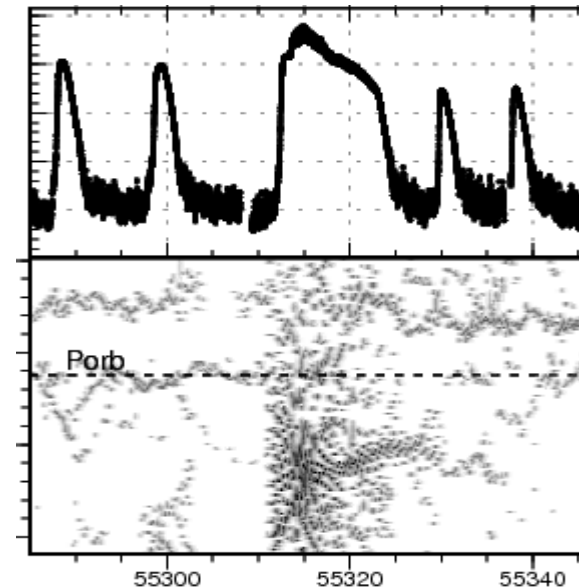
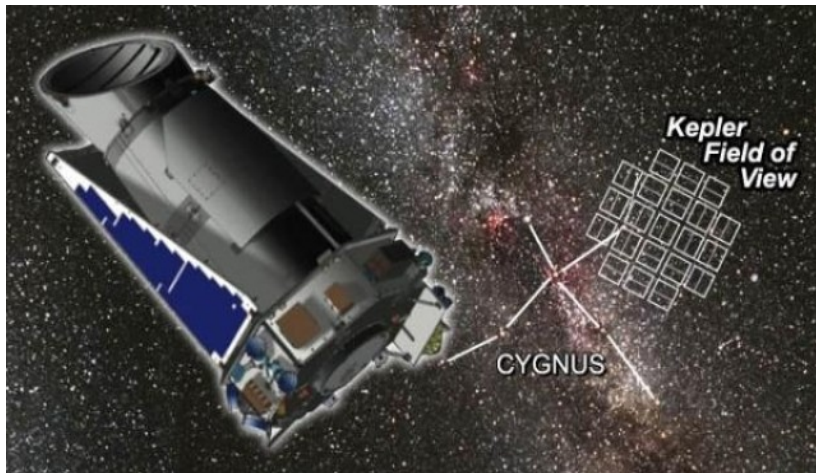
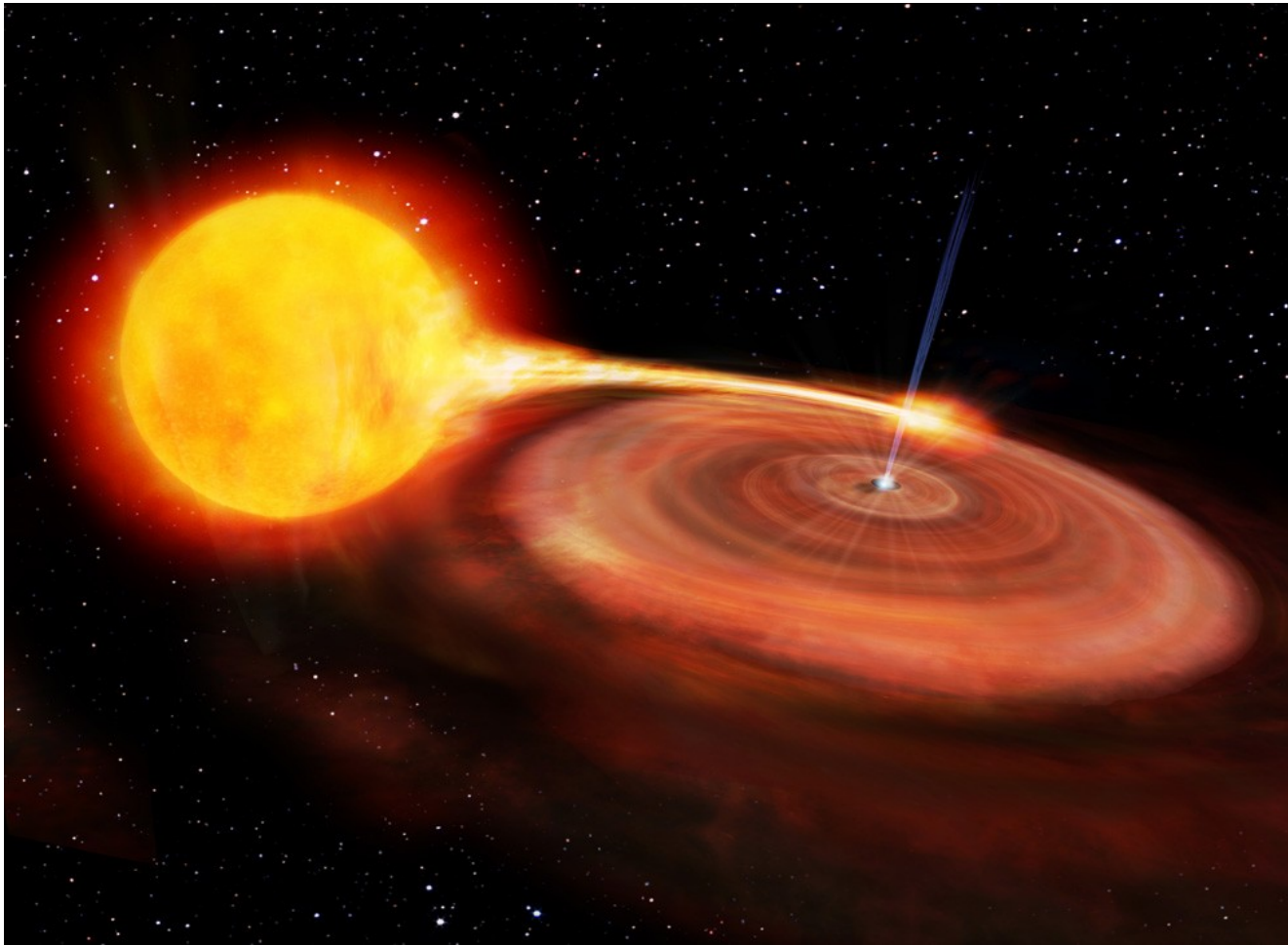


激変星降着円盤における スーパーハンプ現象



加藤太一 Taichi Kato
Dept. of Astron., Kyoto Univ.

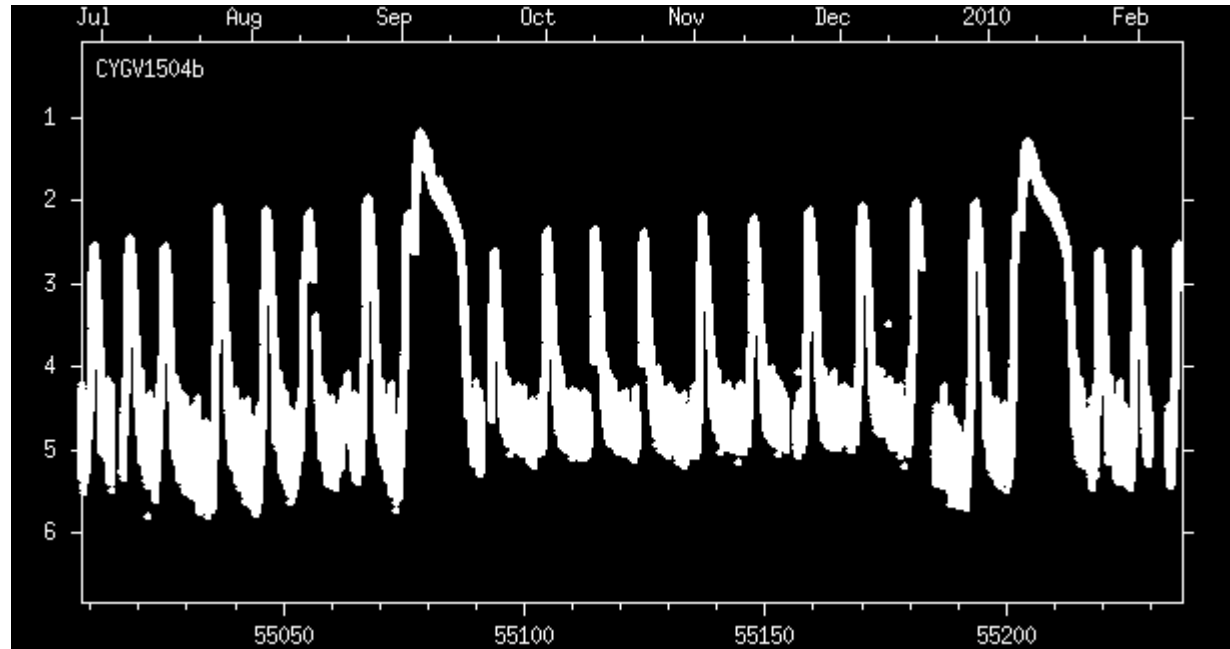
激変星とは



(c) NAO

白色矮星と（多くは）晩期型主系列星の連星系
白色矮星の周囲に降着円盤ができる

アウトバーストなどの 激しい爆発現象を示すものがある



(V1504 Cyg Kepler data)

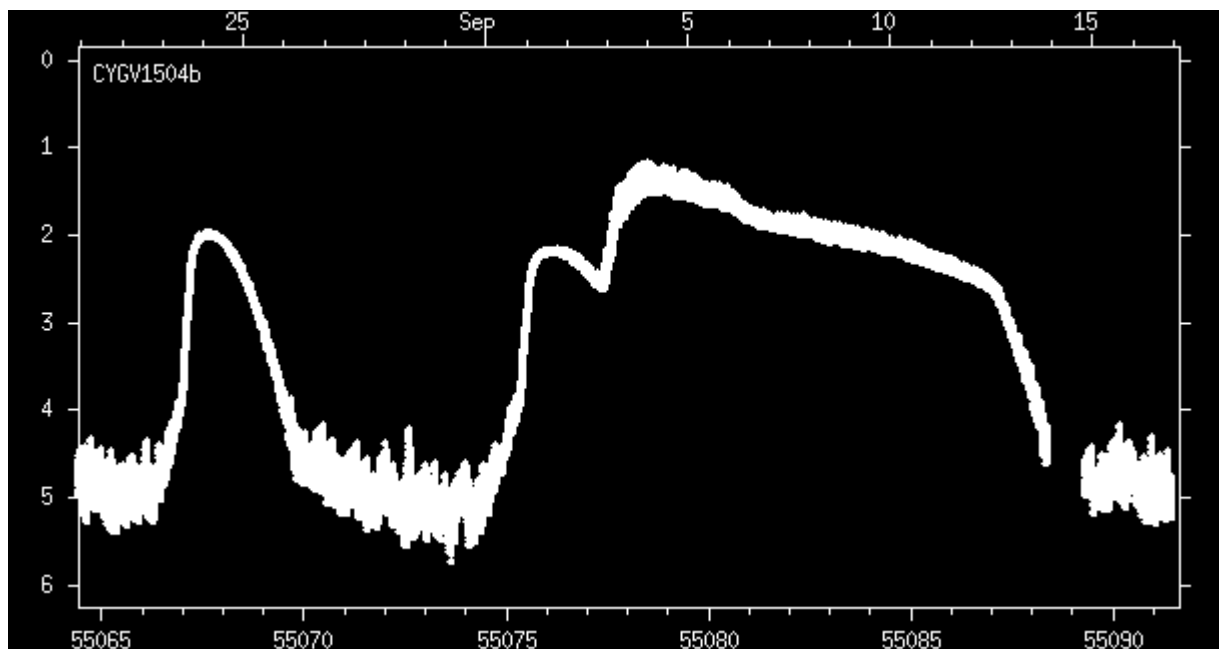
これは降着円盤の活動現象
アウトバースト：熱不安定性
スーパーアウトバースト：潮汐不安定性

近年の激変星（矮新星）理解の進歩

2009 年ごろより急激に理解が進歩した

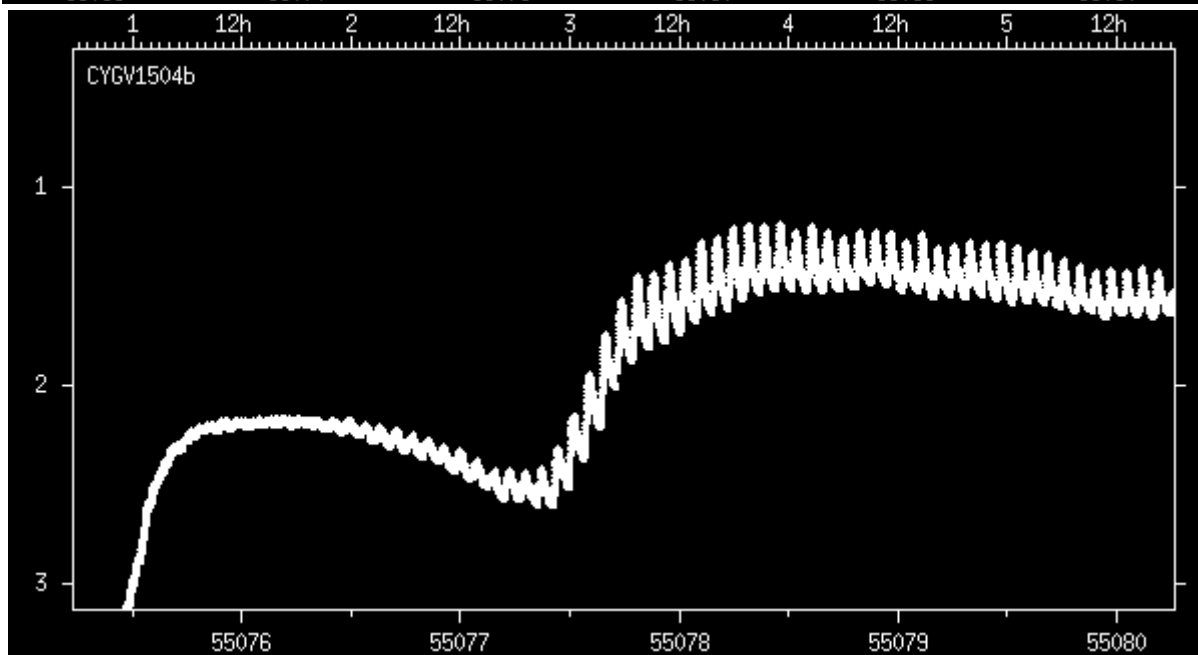
- Kepler 衛星のデータによるこれまでにない高精度の連続データ
- 地上サーベイ（超新星など）副産物として多数の矮新星が見つかる
- 新しい解析手法（圧縮センシング）の発達

スーパーアウトバーストとスーパーハンプ



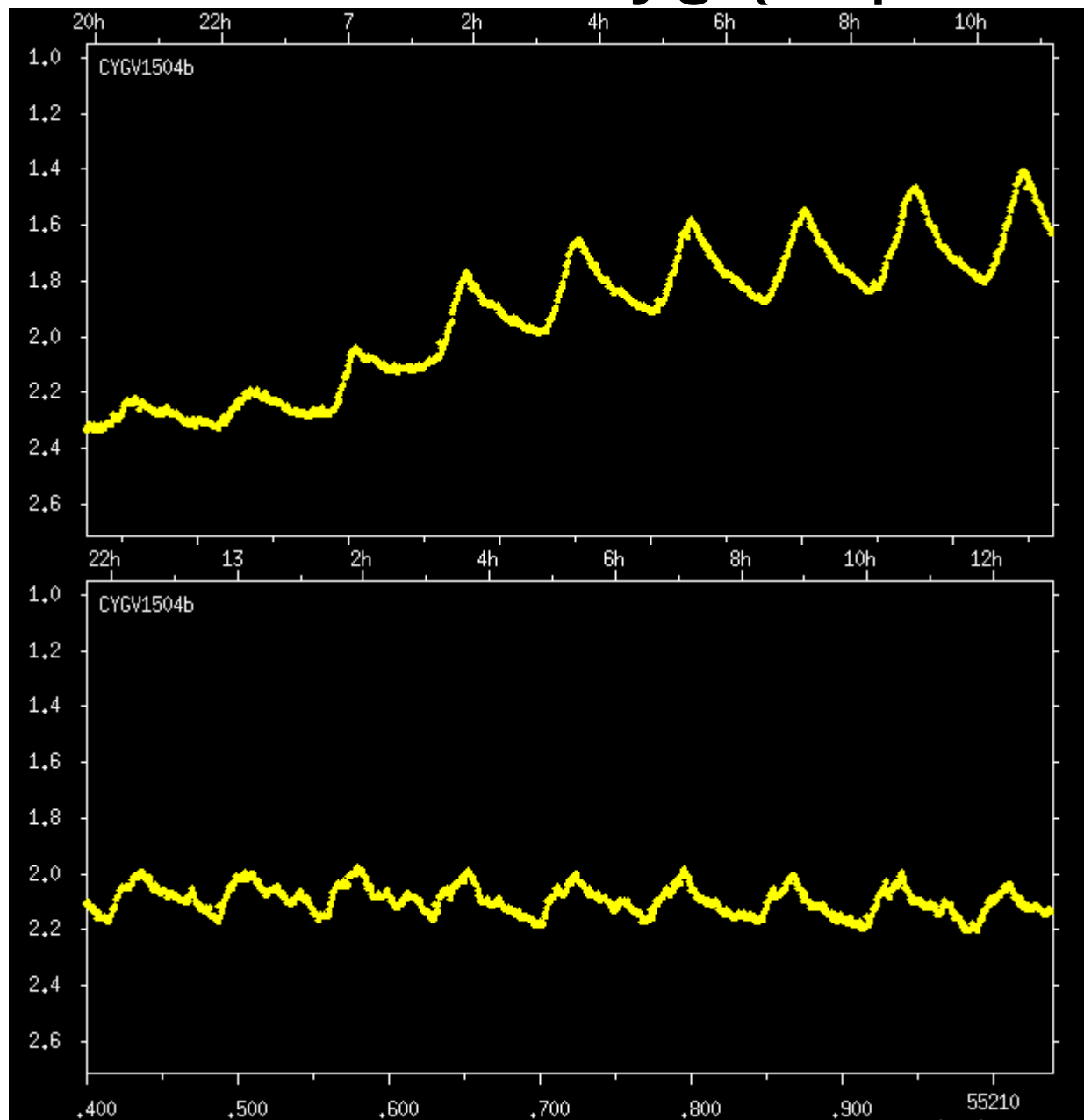
SU UMa 型矮新星
にみられる

スーパーアウトバーストの期間に
スーパーハンプ
現象が見られる
(軌道周期より
数%長い)



現代的なスーパーハンプの例

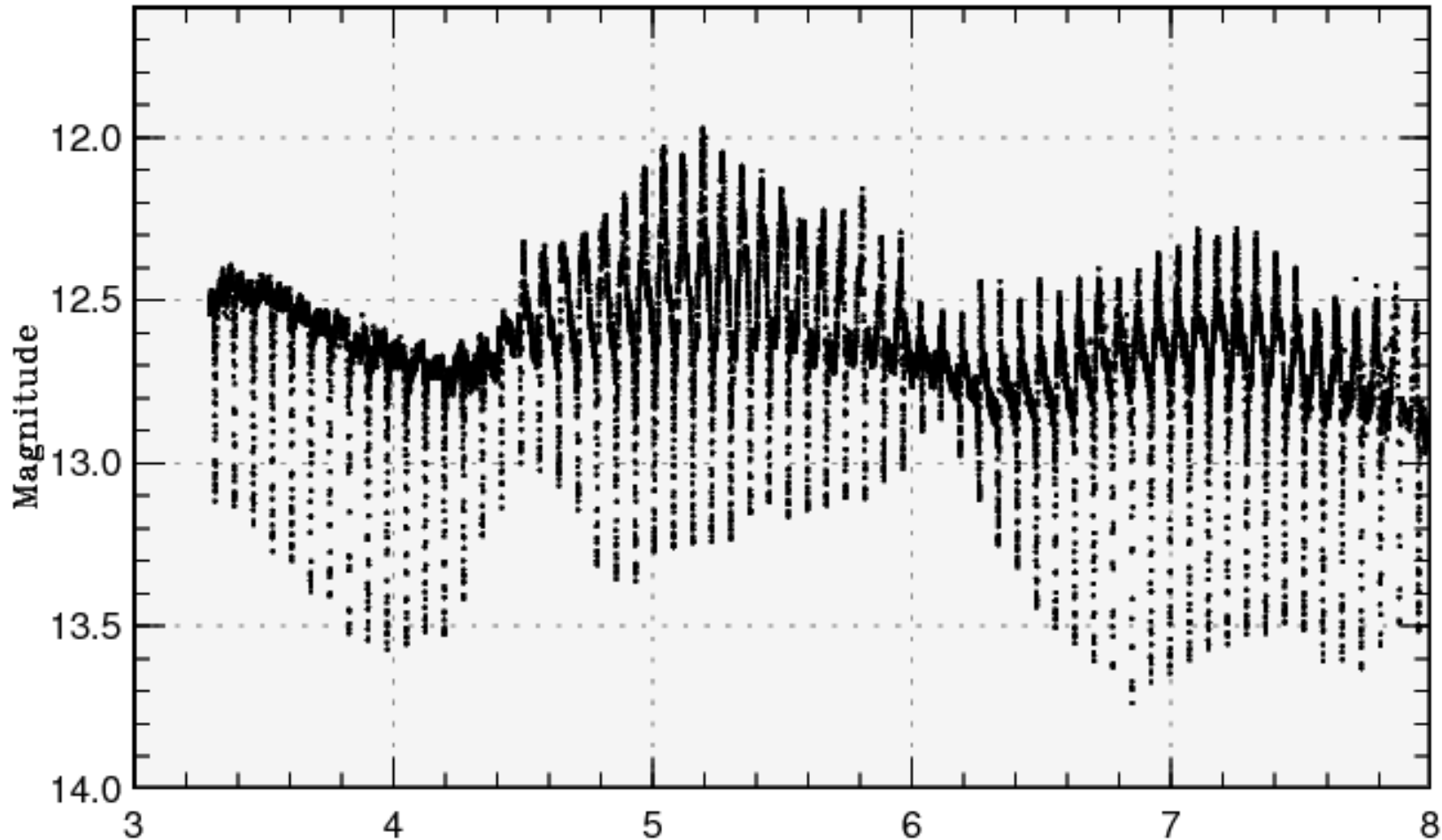
V1504 Cyg (Kepler data)



成長期から
最大光度

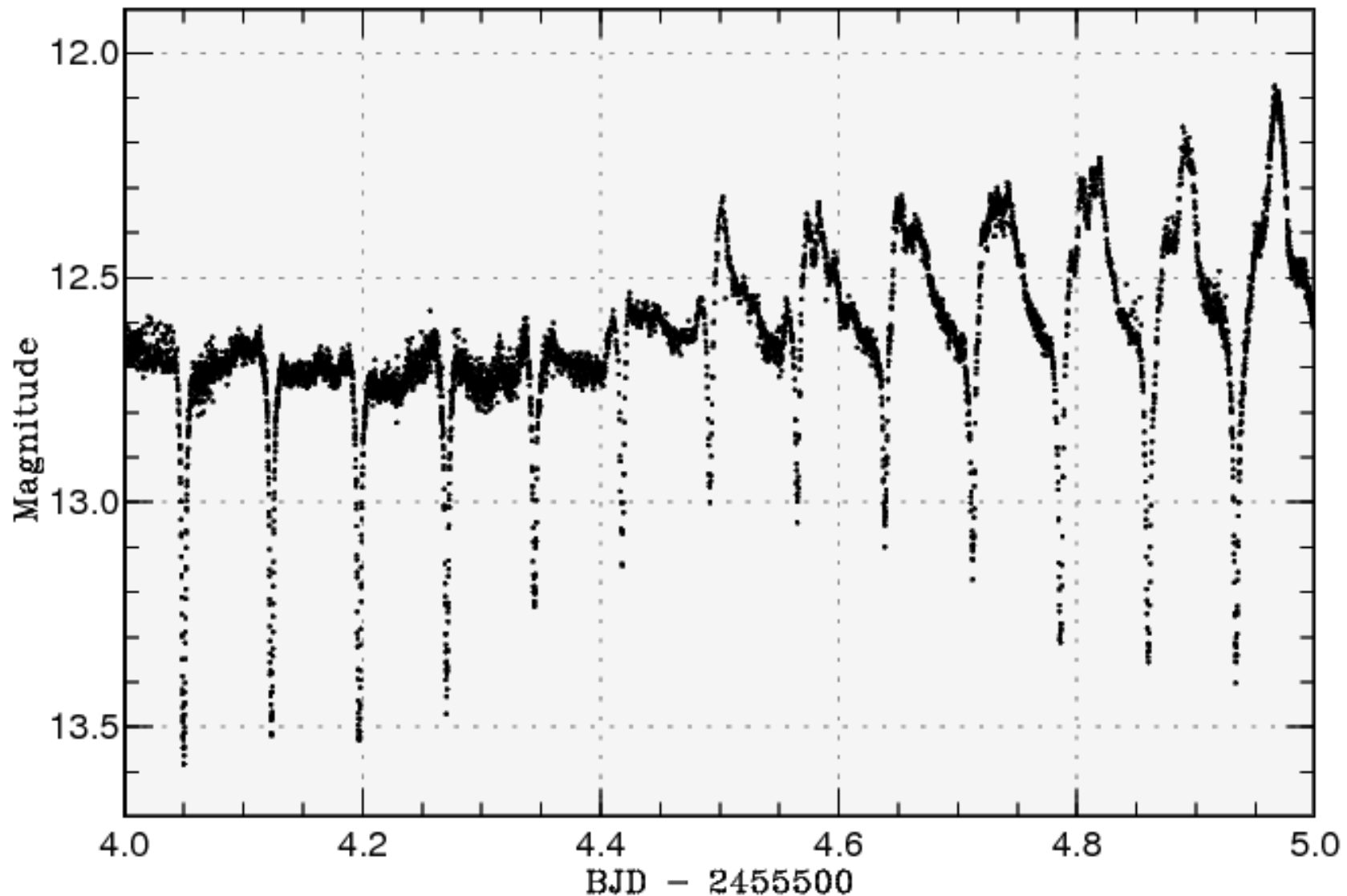
減衰中

しかし地上観測も負けていない

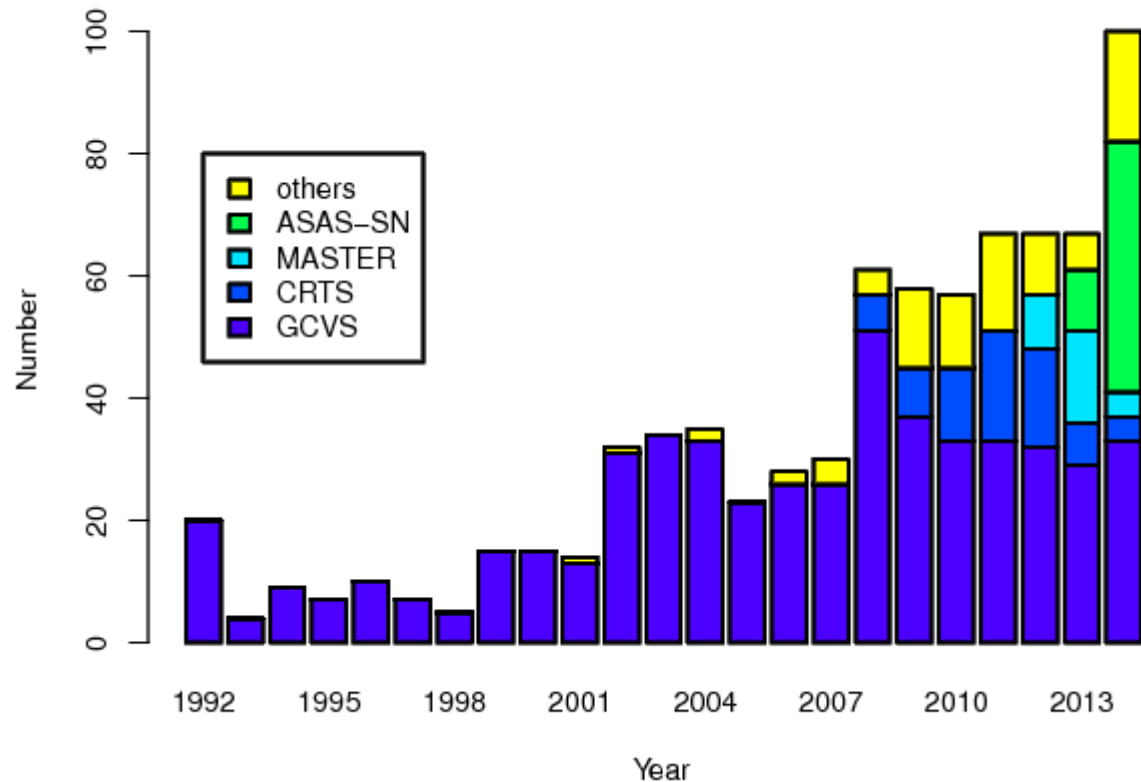


VSNET Collaboration による HT Cas の観測
(2010)

HT Cas (2010): Kepler より高い時間分解能

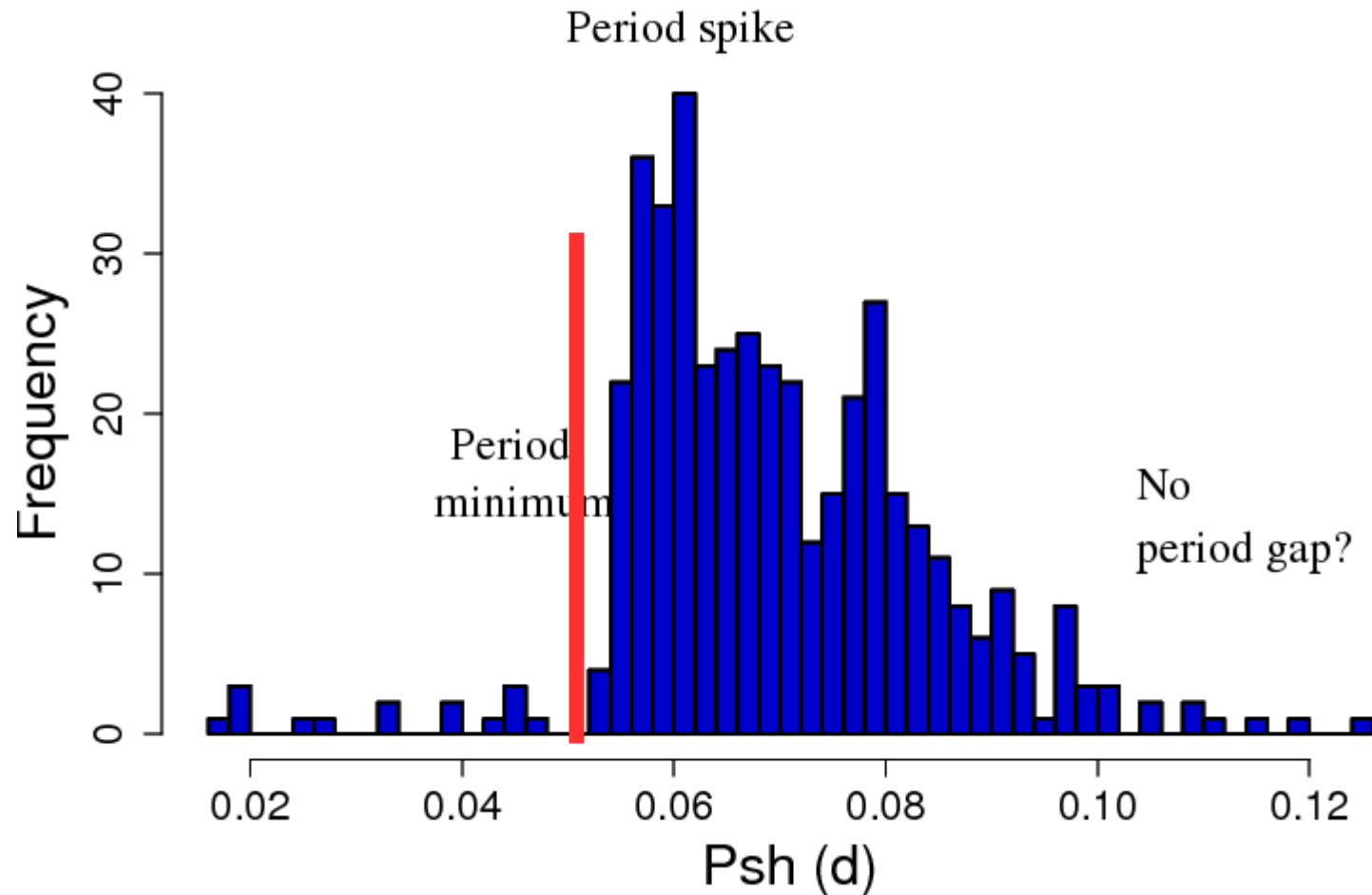


近年の矮新星発見がいかによい



Pdot 論文 (2009-) で扱われた SU UMa 型矮新星
のスーパーアウトバースト数分布

激変星の進化理論へのインパクト



これまでのあらゆる研究を凌駕する統計

激変星における変動現象

(降着円盤の活動現象)

- 矮新星アウトバースト、スーパーアウトバースト
- (通常の) スーパーハンプ (SU UMa 型 , 3:1 共鳴)
- quasi-periodic oscillations (QPOs)
- flickering

そして近年 (1990 年代 -)

- early superhumps (WZ Sge 型 , 2:1 共鳴 ?)
- negative superhumps (tilted disk?)

QPO — X 線連星と共通の性質？

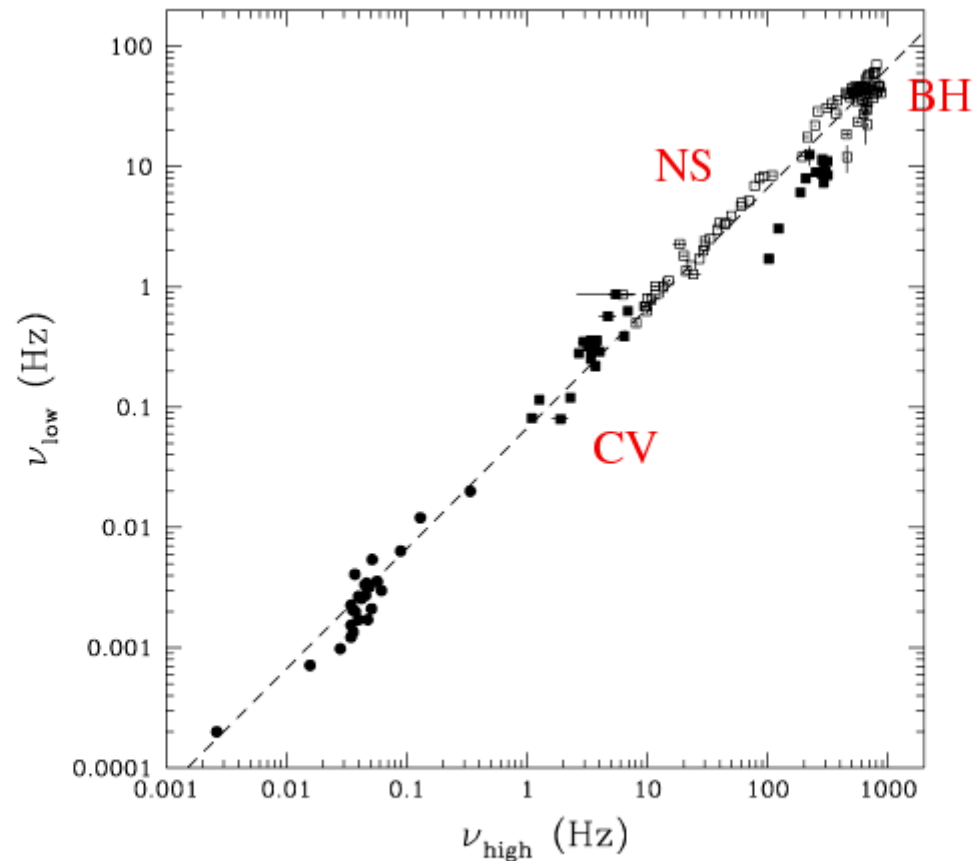
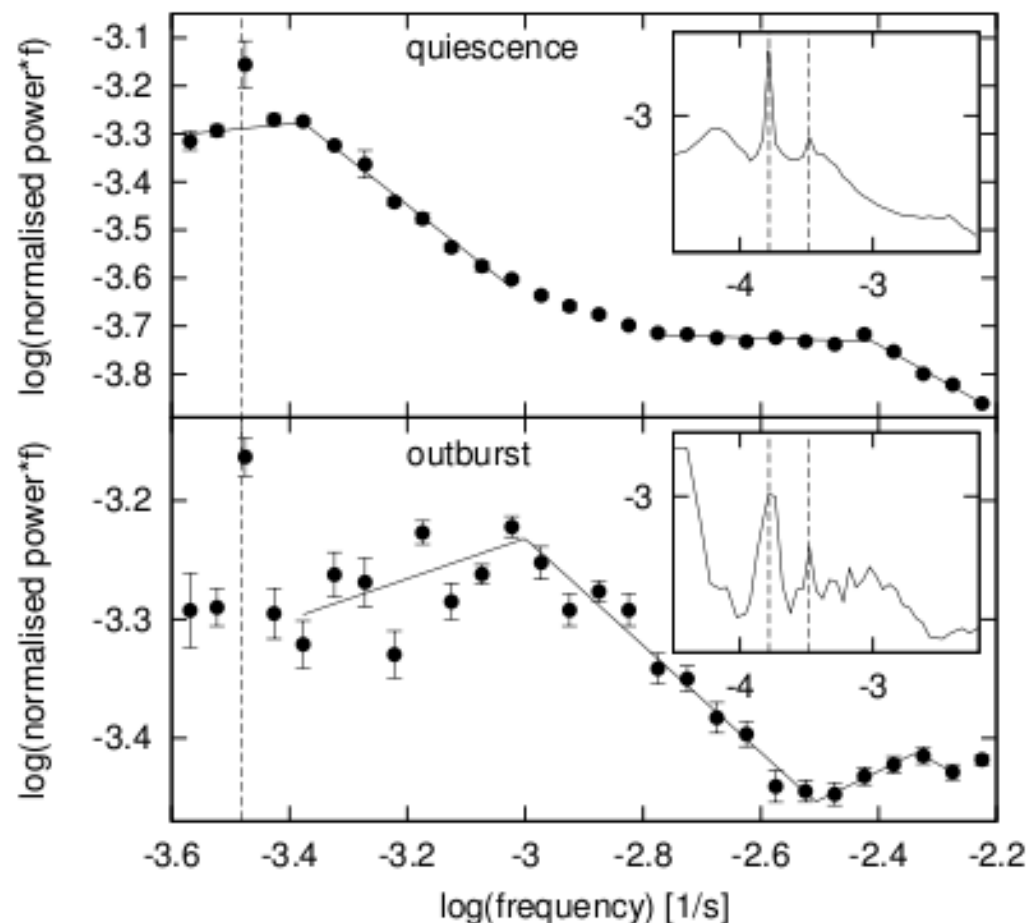


Figure 30. The two-QPO diagram for X-ray binaries (filled squares: black hole binaries; open squares: neutron star binaries) and 26 CVs (filled circles). Each CV is only plotted once in this diagram. The X-ray binary data are from Belloni et al. (2002) and were kindly provided by T. Belloni. The dashed line marks $P_{\text{QPO}} / P_{\text{DNO}} = 15$.

Warner (2003): dwarf nova oscillations (DNOs)
と QPOs が X 線連星と同じ関係に乗る

Flickering 解析にも Kepler data が使われる



Broken power law
従来よりも複雑な
構造

アウトバーストすると
break 位置が変化する

物理猫像はまだ ...

Figure 2. Left column: mean PDS of quiescent and outburst data. Solid lines are the broken power law fits. The dashed lines shows the orbital frequency $f = 10^{-3.78}$ Hz (1.67 h) with its first harmonic $f = 10^{-3.48}$ Hz (0.84 h). The insets show low resolution mean PDSs with larger x-axis range. Right column: Rms-flux relations calculated from both quiescent and outburst data. The dashed lines are linear fits.

(Dobrotka and Ness 2015)

スーパーハンプの成因 - precession する離心円盤

Whitehurst が数値計算により質量比 ($q=M_2/M_1$) の小さい系で円盤が離心変形することを発見 (1988)

円盤内の粒子の軌道離心率が 3:1 共鳴によって増大する (eccentric instability) ことが解析的に示された (Hirose, Osaki 1990)

-- これは particle の扱い。通常天体力学の問題

流体でも解析的に確認された (Lubow 1991)

Wood et al. (2011) の SPH 計算

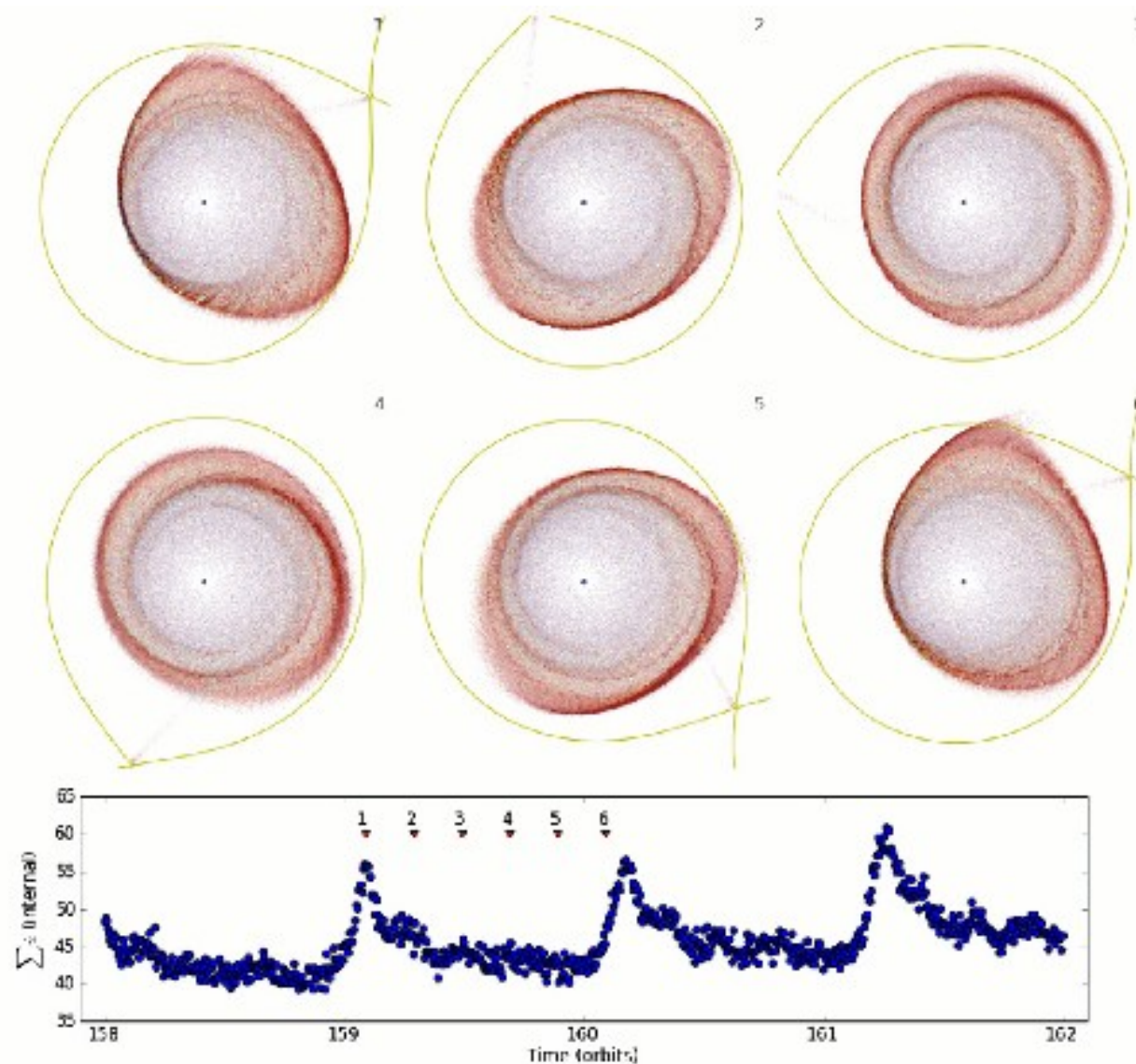


Figure 1. Snapshots from one orbit of a $q = 0.25$ SPH accretion disk simulation shortly after superhump onset. The 100,000 simulation particles are color coded by their internal energy change (“luminosity”) over the previous simulation time step. The simulation light curve shown is calculated as the sum of the luminosities of all the particles. Note that the superhump maximum corresponds to frames 1 and 6, where the disk opposite the secondary is radially compressed and hence a region of strongly convergent flows. Note also that the accretion stream impact region is deeper in the potential well in frame 3 than in frames 1 and 6—this yields the “late” superhump signal.

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

SPH の結果に対する批判も

- (2) Numerical 2D and 3D SPH simulations produce “superhumps” with visual amplitudes which are smaller than $A = 0.10$ mag (from 2D models), or as small as $A = 0.03\text{--}0.04$ mag (from 3D models) (see Smak 2009a and references therein). They are by a factor of 4–10 smaller than $\langle A_n \rangle = 0.34 \pm 0.02$ mag obtained from observations in Section 3.2.

Smak (2009, 2010) (mass-transfer burst 派)

SPH でのスーパーハンプ振幅が小さ過ぎる

(SPH では円盤内側の明るい部分の寄与も扱えないのでそれを考慮するとさらに小さい)

-> Osaki のスーパーハンプモデルは根本的に間違いとの挑戦

伴星からの周期的な質量輸送の変化が原因との独自の説を展開 (Olech などのポーランド学派はこの影響下に ...)

ではなぜ他の流体計算を使わない？

より精度が高いと考えられる差分法ではスーパー
ハンプが再現できなかった（長年の問題）（なお
spiral arm は簡単に出てくる）

なお差分法でも輻射の扱いはやはり問題で、振幅
が再現できるかは別問題

Kley et al. (2008) が初めて成功

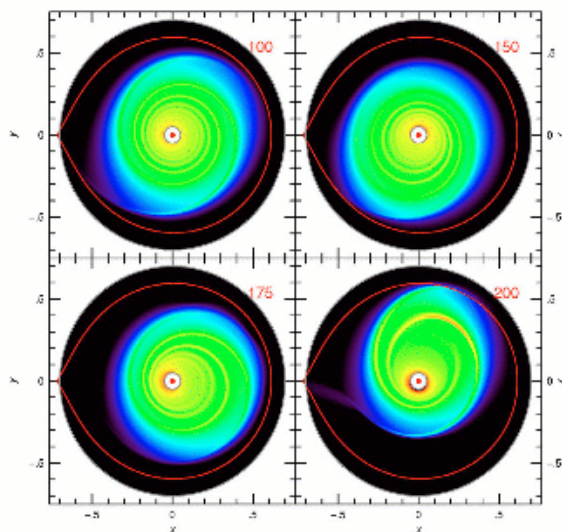


Fig. 3. Greyscale plot of the surface density of the disk for the standard model at 100, 150, 175 and 200 orbital periods. The solid (red) curve indicates the Roche lobe of the primary star (central red dot).

In the subsequent evolution the disk slowly becomes eccentric. This is indicated in Fig. 3 where we display the two-dimensional surface density structure at four different times. The distortion of the disk is evident at later times. While in the first

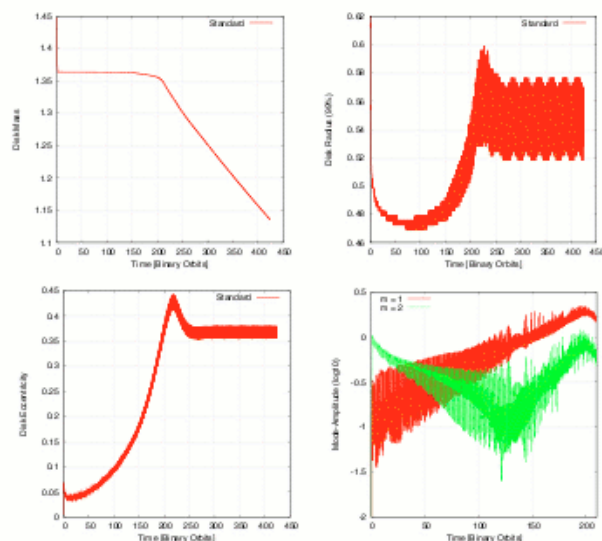
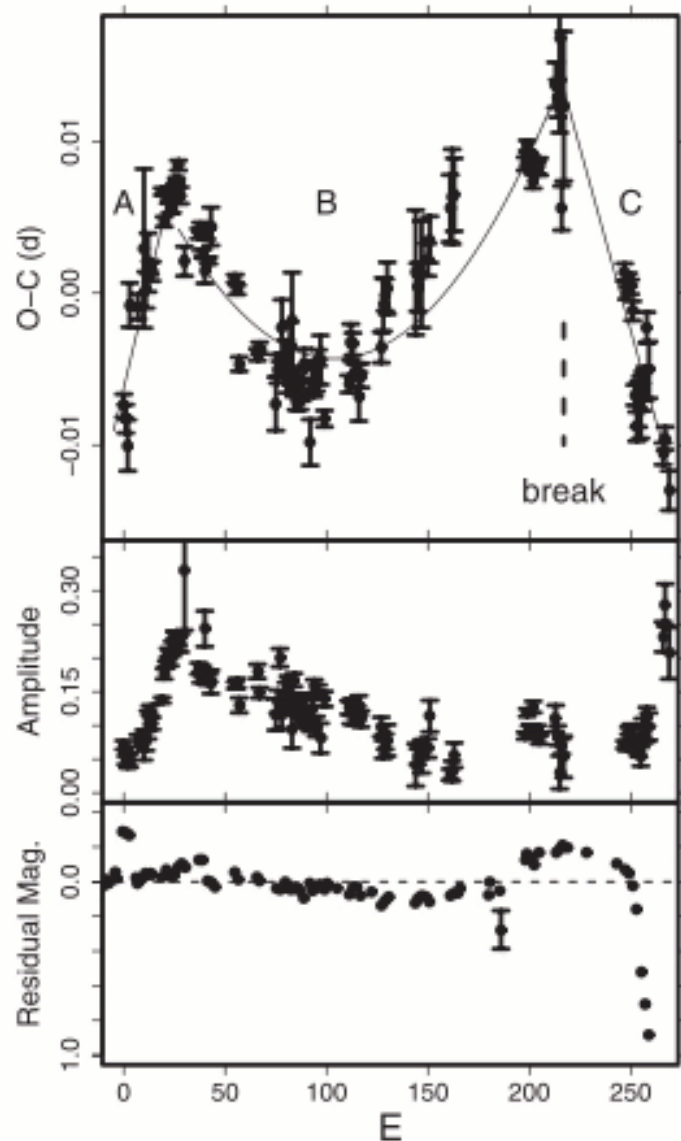


Fig. 5. Evolution of various global disk properties of the standard model as functions of time. The total mass in the computational domain, or equivalently the disk mass, is shown in the upper left panel. The disk radius, defined as the radius containing 99% of the mass, is shown in the upper right panel. The disk eccentricity is shown in the lower left panel and the $m = 1$ and $m = 2$ Fourier amplitudes are shown in the lower right panel.

- ただし 2次元計算 (3次元にすると SPH でも振幅が小さくなる)
- $q=0.3$ でもスーパーハンプ成長、軌道周期より短い周期も出る (圧力効果が効きすぎ?)
- > 整合性が今一つ? その後の計算もない

近年のスーパーハンプ現象の理解の進展

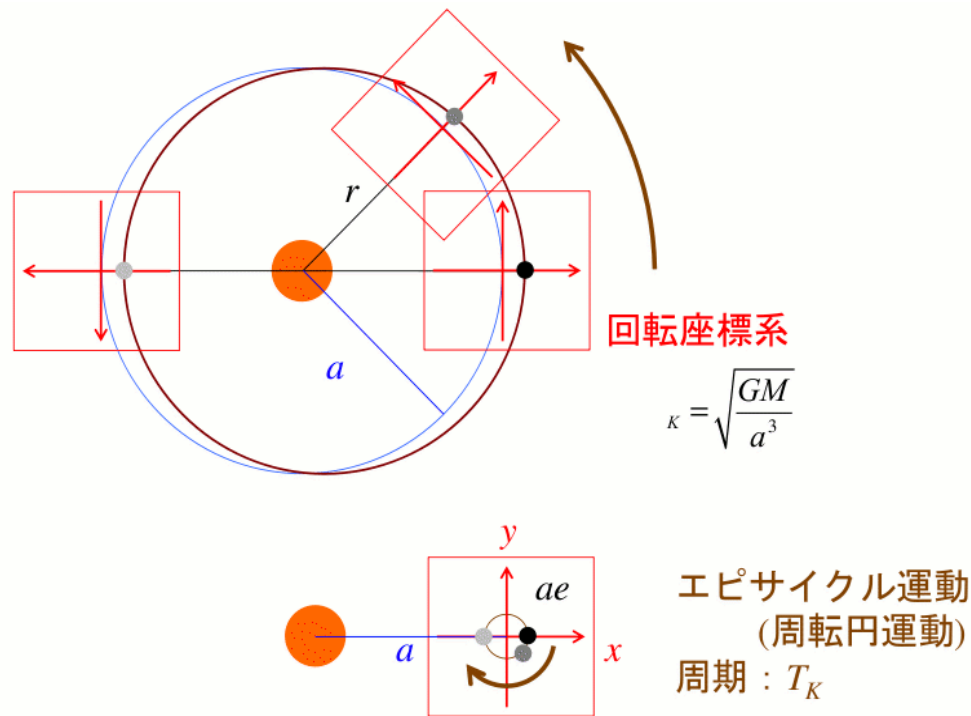


Kato et al. (2009) のサーベイ研究により、ほとんど全ての SU UMa 型矮新星が特有の周期変化パターンを示すことが明らかに

当時は起源不明だったが stage A,B,C と名付けられた

周期変化は precession rate を反映

epicyclic frequency を考えるとわかりやすい



逆 2 乗則からのずれが precession を起こす

2つの要因

* 伴星の重力場

(Osaki 1985)

* 円盤内の圧力勾配

(S.Kato 1983)

one-armed oscillation

中本秦史さんのセミナー
資料より

この2つの効果で stage A-B の変化が理解される (Osaki and Kato)

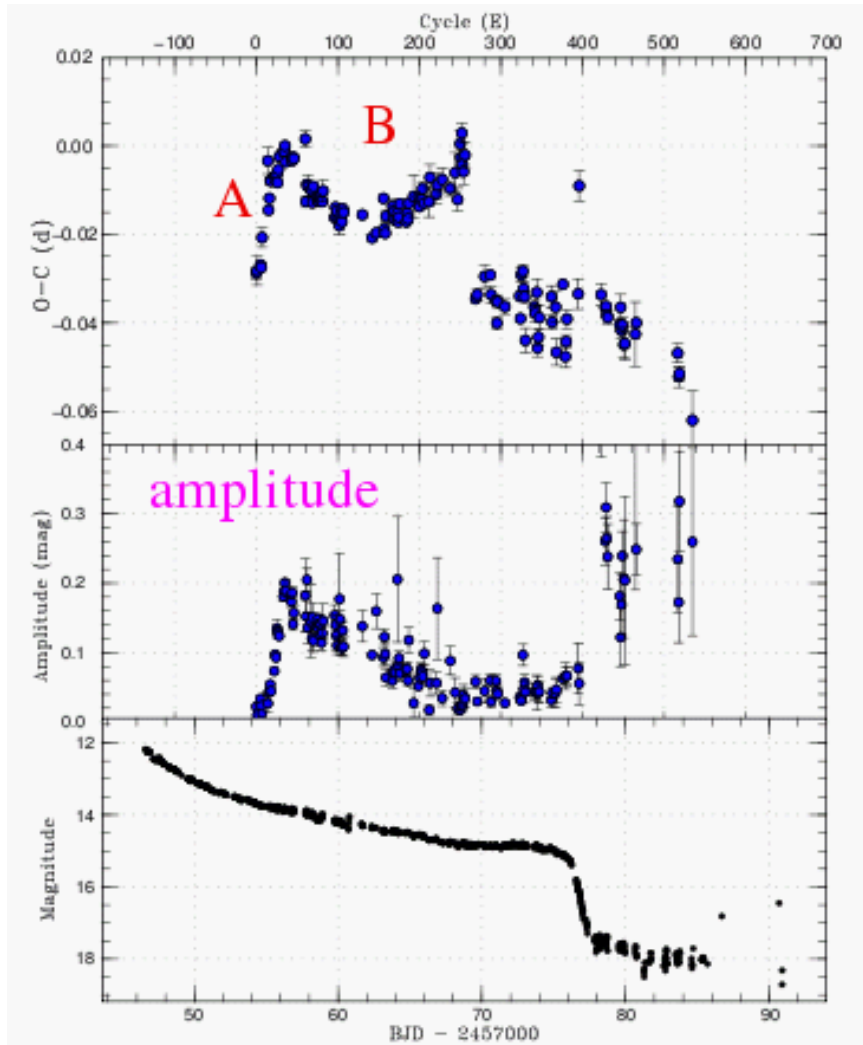
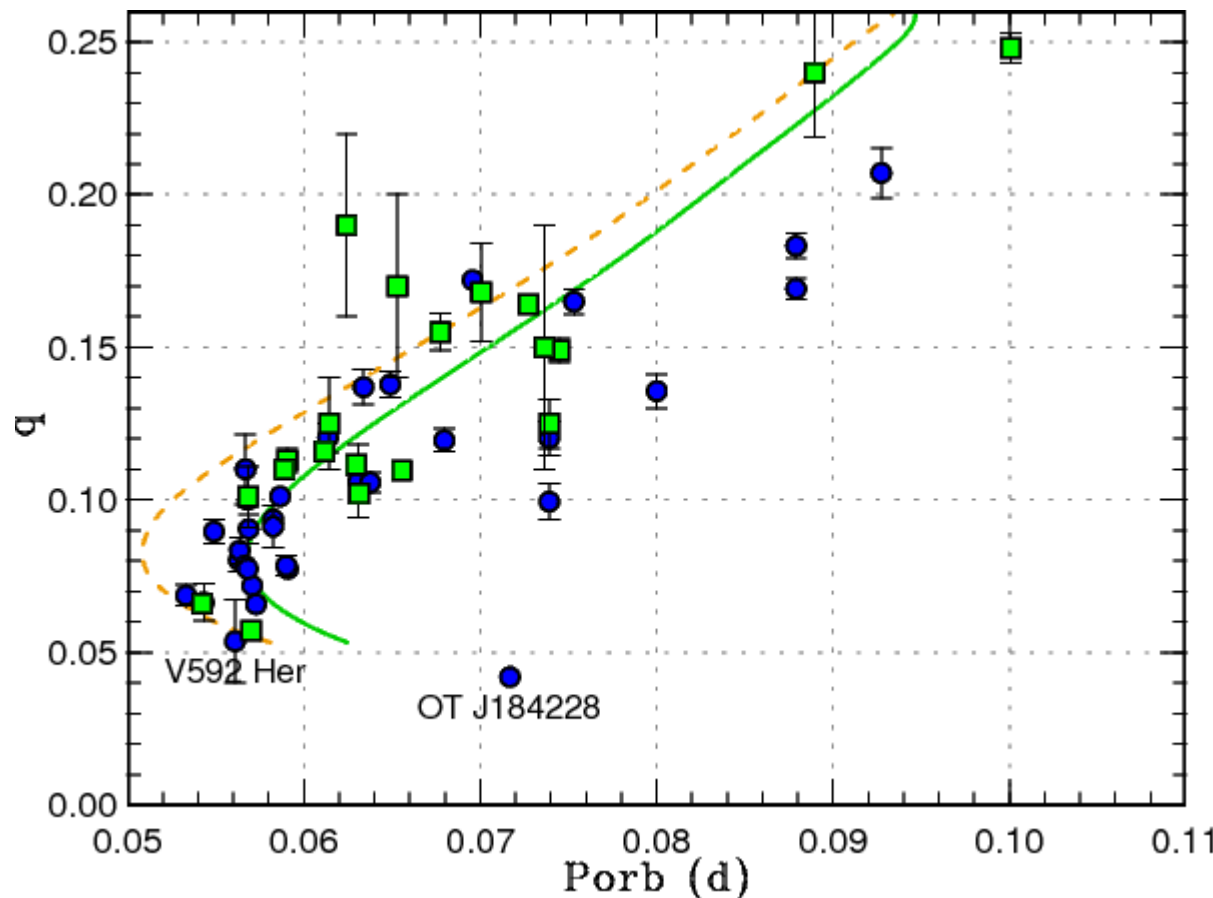


Fig. 95. $O - C$ diagram of superhumps in ASASSN-15bp (2015). (Upper:) $O - C$ diagram. We used a period of

Stage A はスーパーハンプ
成長期：離心変形は 3:1 共鳴
付近にとどまり、円盤他の部分
からの圧力効果が無視できる
3:1 共鳴半径における解析的な
precession rate と見事に一致

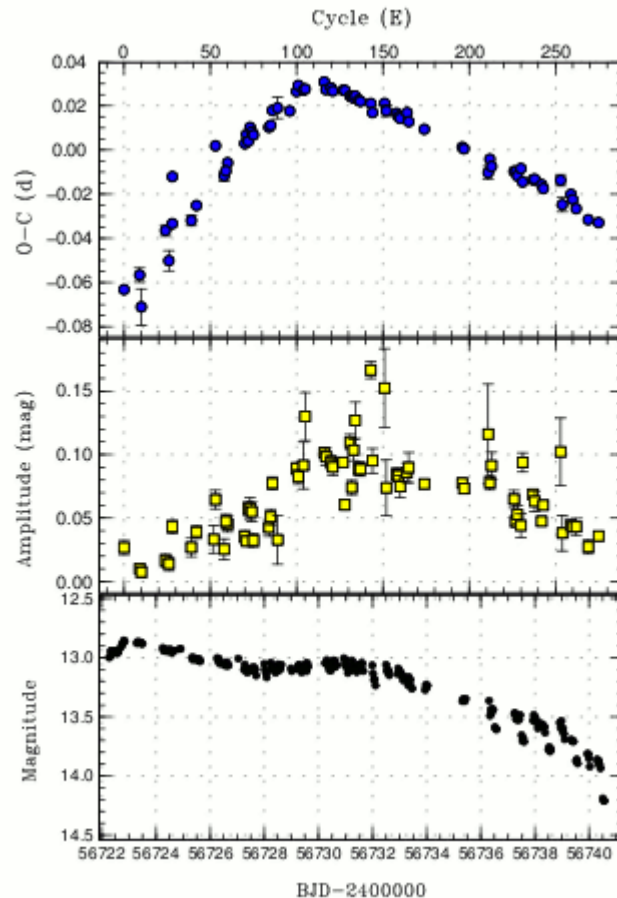
Stage B になると変形が円盤
全体に広がり圧力効果で
precession rate が下がる

この発見により、 stage A superhump
と軌道周期がわかれば
質量比が解析的に求められる！
-> 激変星進化の理解に革命的進歩？



(Kato and Osaki
2013)

極端に stage A の長い天体がみつかる — period bouncer か



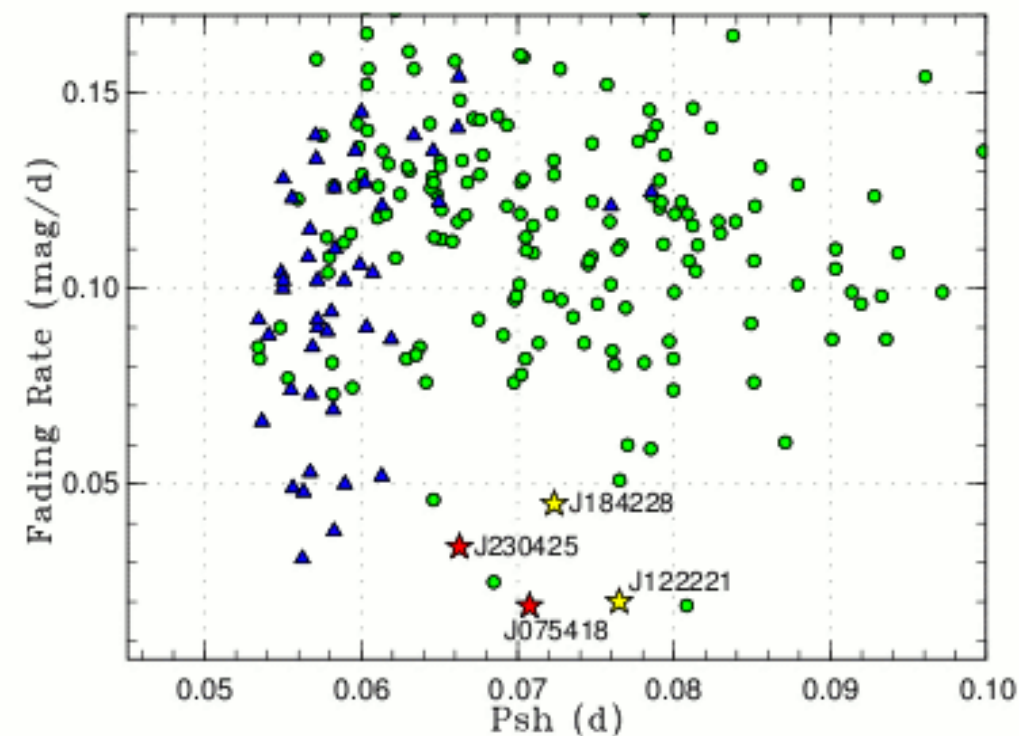
スーパーハンプの成長
時間 – 3:1 共鳴の成長
のタイムスケール

これは $1/q^2$ に比例

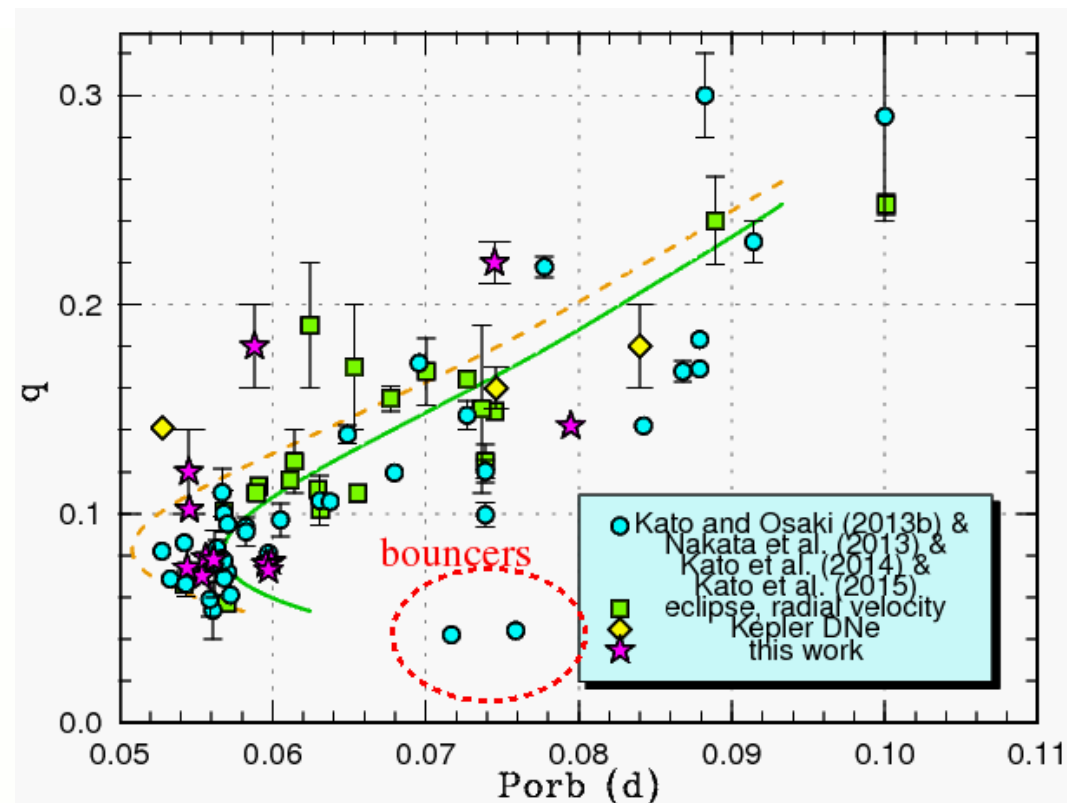
アウトバースト減光も
非常にゆっくり

(Nakata M. thesis)

これまでわからなかった激変星進化 の最終段階が見えてきた



(Nakata M. thesis)



(Kato et al. 2015)

もう一つの大きな進展— negative superhump の発見

- 現象は比較的古くから知られていた
- Harvey et al. (1995) が矮新星 V503 Cyg に検出

disk tilt の結果ではないかと示唆

- Patterson et al. (1997) が新星 V603 Aql で
positive – negative SH に相関があることを発見

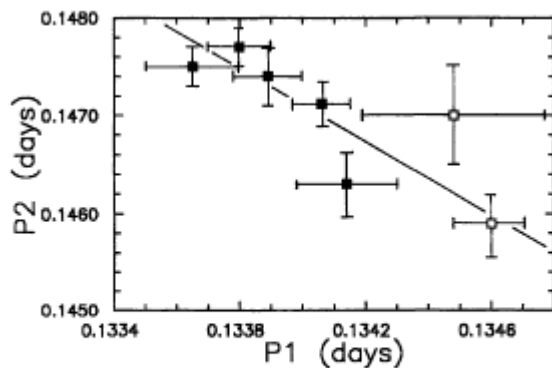


FIG. 8—Correlation of positive superhump period P_2 with negative superhump period P_1 . Open squares indicate points of lower weight. The straight line corresponds to $dP_2/dP_1 = -1.9 \pm 0.4$.

positive の precession rate
は negative のだいたい 2 倍
tilt だと考えると天体力学的
に説明できそう？

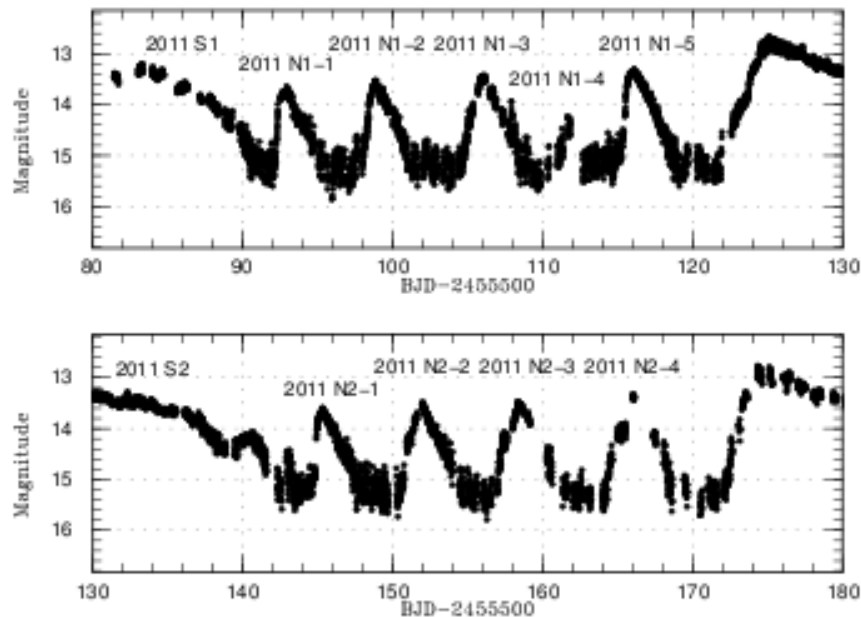
Tilted disk の問題点

- Precession rate は先の epicyclic motion の鉛直方向を考えればよい
 - 半径によって precession rate は異なるはず
 - > そんなものが同じ位相で disk 全体 precession するのだろうか？
 - Tilt する原因も不明
- (3:1 共鳴の tilt instability は成長率が遅すぎる
BH/NS ならば Eddington 近い輻射場、相対論効果などもあるうが？)

スーパーアウトバーストにおける negative superhump の発見

- Patterson のグループは negative SH の研究で当時世界をリードしていた
- 彼らは 3:1 共鳴の tilt instability を主に念頭に起き、**長期間一定光度を保つ天体 (novalike) にのみ negative SH が現れる**と考えていた
- ところが、2011 年 ER UMa(SU UMa 型) の**スーパーアウトバースト中に negative SH を偶然発見** (Ohshima et al. 2012, 2014)

ER UMa の negative SH



(from Ohshima et al.
2012, 2014)

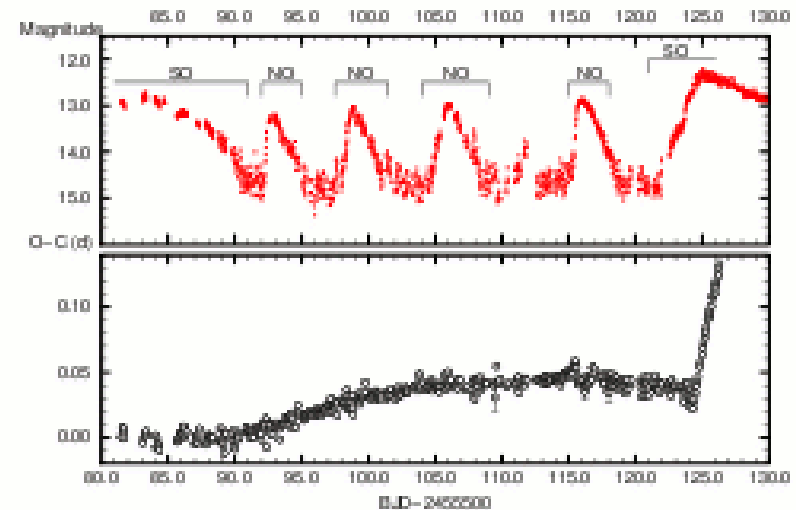
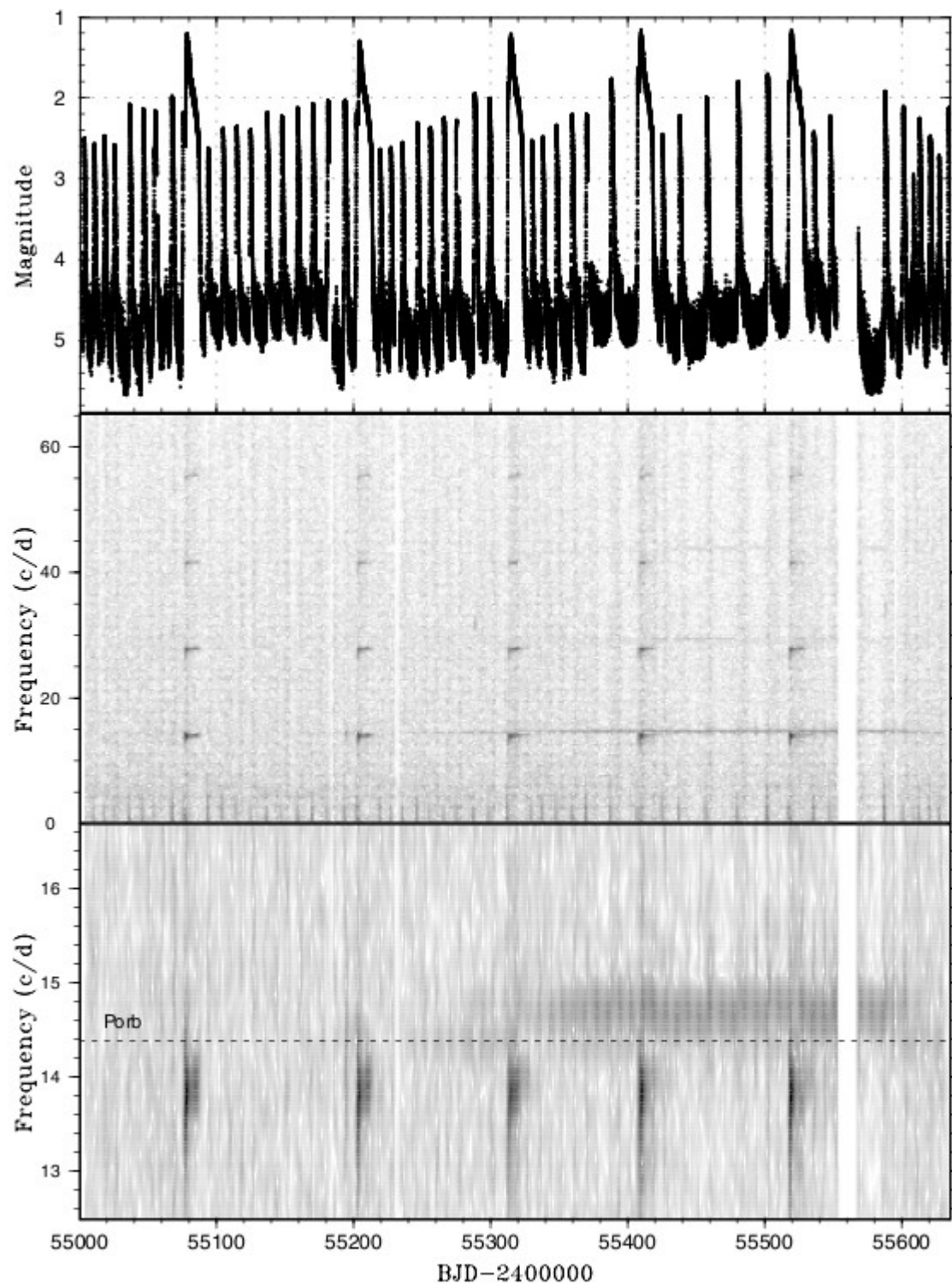


Fig. 2. The upper panel represents the overall light curve from the superoutburst of 2011 January till the next superoutburst of 2011 March. SO represents for a superoutburst and NO represents for a normal outburst. Although not observed by us, the superoutburst of January is reported to have started on BJD 2455578 (January 16). The lower panel is $O - C$ diagram in the same term. The negative superhumps had disappeared when the superoutburst of March started and showed a smooth transition to positive superhumps. As to circles without a error bar, errors are smaller than the circle radius (this applies to fig 3).



そして Kepler
衛星データに
negative SH を
発見 (Osaki and
Kato 2013)

Kepler data の negative SH の特徴

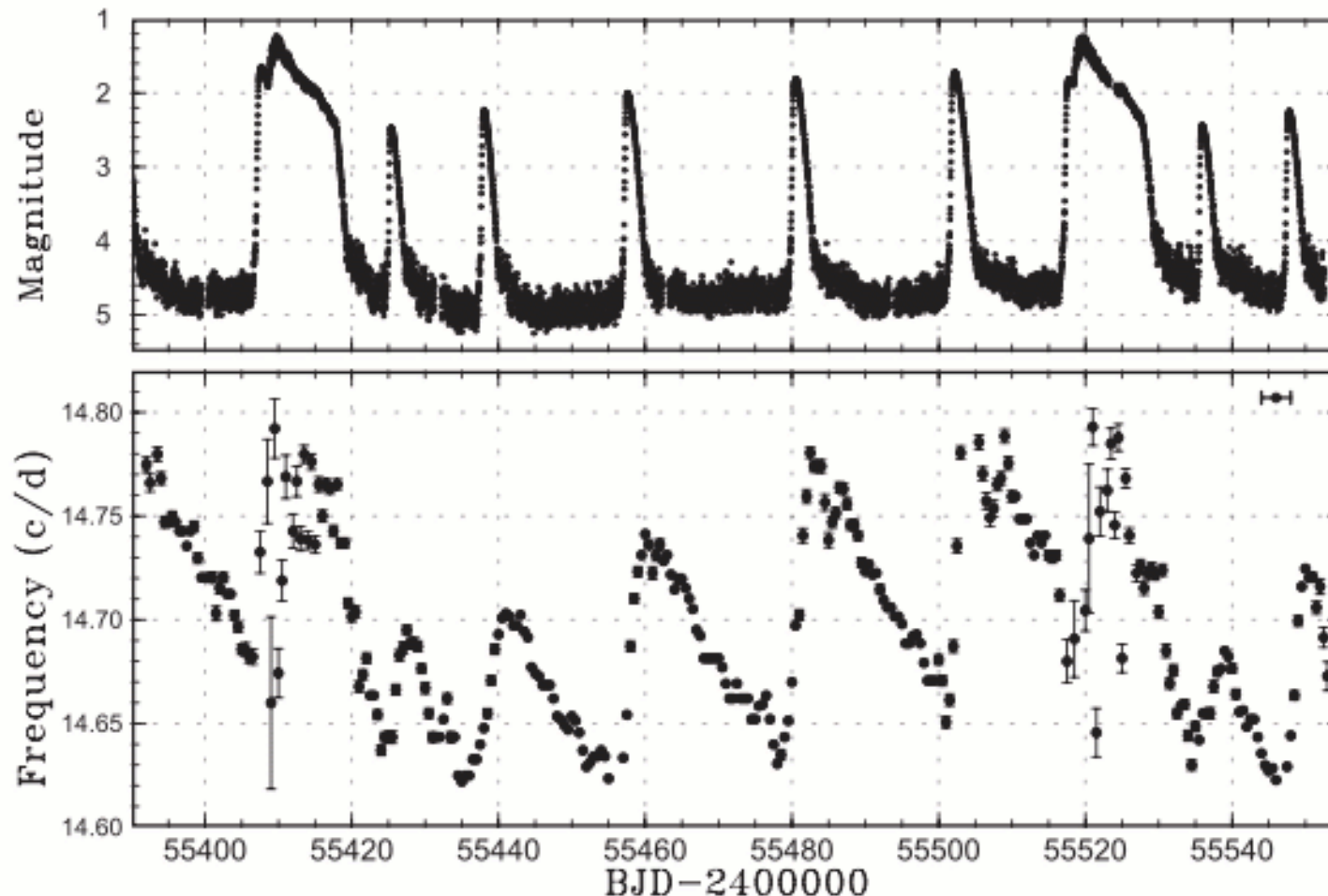
- 静穏時もスーパーアウトバースト中も見える
- Positive SH と negative SH は共存する

離心円盤の precession では説明できない

disk tilt と解釈することが最も自然

- 100 日程度のタイムスケールで成長、減衰する

そして重要な発見
negative SH の周波数はアウトバー
スト位相に従い規則的に変化する

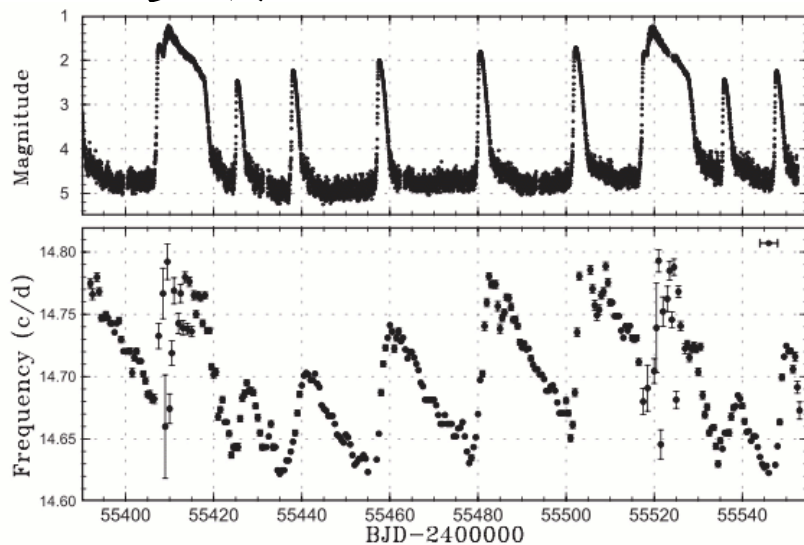


(Osaki and Kato 2013)

Tilted disk の precession rate は
円盤半径の $3/2$ 乗に比例

negative SH から半径変化がわかる

この結果は Osaki (1989) の熱潮汐不安定モデルと完全に一致



この変化を半径変化と読みかえればよい

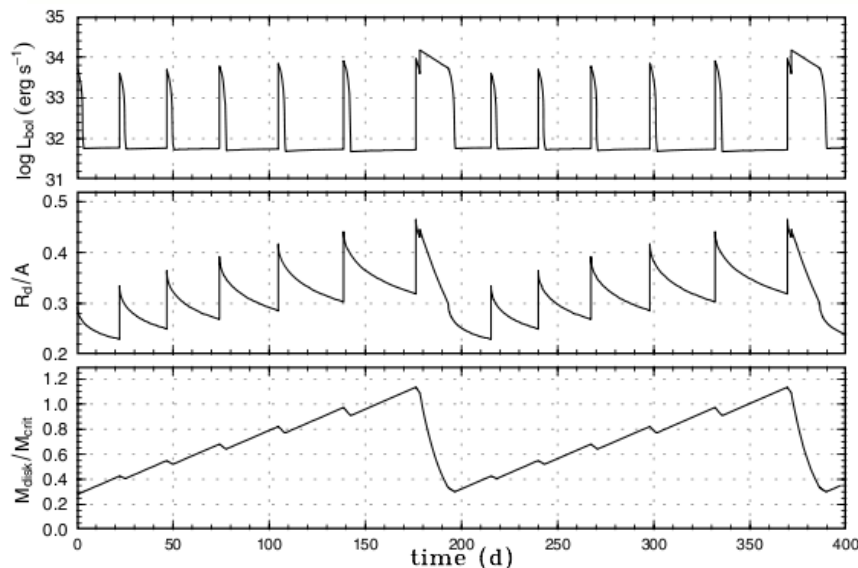


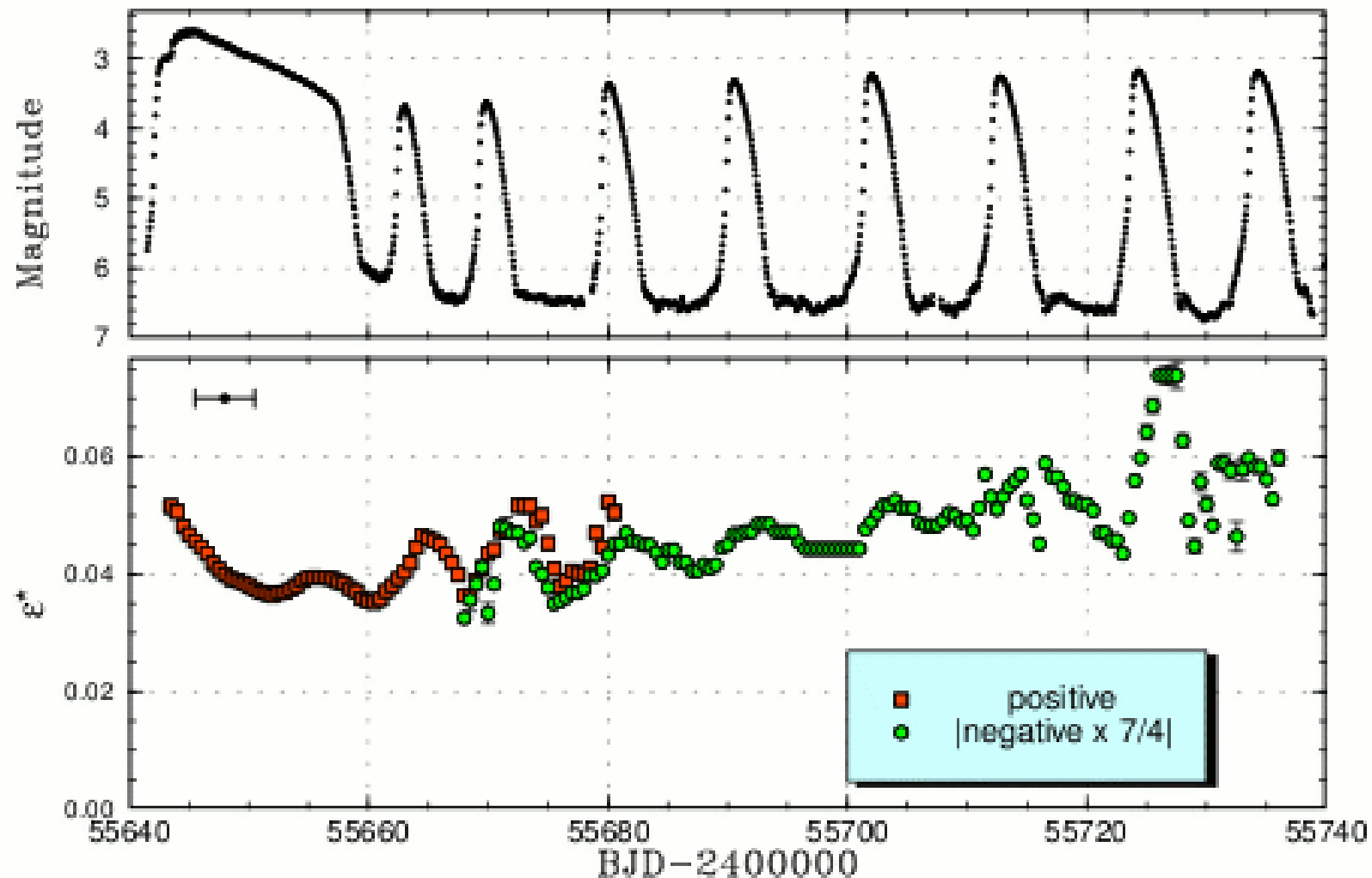
Fig. 1. Time evolution of an accretion disk in a supercycle based on the simplified form of the TTI model, redrawn by using the results in Osaki (2005). Two supercycles are shown in the figure for clarity. The model parameters used are those of VW Hyl, a prototype SU UMa star. From the top to the bottom: the bolometric light curve, the disk-radius variation in units of the binary separation A , and the total disk mass, M_{disk} , normalized by the critical mass, M_{crit} , above which the disk can be tidally unstable.

この結果

- 他の全ての対立モデルを棄却
(これまでは円盤半径を求めるよい方法がなく
観測的 direct 検証はできなかった)
- Negative SH は disk tilt 由来である

ことを同時に示した

半径変化の傍証：positive, negative が同時に見えることがある



(Osaki, Kato 2013)

Disk tilt はなぜ起きる？

Montgomery and Martin (2010) は降着円盤への accretion stream との流体力学的効果（揚力）と考えた

ある程度以上の質量移動率がないと起きないことも示された（観測との整合性はよい？）

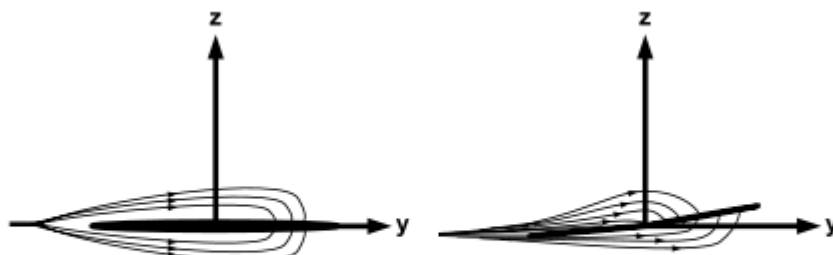
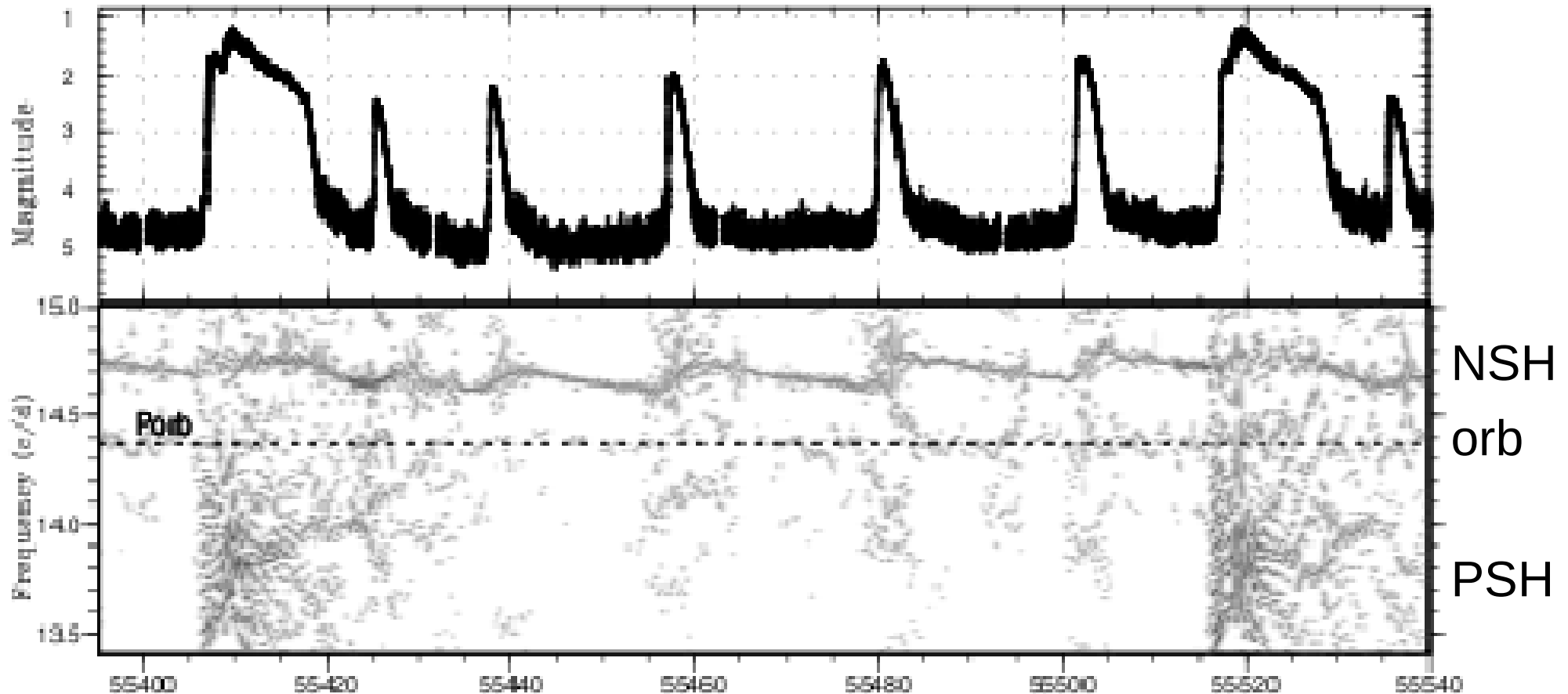


Figure 3. Sketch of gas flow streamlines over and under a non-tilted, edge-on accretion disk (top panel) and a tilted, edge-on accretion disk (bottom panel). Tilt angles and thus streamlines are exaggerated to show details. Wider/closer spacing of streamlines indicates slower/faster flow speeds and higher/lower pressures. The gas stream overflowing the disk edge at the bright spot eventually rejoins the disk downstream as shown. Note that we assume in the figure that the gas speeds over/under the disk significantly vary along the gas stream path as shown by the streamlines. The gas stream may very well remain intact in which case the streamlines above/below the disk would rejoin the disk in approximately the same location.

しかし反論もサポートもあまりなく、現状は不明

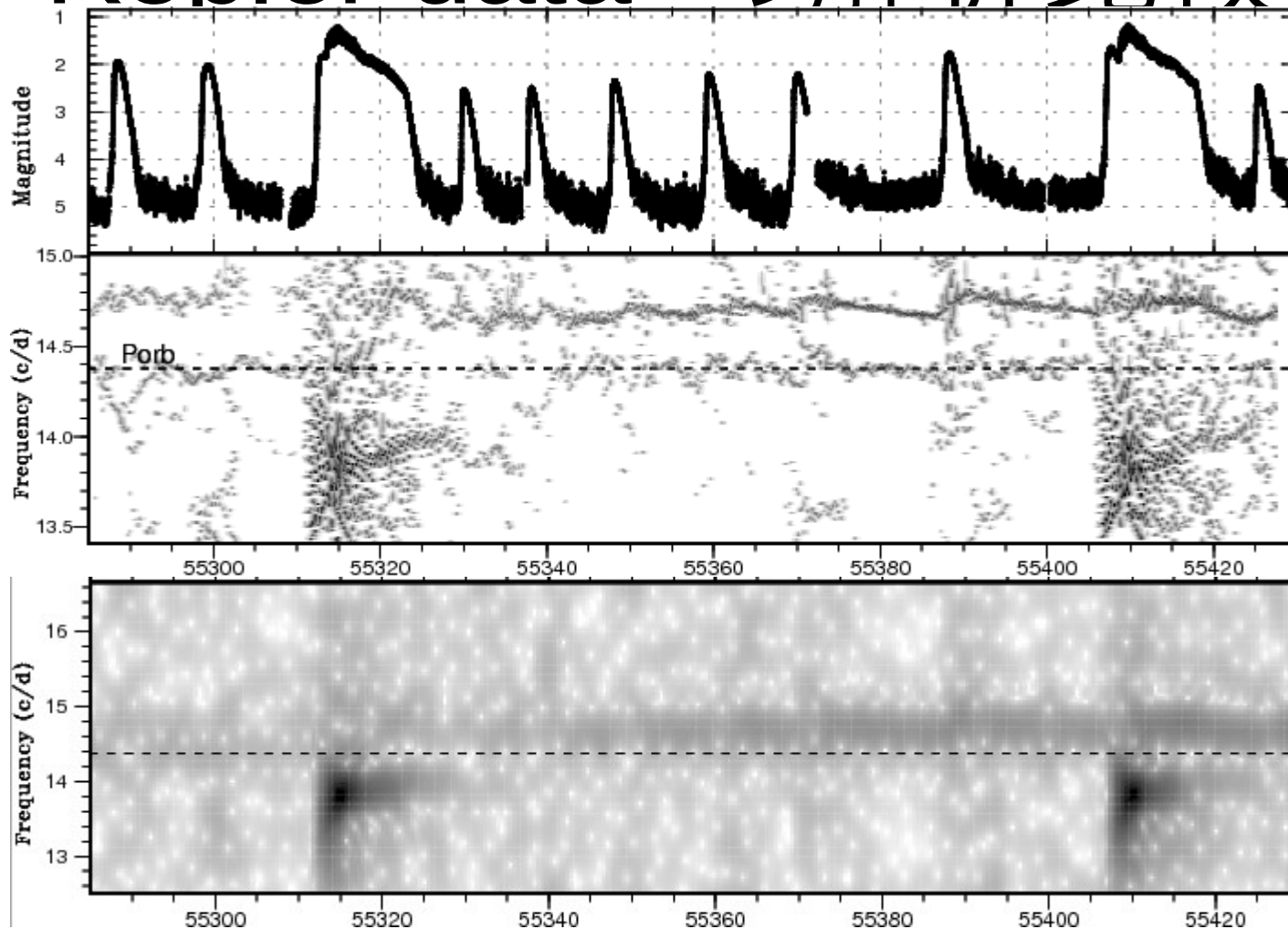
最新手法 (圧縮センシング) 解析例

NSH (negative superhump), orbital, PSH (positive) の3種類の信号の変化を同時に追跡できる！



(Osaki and Kato 2013a, 2013b)

Kepler data の解析比較

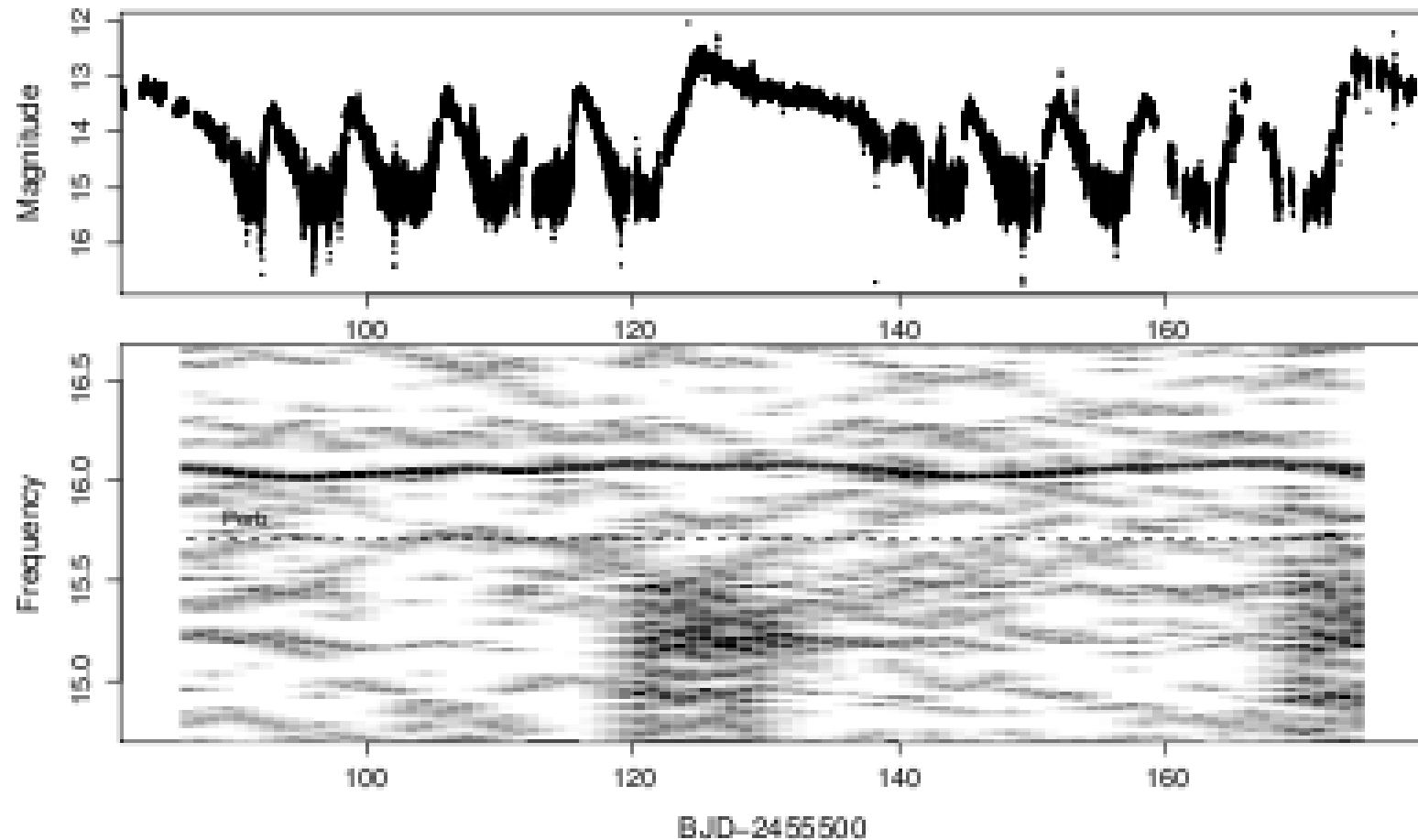


Lasso

Fourier

Fourier では NSH と Porb の分離が十分でなかった
Lasso によって NSH と Porb が同時に見えている
ことがわかった

ER UMa の Lasso 解析 (Ohshima et al. 2014)



まとめ

- スーパーハンプの周期の変化に規則性があることがわかった (stage A,B,C)
 - Stage A は 3:1 共鳴半径での precession を反映
 - この結果 stage A 周期から連星質量比がわかる
- > 激変星進化を調べる上で画期的な手法
- Negative SH の見える矮新星がいくつもある
 - それを用いて Osaki(1989) の熱潮汐不安定モデルが四半世紀ぶりついに検証された
 - Negative SH は disk tilt が原因