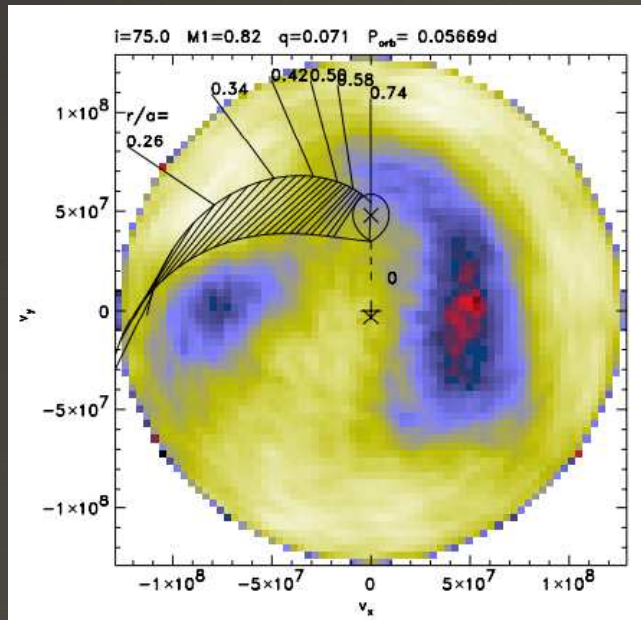


植村誠 (広島大学 宇宙科学センター)

@「降着円盤大研究会」京大 2015.06.21-22

トモグラフィー的手法で探る WZ Sge型矮新星の降着円盤構造

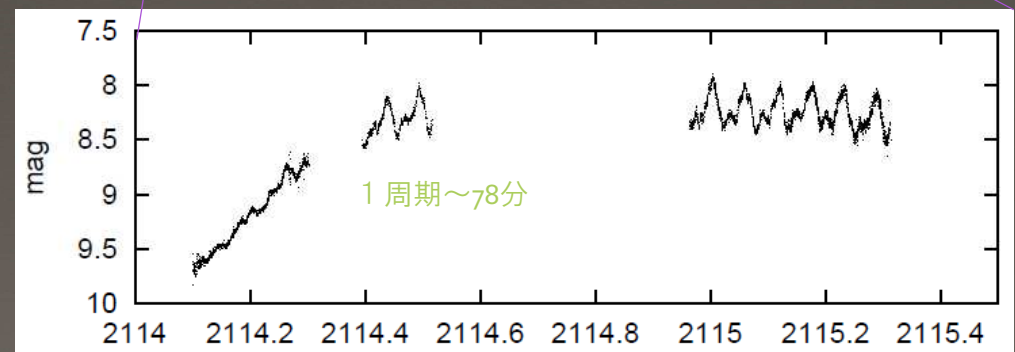
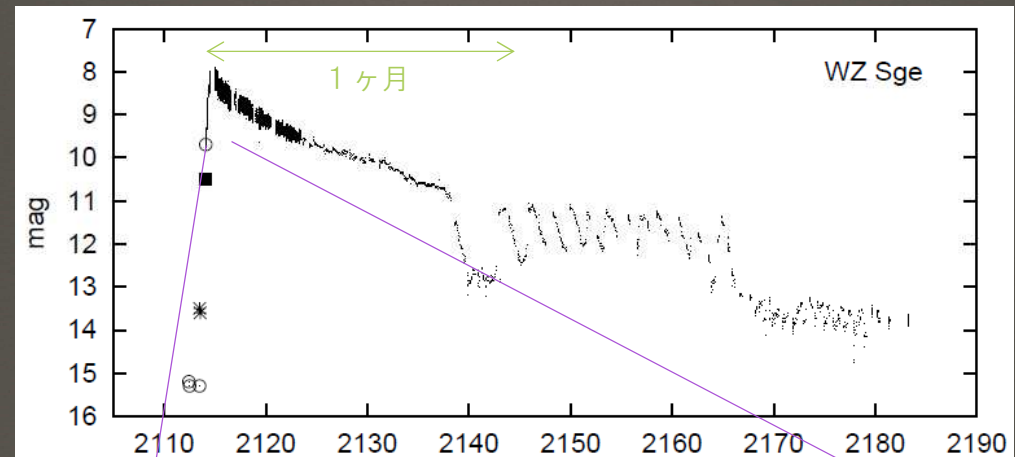
WZ Sge型矮新星



Baba+02

- 連星質量比が極端
 - $M_2/M_1 < 0.1$
 - 2:1 resonance半径まで円盤が広がる可能性あり
- アウトバースト初期にのみ現れる特異な挙動
 - Early superhump
 - 非対称なスパイラルパターン (WZ Sge)

矮新星 WZ Sge の光度曲線 (Ishioka, et al. 2002)



今日の話

- 最近、トモグラフィー的解析による降着円盤の構造再構成の研究をしているので、その結果を紹介します。
(特にWZ Sge型の初期について)

- Early superhump から円盤の幾何構造

- Uemura+12, PASJ, 64, 92

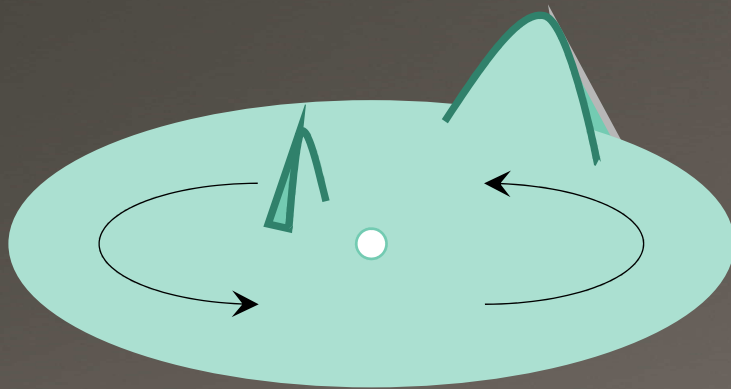
- ドップラートモグラフィーで輝線の輝度分布

- Uemura+15, PASJ, 67, 22

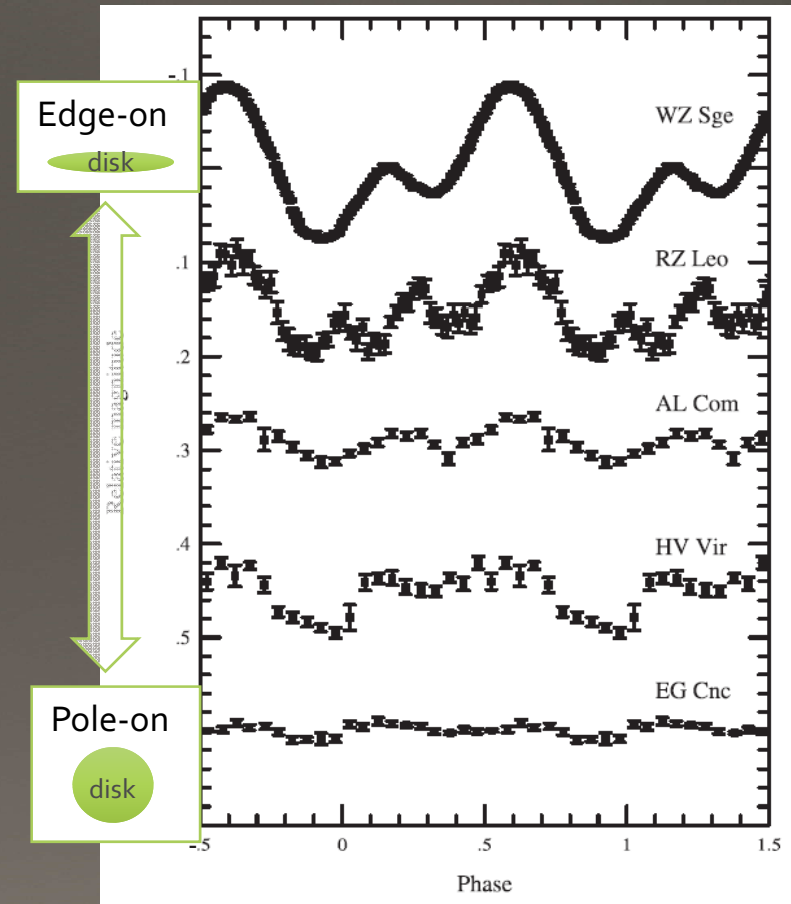
(時間はあるまいないので概要だけです)

早期スーパーハンプ

- WZ Sge型のアウトバーストごく初期にのみ現れる短周期振動。
- レアなイベントなのでその機構はよくわかっていなかった。
- 最近の研究で、円盤の幾何構造を反映した回転による変光であることが明らかに。



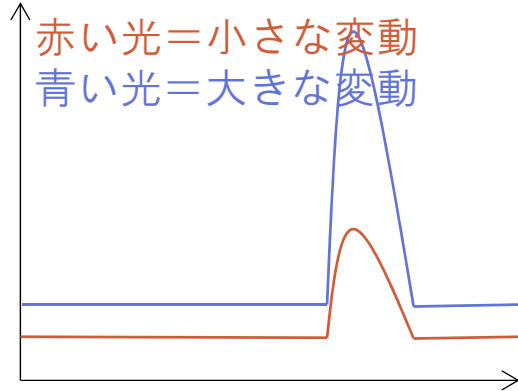
様々な早期スーパーハンプ (Kato, et al. 2002).
円盤を横から見る系では大きな振幅



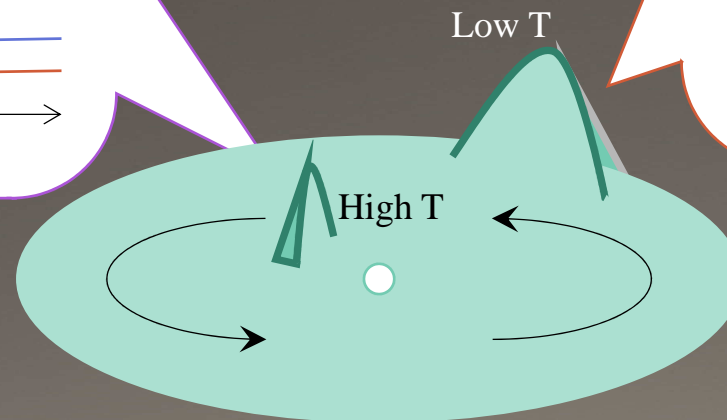
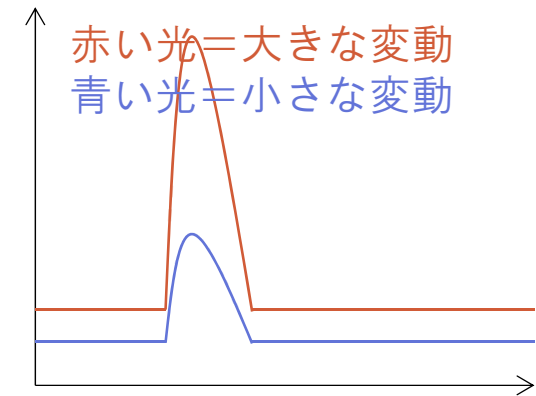
早期スーパーハンプを使った 円盤幾何構造の再構成

- 降着円盤は内側ほど温度が高く（青く）、外側ほど温度が低い（赤い）
- データ：いくつかの波長での明るさの時系列データ
 - 時間方向の情報 → 円盤の方位角方向の情報
 - 波長の情報 → 円盤の動径方向の情報

もし内側の高温部分が
膨らんでいたら...



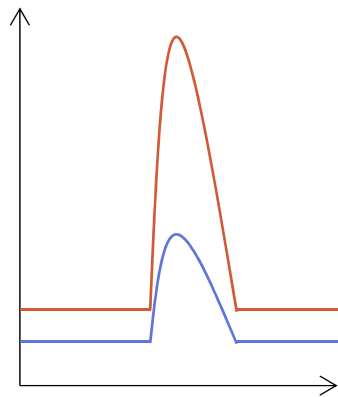
もし外側の低温部分が
膨らんでいたら...



モデル

入力

多波長の光度曲線



モデル

円盤高さ, $h(i,j)$ を推定するベイズモデル

$$P(h) \propto L[f_{\nu,obs}(\phi), f_{\nu,model}(\phi)]\pi(h)$$

事後分布 尤度関数 事前分布

* 尤度関数：正規分布

$$L \propto \prod_{i,j} \exp - \frac{[f_{\nu_i,obs}(\phi_j) - f_{\nu_i,model}(\phi_j)]^2}{2\sigma^2}$$

* 事前分布

(2次微分の2次ノルム = 滑らかな構造)

$$\pi_{smooth}(h) \propto \prod_{l,m} \left[\exp - \frac{(h_{l,m} - 2h_{l-1,m} + h_{l-2,m})^2}{2w^2} \right. \\ \left. \exp - \frac{(h_{l,m} - 2h_{l,m-1} + h_{l,m-2})^2}{2w^2} \right],$$

$$\pi_{disk} \propto \begin{cases} \prod_{l,m} \exp - \frac{(h_{l,m} - h_{disk,l,m})^2}{2h_{disk,l,m}^2} & (h_{l,m} \geq 0) \\ 0 & (h_{l,m} < 0) \end{cases}$$

* h を MCMC で推定
観測点100点から320点を推定

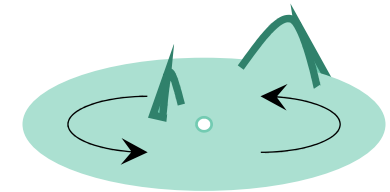
* 温度分布

標準円盤モデルの温度分布 $T = T_{in} \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^{-3/4}$
or

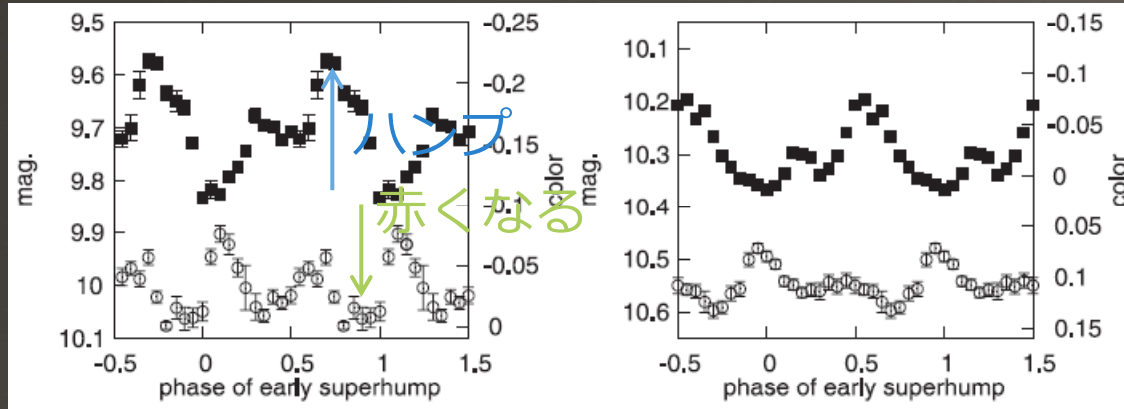
irradiation を考慮した非対称分布

出力

円盤の高度マップ



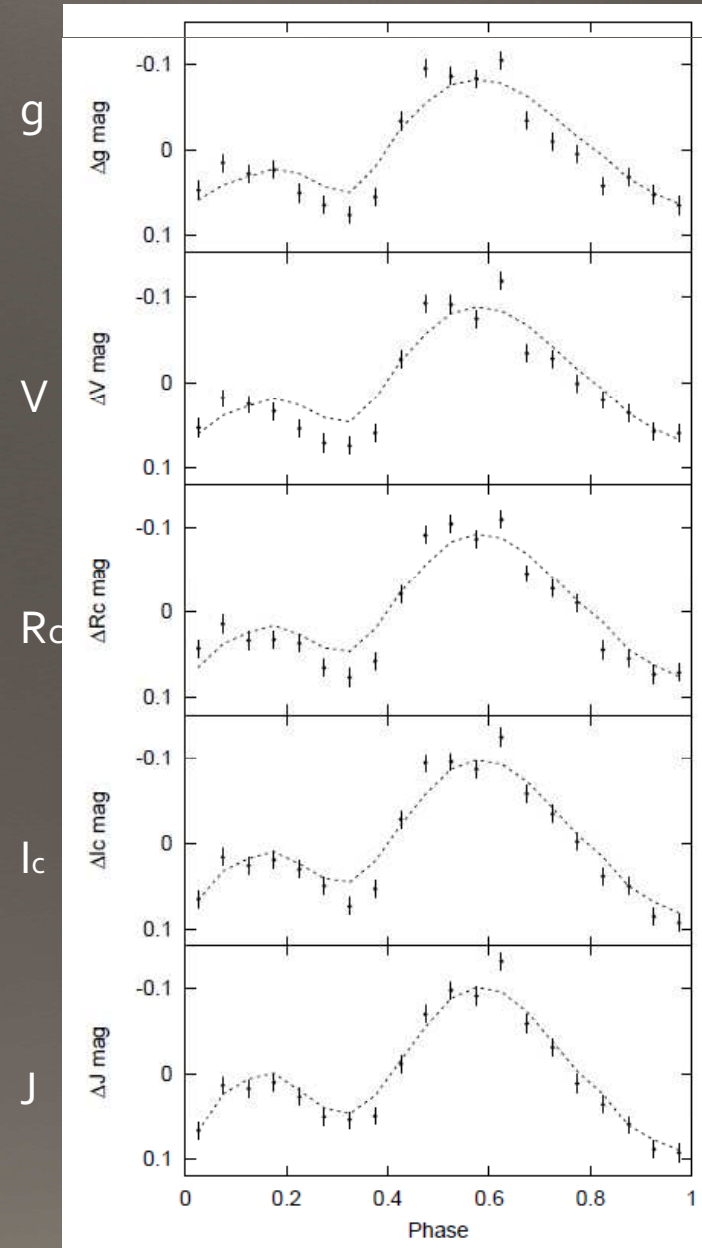
データ

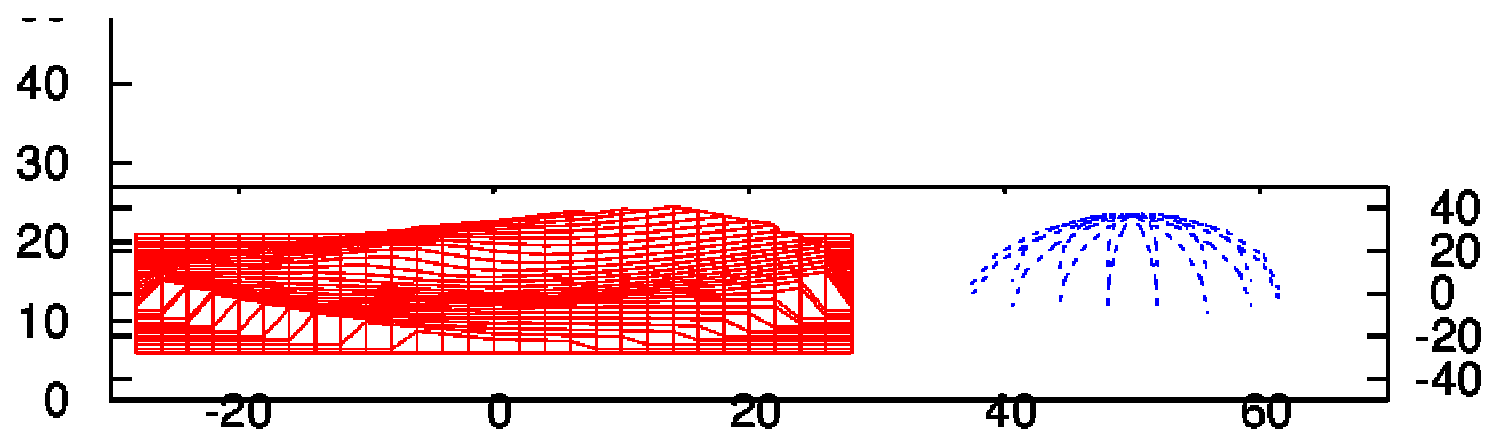


- 矮新星 V45 And
- アウトバースト5日目のデータ
- 観測装置
 - 1.5m かなた望遠鏡 (V, J, Ks)
 - 50cm MITSuME (g, Rc, Ic)



V45 And の早期スーパーハンプ
(Matsui+09)

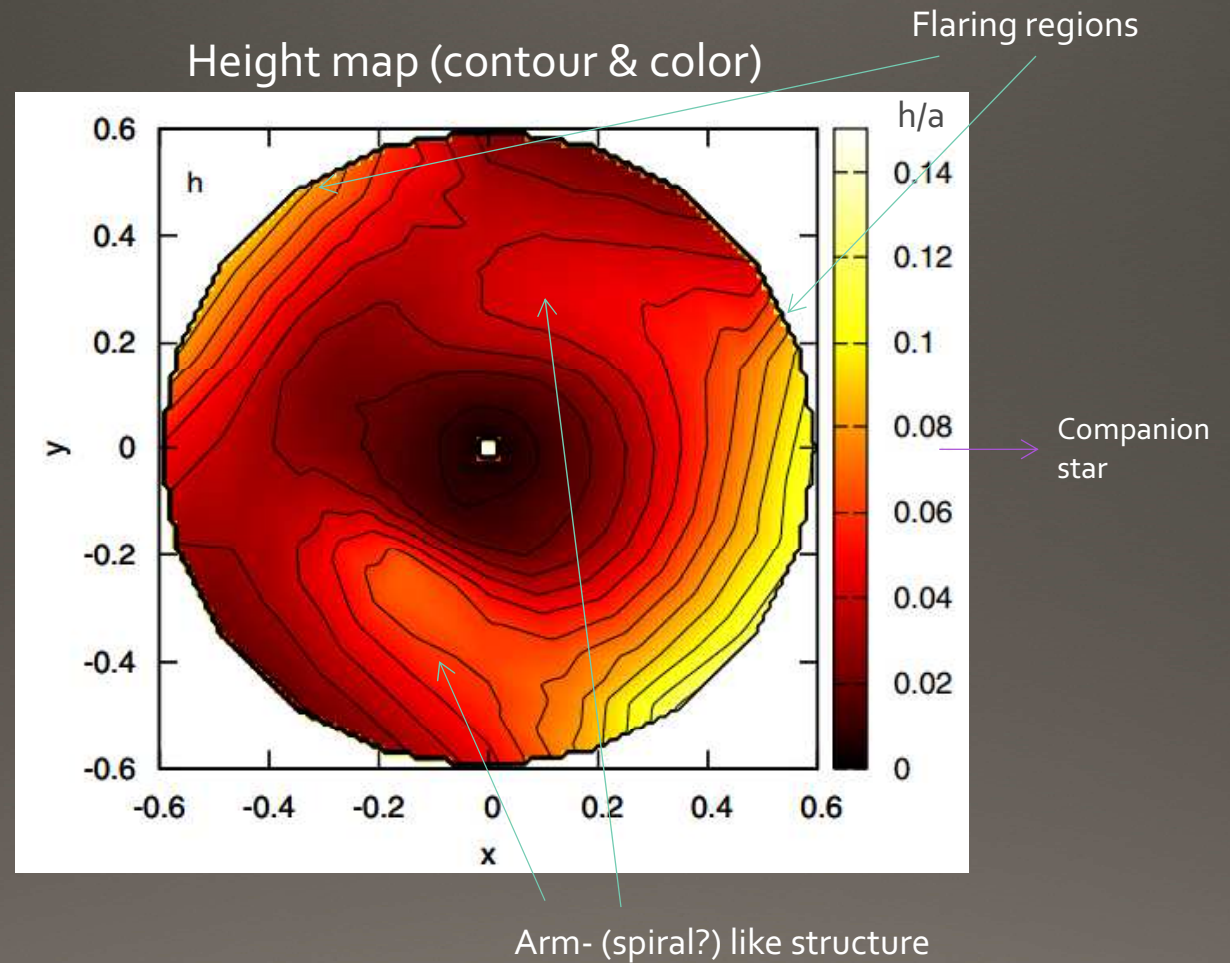
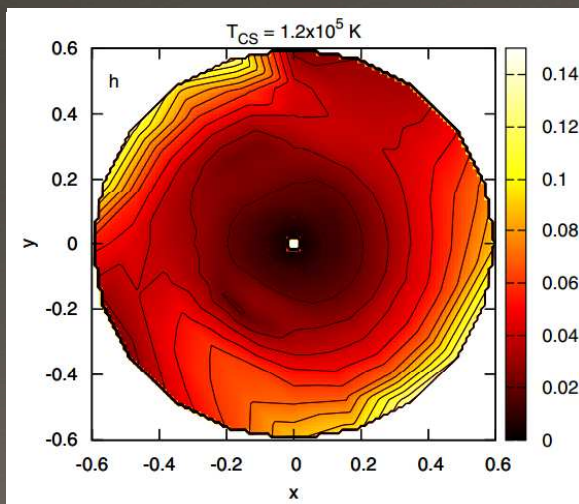




V455 Andのデータによる再構成結果

- 最外縁の膨らんだ2箇所
の部分がハンプの2つの
ピークに対応
- 高さは h/r : 0.1~0.2
- 内側にも Arm-like ? な構造
- シミュレーションの結果
と比較が可能に。

irradiationを考慮して、温度
分布を非軸対称にした結果



ドップラートモグラフィ

(Horne 85; Baptista+93)

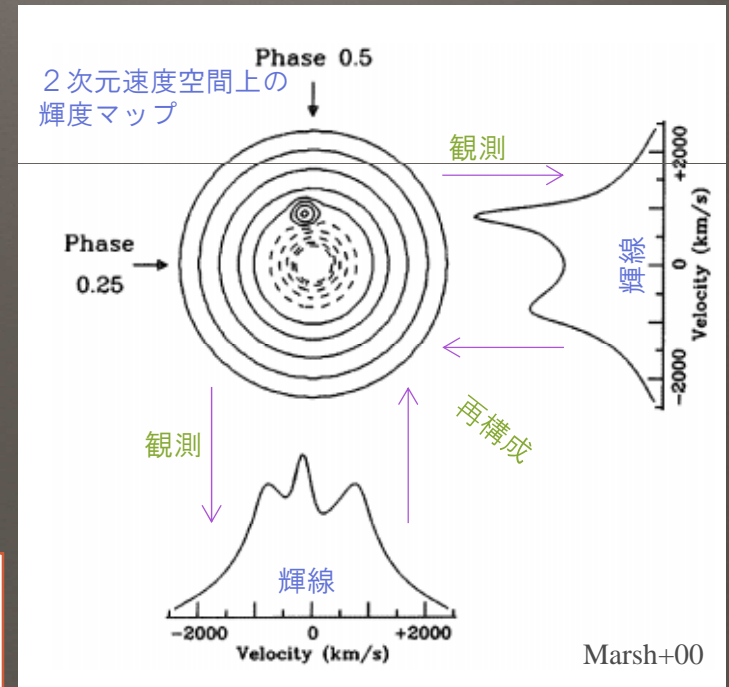
- データ
 - スペクトル中の輝線の時間変動
- 推定するもの
 - 2次元速度空間上の輝度マップ

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \right\|_2^2 + \lambda f(\mathbf{x})$$

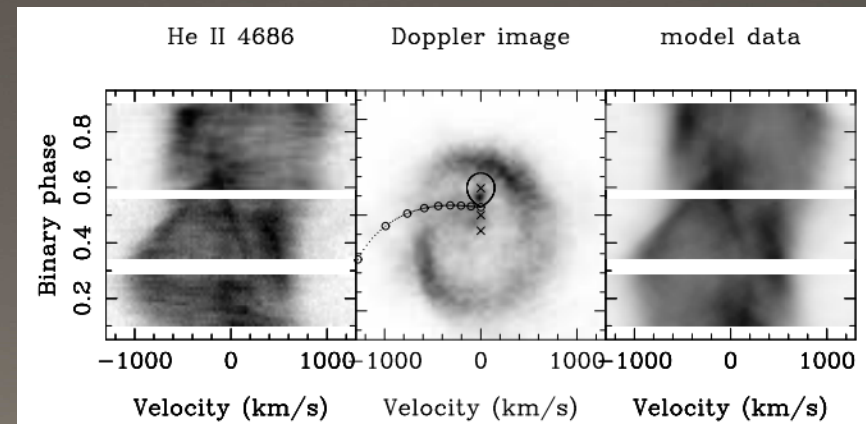
データ
観測行列
マップ

最小二乗法

罰則項
Ex. MEM, TVM



IP Peg (Harlaftis+99)



最大エントロピー法(MEM) と 全変動最小化法(TVM)

- 最大エントロピー法 (MEM)

- ドップラートモグラフィでは標準
- 罰則項:

$$S = - \sum_{i=1}^M p_i \ln \frac{p_i}{q_i}$$
$$q_i = \frac{D_i}{\sum_{j=1}^M D_j},$$

- MEMは降着円盤のドップラートモグラフィに最適なのか？

- ホットスポットや衝撃波領域などはシャープなエッジをもつ構造として観測されるかもしれない。

- 全変動最小化

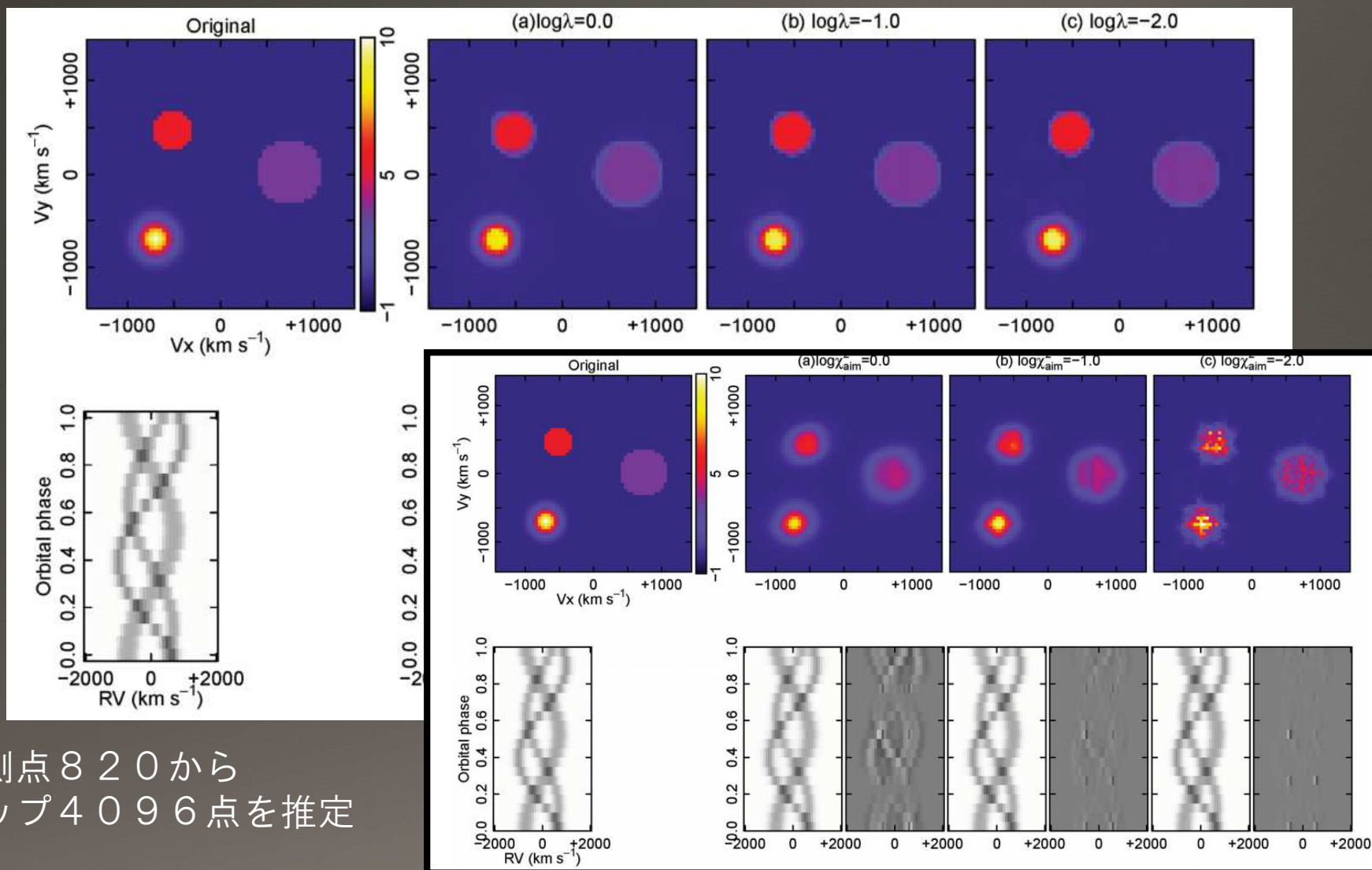
Total Variation Minimization (TVM)

- 1次微分の1次ノルム
- 罰則項:

$$TV(\mathbf{x}) = \sum \sqrt{(\Delta^h \mathbf{x})^2 + (\Delta^v \mathbf{x})^2}$$

- $\Delta \mathbf{x}$: 差分演算子 = $x_{i+1} - x_i$
- 差分空間でスパースに。

実験 1 : 3つのスポット

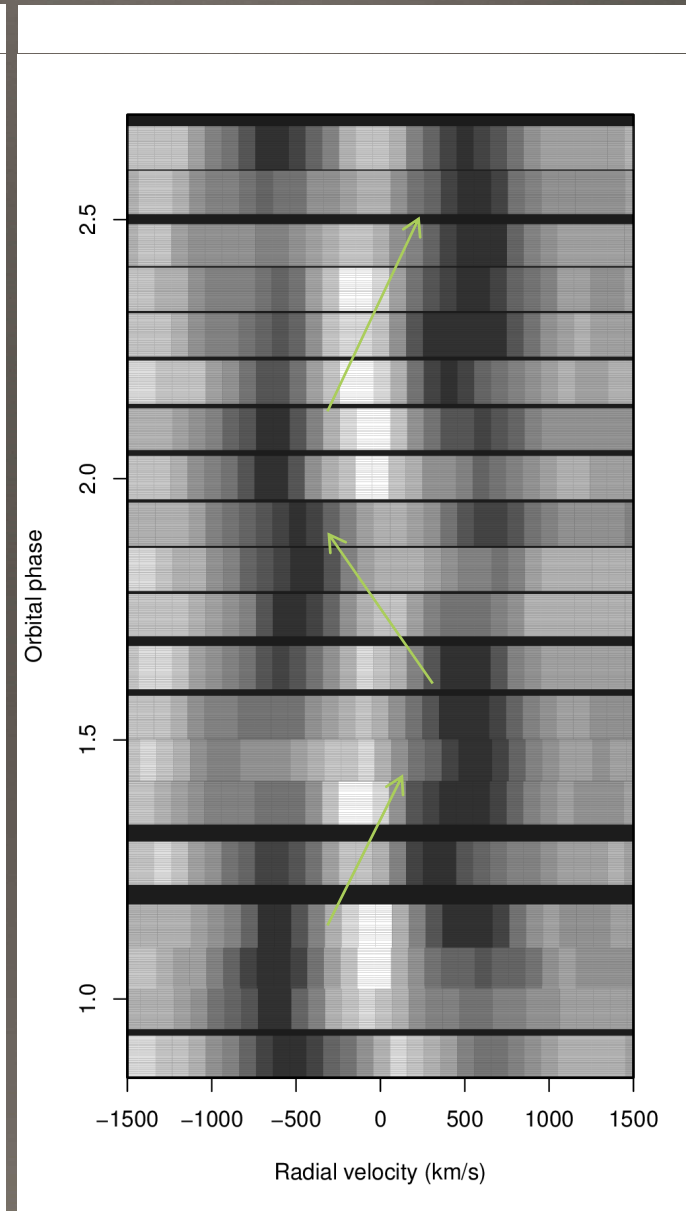
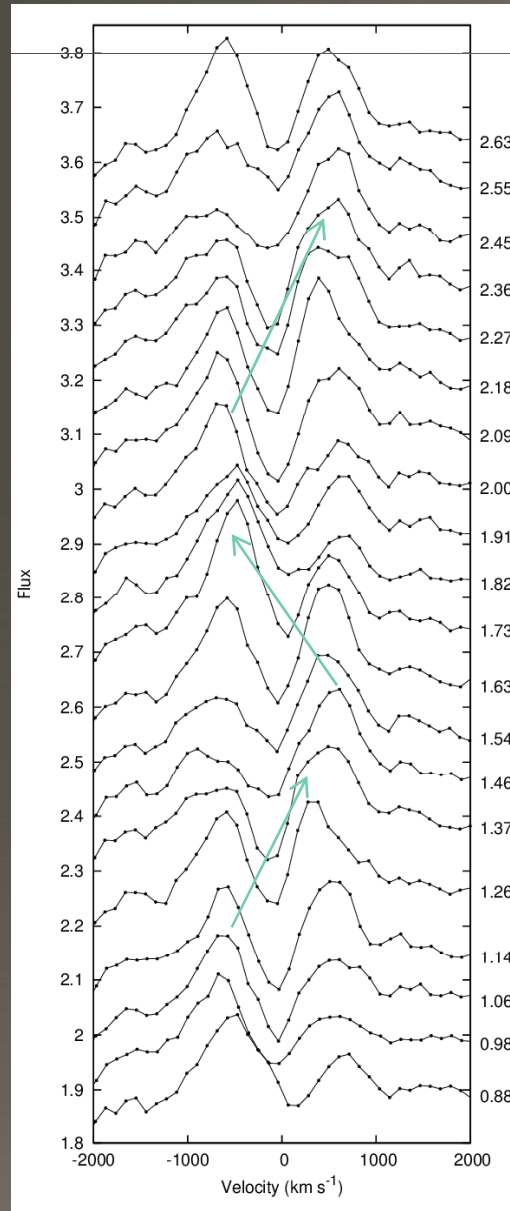


観測点 820 から
マップ 4096 点を推定

実データへの応用

- 矮新星 WZ Sge
- アウトバースト10日目
- 観測装置
 - 122-cm Asiago
 - Resolution $\sim 6 \text{ \AA}$

水素 (H α) 輝線の時間変化 (Nogami+04)



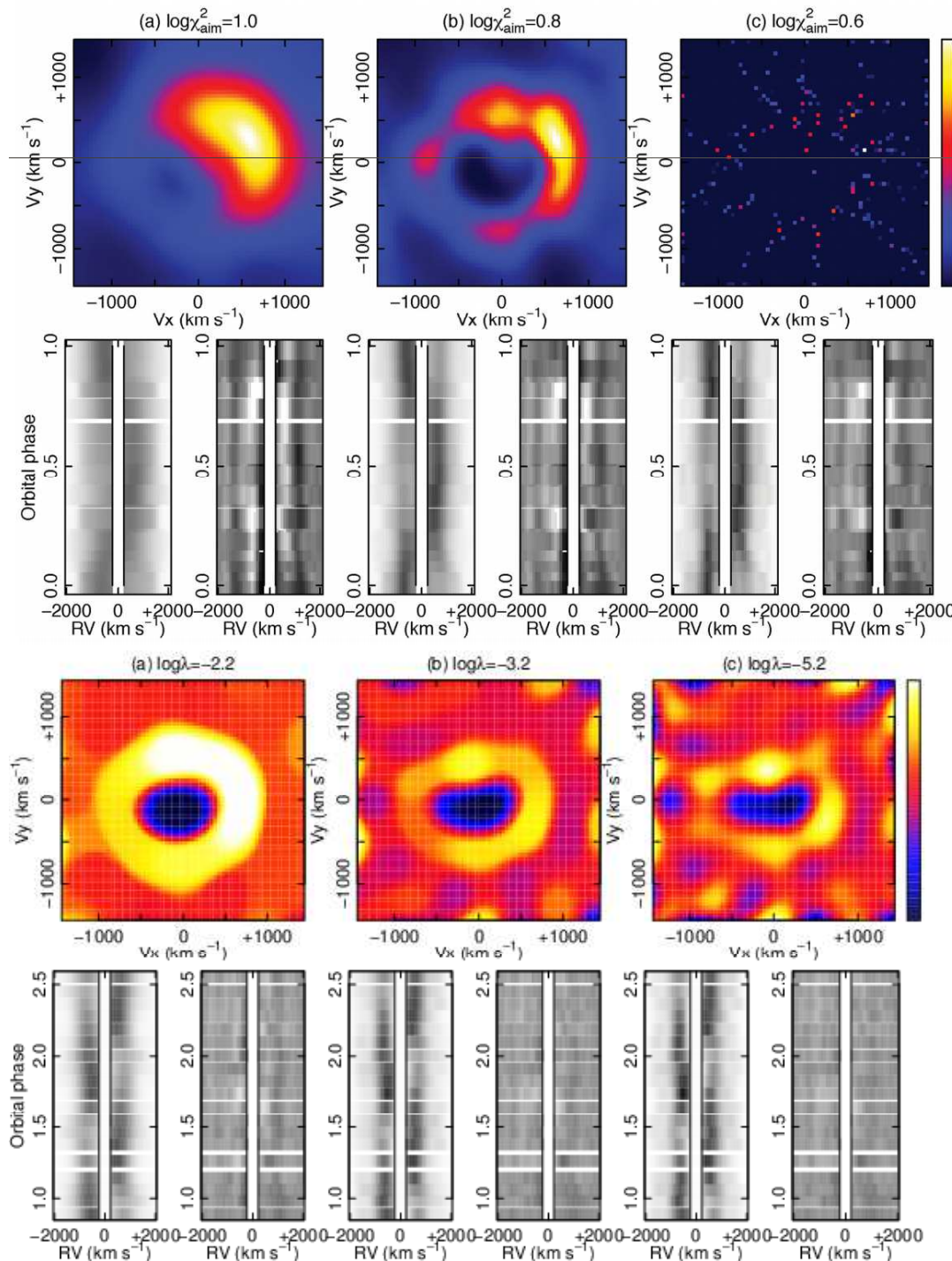
Doppler maps of WZ Sge

MEM (Spruit 1988, Marsh's code)

- ✓ 右上が一番明るい
- ✓ 全体的に円形
- ✓ 残差が大きい
- ✓ ハイパーパラメータに強く依存
- ✓ 低速度の吸収コアの差し引きに強く依存

TVM (Uemura+2015)

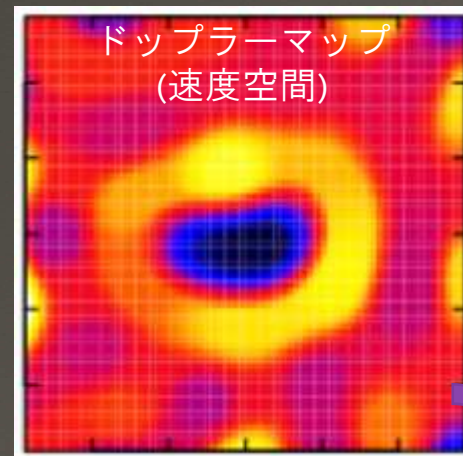
- ✓ 上と右下が明るい。
- ✓ 全体的に楕円
- ✓ 目立った残差成分なし
- ✓ 結果がパラメータに強く依存せず、安定



円盤の高さ構造と輝線マップを比較

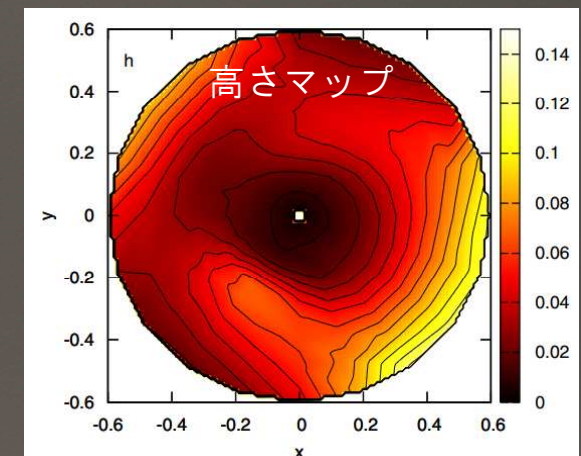
- Disk height mapping

- データ: V455 And
(アウトバースト 5 日目)



- ドップラートモグラフィ

- データ: WZ Sge
(アウトバースト 10 日目)



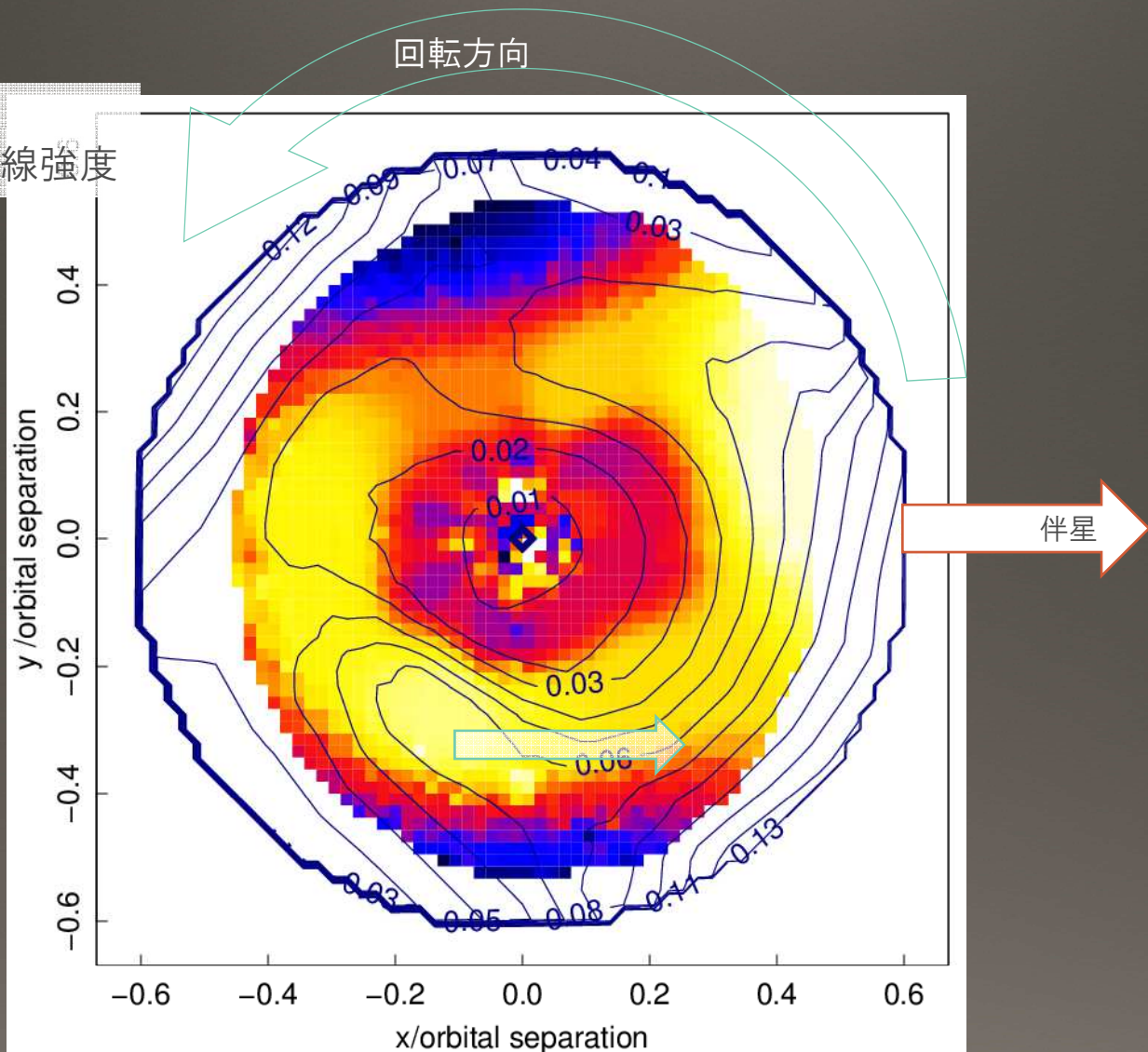
実空間上の速度場は制限三体問題の周期解を仮定

- 類似天体の類似アウトバースト時期

円盤の高さ構造と輝線マップを比較

等高線: 高度
カラーマップ: 輝線強度

- 最も高い領域 ≠ 強い輝線領域
 - 中心からの照射効果は輝線形成の主たる要因ではない
- ガスは内側の強い輝線領域を経て、縦方向に膨張
 - 圧縮と膨張の過程?



まとめ

- トモグラフィ的な手法は連星系の降着円盤を研究する上で強力なツール
- 新たなデータ・需要から新たな手法を開発
 - 早期スーパーハンプの多色光度曲線から円盤の高さをマッピング
 - 少ないデータからでも正確な結果→全変動最小化を用いたドップラートモグラフィ
- 今後の展望
 - ダイナミックドップラートモグラフィ：時間と共にわずかに構造が変化する円盤のドップラートモグラフィ
 - アウトバースト立ち上がり時のスパイラル構造の発達
 - 空間方向はTVM、時間方向は滑らかな変化、で解けるか？

Back-up

Disk height mapping

(Uemura+12, PASJ, 64, 92)

Outline

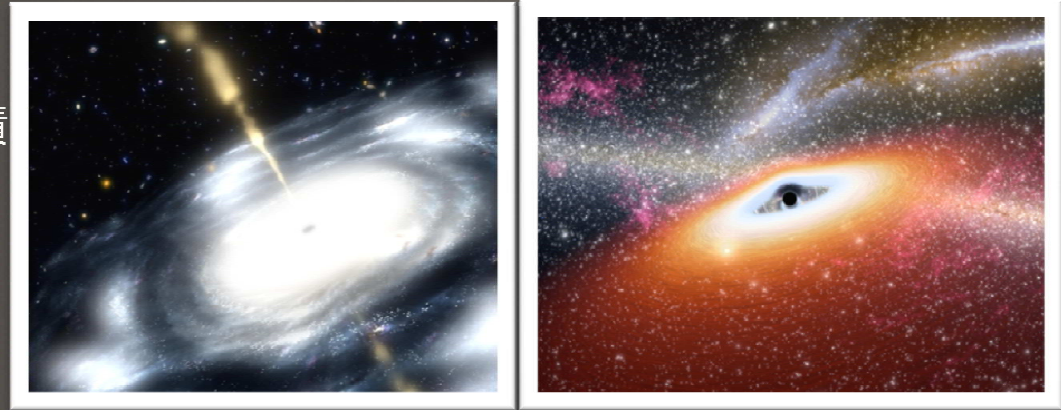
- はじめに
- Disk height mapping
 - M. Uemura, T. Kato, T. Ohshima, and H. Maehara, "Reconstruction of the Structure of Accretion Disks in Dwarf Novae from the Multi-Band Light Curves of Early Superhumps," PASJ, vol. 64, p. 92, 2012
- ドップラートモグラフィー
 - M. Uemura, T. Kato, D. Nogami, and R. Mennickent, "Doppler tomography by total variation minimization," PASJ, vol. 67, p. 22, 2015

「降着円盤」とは

ブラックホール周辺の想像図

- 降着円盤

- 重力源のまわりにガスが降り積もる際にできる構造
- 重力エネルギーを解放することで明るく輝く



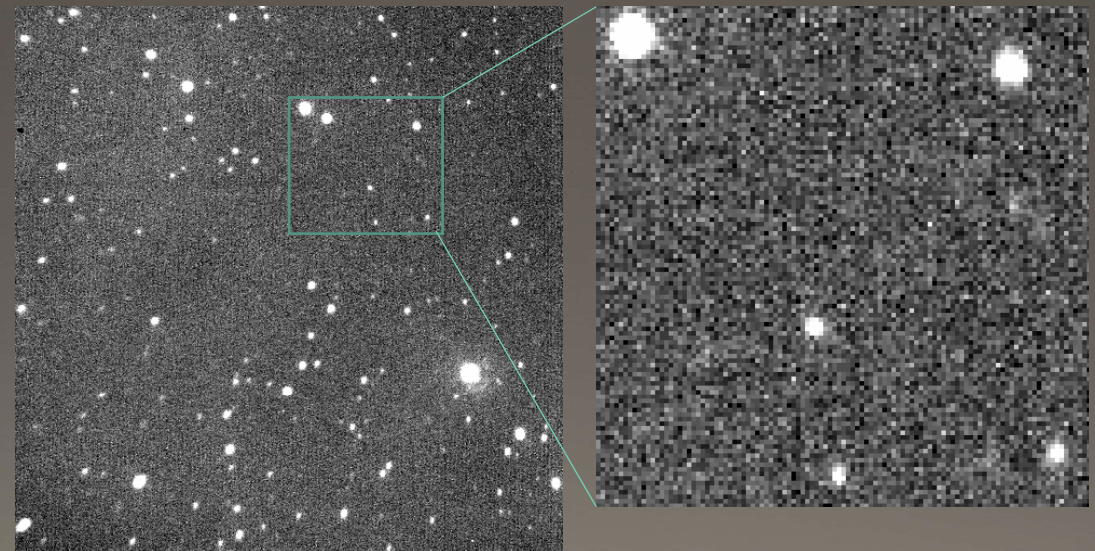
- 矮新星

- 白色矮星の周りに降着円盤
- 降着円盤に起因する激しい変動

観測

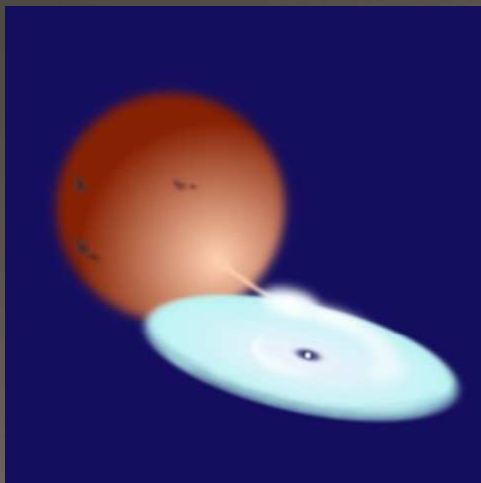
- 変動機構を知りたい

- 降着円盤の構造を知りたい
- 遠すぎて直接はわからない
- トモグラフィックアプローチ

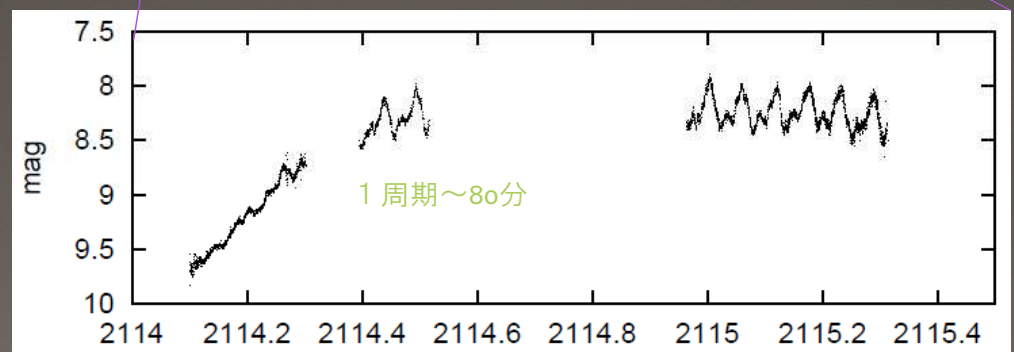
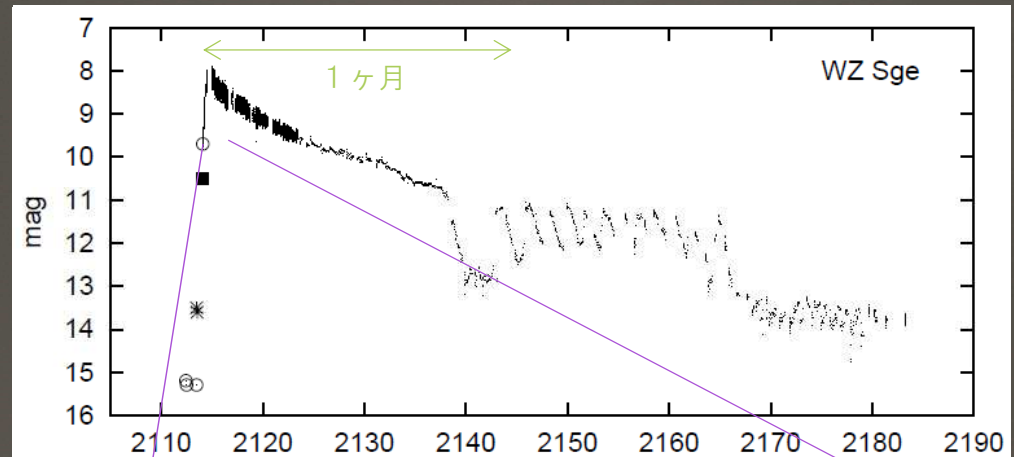


矮新星の時間変動

- 数ヶ月～数10年に一度、アウトバースト
- 1回のアウトバーストは数日～数ヶ月継続
- アウトバースト中に連星周期（数時間）に近い振動現象も。

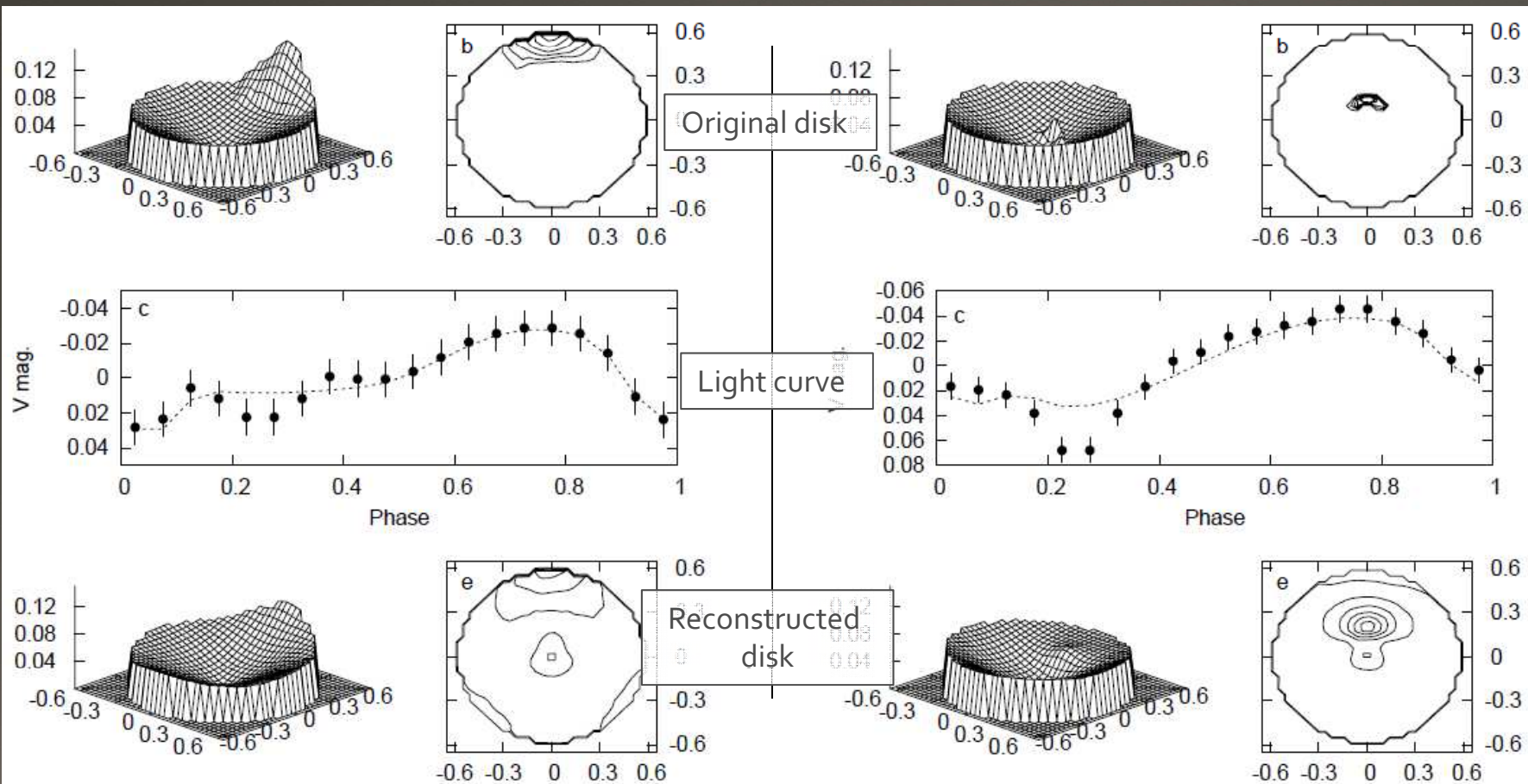


矮新星の光度曲線 (Ishioka, et al. 2002)



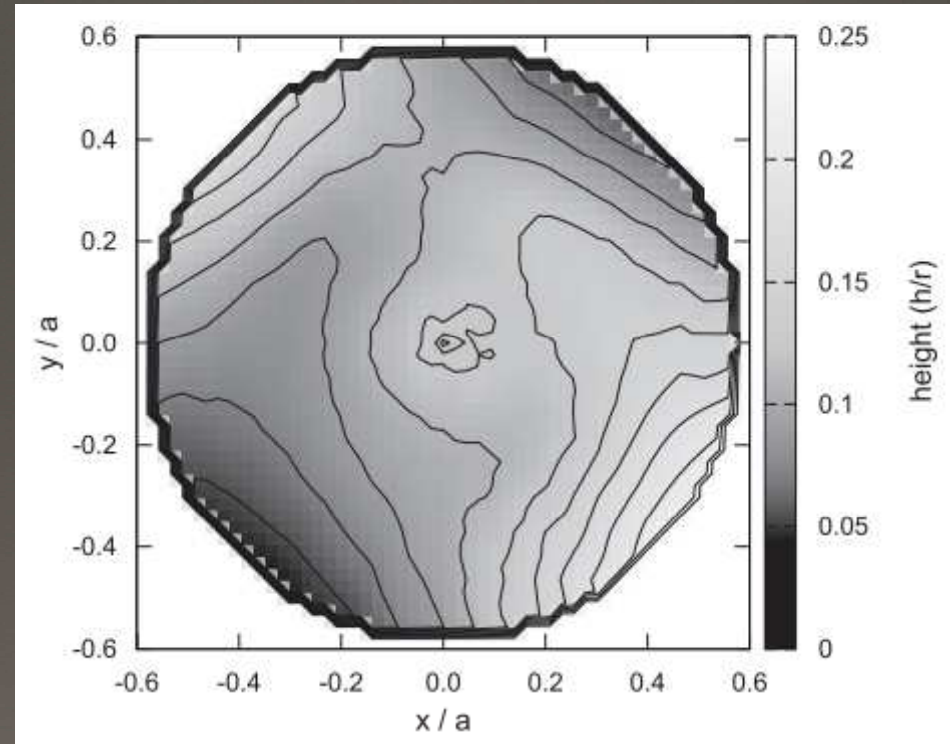
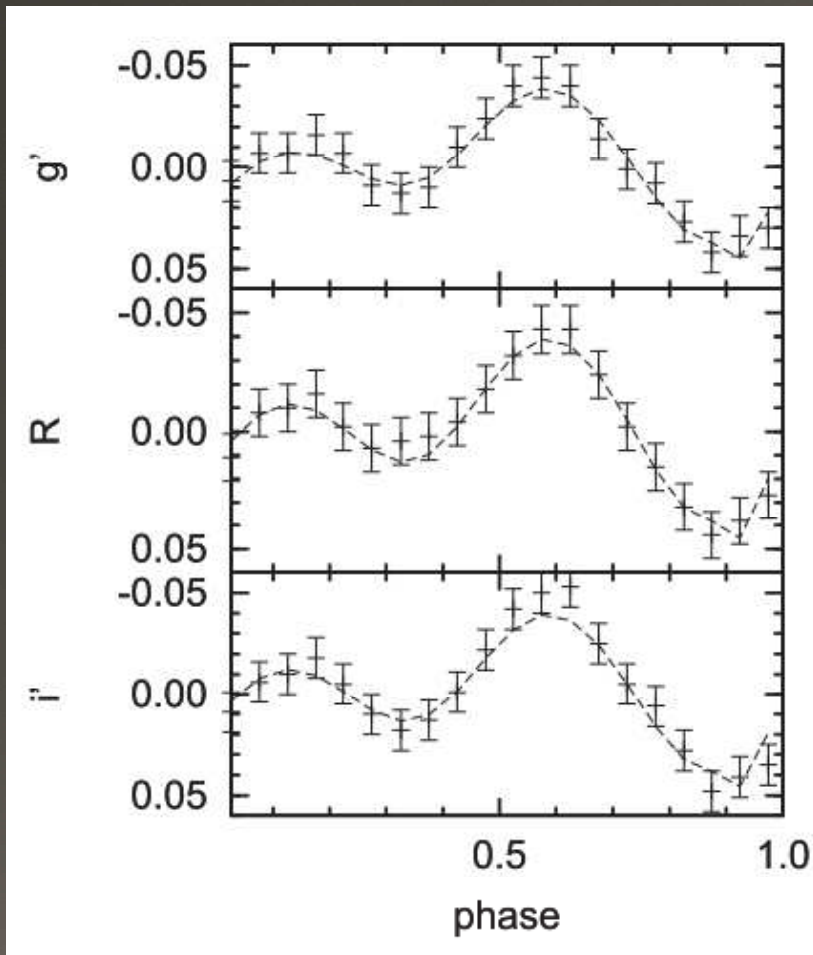
人工データによる実験

- 結果：期待通りの性能
 - 外側の構造は外側に、内側の構造は内側に、再構成成功
 - 事前分布のため、切り立った構造はなまる



他の天体での例:

OT J012059.6+325545 (Nakagawa+13)



V₄₅₅ And に似てるが、内側の構造 (左下部分) が無い。

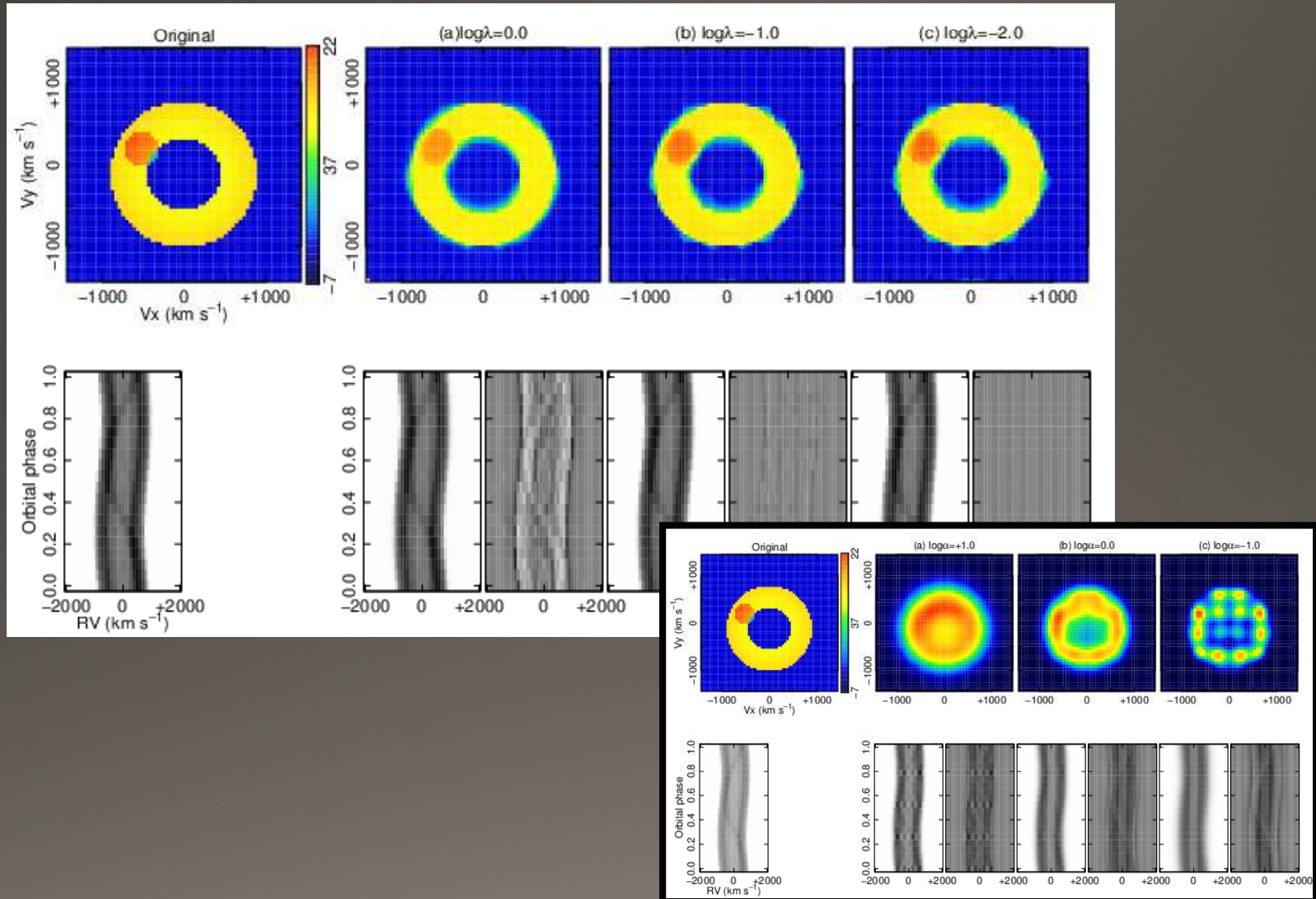
円盤の高さマッピング

- 早期スーパーハンプの多バンド光度曲線から降着円盤の高さ構造を推定する
- 円盤最外縁に2つのフレア領域
- 最も高い領域で $0.2 r (= 0.1 a)$
 - 標準円盤モデルの予言では $0.01 r$
 - 潮汐などが重要か。

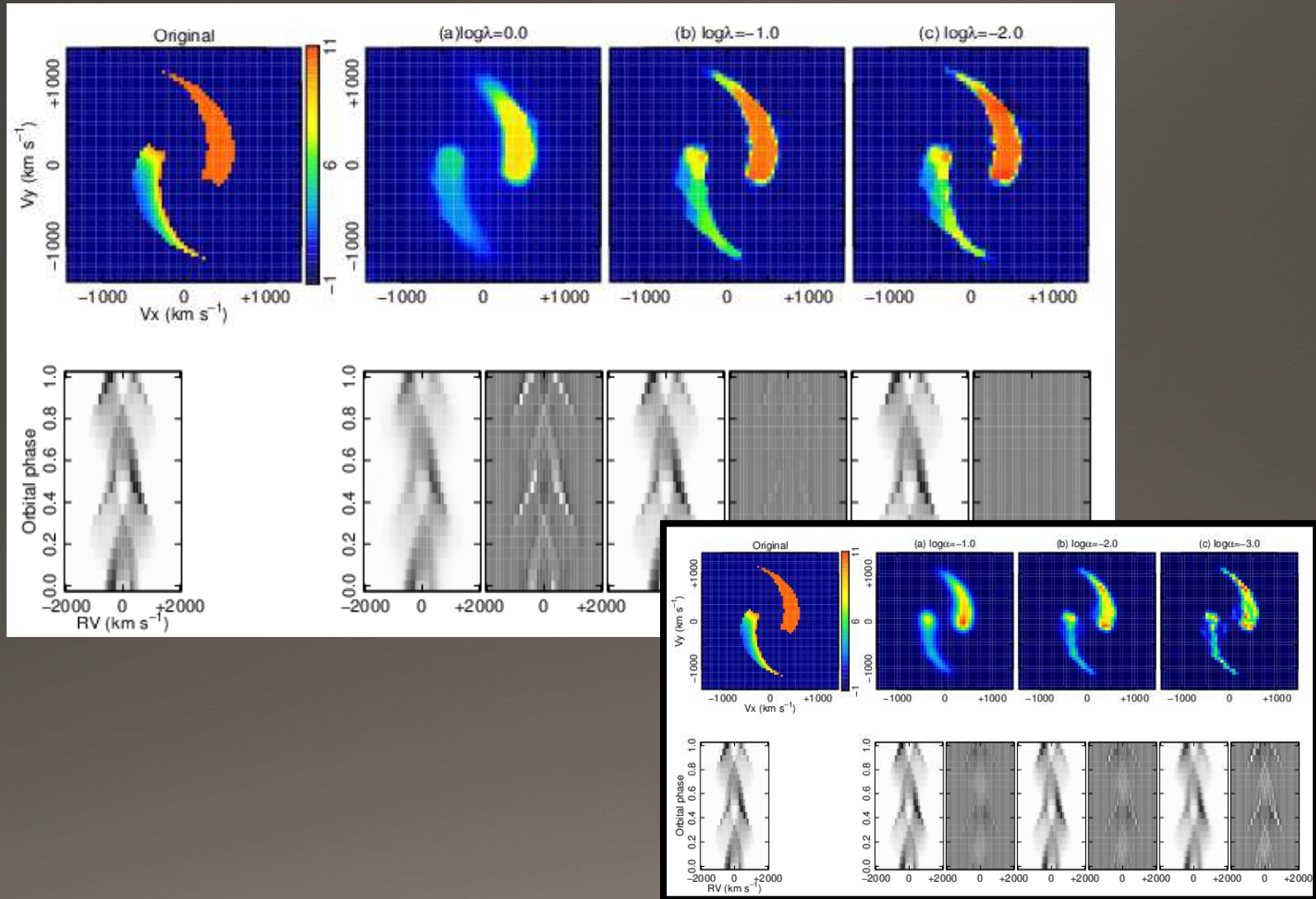
全変動最小化を使った ドットプラートモグラフィ

(Uemura+15, PASJ, 67, 22)

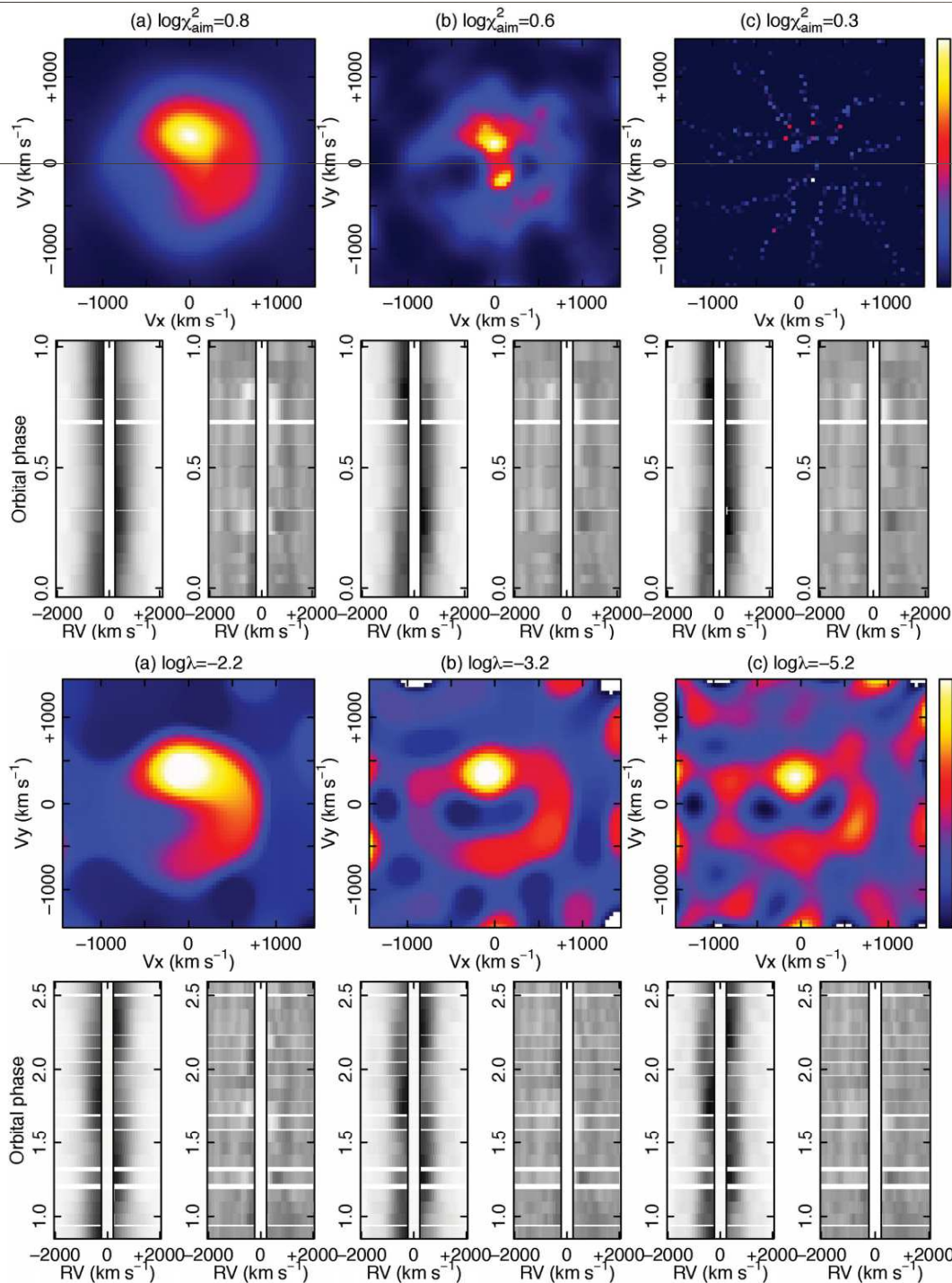
実験 2 : 円盤 + スポット



実験 3 : スパイラル構造



Doppler maps of WZ Sge



MEM (Spruit 1988, Marsh's code)

- ✓ 右上が一番明るい
- ✓ 全体的に円形
- ✓ 残差が大きい
- ✓ ハイパーパラメータに強く依存
- ✓ 低速度の吸収コアの差し引きに強く依存

TVM (Uemura+2015)

- ✓ 上と右下が明るい。
- ✓ 全体的に楕円
- ✓ 目立った残差成分なし
- ✓ 結果がパラメータに強く依存せず、安定

全変動最小化を使った ドップラートモグラフィ

- データサイズが小さく、マップがシャープなエッジをもつような場合に特に有利
 - MEMはなまらせる。
- 降着円盤に最適