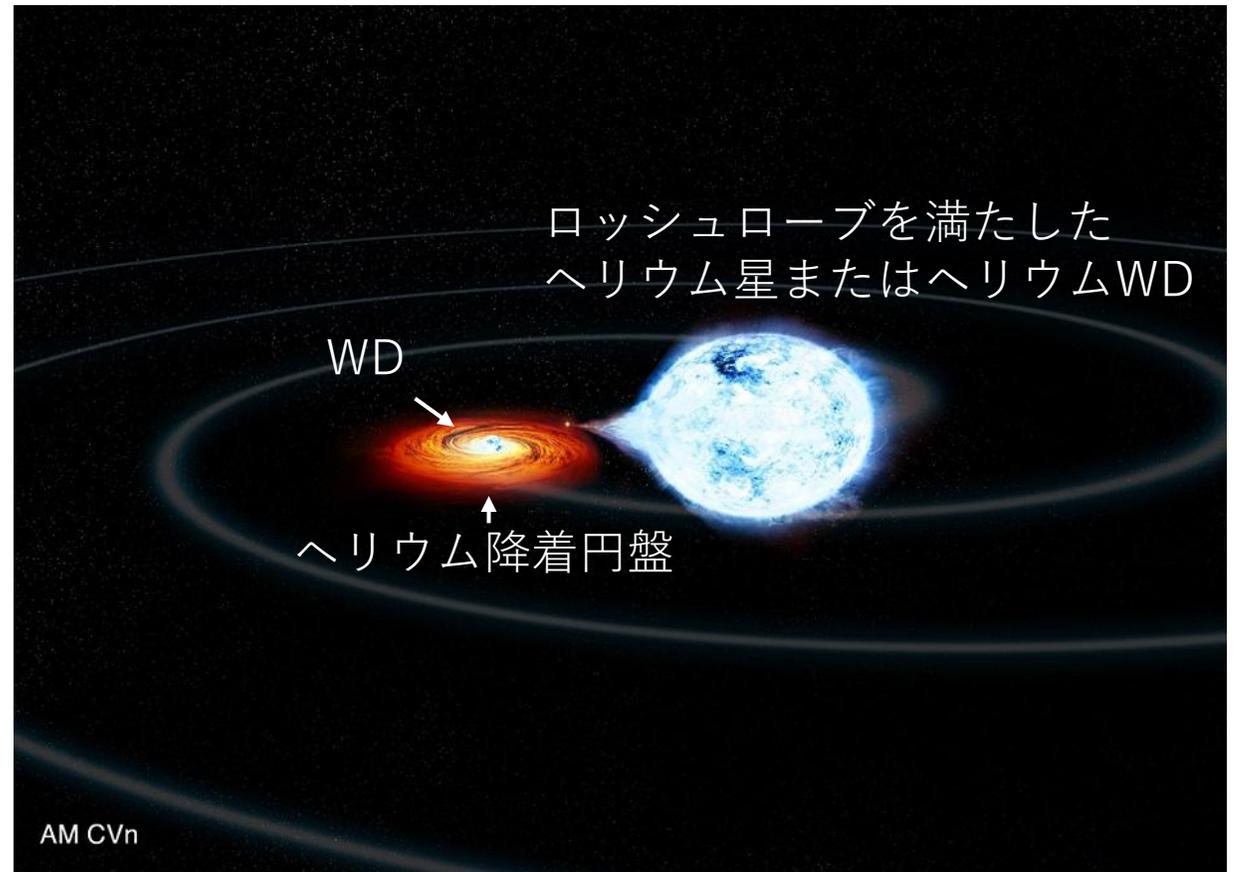


長い軌道周期をもつ AM CVn 型星の スーパーアウトバーストの観測的研究

小路口直冬, 磯貝圭介, 反保雄介, 加藤太一, 野上大作 (京都大学)
VSNET collab., AAVSO collab.

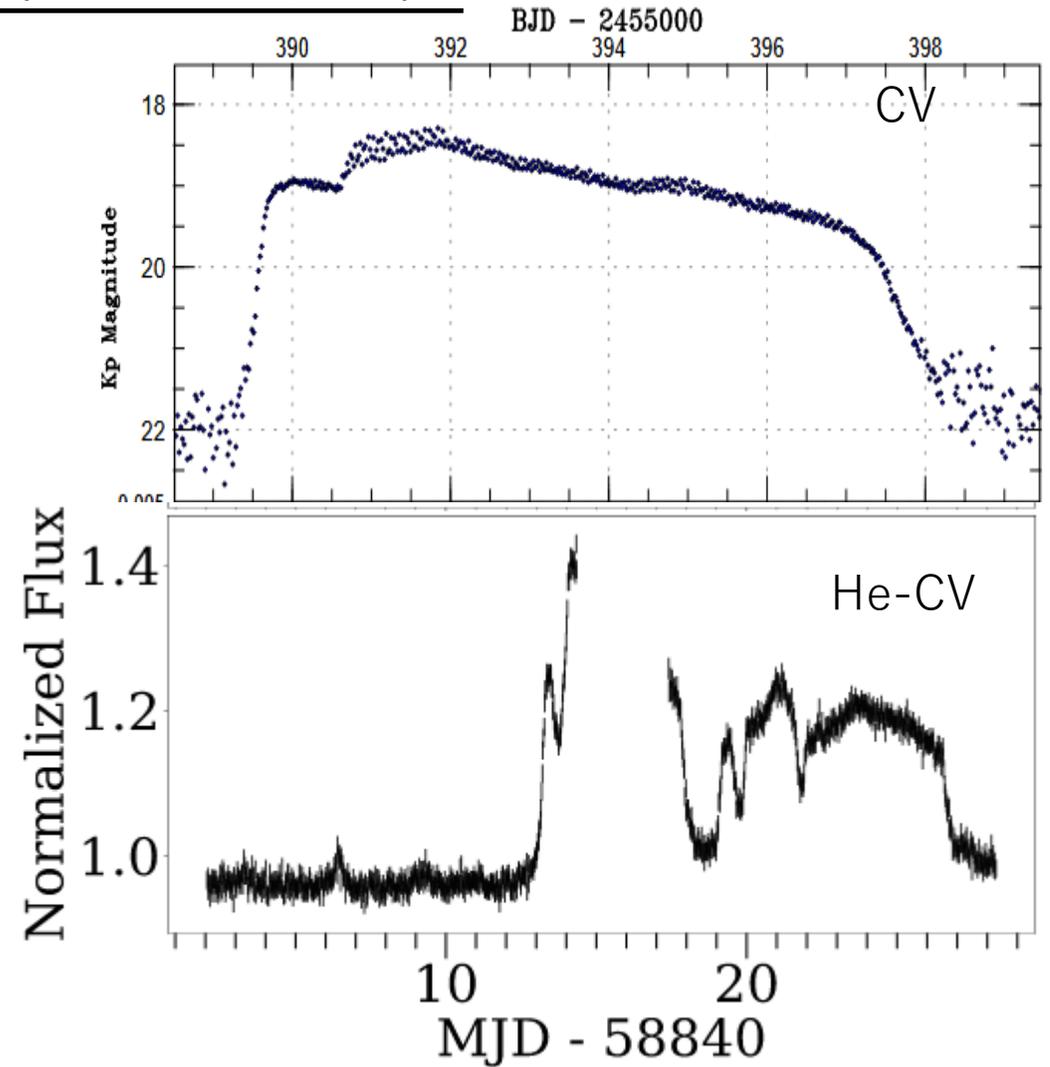
Background: AM CVn型星(ヘリウム激変星)とは？

- 軌道周期 P_{orb} : 5 – 70 分
(うち 35 分以上のものを長周期と定義)
- 質量比(伴星質量/主星質量): $q < 0.2$
長軌道周期天体: $q < 0.07$
(食をもつ天体の割合は少ない)
- CVs と同様にアウトバーストを示す
 $P_{\text{orb}} > 35 \text{ min}$: $SC > 1 \text{ yr}$
 $P_{\text{orb}} > 40 \text{ min}$: $SC > 10 \text{ yrs}$
(Kojiguchi et al. 2025)



Background：矮新星アウトバースト

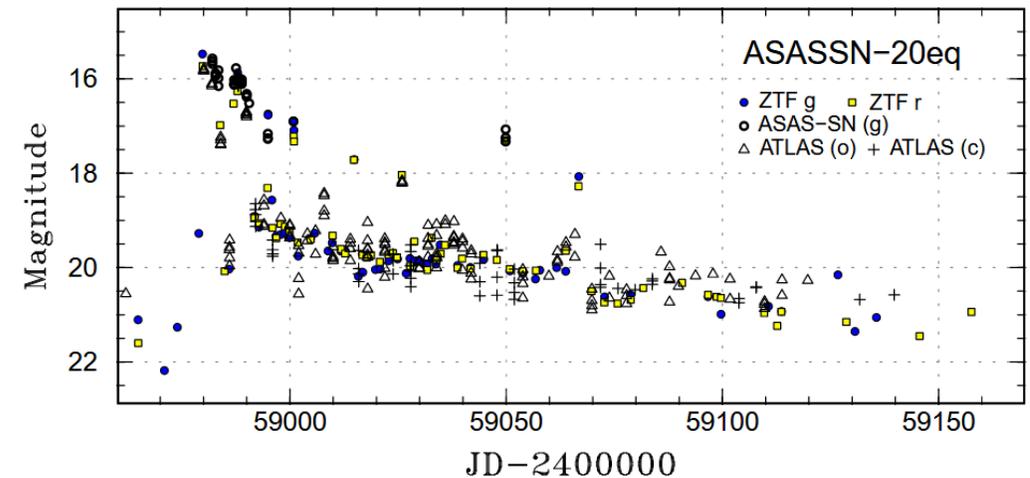
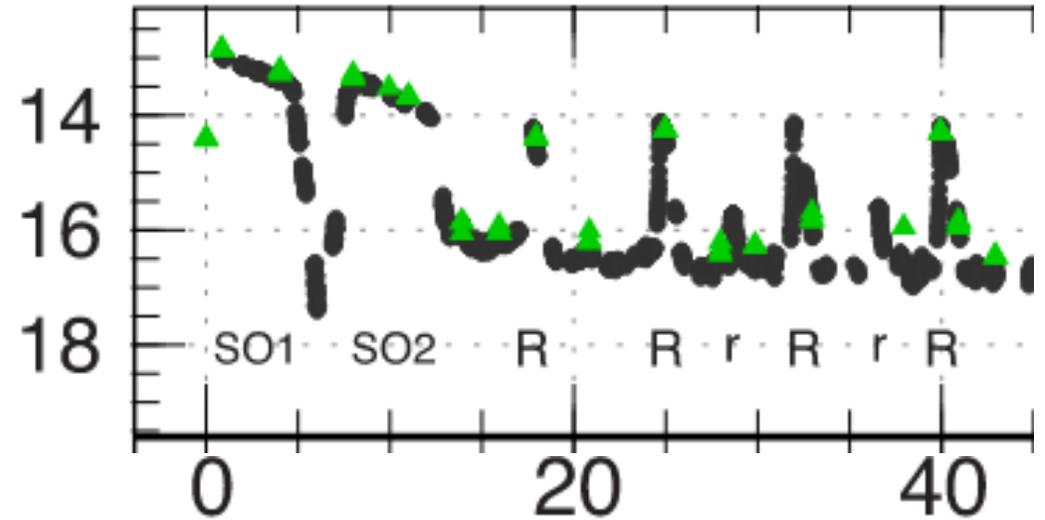
- 激変星と同様に矮新星アウトバーストを示す
(降着円盤の熱不安定性)
- 降着円盤の組成：He-rich
- 連星間距離が CV に比べ短く、降着円盤が小さい
- スーパーアウトバースト継続期間が短い
SU UMa型：~ 10 d
短軌道周期He-CV：~ 5 d
- スーパーアウトバースト後に激しい再増光



Kato & Osaki 2014, Pichardo Marciano et al. 2021

Background : 長軌道周期 AM CVns のスーパーアウトバースト

- スーパーアウトバースト中に dip が存在する
→ ダブルスーパーアウトバーストと呼ばれ
前半では early superhump,
後半では ordinary superhump
と呼ばれる周期変光を示す。
- これらは 2:1 共鳴半径, 3:1 共鳴半径に
降着円盤が達することで励起される
→ 熱潮汐不安定性によって説明される
- スーパーアウトバースト後には
静穏期よりも明るいフェーディングテールを伴い
継続時間 1 d 程度の再増光を複数回示す。
- CV においてフェーディングテールは
白色矮星が降着により加熱され
冷めていく様子を見ていると考えられている



Isogai et al. 2019, Kato & Kojiguchi 2021

Motivation & Aims

- 長軌道周期 AM CVns の superoutburst については既報の例 (NSV 1440, J0902 など) が散発的でまだ体系的な研究が十分ではない。2019 年が長軌道周期 AM CVns の double superoutburst 元年 (Isogai et al. 2019)
- サーベイデータのみでされている体系的な研究は存在する (Kato & Kojiguchi 2021) しかし、AM CVns の増減光のタイムスケールは短く、サーベイのみでは詳細な形が良くわからない
- 短軌道周期 AM CVns は TESS data を用いた体系的な研究がある。 (Pichardo Marcano et al. 2021) →アウトバースト終了後に激しい再増光を起こすことから EMT の重要性について議論
- 長軌道周期 AM CVns については EMT を支持しないものと支持するものの両方が出ている (e.g. Kato & Stubbings 2021, Rivera Sandval et al. 2020, 2021, 2022)
- 本研究の目的：長軌道周期 AM CVns の SO の共通性と fading tail 構造を明らかにする

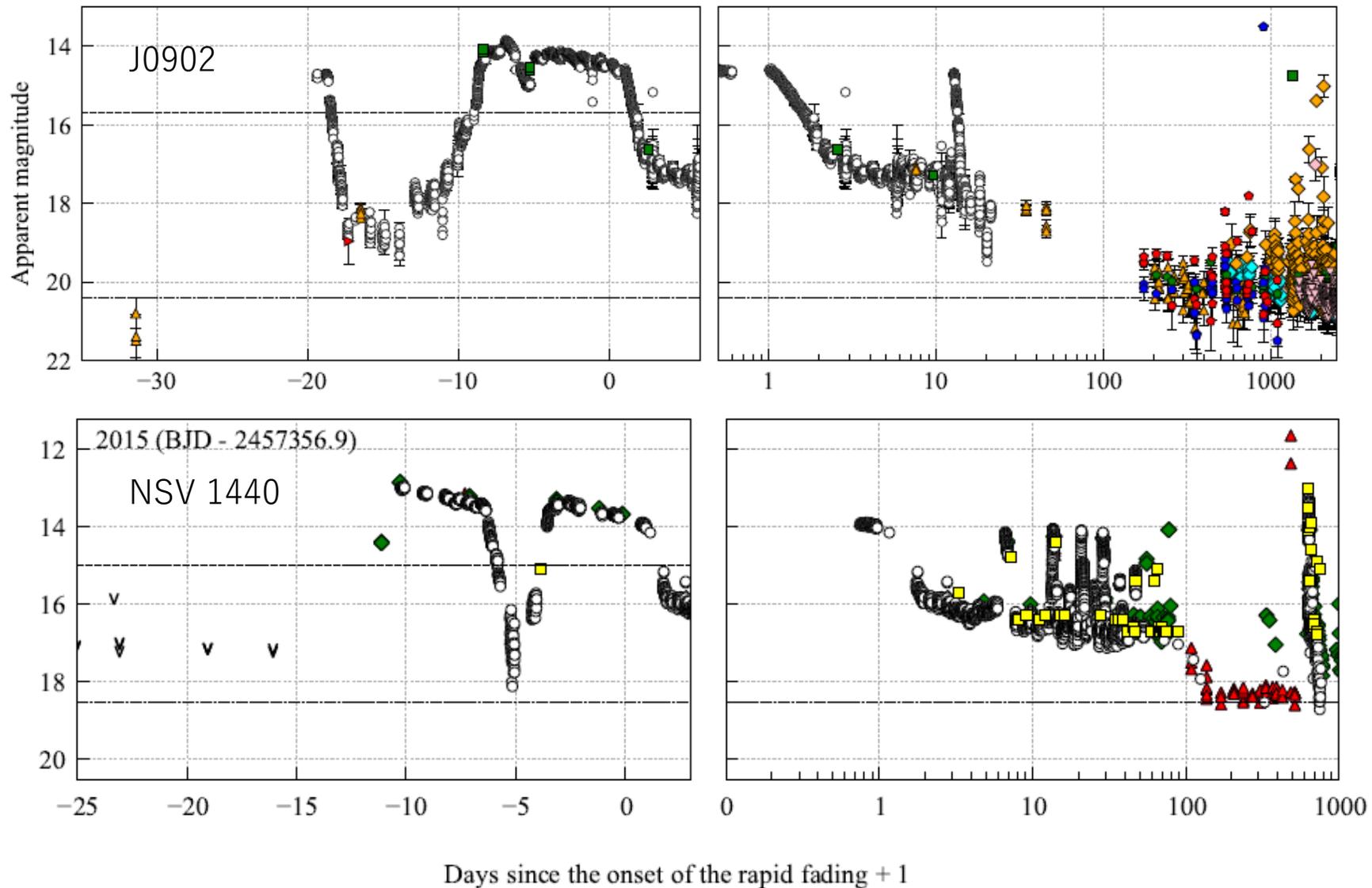
Observation Data

- 6 天体, 計 9 SO を観測。Variable Star NETwork (VSNET) を中心とし AAVSO やサーベイ観測である ZTF, ASAS-SN, ATLAS, CRTS, SkyMapper, TESS, Gaia を含む
- VSNET や AAVSO は口径20—40cmの小口径望遠鏡のデータが中心
NSV 1440 には3名の眼視観測者のデータが含まれている(観測者は計77名)

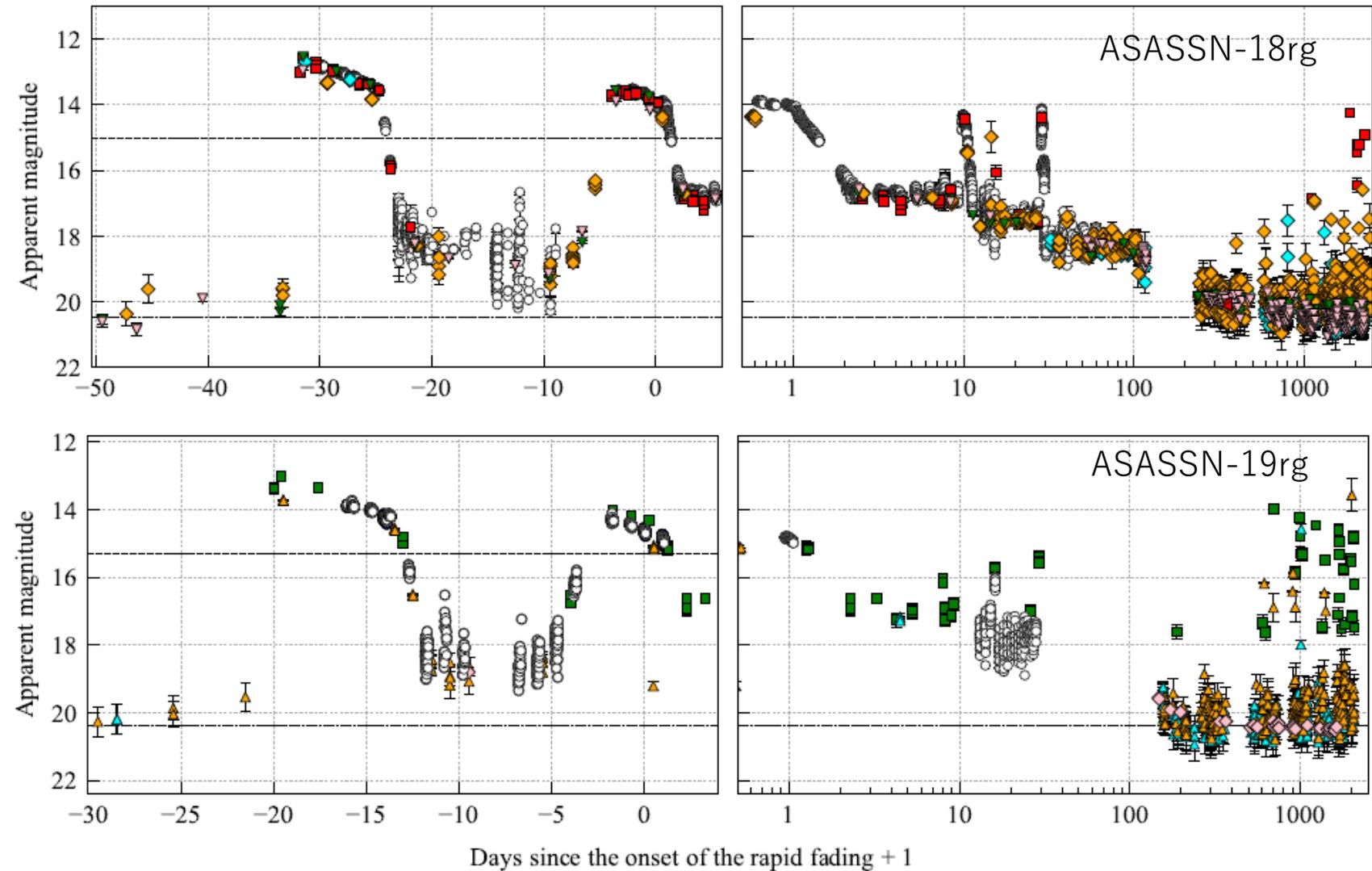
object	year	observer or survey
SDSS J090221.35+381941.9	2014*	VSNET, AAVSO, CRTS
NSV 1440	2015*	VSNET, AAVSO (眼視含む), ASASSN, Gaia
	2017*	VSNET, AAVSO (眼視含む), ASASSN
	2019	VSNET, AAVSO (眼視含む), ASASSN, SkyMapper
	2021	VSNET, AAVSO (眼視含む), ASASSN, ATLAS, SkyMapper
ASASSN-18rg	2018	VSNET, ZTF, ATLAS, ASASSN
ASASSN-19rg	2019	VSNET, ATLAS, ASASSN
ASASSN-20eq	2020	VSNET, TESS, ZTF, ATLAS, ASASSN
ASASSN-21au	2021 †	VSNET, AAVSO, ZTF, ATLAS, ASASSN

* 周期解析論文は出版済み, † 多色観測論文は出版済み

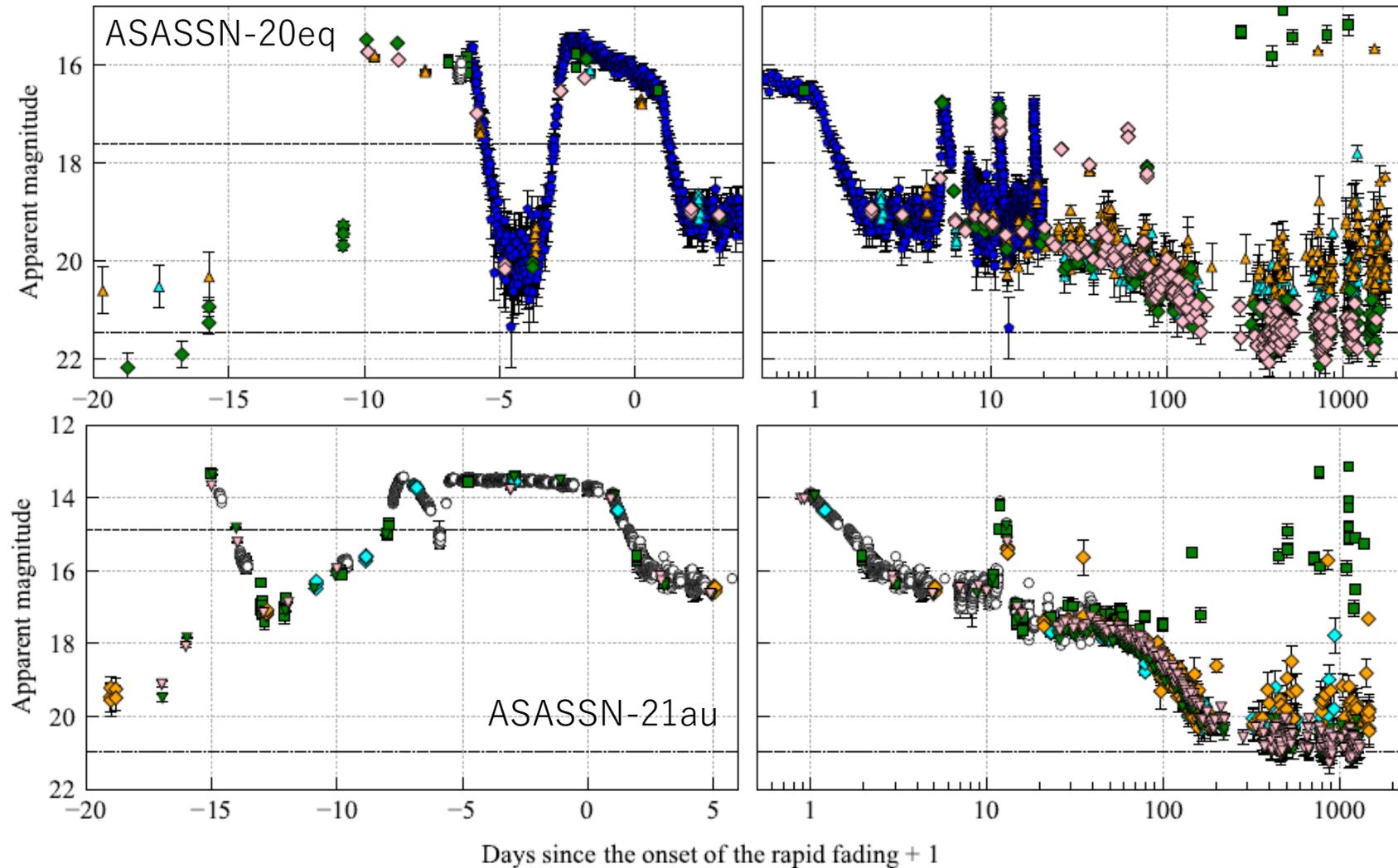
Results : Outburst Profiles



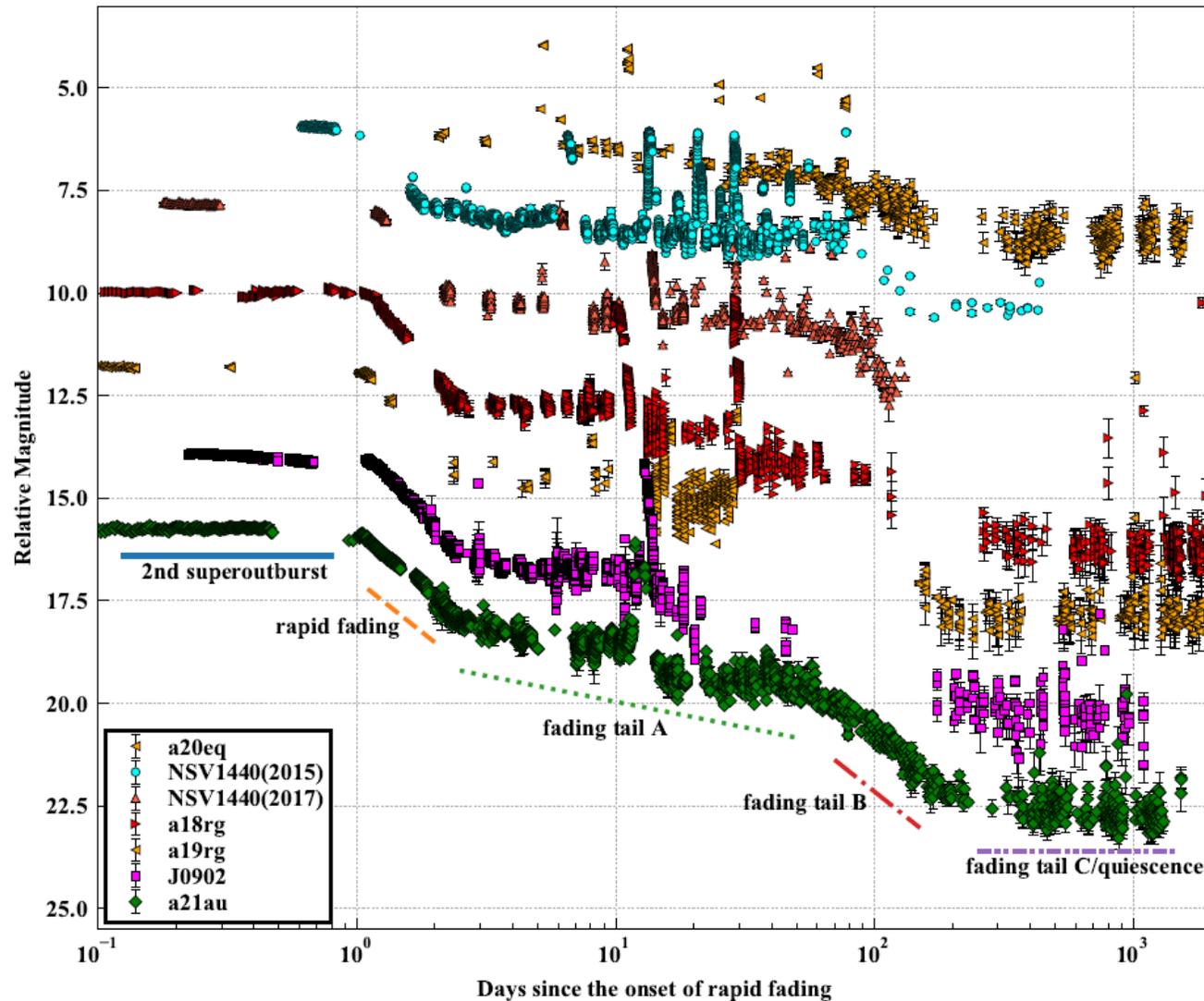
Results : Outburst Profiles



Results I: Outburst Profiles



Results : fading tail



継続時間

- Fading tail A: ~ 70 -- 100 days
- Fading tail B: ~ 1 yr
- Fading tail C: ~ 3 yrs

その他の特徴

- Fading tail A 中の再増光の前後で階段状の減光を示している
- ASASSN-21au の再増光の前後で superhump 周期が減少
→降着円盤半径が小さくなっている
- Fading tail C が見えている系と 静穏期になってしまう系が存在する

Results : NSV 1440 の superoutburst の比較

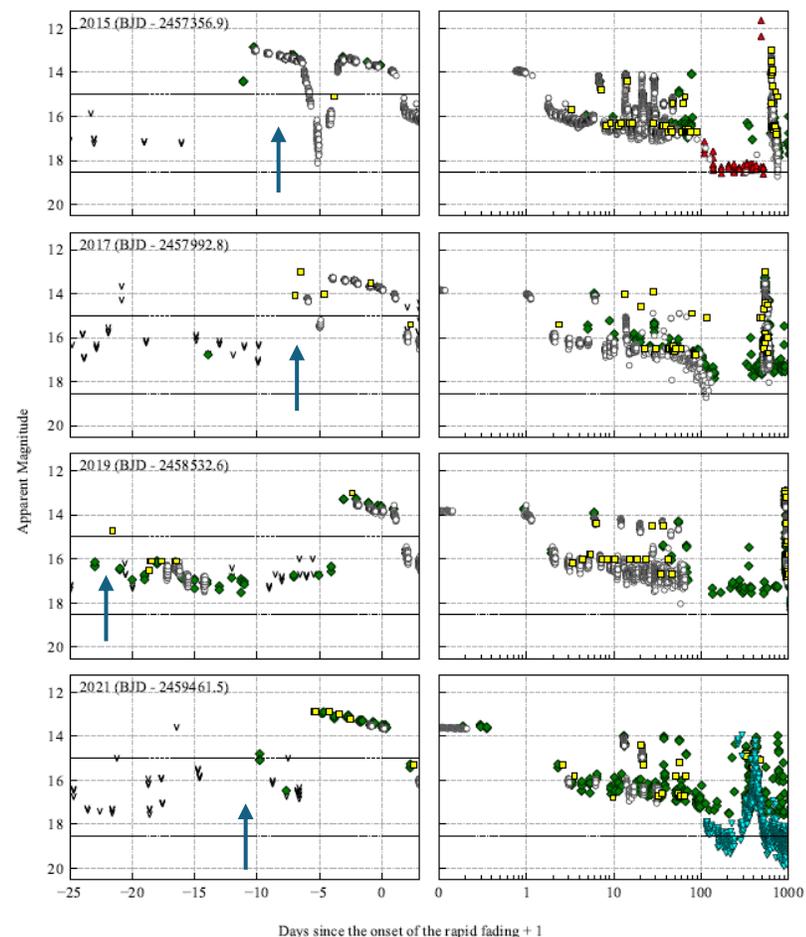


Fig. 4. Light curves of the 2015, 2017, 2019, and 2021 superoutbursts of NSV 1440. The x-axis is referenced to 1 day after the onset of rapid fading. The left panels show the superoutbursts proper with a linear scale, while the right panels display the fading tails with a logarithmic scale. White circles indicate VSNET-reported data, yellow squares represent visual observations, green diamonds represent ASAS-SN g -band, cyan downward triangles represent ATLAS γ -band, and red upward triangles represent Gaia. The dashed line indicates 1 magnitude fainter than the onset of rapid fading, and the dash-dotted line marks the g -band magnitude from the SkyMapper DR4 catalog. Alt text: The figure consists of four rows and two columns of panels. The left panels have an x-axis ranging from minus twenty-five to three days, and the right panels have an x-axis ranging from one tenth to one thousand days.

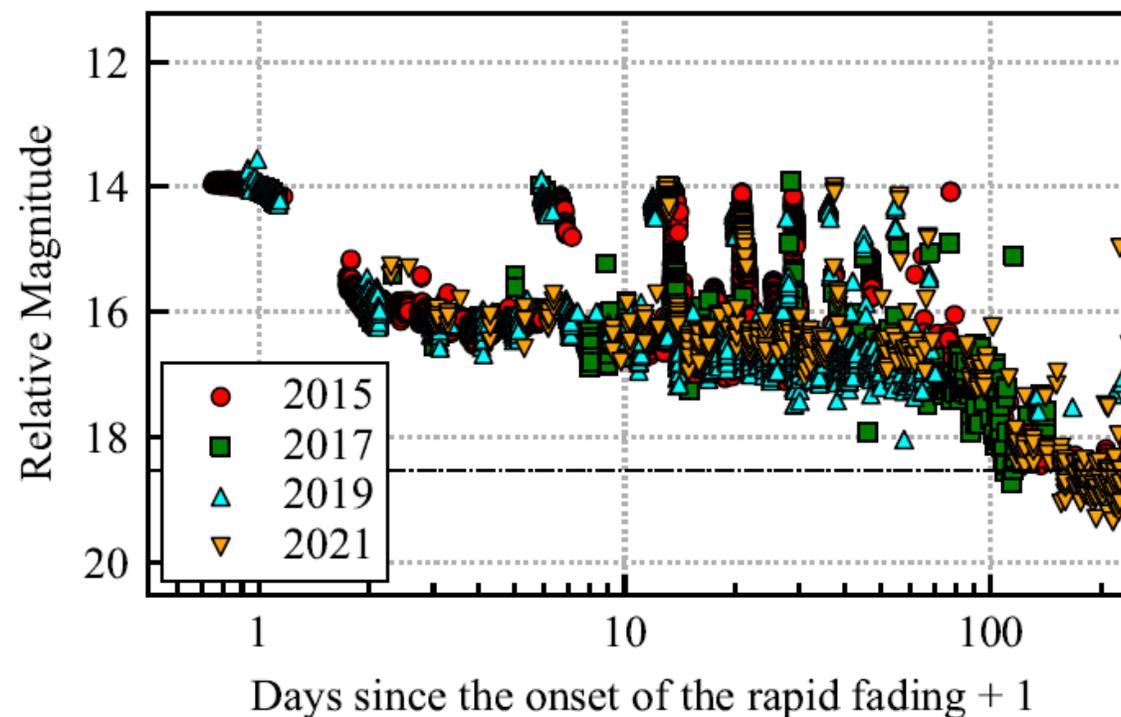
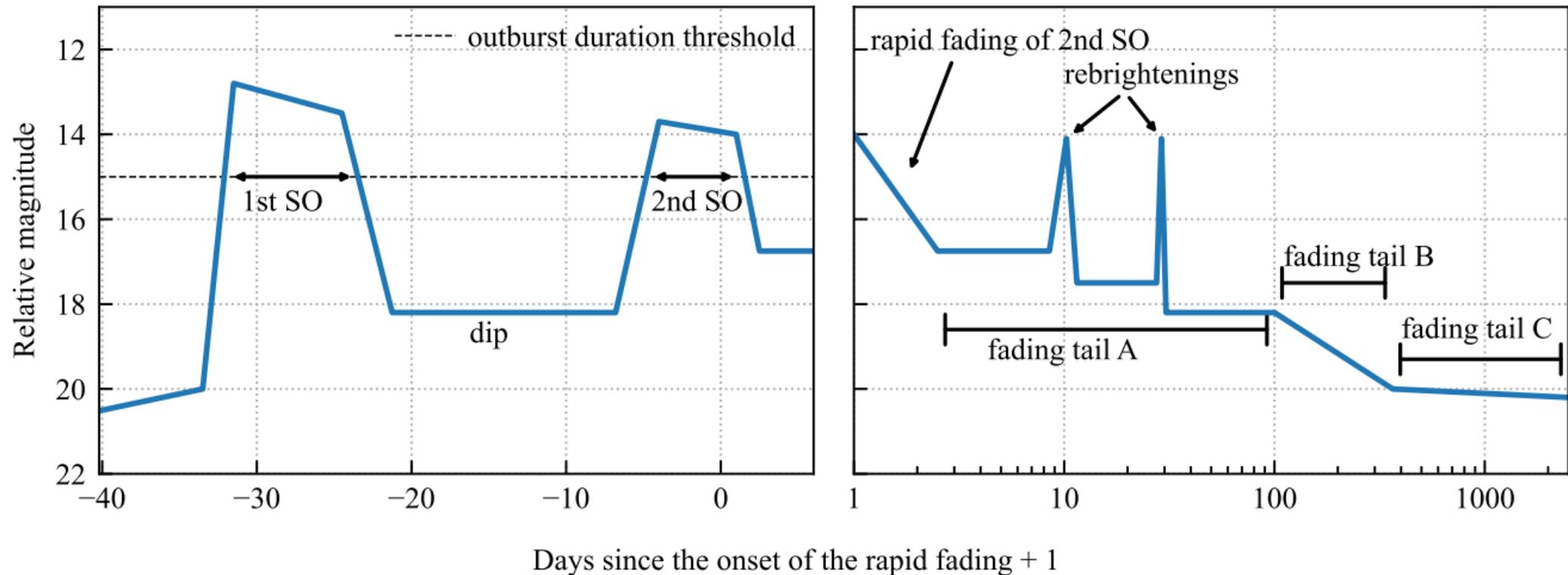


Fig. 5. Overlaid light curves of the fading tails following the superoutbursts of NSV 1440 in 2015, 2017, 2019, and 2021. The x-axis is referenced to 1 day after the onset of rapid fading. The dash-dotted line marks the g -band magnitude from the PS1 catalog. Alt text: A single panel figure with the x-axis ranging from 0.5 to 250 days.

Results : schematic figure



- (pre-rise phase) → PO/1st SO → dip → 2nd SO → rapid fading → tail A → tail B → tail C/静穏期
- 2nd SO は ordinary superhump を伴う SO と定義する
- fading tail が 3 つにわけることができる
- 1st SO から 2nd SO までの期間を t_{all} , dip 期間を除いた期間を t_{eff} と定義

Discussion

Superoutburst

- Double superoutburst において 2nd SO の継続時間が ~ 5 d になるのは熱潮汐不安定性によれば 1st SO が降着円盤の質量を消費し、3:1 共鳴半径で driven される状態まで統一化されることによるもの
- もし EMT によって driven されているのであれば precursor outburst を伴う 2nd SO よりも 1st SO を伴う 2nd SO のほうが継続時間が長くなるはずである。

Fading tail

- Fading tail A: superhump が見えている。系が小さいため、CVよりもWDに降着する質量が小さい。
- Fading tail B: fading tail A と power law index の値が違う
 - 状態遷移を見ていると解釈するのが尤もらしい
 - WD の冷却過程で状態遷移が見えるというのは考えにくい
 - fading tail A, B は disk-dominated
 - なぜ静穏期よりも明るいのか？ 離心円盤 (superhump) 等によって粘性が高い状態の可能性
 - アウトバーストのインターバルが短い系においては静穏期の粘性が高い状態で次のアウトバーストが引き起こされている可能性が考えられる
- Fading tail C: 継続時間が非常に長く outburst amplitude が大きい系のみで見える
 - WD-dominated

Conclusions

- 6つの天体で計9つのスーパーアウトバーストの詳細な光度曲線を取得した
- スーパーアウトバーストの継続期間については系ごとだけではなく、同じ系でもバラつきが大きいことが分かった。
- ただし、ダブルスーパーアウトバーストの2nd SO だけは~5 d とバラつきが少ないこと
- rebrightening の前後では降着円盤が小さくなっている可能性がある。
→ 長周期 AM CVns のスーパーアウトバーストも TTI で説明でき、EMTの影響は少ない
- fading tail は3段階構造
 - fading tail A：降着円盤寄与、真の静穏期よりも粘性が高い状態
 - fading tail B：降着円盤寄与、粘性が真の静穏期に向かって下がっていく状態
 - fading tail C：白色矮星寄与、降着により加熱された白色矮星が冷めていく状態
- fading tail A, B の継続期間は系によって変わらず、
またアウトバーストの継続期間によっても影響されない。これも EMT が起きていないことを肯定
- Outburst interval が短い系(軌道周期が短い系)では、
fading tail A, B のような降着円盤の粘性が真の粘性よりも高い状態で
次のアウトバーストが起きている可能性