

標準進化モデルと異なる 激変星の進化経路の理解

京都大学 修士2回 伊藤潤平

共同研究者: 反保雄介、小路口直冬、磯貝桂介、
野上大作、加藤太一 (京都大学)
VSNET Collaborations

本日の流れ

1. Introduction of CV evolution
2. LL Andromedae
3. ASASSN-19rx & other long Porb CV
(preliminary)

本日の流れ

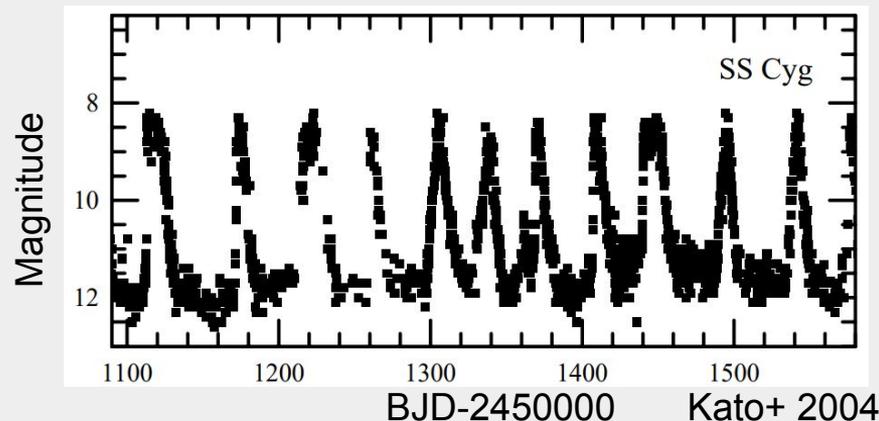
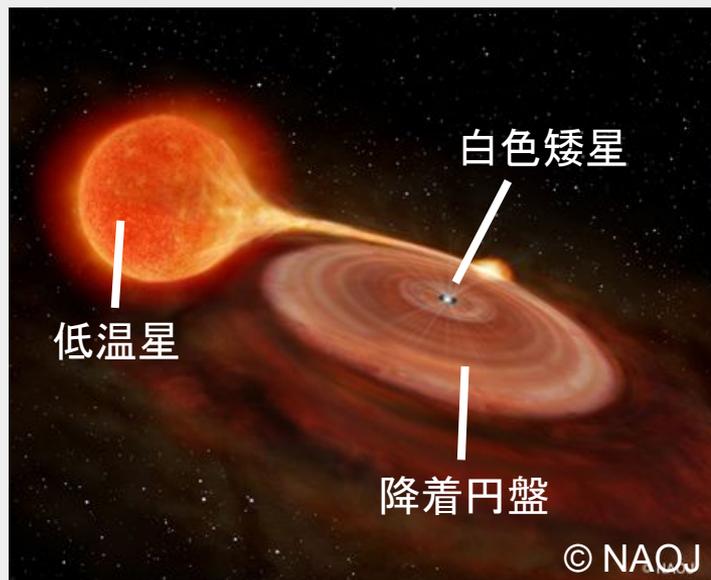
1. Introduction of CV evolution
2. LL Andromedae
3. ASASSN-19rx & other long Porb CV
(preliminary)

激変星 (Cataclysmic Variables)

白色矮星(主星)と低温星(伴星)からなる近接連星系

低温星がRoche lobeを満たし白色矮星の周りに降着円盤を形成

連星間の距離を短くすることで質量輸送が続く 激変星における「**進化**」

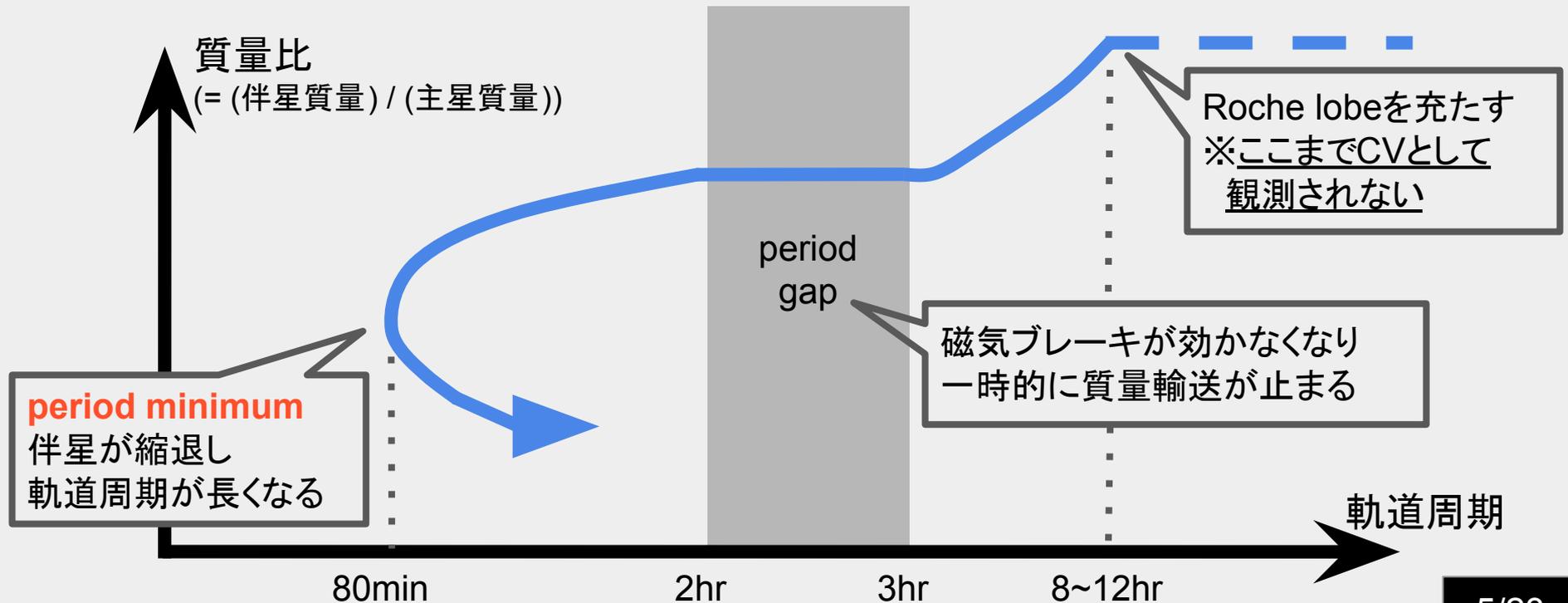


激変星の一部では上のような増光

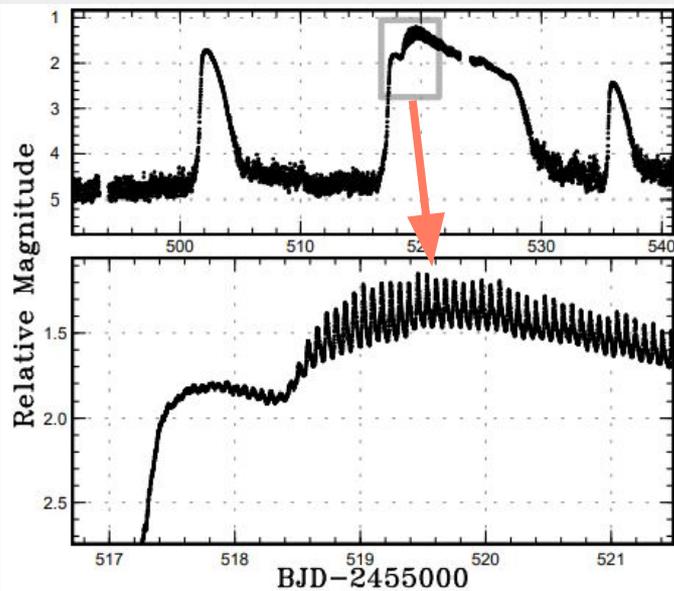
⇒ **矮新星アウトバースト**

激変星の標準進化モデル理論

角運動量損失で、軌道周期の縮小・伴星の質量減少が同時に起こる
この間、伴星は主系列星(に近い状態) ⇒ 多くのCVが**標準進化モデル**に従う



superoutburst



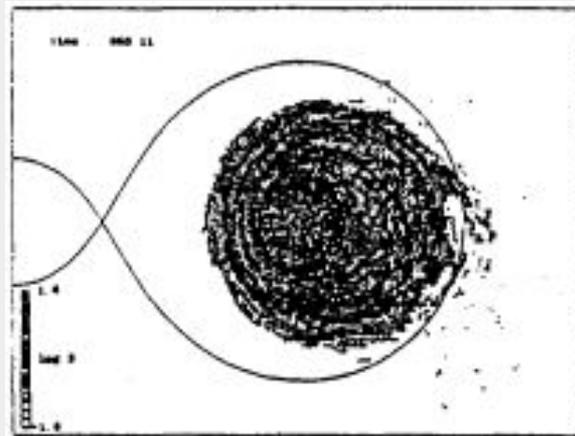
Osaki & Kato (2013)
©Kepler

period gap以下のCVではsuperoutburst

……比較的大規模

+ **superhump**

(軌道周期より数%長い周期の変動)



Hirose & Osaki (1990)の
simulation結果

superhump

……伴星の潮汐的効果で円盤が

離心変形・歳差運動

⇒ superhump周期が
質量比の強い指標に

short orbital period CV

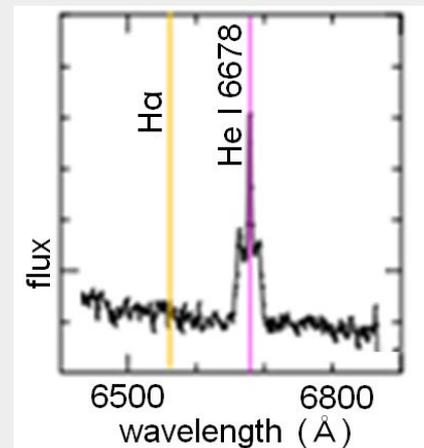
軌道周期がperiod minimumを下回る激変星が少数存在
……伴星質量に対し半径が小さい

1: AM CVn型星

伴星が**He-rich** (e.g. low mass WD、Helium star)
普通のCVと違い、Balmer線の代わりにHe線が明るい

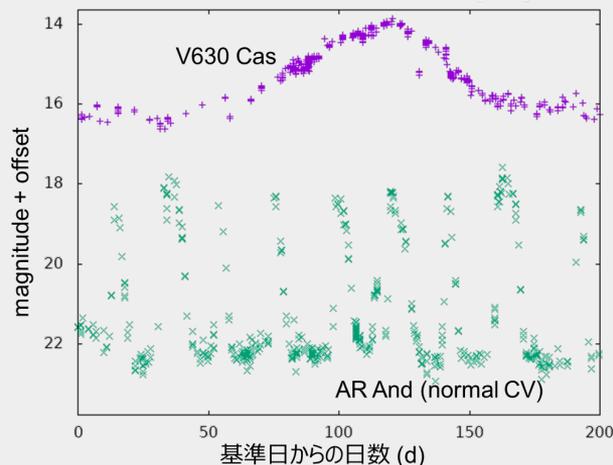
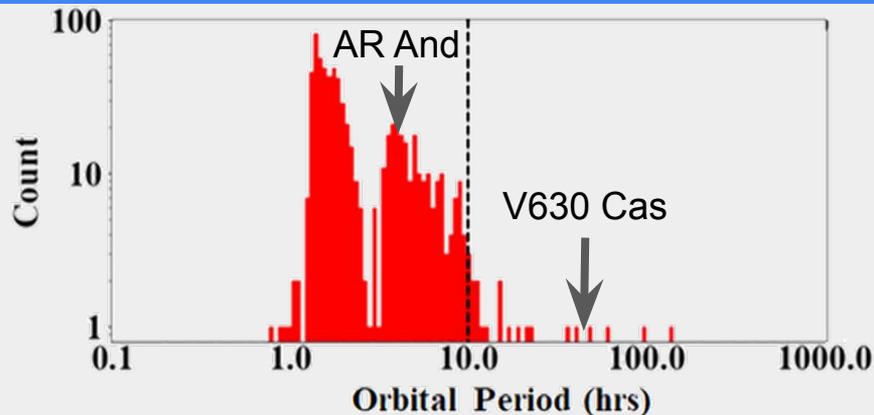
2: pop- II secondary

伴星が**metal poor**
确实視されているのはOV Boo (e.g. Patterson+ 2008) のみ



AM CVn型星の静穏期の
spectrum (Kupfer+ 2013を修正)

long orbital period CV



軌道周期別のCV数のhistogram
(from VSX catalog)

ごく少数の ~ 10hr以上のCVは
標準進化では説明できない

..... 伴星が(準)巨星に進化し、
Roche lobeが充たされる

系の大きさのスケールが違うため、

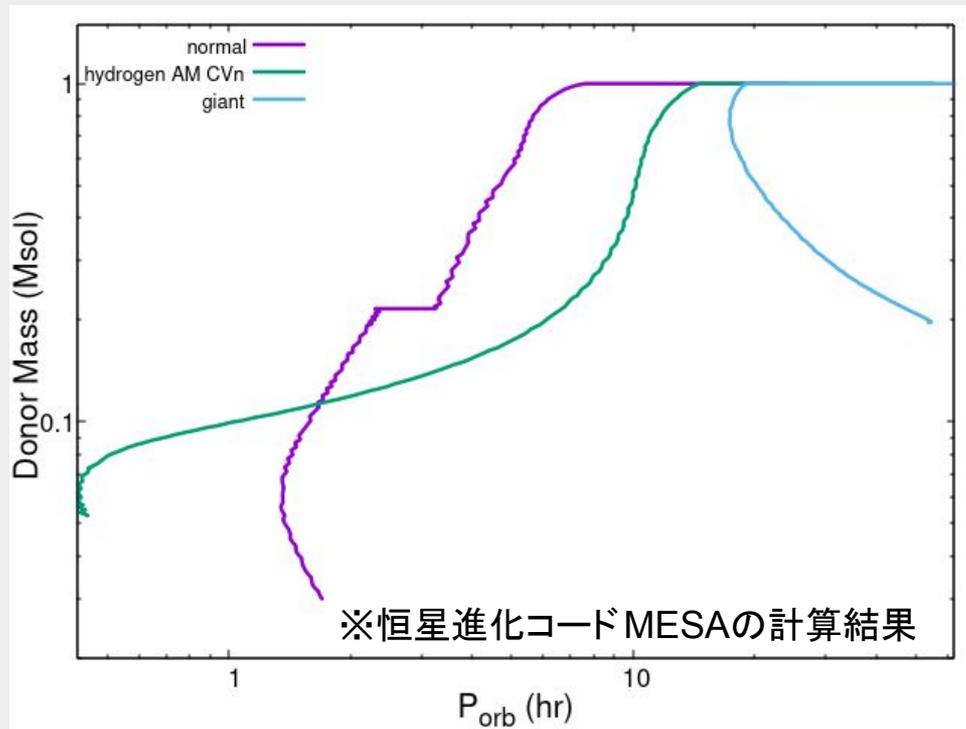
- outburstの間隔 (interval)
- outburstの継続時間 (duration)

が非常に長くなる！

(これらの説明はKimura+ 2018に詳しい)

進化した伴星を持つ激変星の進化

AM CVn型星(の一部)や、長軌道周期CVは伴星進化から説明される (Kalomeni+ 2016)



伴星が主系列の終盤で
Roche lobeを満たす

⇒ 進化途中で伴星水素が枯渇

hydrogen AM CVn (e.g. Tutukov+ 1985)

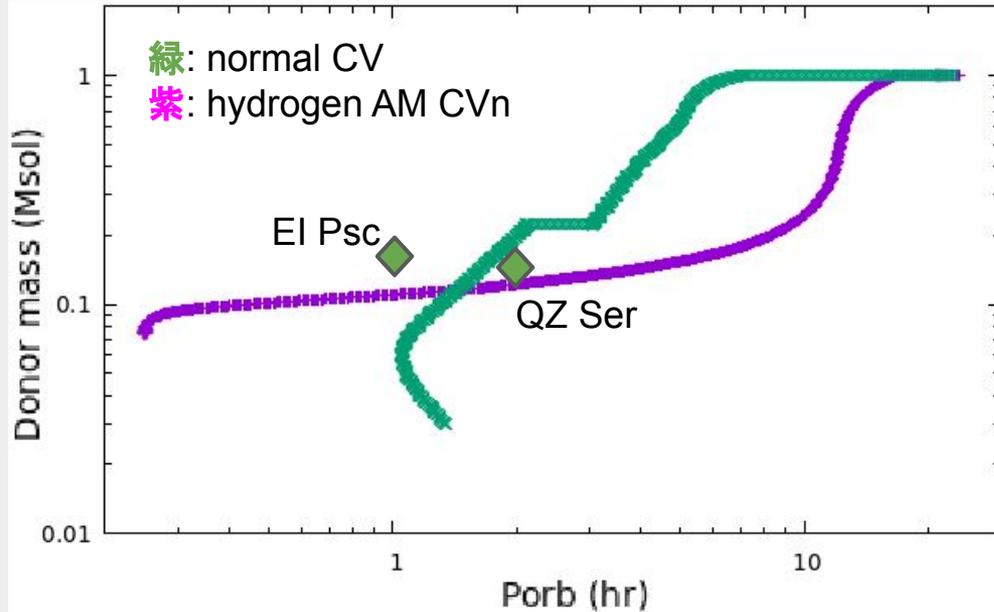
伴星が主系列を終えてから
Roche lobeを満たす

⇒ 長軌道周期CVに進化

本日の流れ

1. Introduction of CV evolution
2. **LL Andromedae**
3. ASASSN-19rx & other long Porb CV
(preliminary)

hydrogen AM CVn progenitors



- HとHeのlineが同時に観測
- 伴星質量が異なる
(軌道周期が短い場合、重い)
- 伴星が高温

等の共通する特徴を持つCV

..... hydrogen AM CVnの前段階

- V485 Cen (Augusteijn+ 1996; Olech 1997)
- EI Psc (Thorstensen+ 2002; Uemura+ 2002)
- QZ Ser (Thorstensen+ 2002)

等が存在するが、

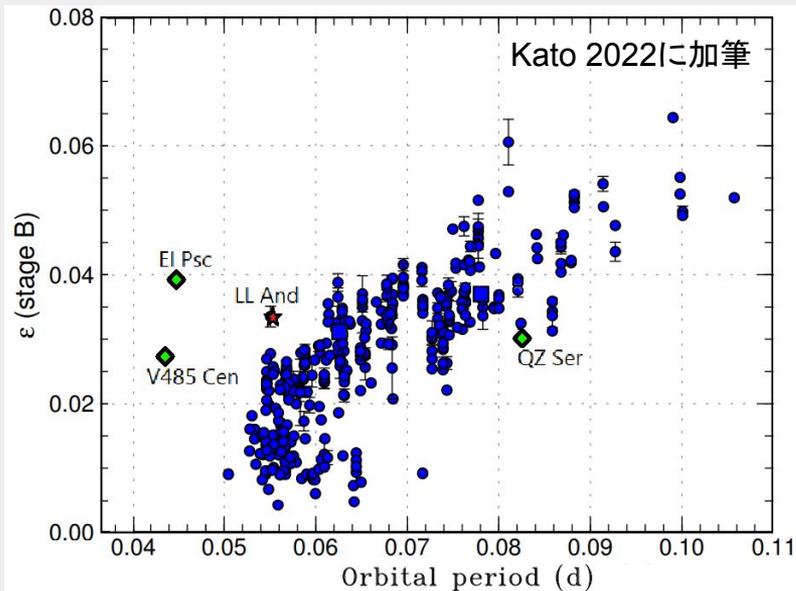
数が少なく統計的議論には至らない

LL And

1979年、1993年、2004年にsuperoutburstを起こしたWZ Sge型星

$P_{orb} \sim 79\text{min}$: normal CVのperiod minimumに近い

標準進化の下で伴星質量 $\sim 0.06M_{sol}$

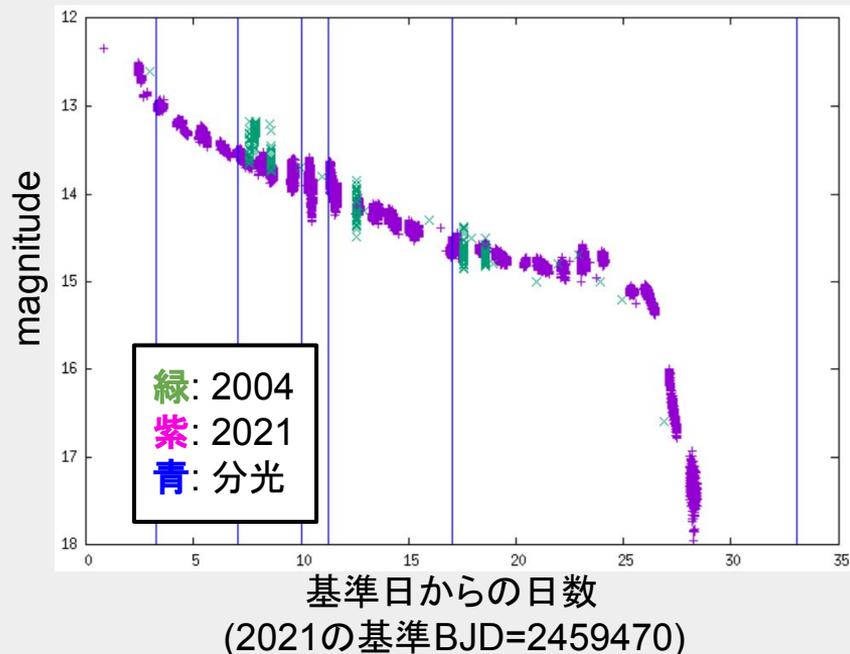


- Kato (2004)
LL Andは似た軌道周期の矮新星と
 $\epsilon (= (P_{sh} - P_{orb}) / P_{orb})$ が大きく異なる
..... 通常のCVに対し**伴星がmassive?**

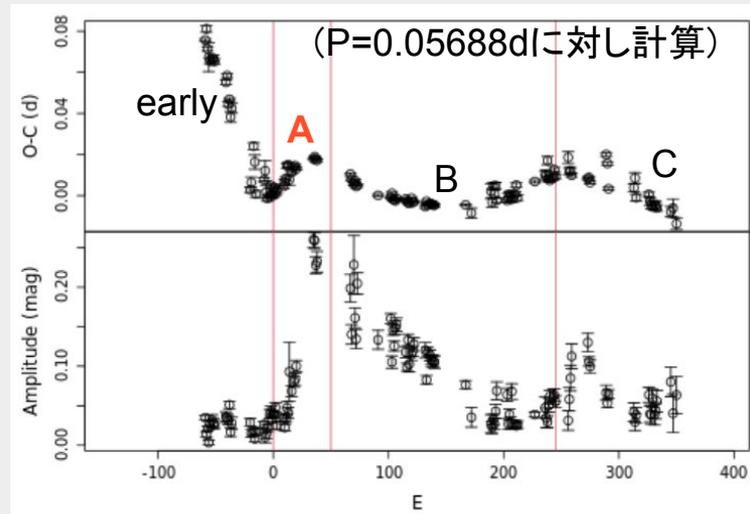
AM CVn progenitorとOV Boo like
どちらでLL Andは説明されるか？

⇒ 2021年のsuperoutburstの測光・分光
MESAによる進化の再現

photometry



SO shapeは2004年のものと大凡合致

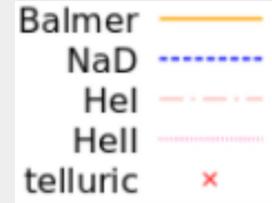
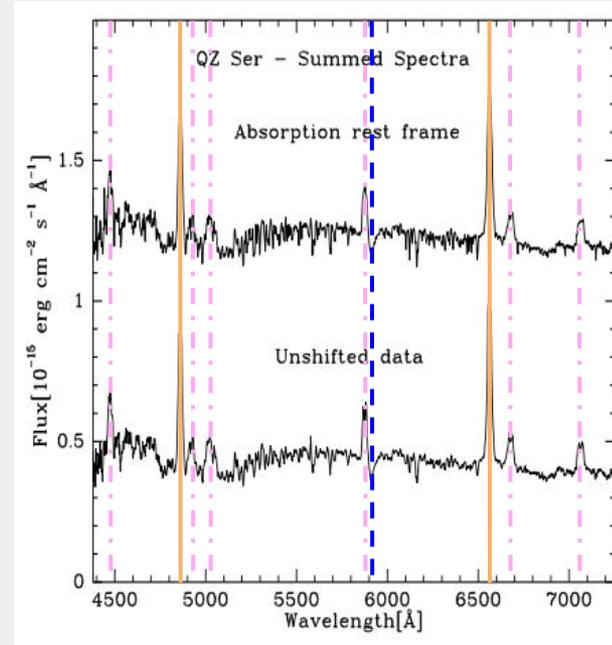
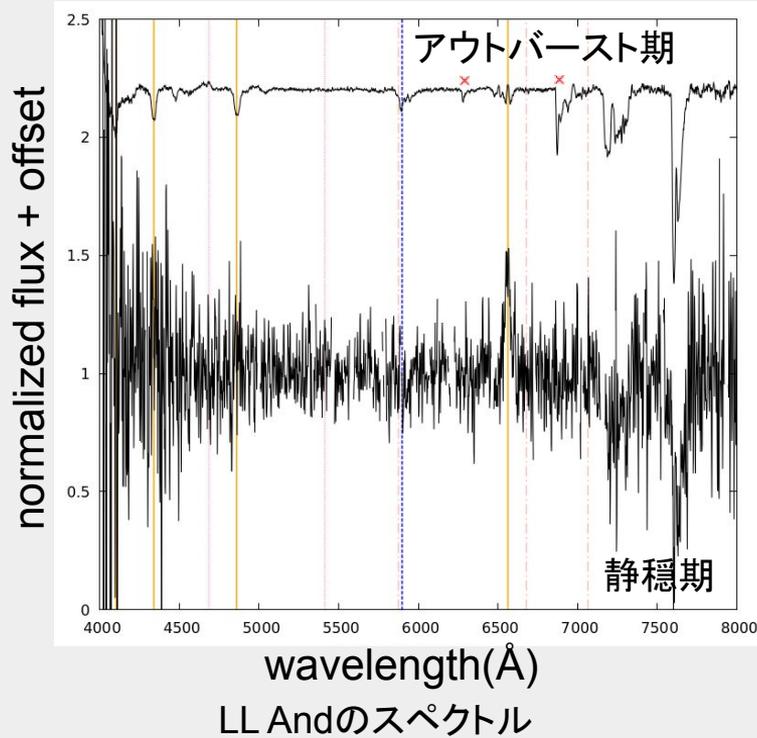


outburstを通じたsuperhumpの周期変化
.....O-C diagramで書ける

superhump初期 (stage A) の周期から
質量比 q を導出(Kato & Osaki 2013; Kato 2022)

$$\Rightarrow \underline{q = 0.111(3)}$$

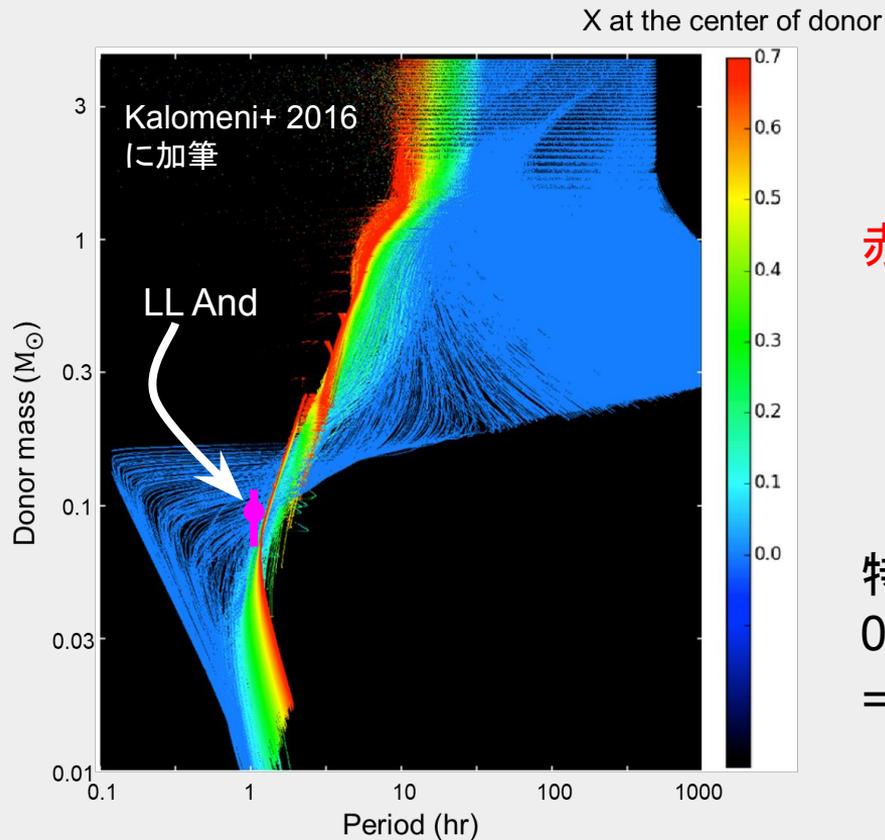
spectroscopy



AM CVn progenitorのQZ Serの
静穏期スペクトル Thorstensen+ 2002

⇒ LL AndはHに対しHeが弱く、Hの枯渇があまり進んでいない?

Porb vs. mass ratio



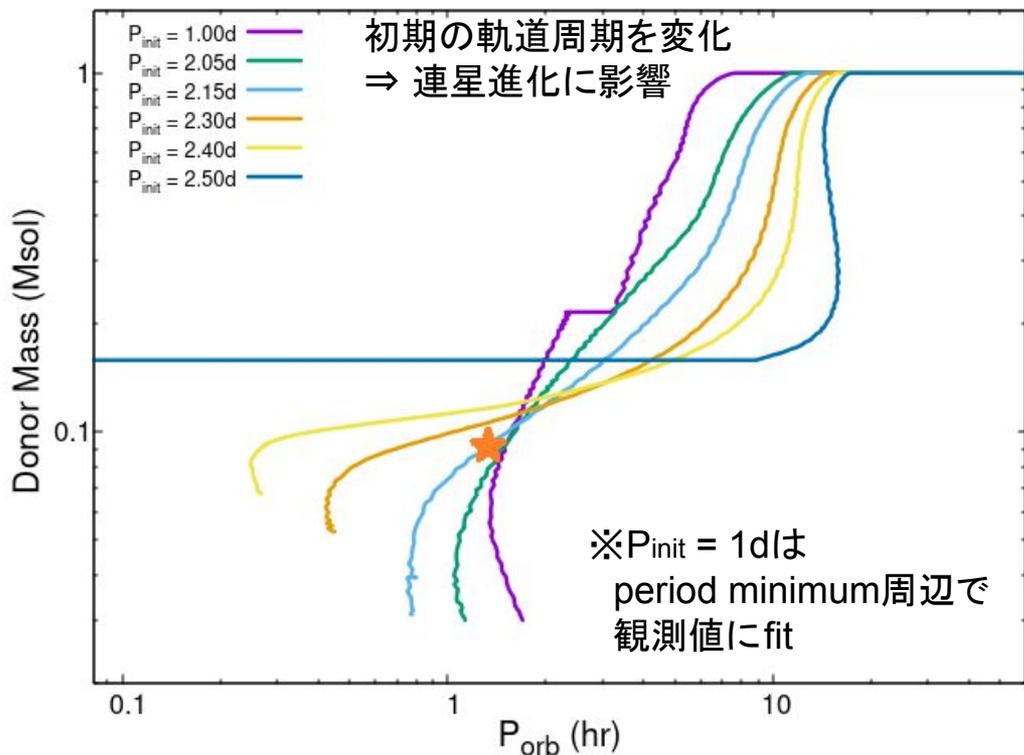
赤の領域: H欠乏のない標準進化に相当

- $q = 0.111(3)$
- 一般に激変星で $\langle M_{\text{WD}} \rangle = 0.81^{+0.16}_{-0.20} M_{\odot}$ (Pala+ 2021)

特にperiod gap以下の激変星で M_{WD} が $0.5 M_{\text{sol}}$ 以下 ($\sim 1.5\sigma$ 以下) は考えにくい (Kato 2022)

⇒ **標準進化を外れる可能性を強く支持**

evolved donor in LL And?

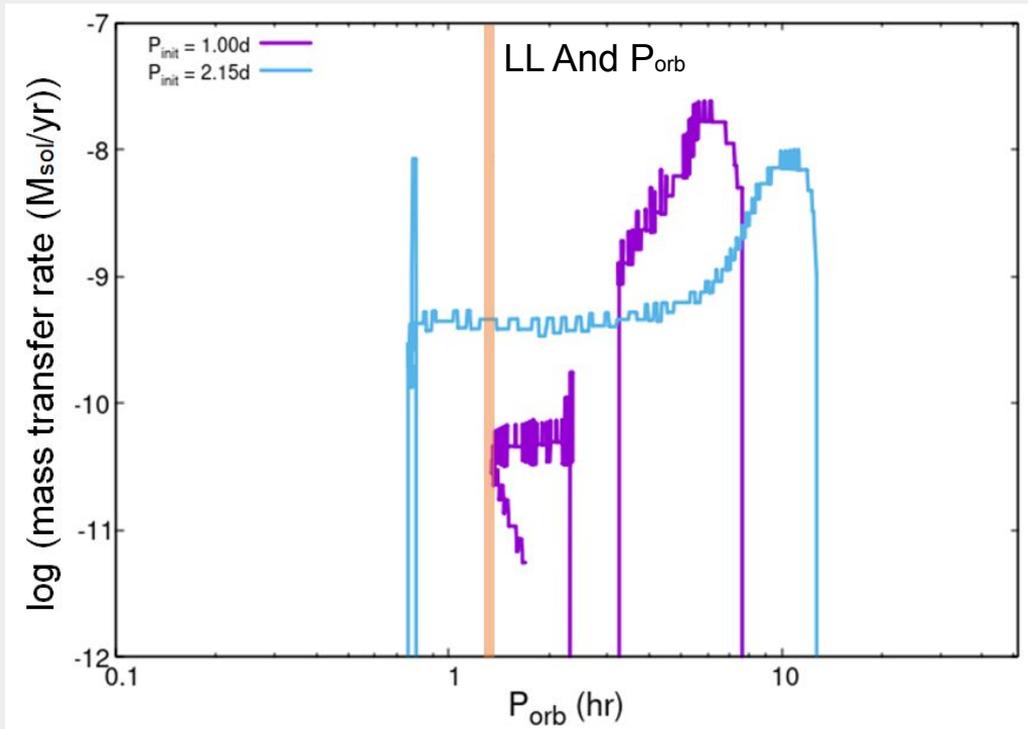


LL Andが進化した伴星を持つと仮定
MESAにより連星進化を再現

★: LL And

→ $P_{\text{init}} \sim 2.15\text{d}$ で(P_{orb} , M_{donor})を
よく説明

evolved donor in LL And?



- LL And程度の軌道周期では、進化した伴星を持つpathだと標準進化の10倍の \dot{M}_{trans}
 - ⇔ LL Andのoutburst intervalが軌道周期の近いCVと同程度
 - He lineがBalmerに対し弱い
- ⇒ evolved donorは考えにくい

metallicityがLL Andに与える影響

LL Andのmetallicityは太陽の半分程度である可能性 (Howell+ 2002)

- ⇒ 質量が $q < M_{WD}$ で、
- 1) $Z=0.014$ (~ solar metallicity)
 - 2) $Z=0.007$ (~ LL And metallicity) の単独星の密度は？

MESA simulation: $Z=0.007$ の場合は、 $Z=0.014$ の場合の1.09倍の平均密度

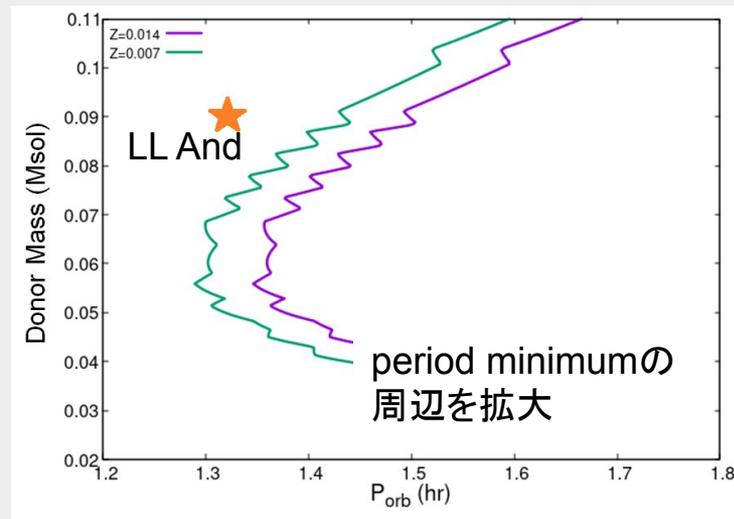
Faulkner+ (1972): $P_{orb} \sqrt{\langle \rho \rangle}$ が一定

- ⇒ $Z=0.007$ の場合のperiod minimumは
80minから~ 77minに

observed LL Andに近付くが、少しズレ

- 1) Z がもう少し小さい
- 2) WD massがもう少し小さい

ことで説明できる可能性



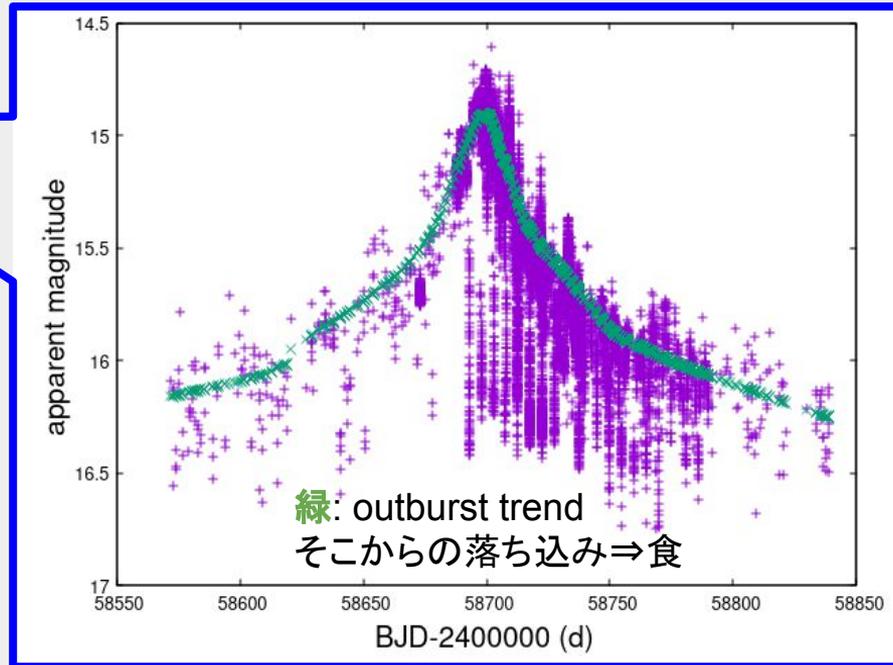
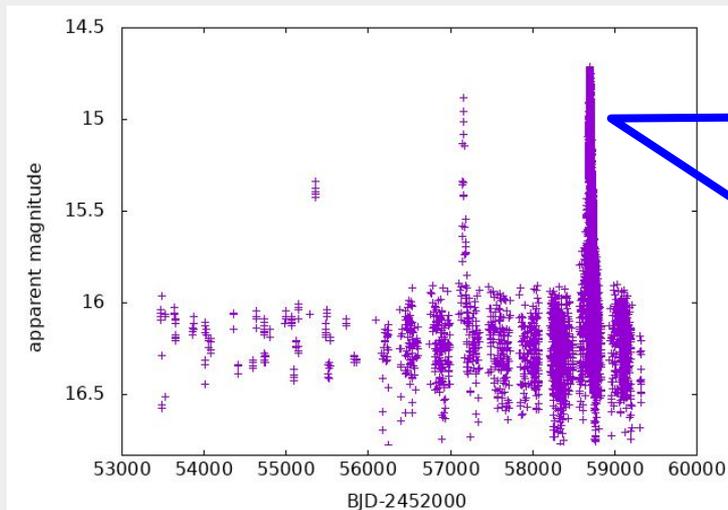
本日の流れ

1. Introduction of CV evolution
2. LL Andromedae
3. ASASSN-19rx & other long Porb CV
(preliminary)

ASASSN-19rx

~10hr以上のCVは標準進化では説明できない

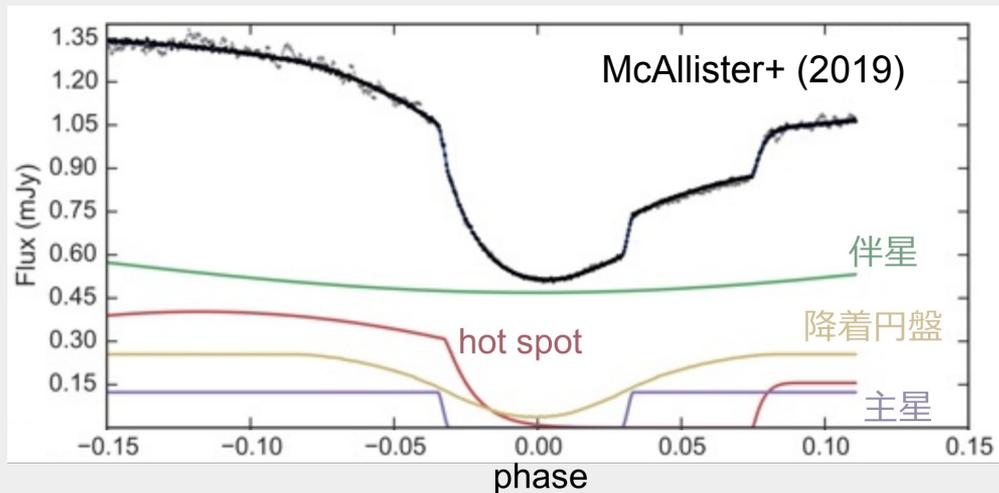
⇔ ASASSN-19rx: $P_{orb} \sim 2.47d$ 、outburst intervalが約4~5年の長軌道周期CV



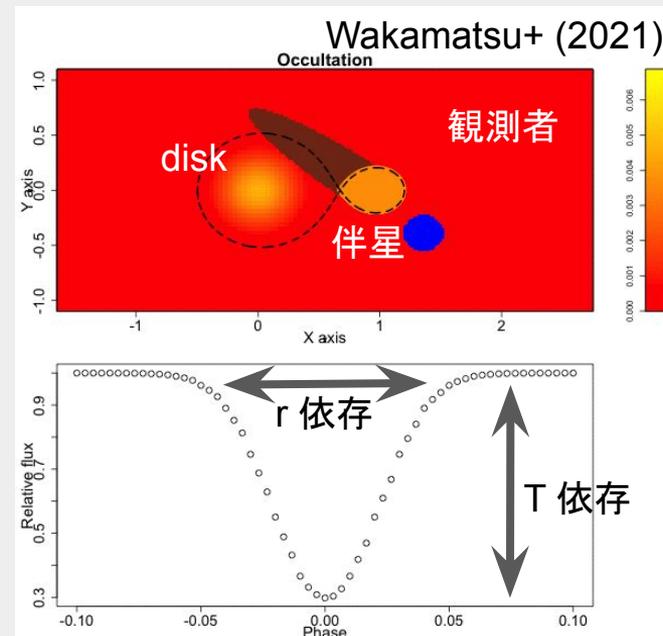
伴星が降着円盤の大部分を隠す(食)

.....eclipse modelingが容易
進化の状態をよく推定できる

eclipse modeling



一般に激変星では
主星・伴星・降着円盤・hot spotが
明るさに寄与



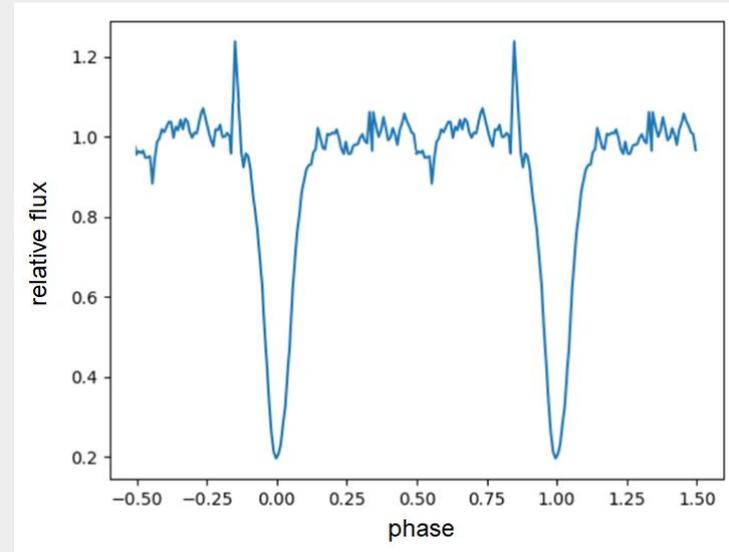
食の形状から連星や降着円盤の
parameterが推定可能

eclipse modeling of ASASSN-19rx

ASASSN-19rxのoutburstの最も明るい部分で簡易的なeclipse modelingを実行

- outburst中のflux (連星 + hot disk) から静穏期のflux (連星 + cool disk)を引き、食外を1とした相対値で、hot diskの食を与える
- diskの各部分からのfluxはpower lawに従い、その指数は -0.6 つまり、 $f(r) \propto \left(\frac{r}{r_{\text{edge}}}\right)^{-0.6}$

(q , i , r_{edge}) の3parameterを
MCMC (マルコフ連鎖モンテカルロ法) で推定



conclusion

LL And

- 連続測光より高精度でmass ratioを推定
先行研究の通り、実際に重い伴星を持つ可能性が高い
- outburst intervalを考えると進化した伴星は考えにくい
metal-poorな伴星を持つ可能性が高い

ASASSN-19rx

- mass ratio等の推定を行い、進化の状態を特定したい
現在eclipse modelingを実行中