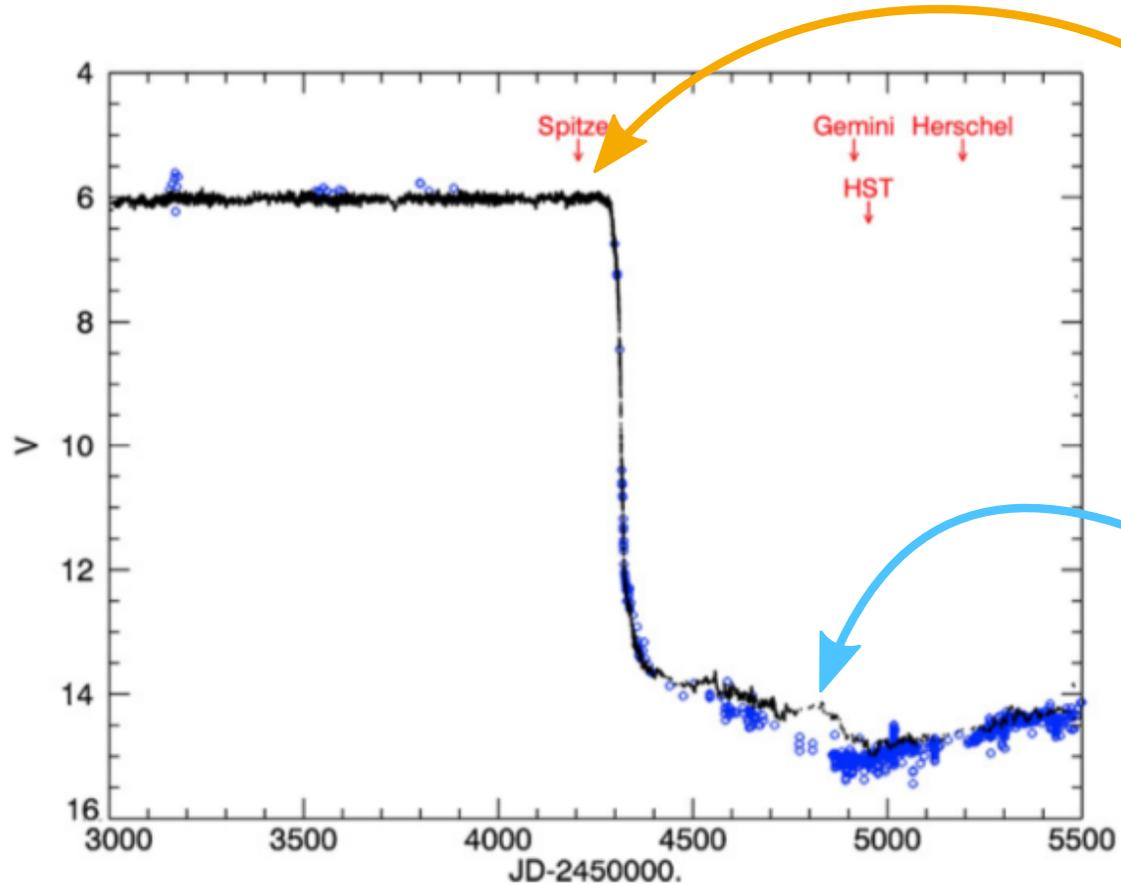
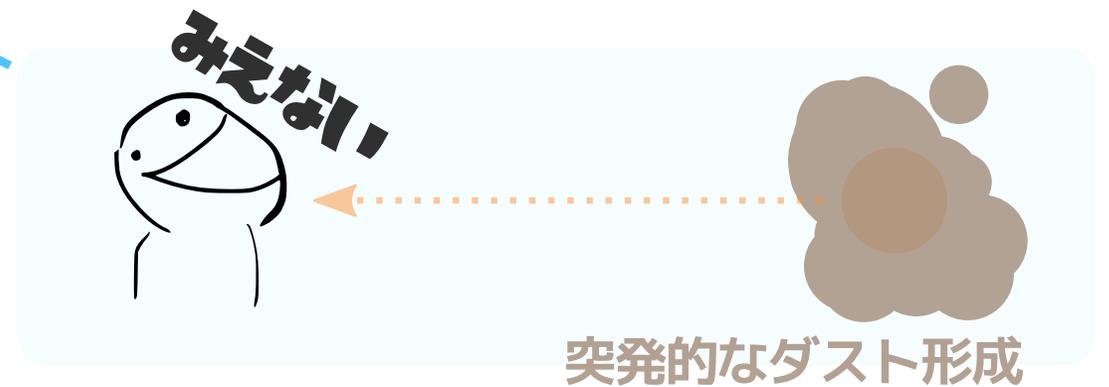


Figure 1. AAVSO data for R CrB since 2004. Visual magnitudes are plotted as black dots. Johnson *V* data are plotted as blue open circles. The epochs at which the *Spitzer*, *Gemini*, *HST*, and *Herschel* data were obtained are marked.

(A color version of this figure is available in the online journal.)



R Coronae Borealis stars

Surface temperature: $\sim 4500\text{--}12000\text{ K}$

Bolometric luminosity: $\log L \sim 3.5\text{--}4.3$

Infrared excess

Hydrogen deficient Carbon star (Hd C)

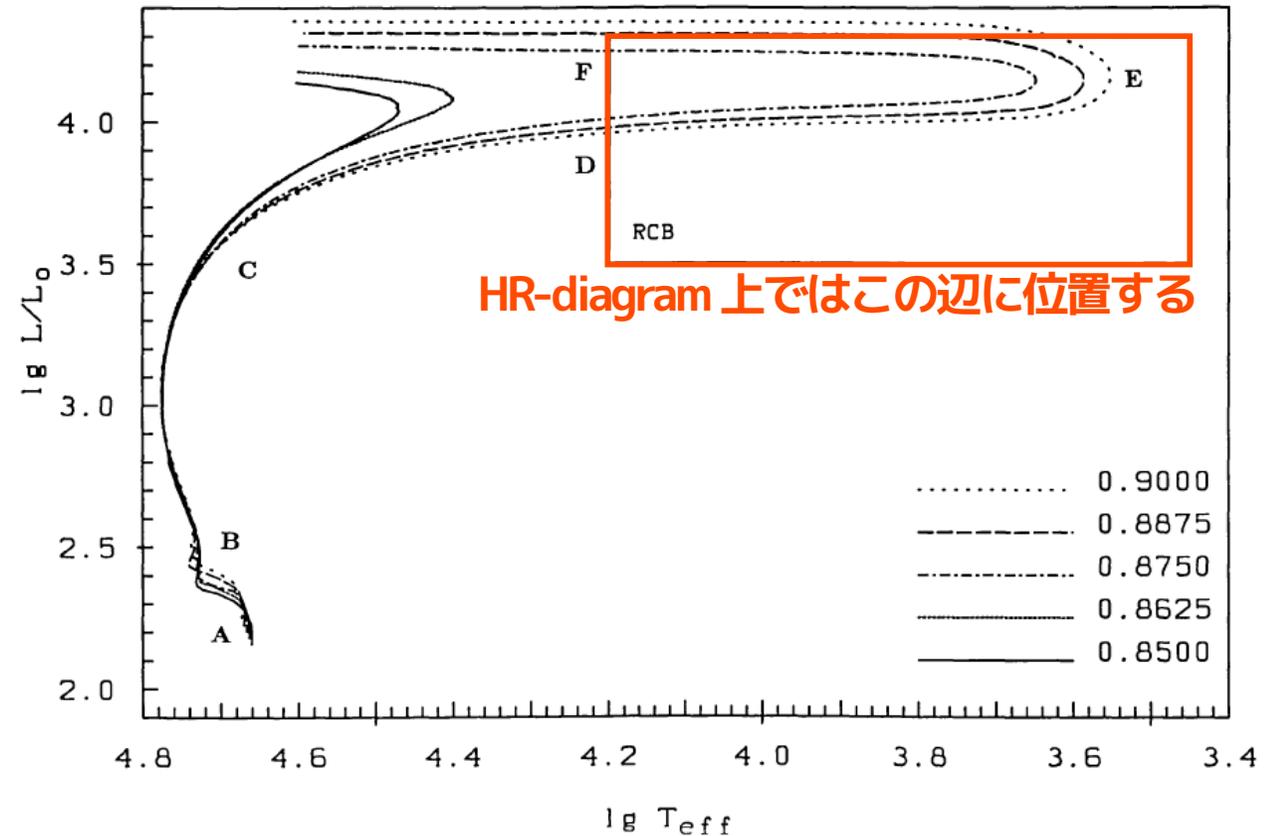
Composition: He (98%), C (1%)

Basically solar abundance

F- and Li-enriched? (possibly Sr, Y, Ba)

Single star (exception: DY Cen)

30-100 days pulsation



Origin of R CrB stars

形成過程として現在主流な節は以下の2つ

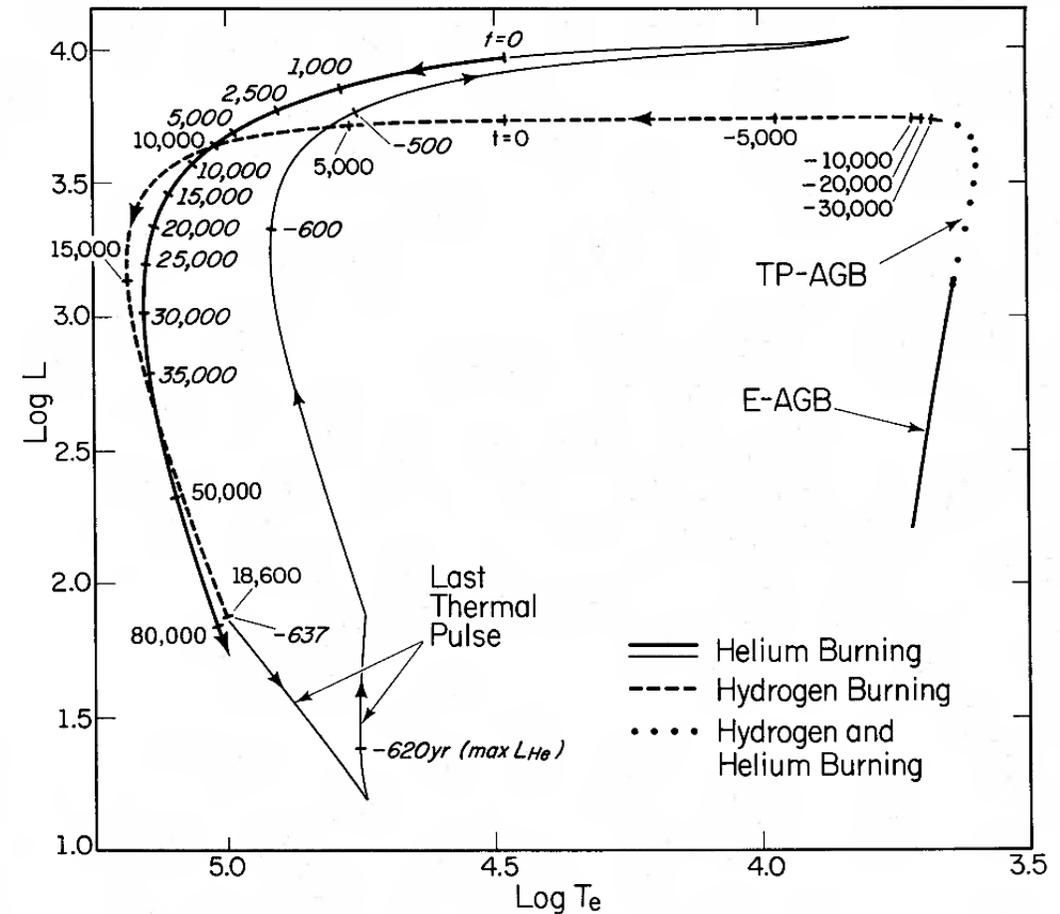
1. Final Helium Shell Flash (FF scenario)
2. He+CO white dwarf merger (DD scenario)

Final Helium Shell Flash (Iben, 1983)

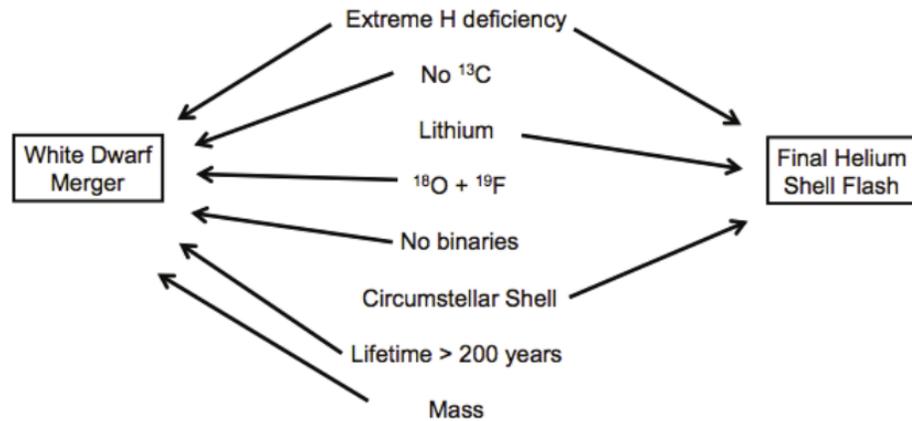
低質量の星が white dwarf sequence に入る付近で thermal pulse によって再び赤色巨星まで戻る
white dwarf の sequence のどこで起きたかによって born-again PNe と区別される可能性を示唆

He+CO white dwarf merger (Webbink, 1984)

He white dwarf と CO white dwarf が merger した結果 Paczyński (1971) の初期状態のような星になりうる



Origin of R CrB stars: DD vs FF



まだ決着がついていないが
同位体比の観測から DD scenario 有利?

$$^{12}\text{C}/^{13}\text{C} > 500$$

$$^{16}\text{O}/^{18}\text{O} \sim 1 \text{ (Clayton et al., 2007)}$$

Table 3. DD vs FF¹

Property	DD	FF
Extreme H deficiency but some H present	yes?	yes
H abundance anti-correlated with Fe	?	?
Li abundance high in 5 stars (all majority)	no	yes
C/He ~ 1%	yes	no
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C} > 500$	yes	no
High N, O	yes	yes
High Na, Al	yes?	yes
High Si, S	?	?
Enrichment of s-process elements	yes?	yes
Abundance uniformity/non-uniformity for majority/minority	no?/yes	yes/no?
Similar to Sakurai's object	no	yes
Nebulosity present in a few stars	yes?	yes
RCB Lifetime	yes	no
Lack of binarity	yes	no?
^{18}O and ^{19}F greatly enhanced in (all?) stars	yes	no
$M_V = -3$ to -5 mag	yes	yes
Mass = $0.8-0.9 M_{\odot}$	yes	no?

¹Adapted and updated from Table 7 of Asplund et al. (2000).

The Great Decline of R CrB

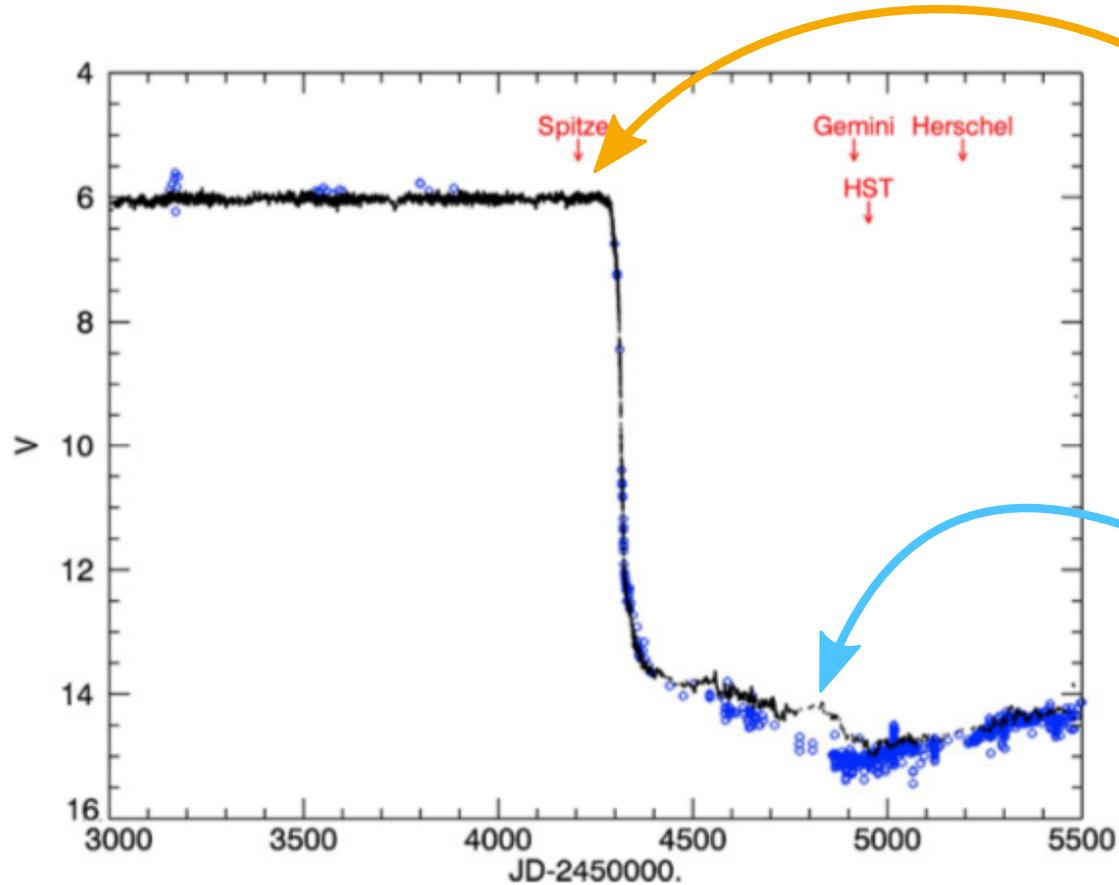
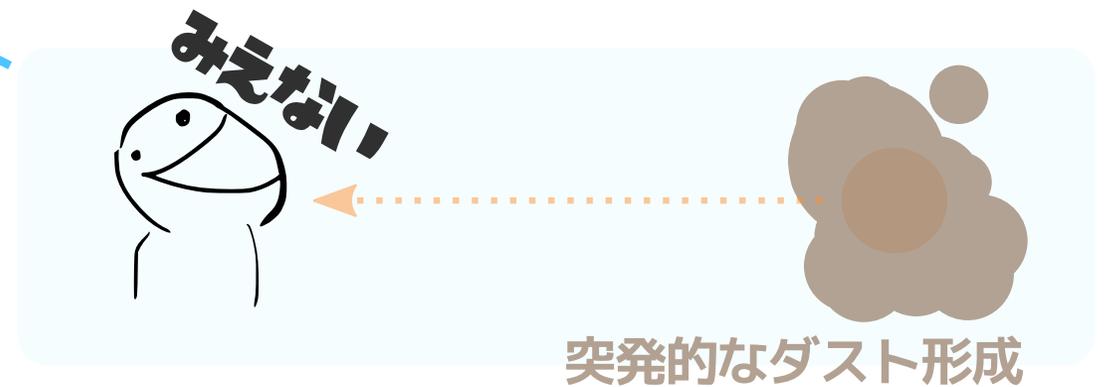
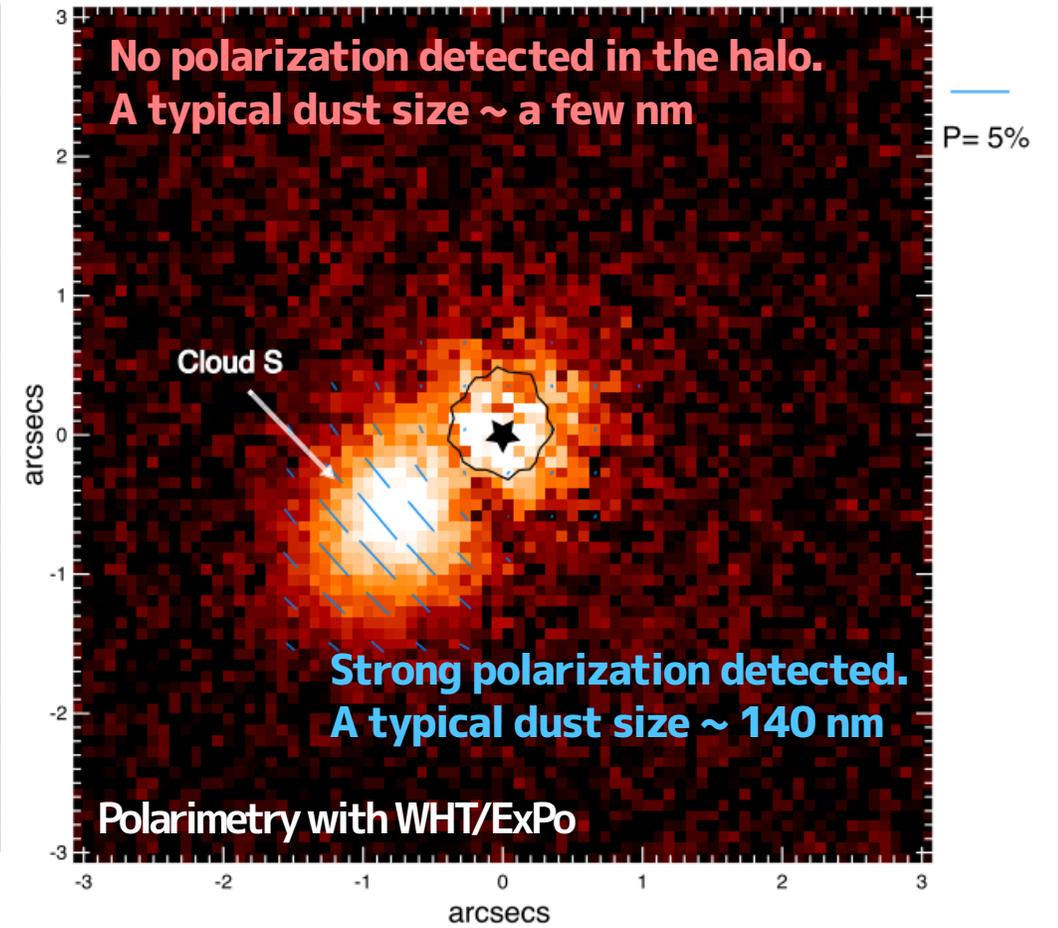
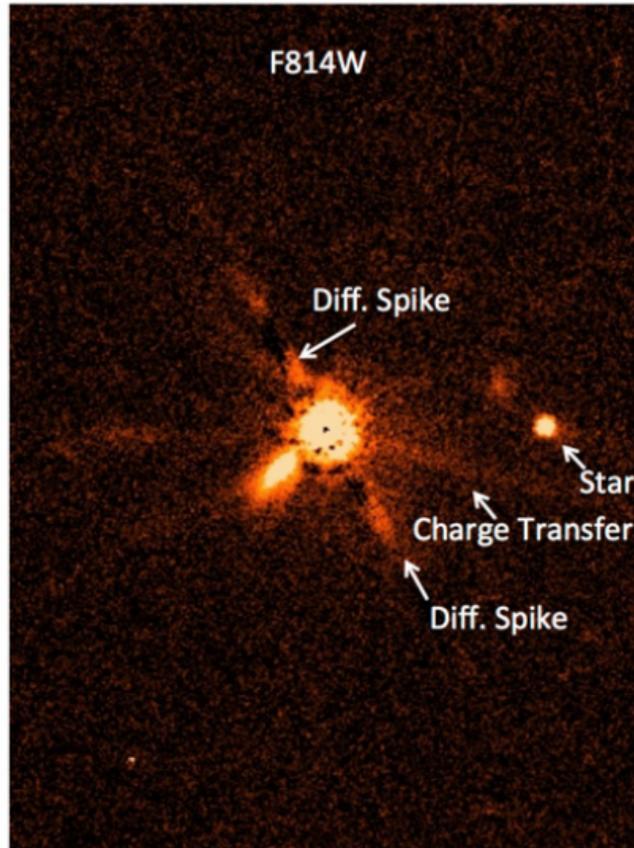
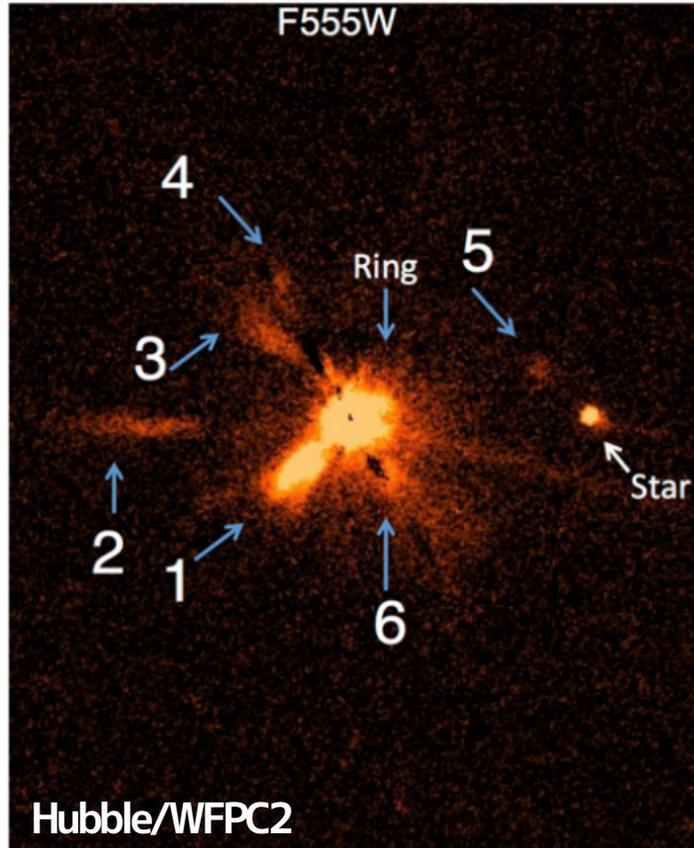


Figure 1. AAVSO data for R CrB since 2004. Visual magnitudes are plotted as black dots. Johnson V data are plotted as blue open circles. The epochs at which the *Spitzer*, *Gemini*, *HST*, and *Herschel* data were obtained are marked.

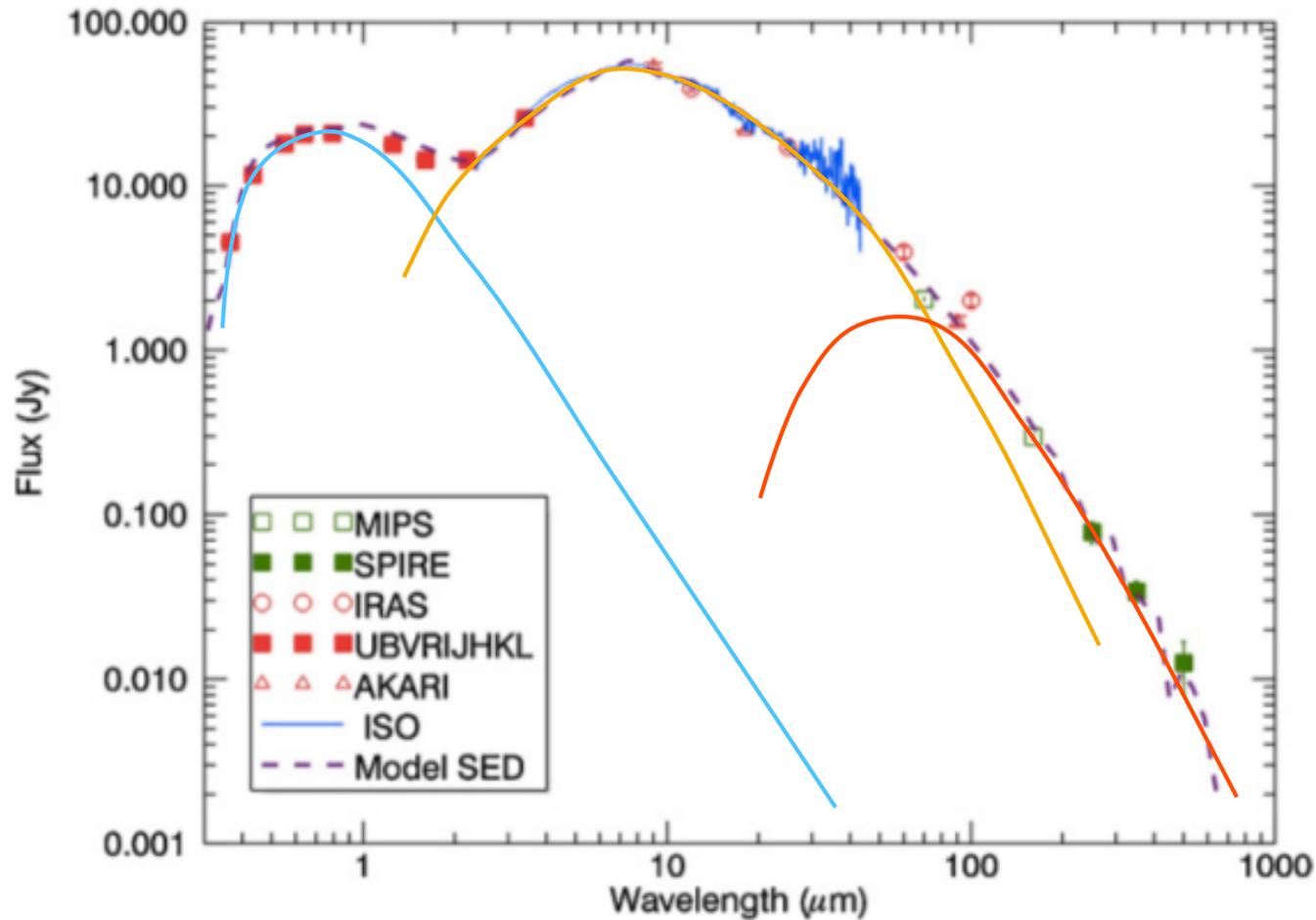
(A color version of this figure is available in the online journal.)



Direct detection of dust clouds



Multi-component SED of R CrB



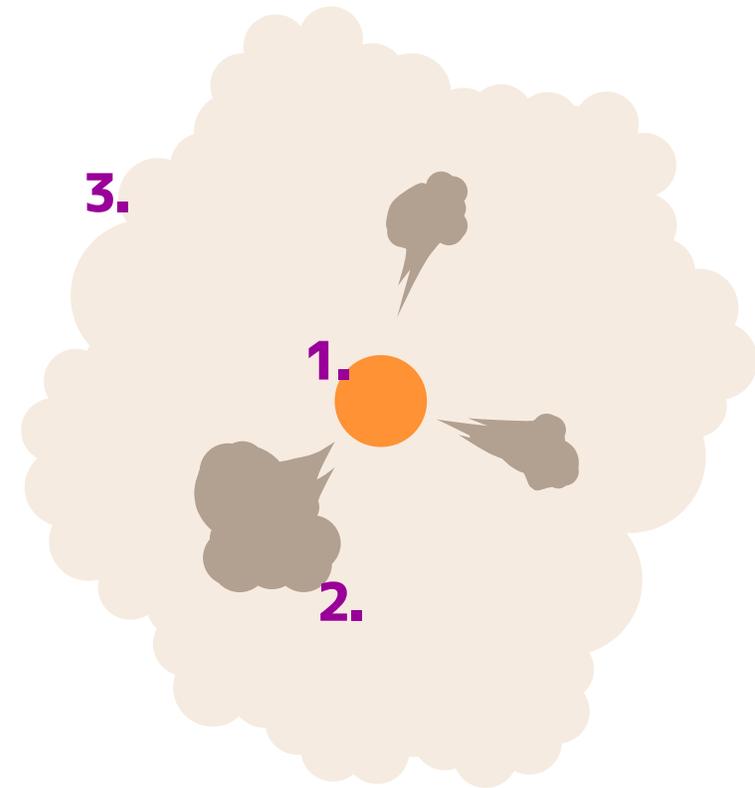
- stellar component
~7000 K blackbody
- disk or halo component
circumstellar dust at ~150 au
- large diffuse envelope
R ~8 pc; fossil of H-rich envelope (?)

Overview of R CrB stars



- 1.** stellar component
5000–13000 K blackbody
- 2.** dense & compact dust cloud (puff)
causing decline events
strong scattering \Rightarrow ~ 140 nm
- 3.** circumstellar halo
circumstellar dust at ~ 100 au
no scattering \Rightarrow small & dark grain
- 4.** large & diffuse envelope
 $R \sim 10$ pc; fossil of H-rich envelope

4.



Dust Formation and Evolution around R CrB stars

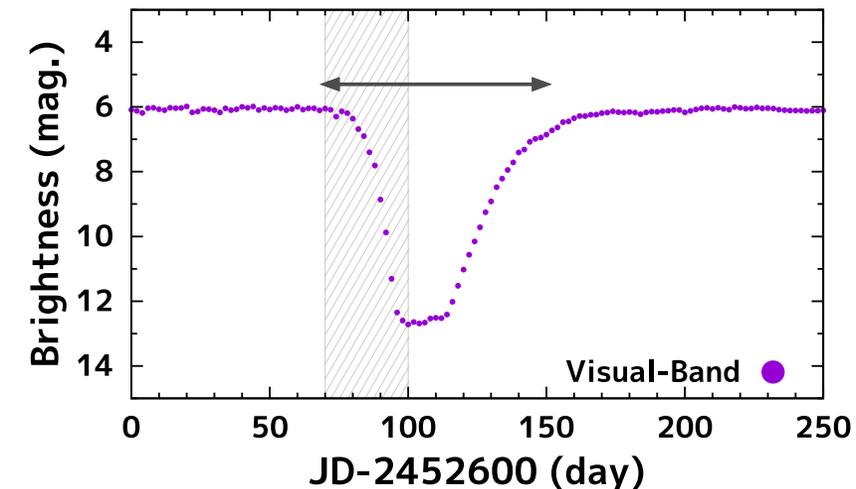
R CrB stars は星周ダストの核形成・成長のよい実験室

1. 突発的に大量のダストを形成する

ダスト形成前/後の差分がわかりやすい (既存のダストとのコントラストが大きい)

2. ダスト生成・進化のタイムスケールが比較的短い

ダスト形成 (~days) \ll 減光イベント全体 (~weeks) \ll 研究者の寿命



R CrB Dust in Literature



Circumstellar Dust Halo

Zubko (1997)

UV 減光曲線の fitting から ~20 nm の小さいダストが支配的であると示唆

Jeffers et al. (2012)

分解した偏光撮像で halo が見えなかったことから小さく黒いダストを支持

Dust Puff

Efimov (1988)

R CrB の複数の減光イベントで光度曲線の色変化からダストの成長を示唆

Skuljan et al. (2003)

多色測光観測で 9 Galactic R CrB stars が似たような色変化を示すことを示した減光曲線 ($E(\lambda-V)/E(B-V)$) が星間ダスト ($R_V \sim 3.1$) と近いという結果

Woollands et al. (2009)

多色測光観測で Skuljan+ (2003) の結果を LMC, SMC の R CrB stars でも確認

Jeffers et al. (2012)

減光中の色が青いこと puff が赤外線偏光でよく見えていることに注目
dust puff には大きいダストによる散乱であると示唆
初めに大きなダストが形成され, 続いて小さいダストが形成されたと想定

Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE)

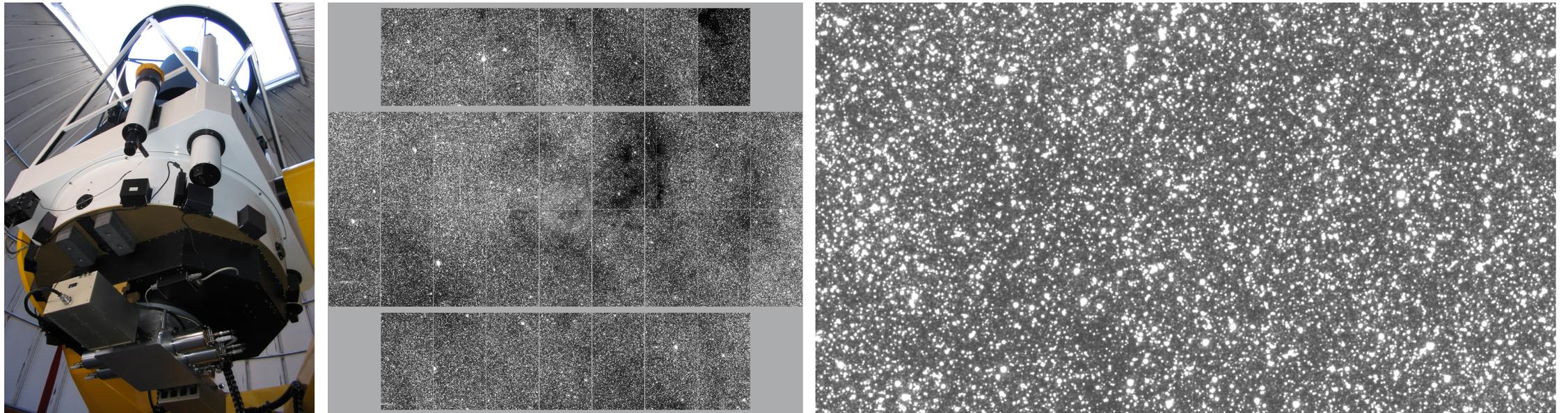
星による重力レンズ効果を検出するための観測システム。

チリにある 1.3 m 望遠鏡を用いてマゼラン雲の星や銀河中心方向を監視。

2001–2009 年にかけて 8k × 8k カメラで可視光モニタリング観測を実視 (OGLE-III)

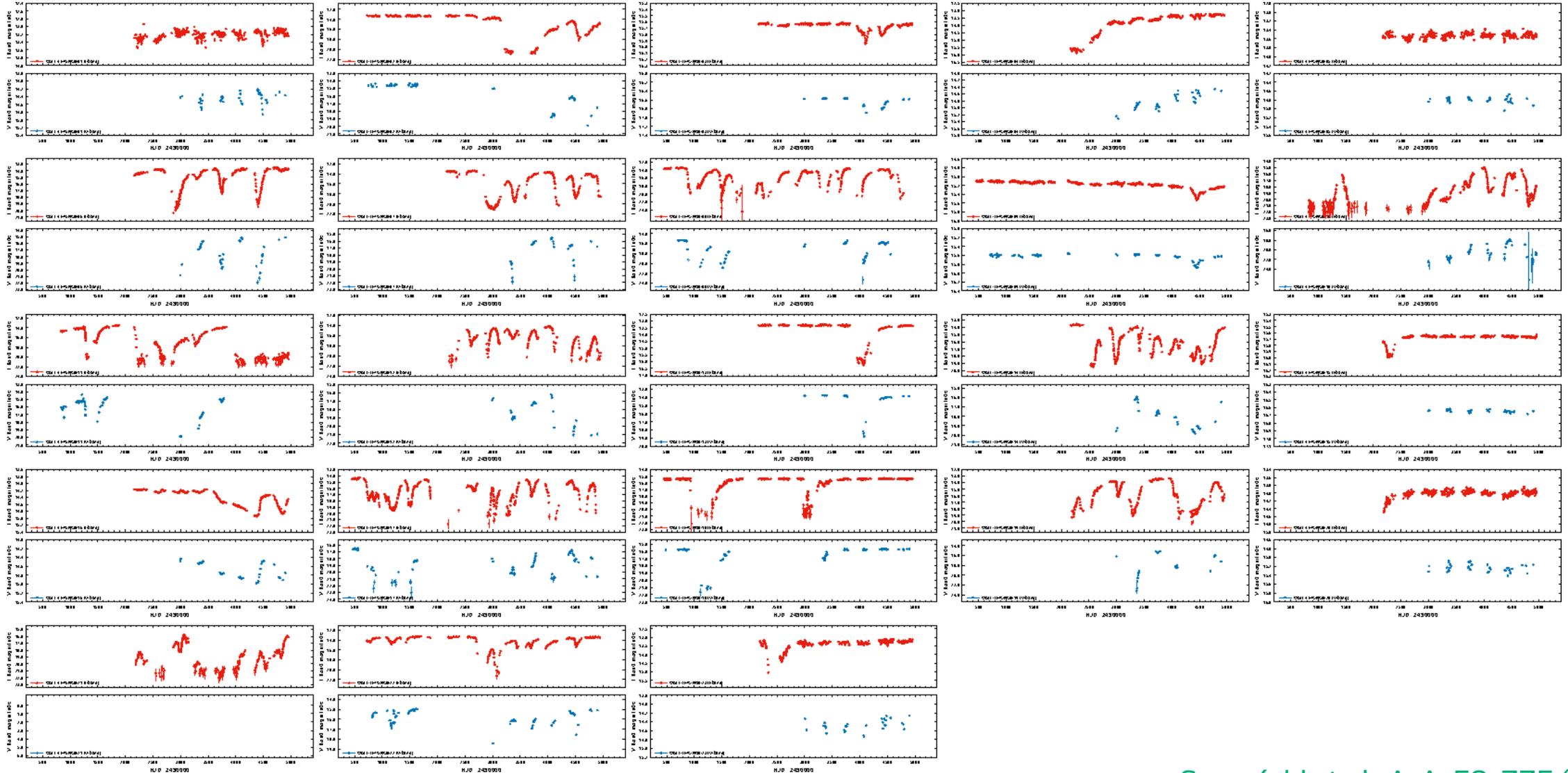
Large Magellanic Cloud に 23 天体の R CrB 型星を発見。

過去の観測も含めて 7–11 年の V-, I-band photometry 結果を公開。

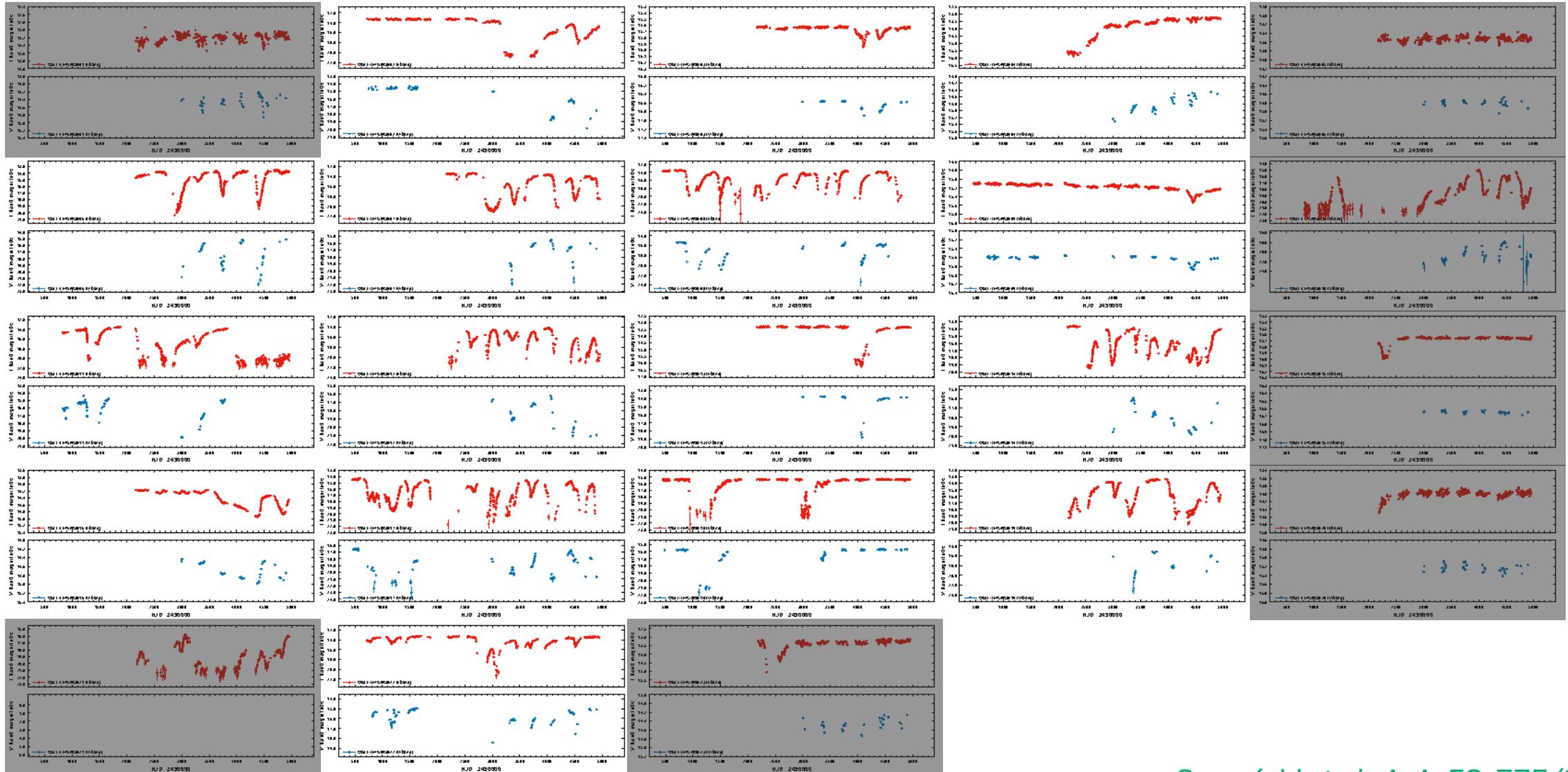


(左) 1.3 m OGLE 望遠鏡, (中) OGLE-IV カメラが撮影した銀河中心領域, (右) 銀河中心領域の拡大写真 (ogle.astrouw.edu.pl)

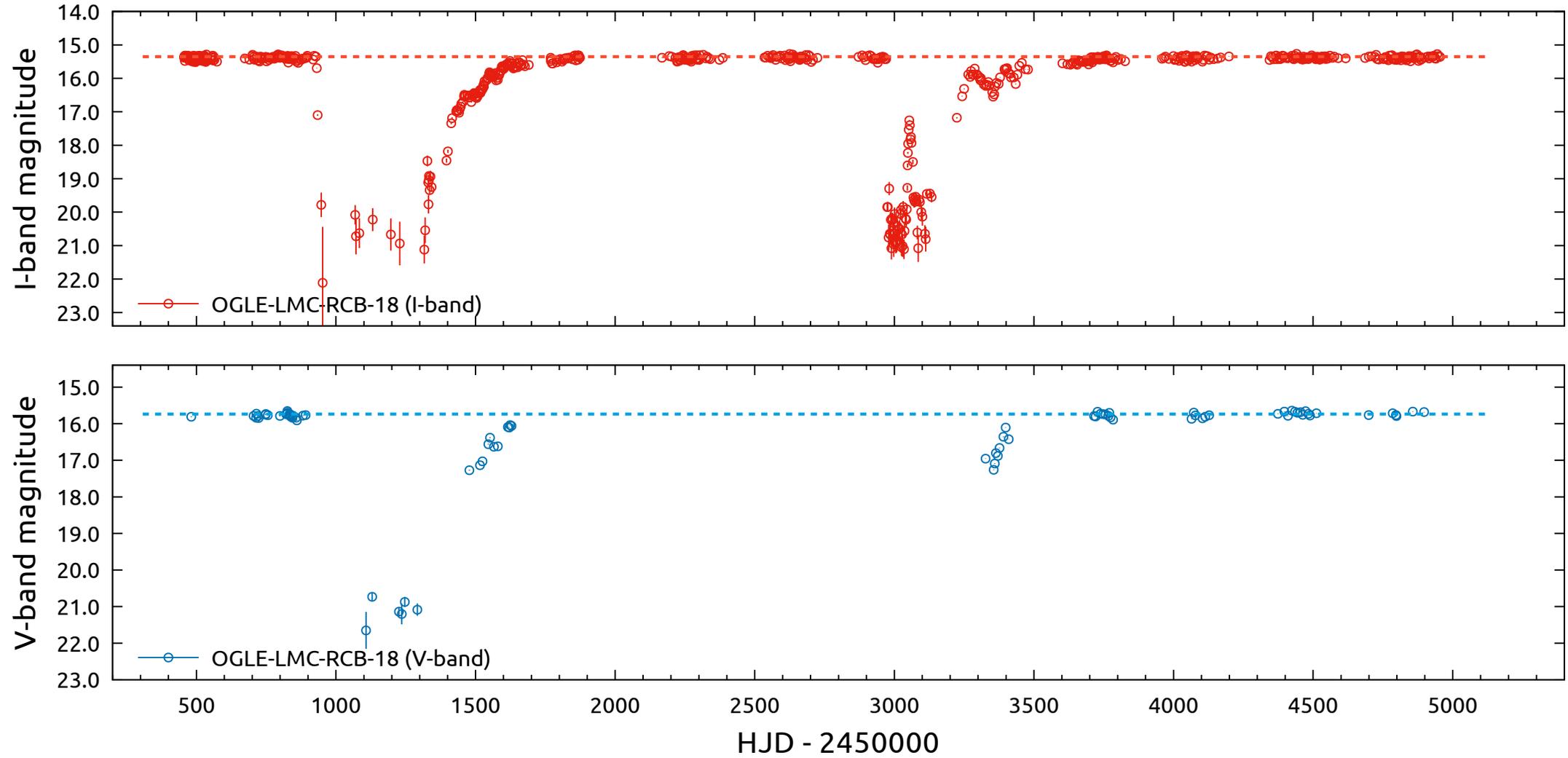
R CrB stars in OGLE-III



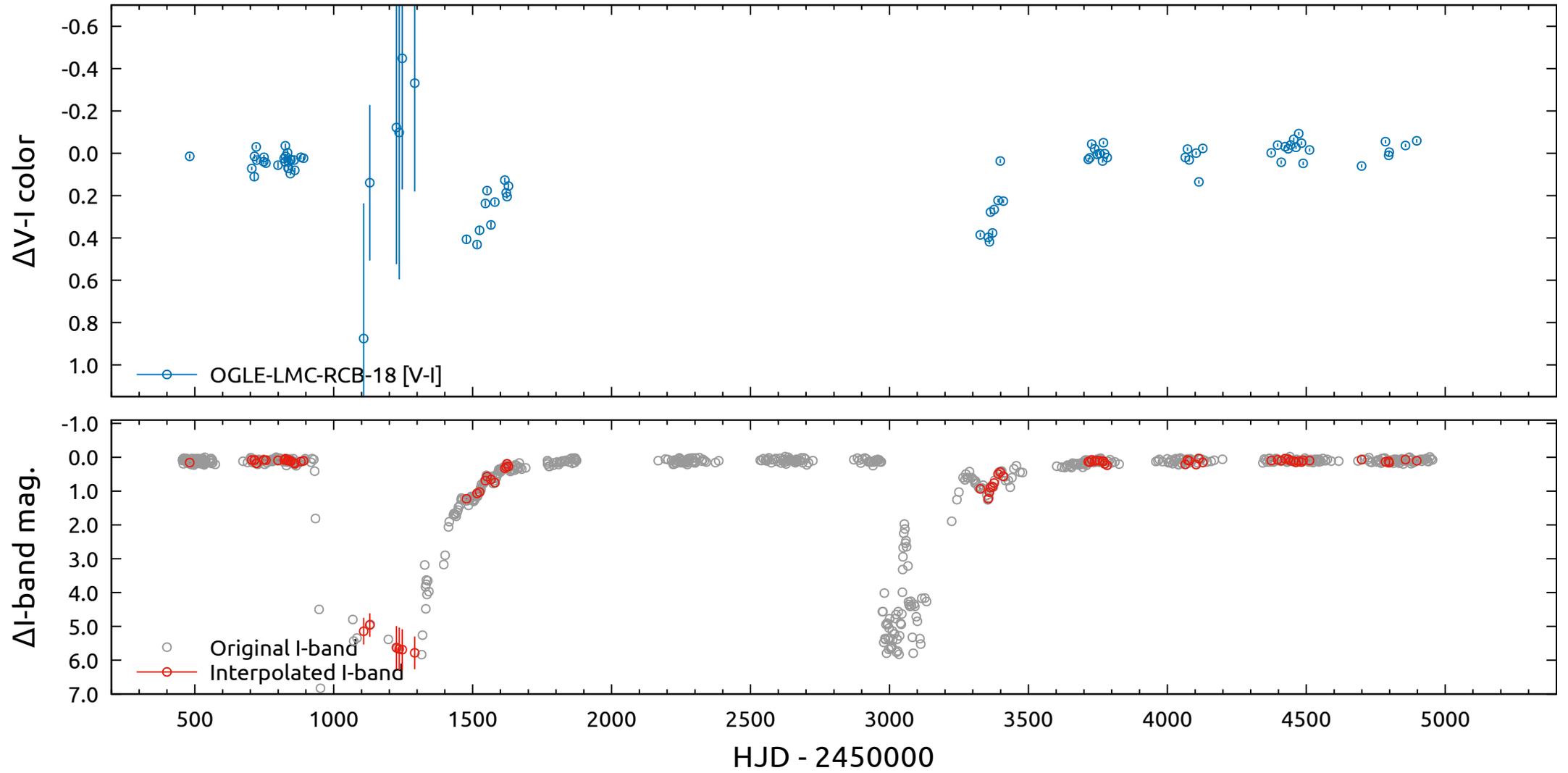
R CrB stars in OGLE-III



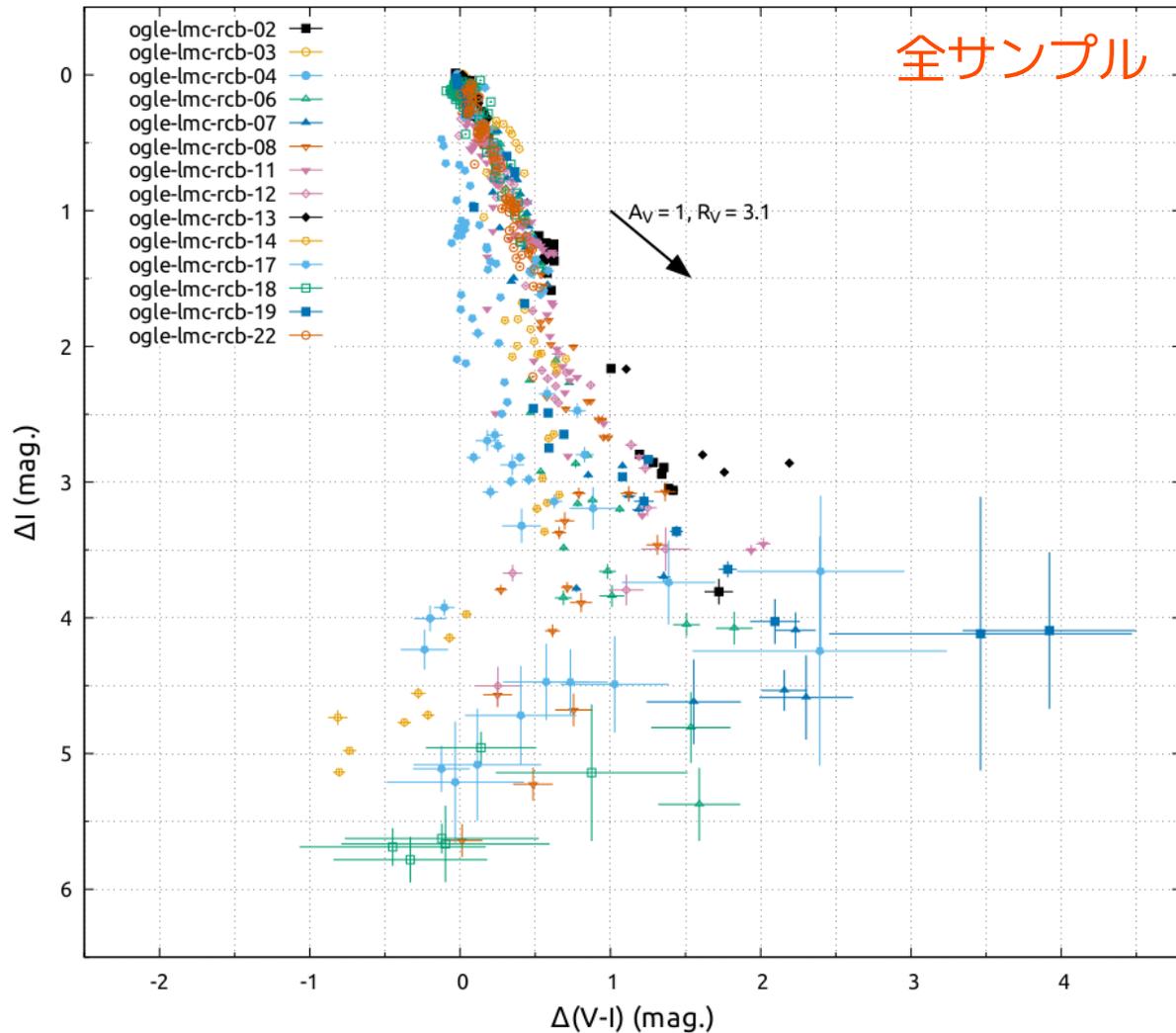
R CrB stars in OGLE-III



R CrB stars in OGLE-III

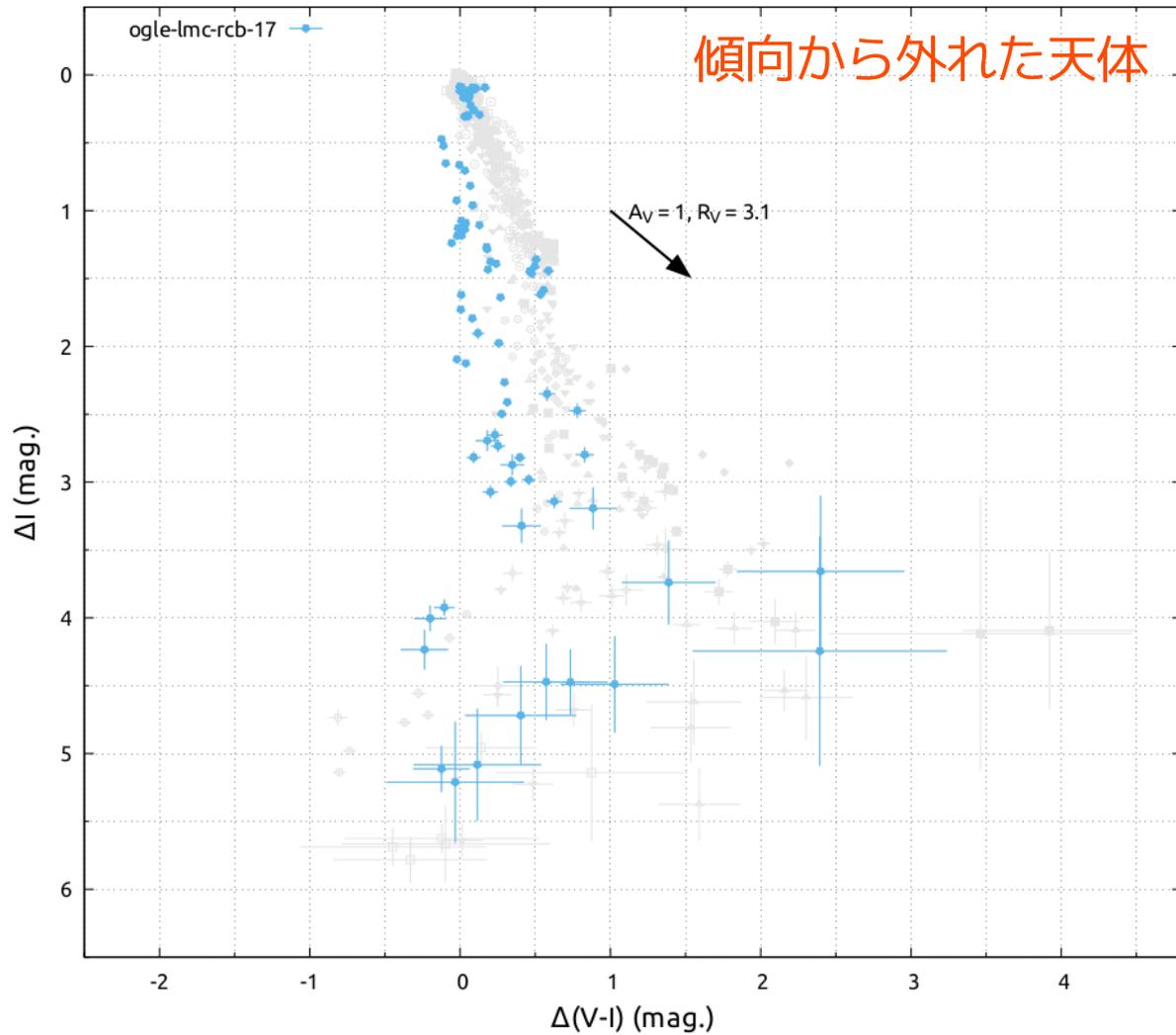


Color-Magnitude Diagram



1. ほとんどのデータ点が直線上に並んでいる
どの天体でも似たようなダストが形成されている
2. 星間ダストの減光ベクトルとは合わない
星間ダストとは違うダストが形成されている
3. 減光が大きい ($\Delta I \sim 4$ mag) と青くなる傾向
ダストの性質 or 星の色が変化した
4. $\Delta(V-I) \sim 0$ mag にデータが少ない
減光期も回復期も同じトラックを通過している

Color-Magnitude Diagram



1. **トレンドに乗っているデータ点もある**
一部の期間は他の天体と同じダストを作っている
2. **トレンドがシフトしたようにも見える？**
暗く or 青くなる方向にシフトさせると合う

Discussion

1. dust puff のダスト組成とサイズについて
2. color-magnitude diagram 上での進化について
3. color-magnitude diagram 上で傾向から外れた天体について

Color-Magnitude Diagram of dust puffs

ダスト種とダストサイズを仮定して輻射輸送計算

計算コード: DUSTY (ver. 4; Ivezić and Elitzur. 1997)

Single photon source with $T = 10,000$ K

Spherical dust shell ranging from R_{in} to R_{out}

Dust temperature at $R_{in} = 1,200$ K & $R_{out} = 10 \times R_{in}$

Dust sublimation temperature = $1,500$ K

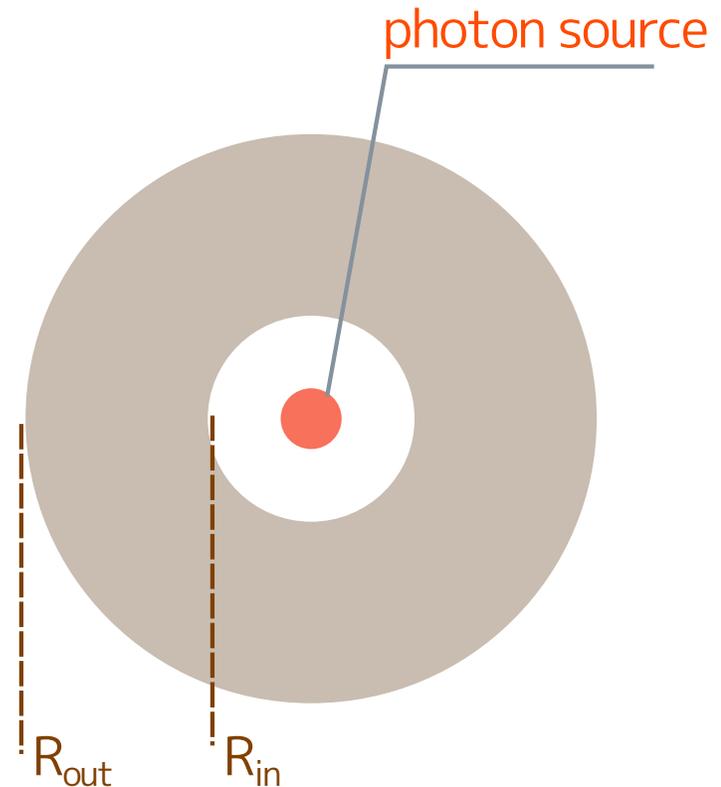
Shell radial density profile = constant

Optical depth at the I-band = 0.0, 0.1, 0.2, ..., 5.0

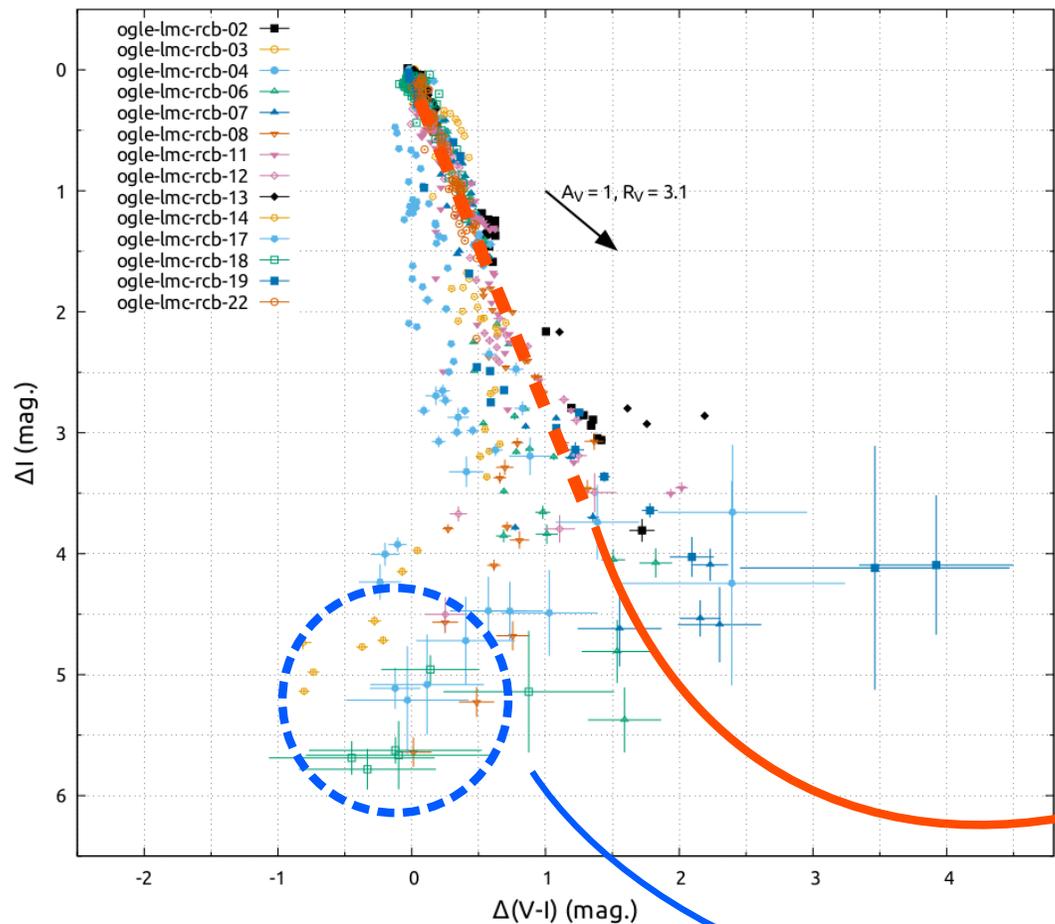
Dust composition: A. carbon (Hanner 1998 & Zubko+ 1996)

Single dust size: 1 – 500 nm

Total-to-selective extinction ratio を V-, I-bands で計算



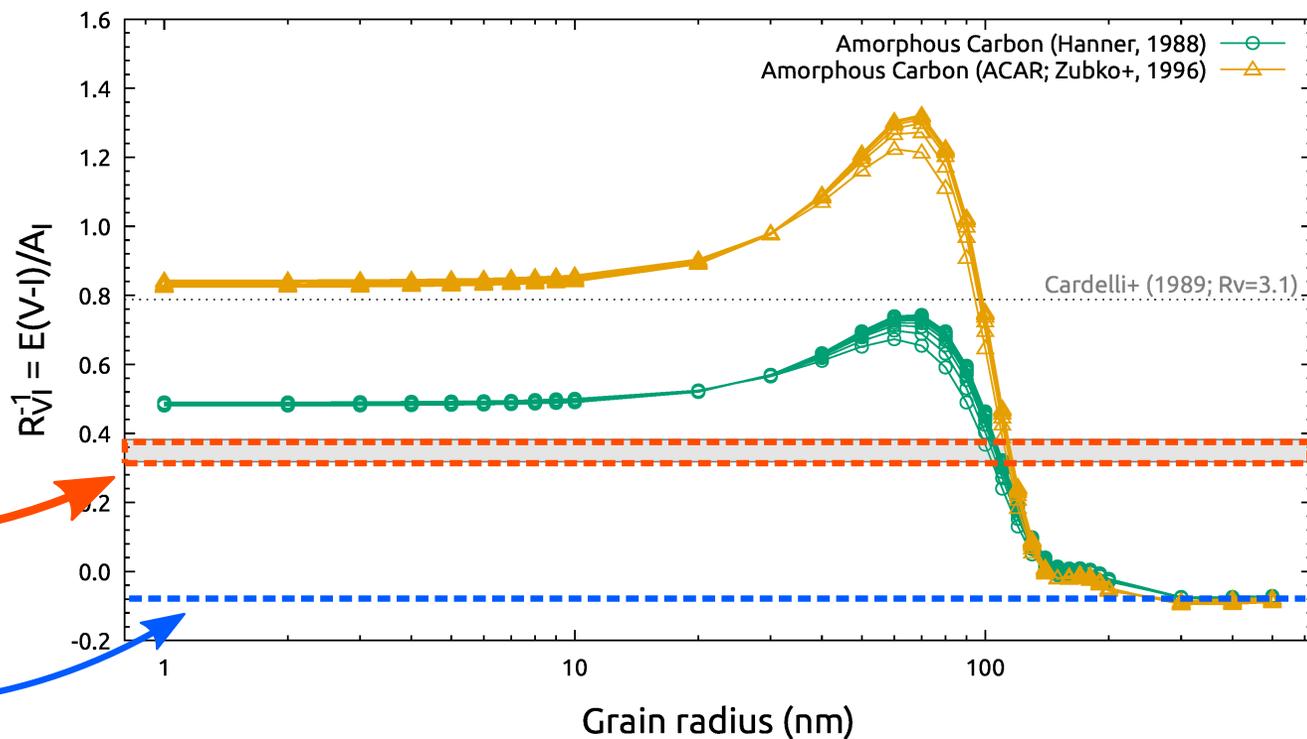
Grain size evolution of dust puffs



OGLE CMD の傾き \Rightarrow grain size ~ 120 nm

減光が大きい場合の E_{V-I} \Rightarrow grain size > 150 nm

他の炭素質ダストでも計算したが概ね同じ結果



Grain size evolution of dust puffs

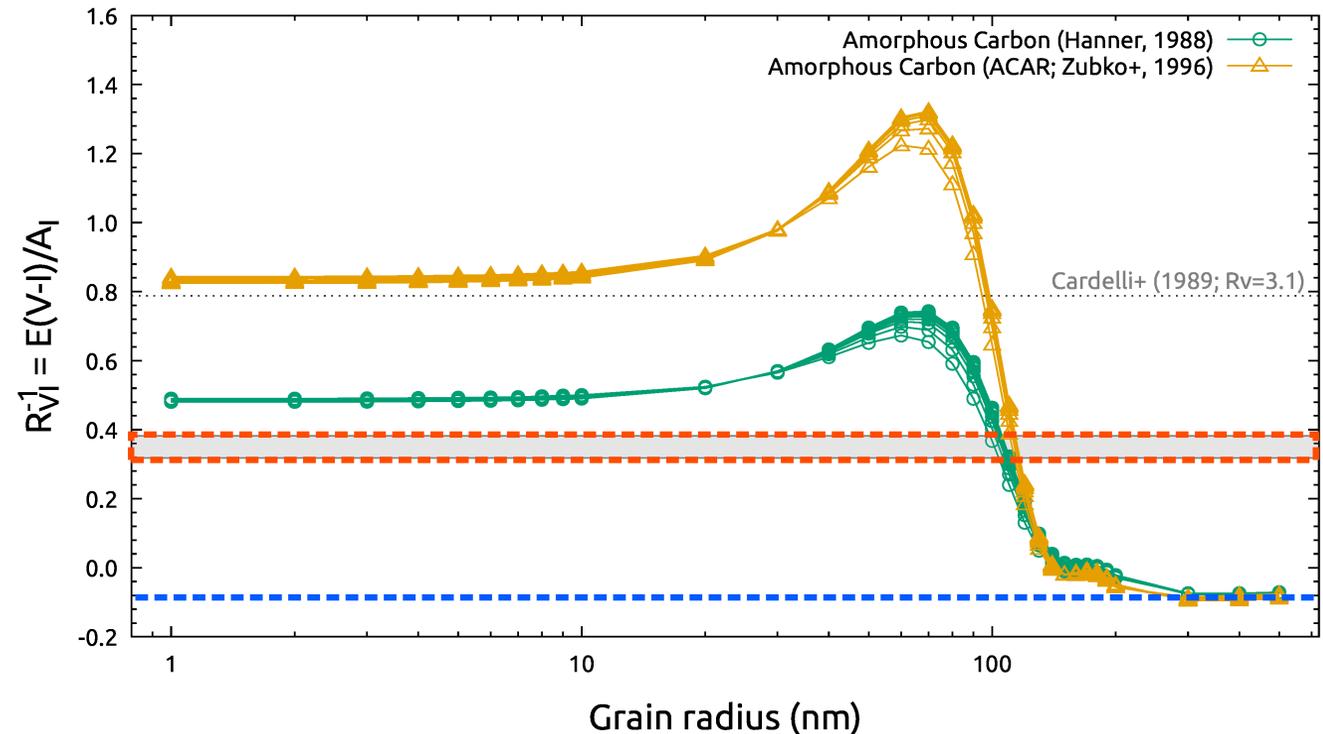
以下のシナリオで説明可能？

A. dust puff 中で **~120 nm** の **amor. carbon ダスト** が形成 \Rightarrow 200 nm 級に成長

ダストサイズの fine tuning が必要

B. dust puff 中で **<10 nm** の **何らかの炭素質ダスト** が形成 \Rightarrow 200 nm 級に成長

今のところ観測を説明できる光学特性を持ったダストが見つからない



Evolution of dust puffs

$\Delta E(V-I) \sim 0 \text{ mag}$ & $\Delta I \sim 1-3 \text{ mag}$ に観測点がない

decline, recovery で同じトラックを通ることを示唆

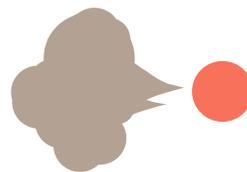
Skuljan et al. (2003), Woollands et al. (2009) と consistent

どうして decline & recovery で同じトラックを通るのか

ダスト形成 \Rightarrow 成長 \Rightarrow dust puff の拡散というプロセスの場合



ダスト雲形成



ダスト成長

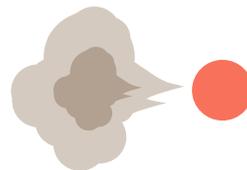


ダスト雲拡散

ダスト形成 \Rightarrow 局所的成長 \Rightarrow dust puff の移動というプロセスの場合



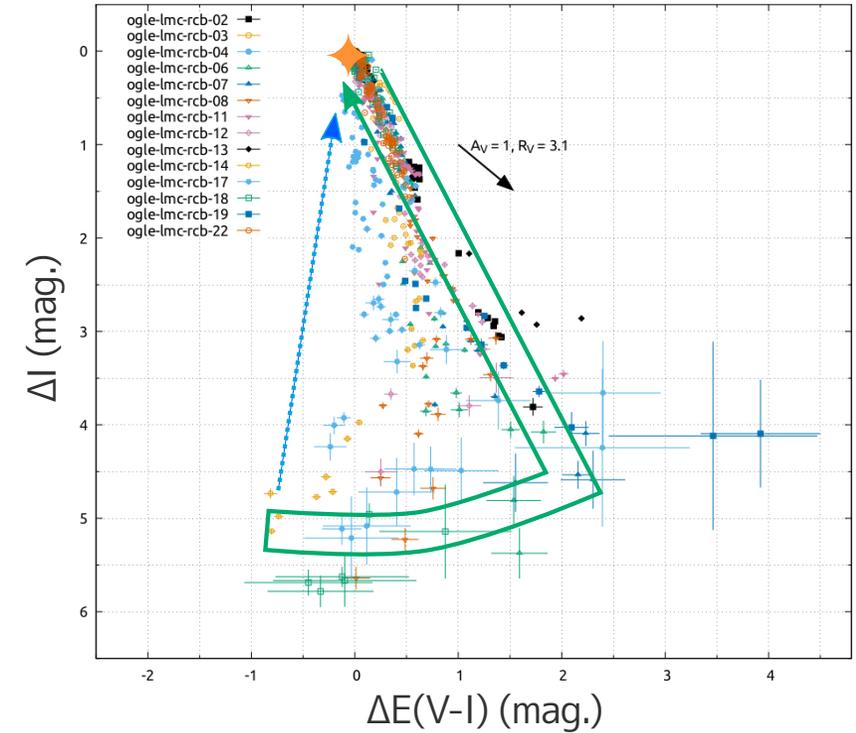
ダスト雲形成



ダスト成長 (中心)



ダスト雲移動



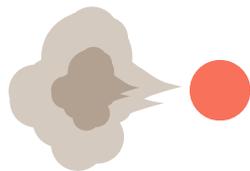
星半径 $R \sim 30 R_{\odot}$
 星表面の速度 $V \sim 30 \text{ km/s}$
 ($R \text{ CrB Vsini} \sim 18 \text{ km/s}$ Uesugi & Fukuda, 1970)
 Photosphere crossing time
 $T \sim 2R/V \sim 16 \text{ days}$

Peculiar groups of dust puffs

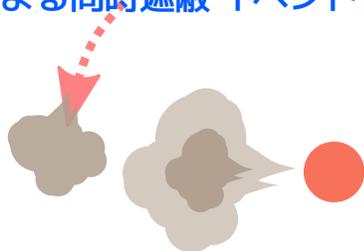
Color-magnitude diagram 上でトレンドから外れた天体

1. 生成するダストのサイズが一時的に変化した
2. 過去に生成した dust puff によるトランジット

新規のダスト雲のみが引き起こす遮蔽イベント ⇨ 通常トレンドに乗る



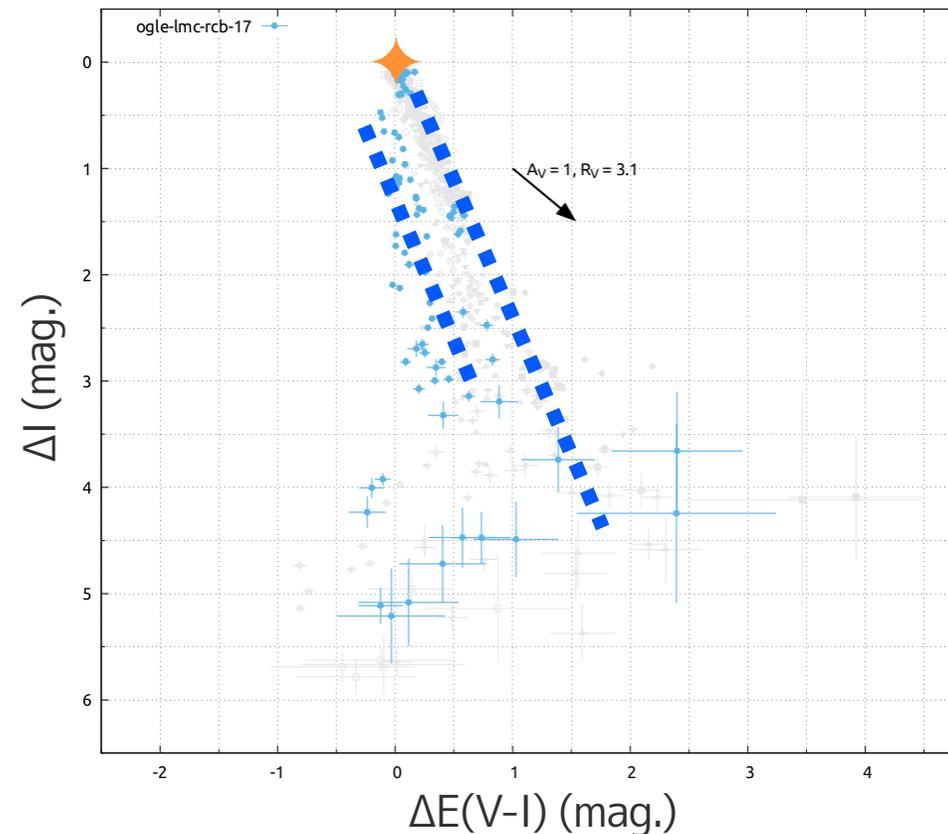
新規+ 既存のダスト雲による同時遮蔽 イベント ⇨ CMD 上で原点がズれる



nm スケールの小さいダストは輻射圧の影響で飛ばされてしまう ⇨ NIR で見えるハローを形成する

100 nm スケールの大きいダストは塊として周回できる可能性がある ⇨ Clayton+ (2011), Jeffers+ (2012) と矛盾しない

RCrB stars の脈動パターンは複雑で多数の周期を含む (Percy, 2019) ⇨ 小規模な transit イベントが混入している可能性



まとめ

MACHO & OGLE-III のアーカイブから R CrB 型星を解析
色等級図上でダストのサイズ進化を議論

シナリオ A

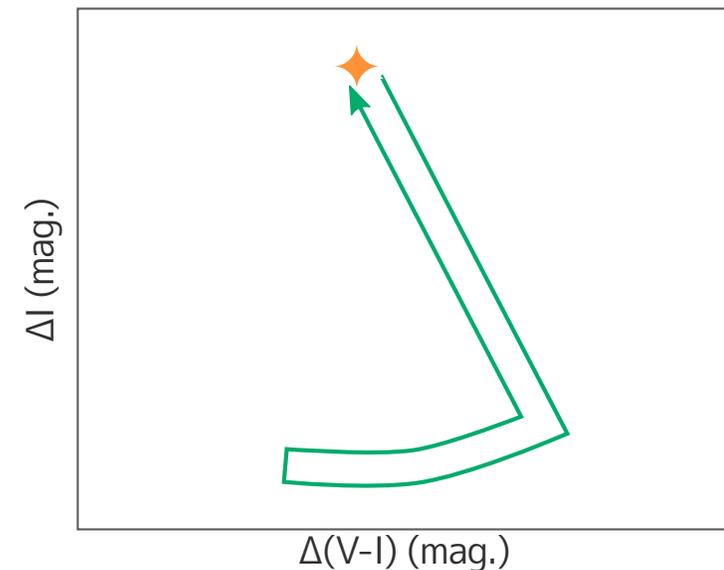
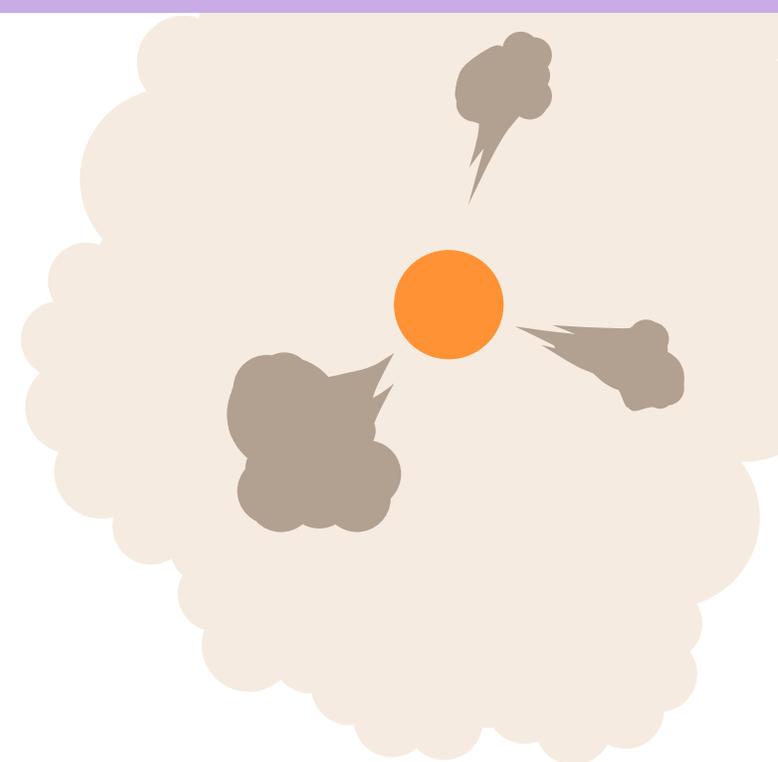
およそ 120 nm の Amorphous Carbon が形成 \Rightarrow より大きく成長

シナリオ B

<10 nm の Unknown Carbon dust が形成 \Rightarrow より大きく成長

進化トラック \Rightarrow dust puff 中での不均質な成長を示唆

トレンドから外れた天体 \Rightarrow dust puffs のトランジット？



with Tomo-e Gozen?

長期モニタリングによるダスト形成・成長の研究

単色なので Tomo-e Gozen 単体では厳しい.....

Northern Sky Transient Survey + フォローアップ観測

既知の系内 R CrB stars はサーベイにバイアスされている (completeness = 1–50%)

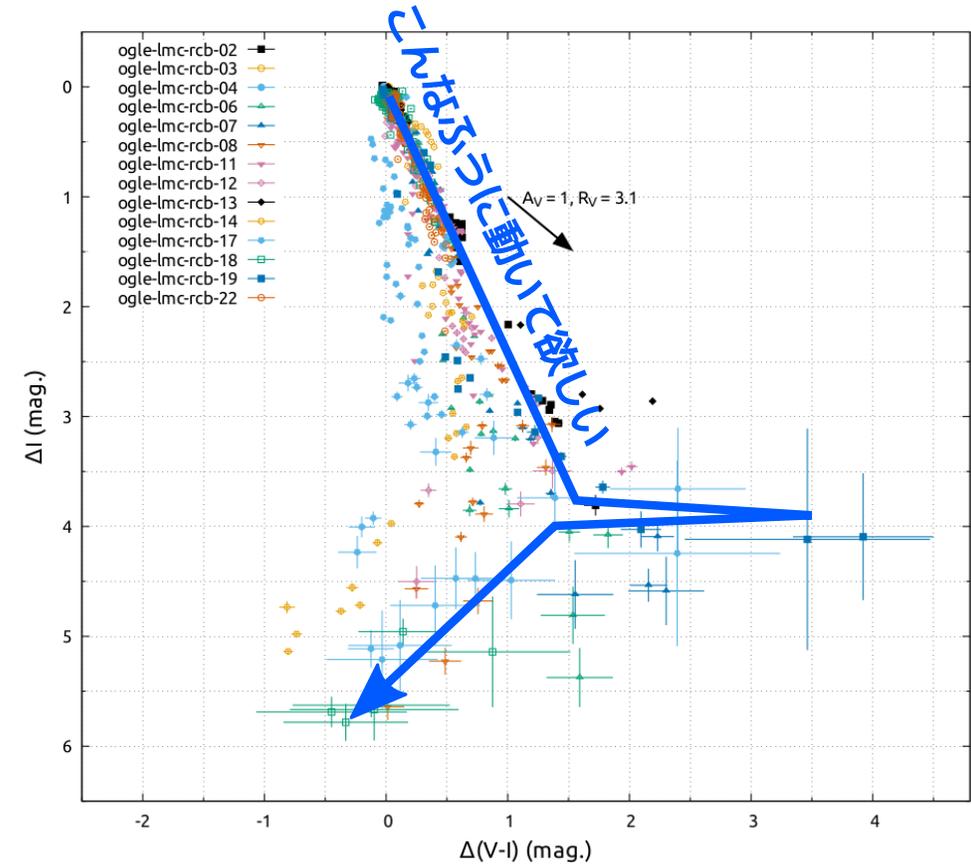
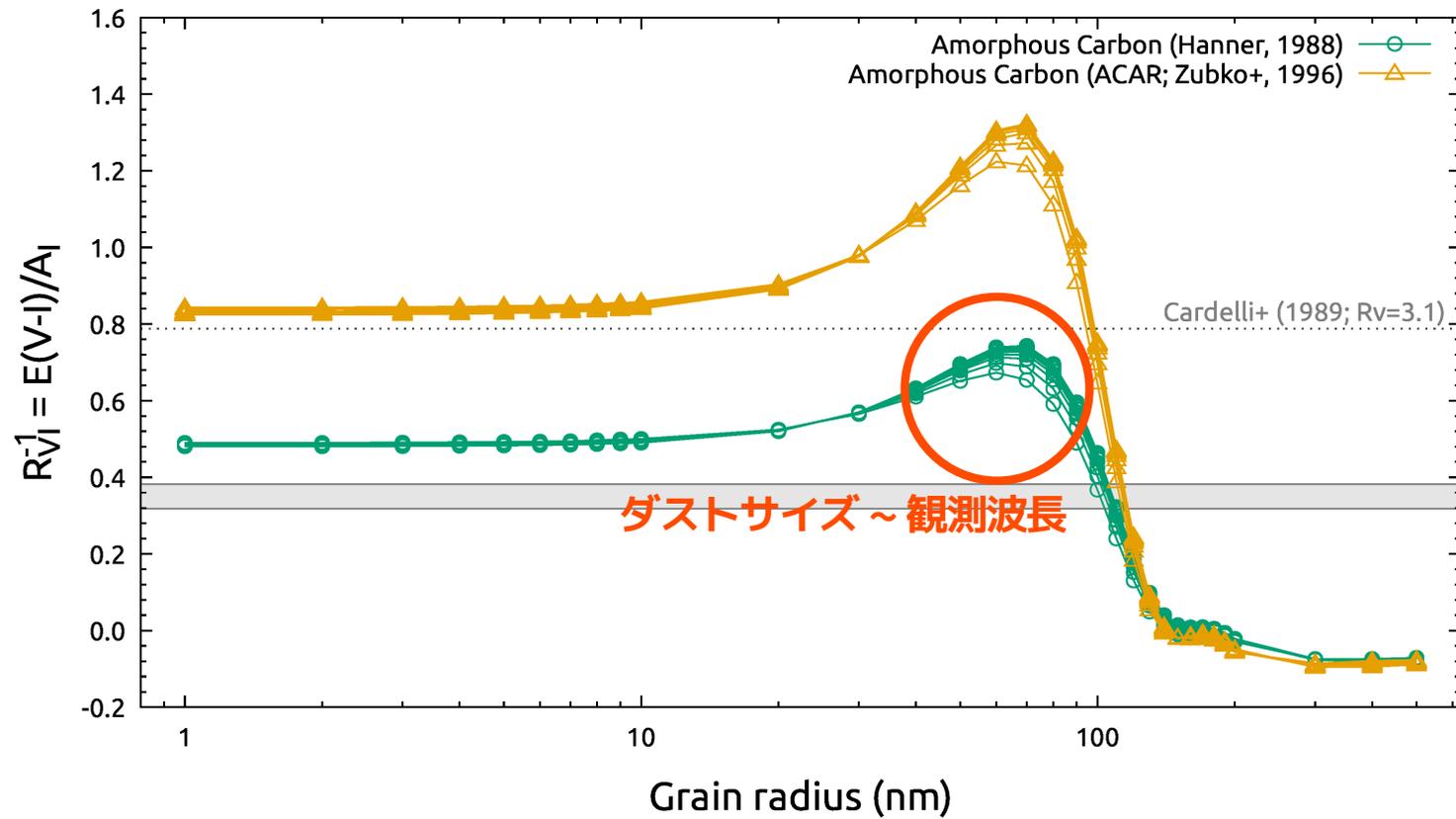
銀河面を避けないサーベイ + 十分な空間分解能

差分パイプラインが暗くなった星も検出してくれるとうれしい

即座にトリガをかけてせいめい望遠鏡/多色カメラで密にフォローアップする



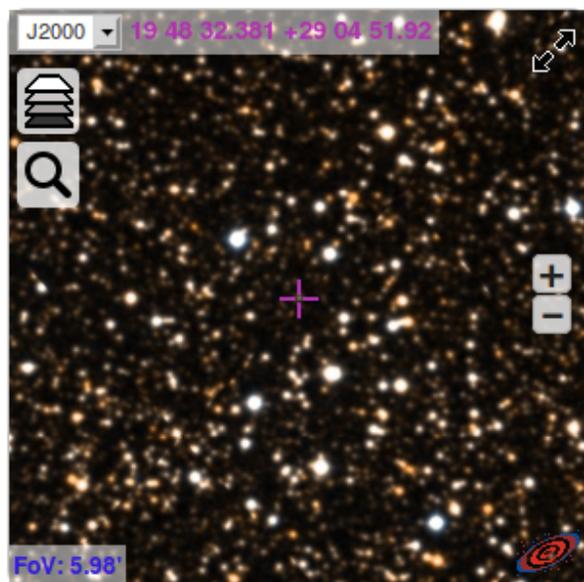
Grain size evolution of dust puffs



Gaia19alg

Details

Follow-up



Other surveys detections

None

Comments

>1 mag decline in an emission line Galactic Plane star

ATels

None

TNS ID

AT2019amb

RA - DEC

297.13492 29.08109

19:48:32.38 29:04:51.92

Galactic coords.

65.0101 1.70992

Alerting date

2019-02-03 04:09:34

Julian date

2458517.67

Alerting magnitude

18.16

Historic magnitude

16.92

Historic StdDev

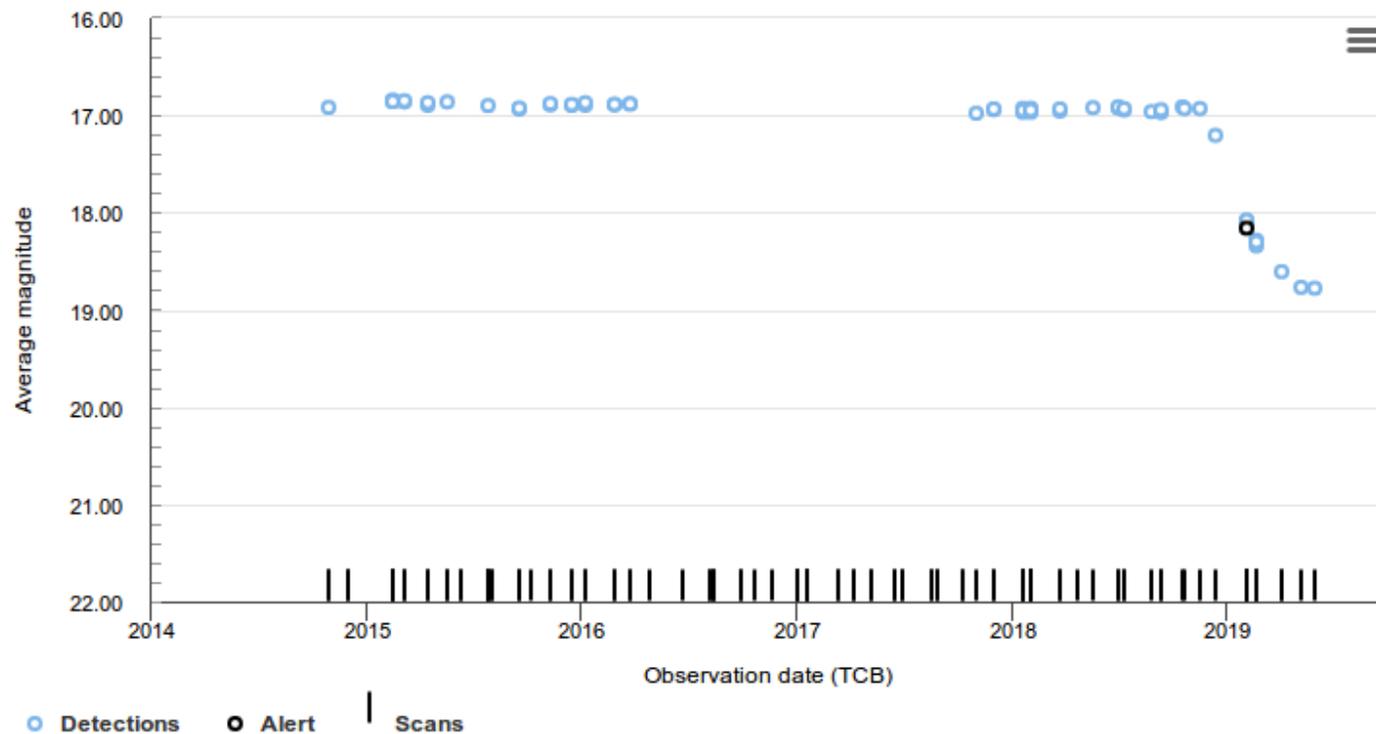
0.05

Class

unknown

Publication date

Feb. 4, 2019, 5:22 p.m.



Get lightcurve data

まとめ

MACHO & OGLE-III のアーカイブから R CrB 型星を解析
色等級図上でダストのサイズ進化を議論

シナリオ A

およそ 120 nm の Amorphous Carbon が形成 \Rightarrow より大きく成長

シナリオ B

<10 nm の Unknown Carbon dust が形成 \Rightarrow より大きく成長

進化トラック \Rightarrow dust puff 中での不均質な成長を示唆

トレンドから外れた天体 \Rightarrow dust puffs のトランジット？

