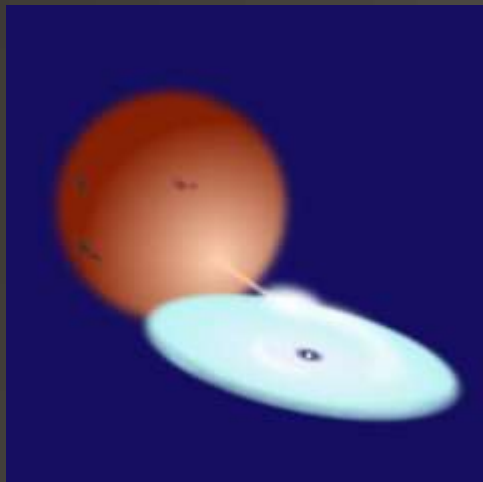


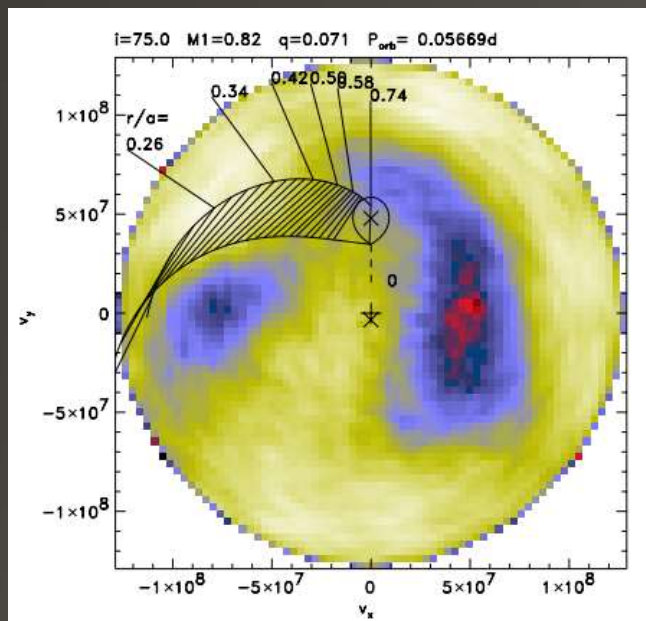


植村誠 (広島大学 宇宙科学センター)

@「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

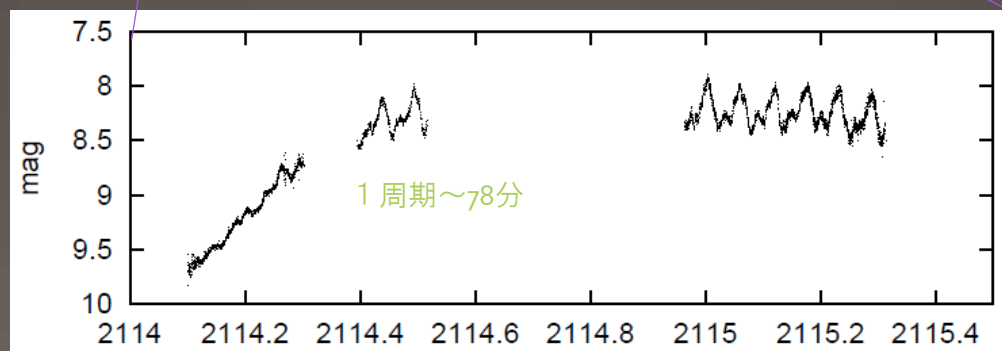
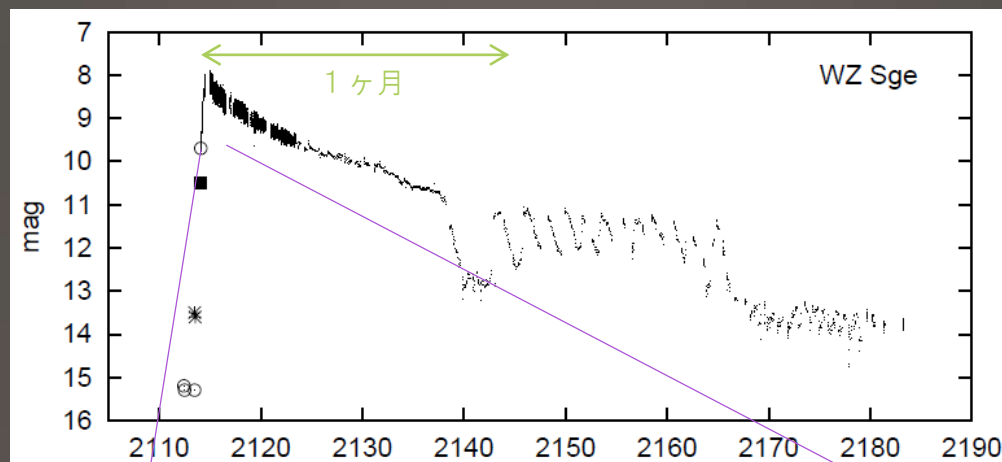
WZ Sge型矮新星



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)



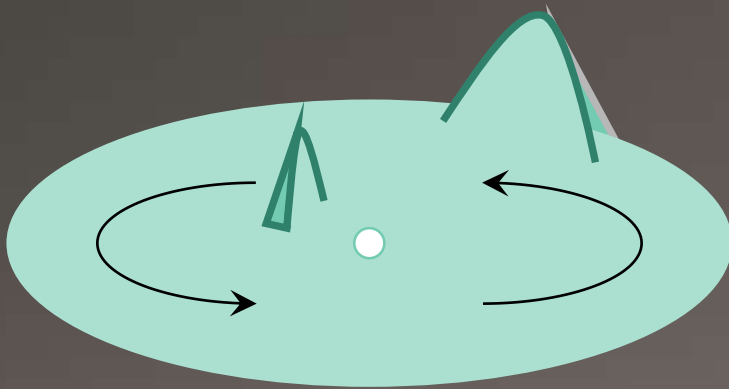
今日の話

- 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

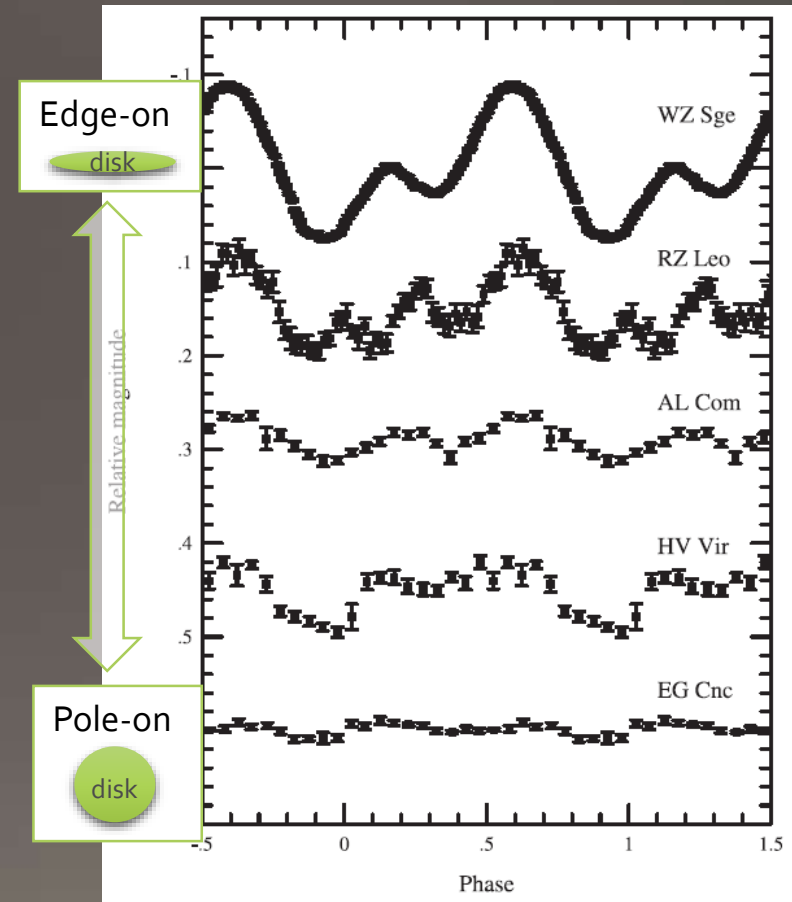
(時間はあるまりないので概要だけです)

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。



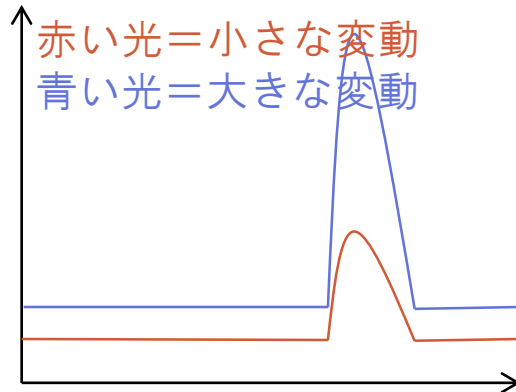
様々な早期スーパーハンプ (Kato, et al. 2002).
円盤を横から見る系では大きな振幅



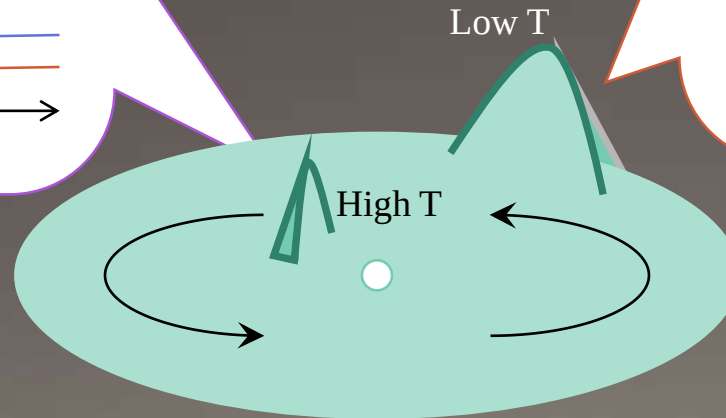
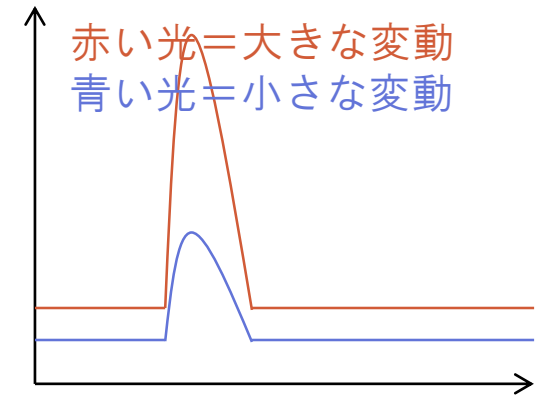
早期スーパーハンプを使った 円盤幾何構造の再構成

- ・ 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...



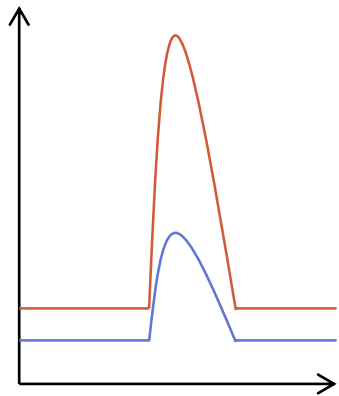
もし外側の低温部分が
膨らんでいたら...



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

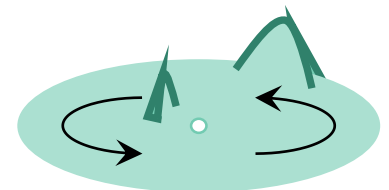
標準円盤モデルの温度分布 $T = T_{in} \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^{-3/4}$

or

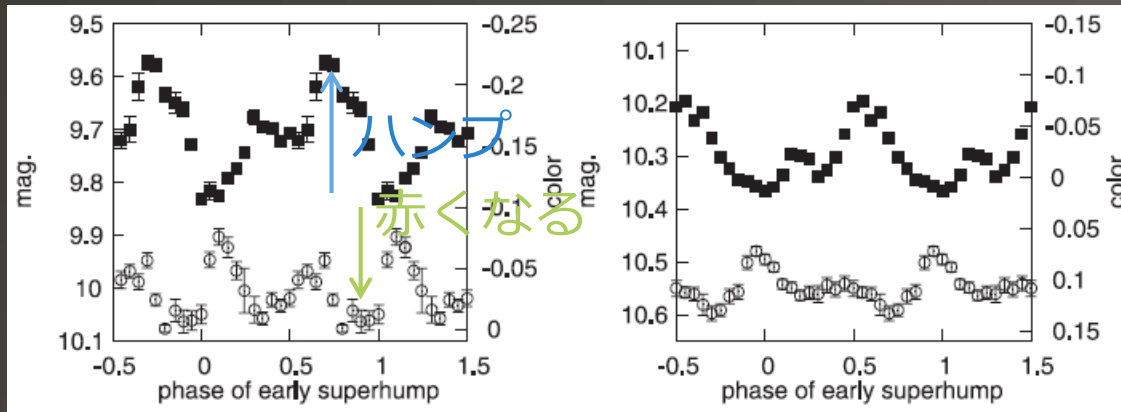
irradiation を考慮した非対称分布

出力

円盤の高度マップ



データ



- 矮新星 V455 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)



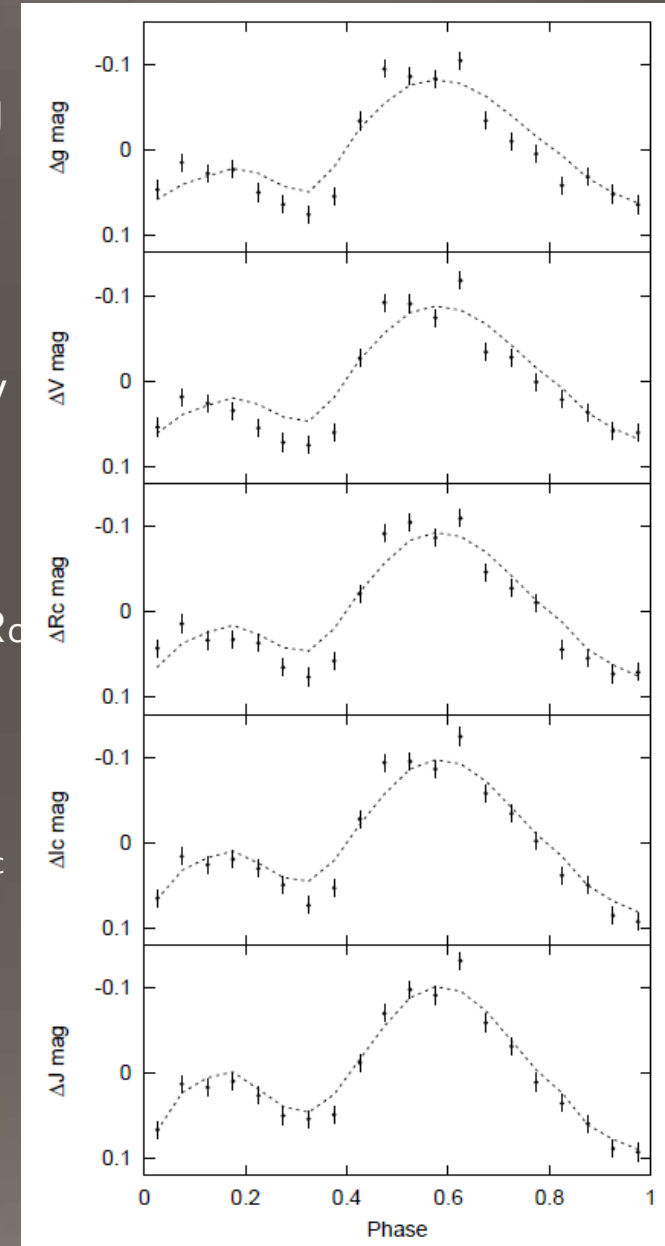
g

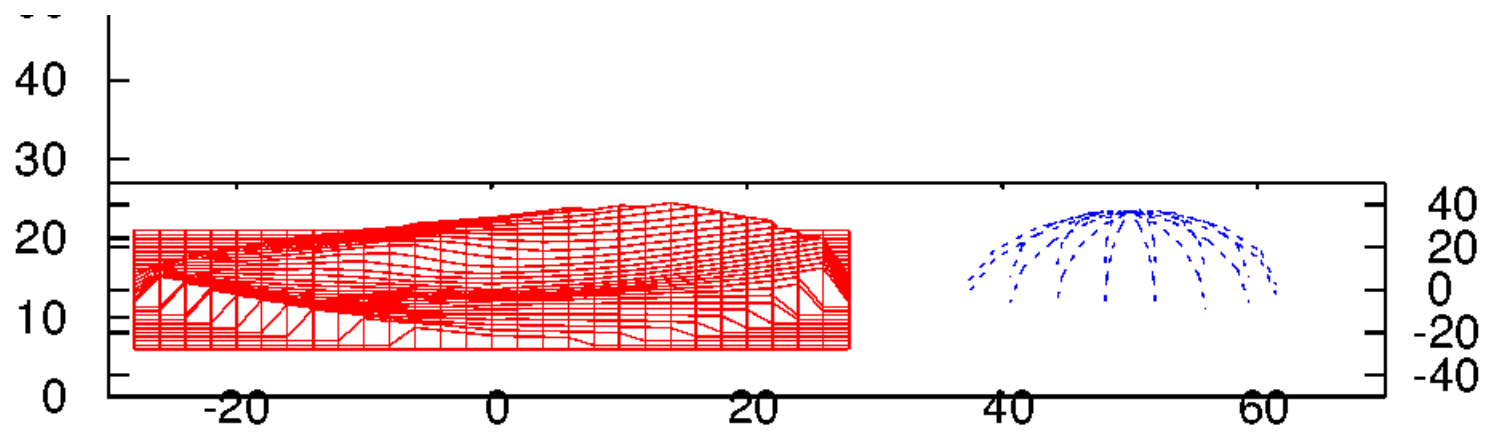
V

Rc

Ic

J

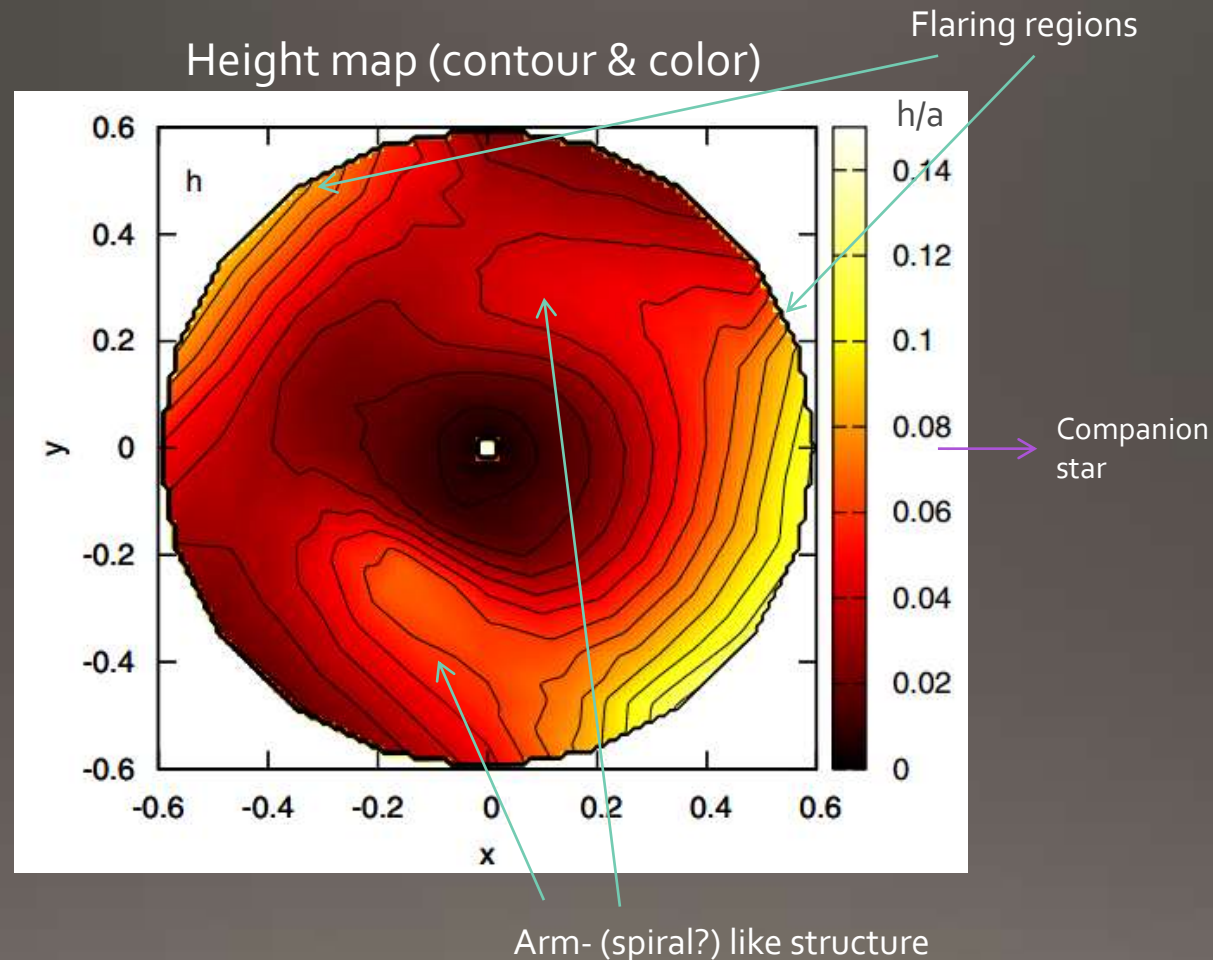
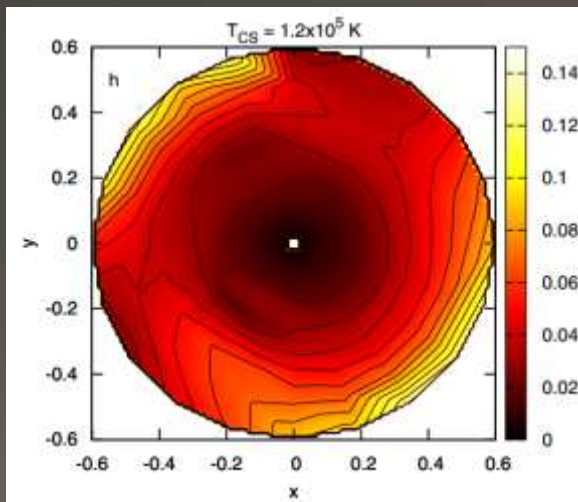




V455 Andのデータによる再構成結果

- 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

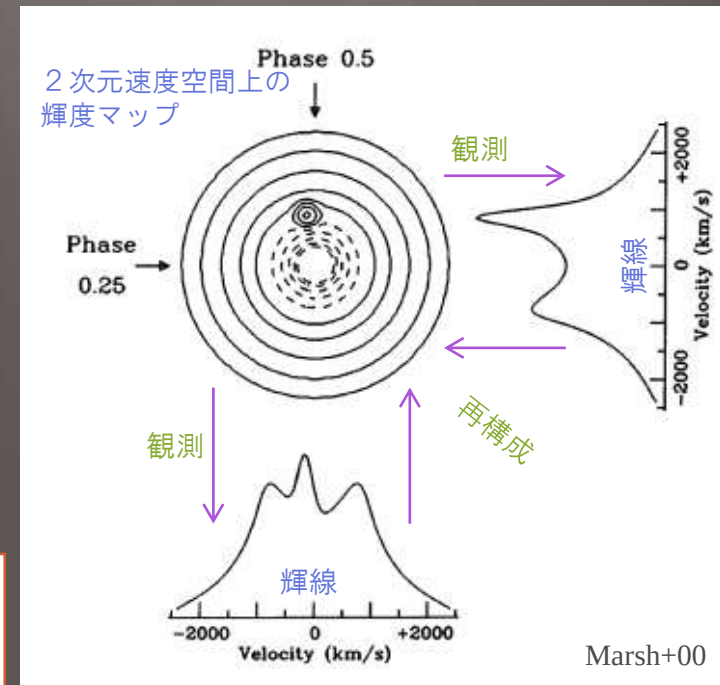
(Horne 85; Baptista+93)

- 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

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

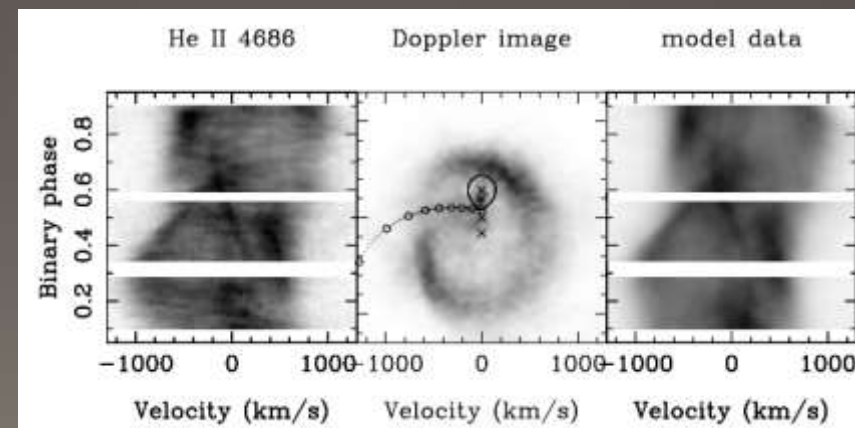
最小二乗法

罰則項
Ex. MEM, TVM



Marsh+00

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ーでは標準
- 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ーに最適なのか？

- 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

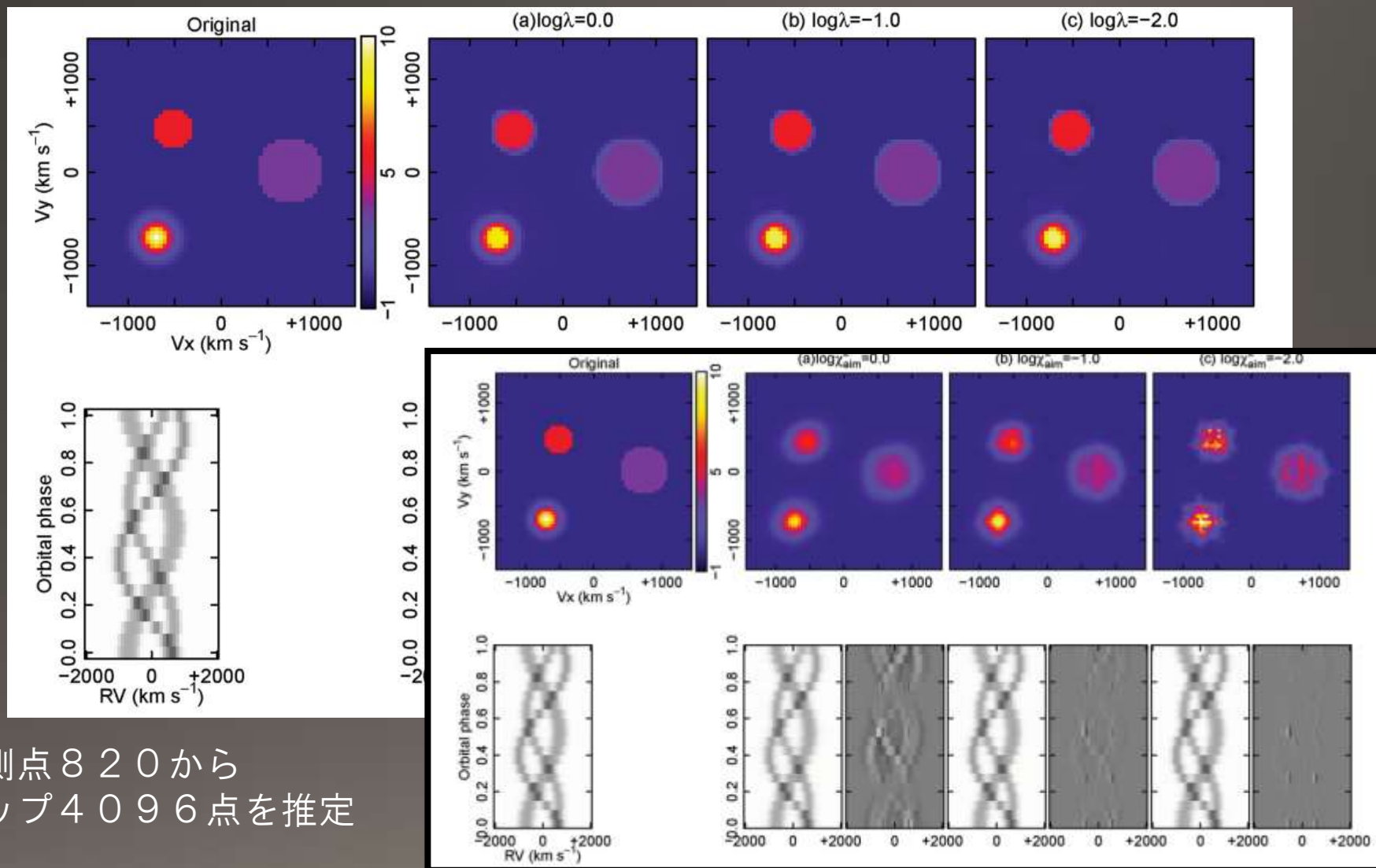
Total Variation Minimization (TVM)

- 1 次微分の 1 次ノルム
- 罰則項:

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

- Δx : 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

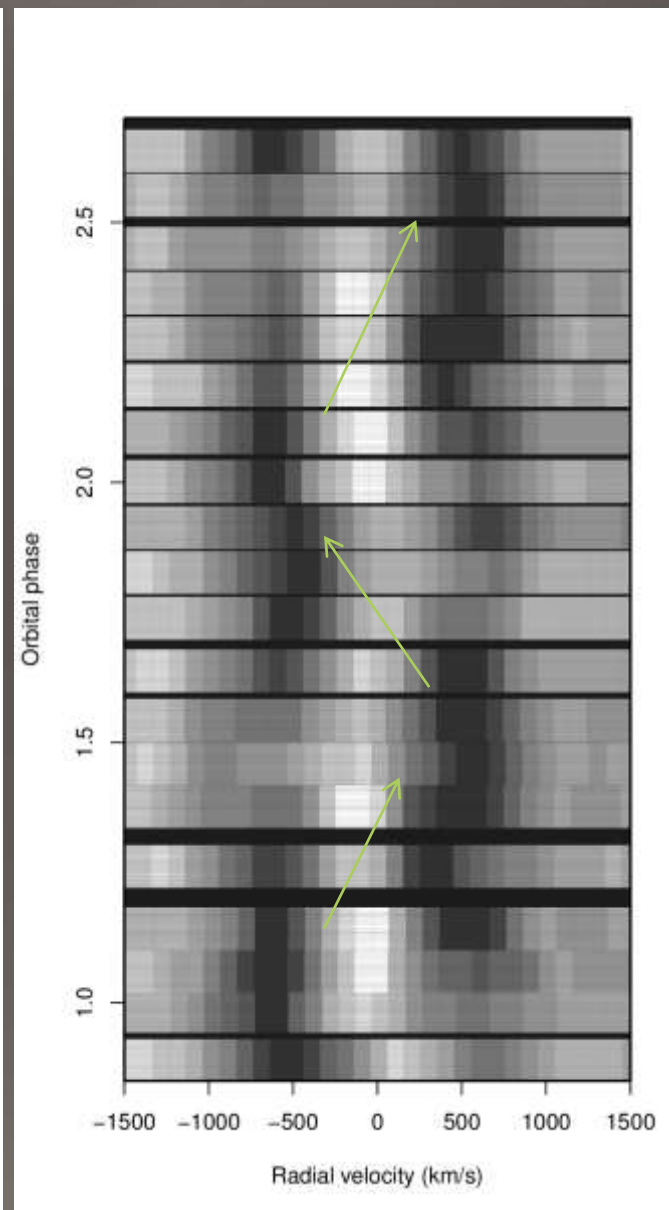
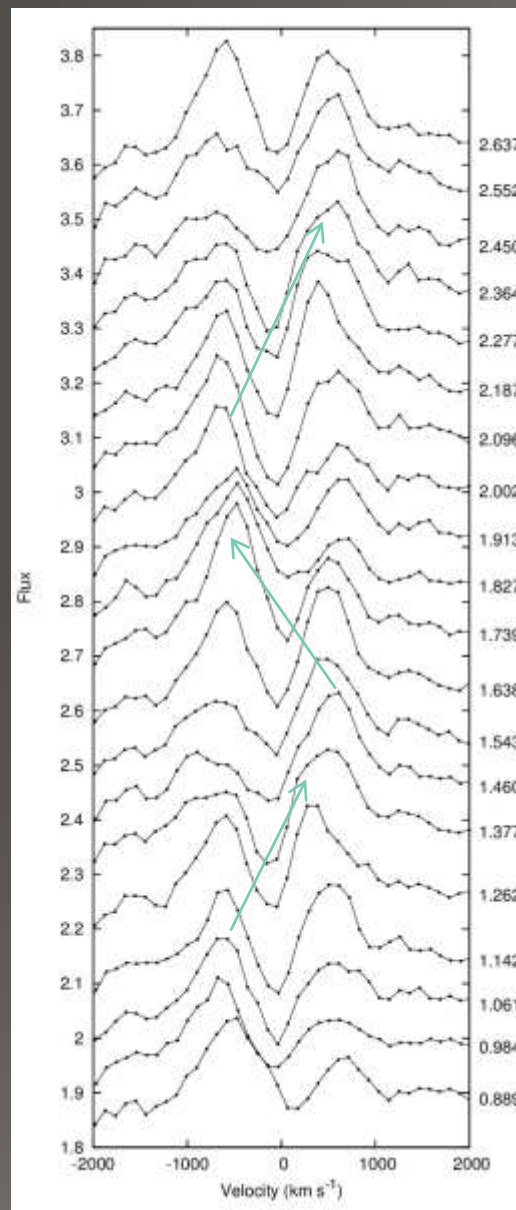


観測点820から
マップ4096点を推定

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 ($\text{H}\alpha$) 輝線の時間変化 (Nogami+04)



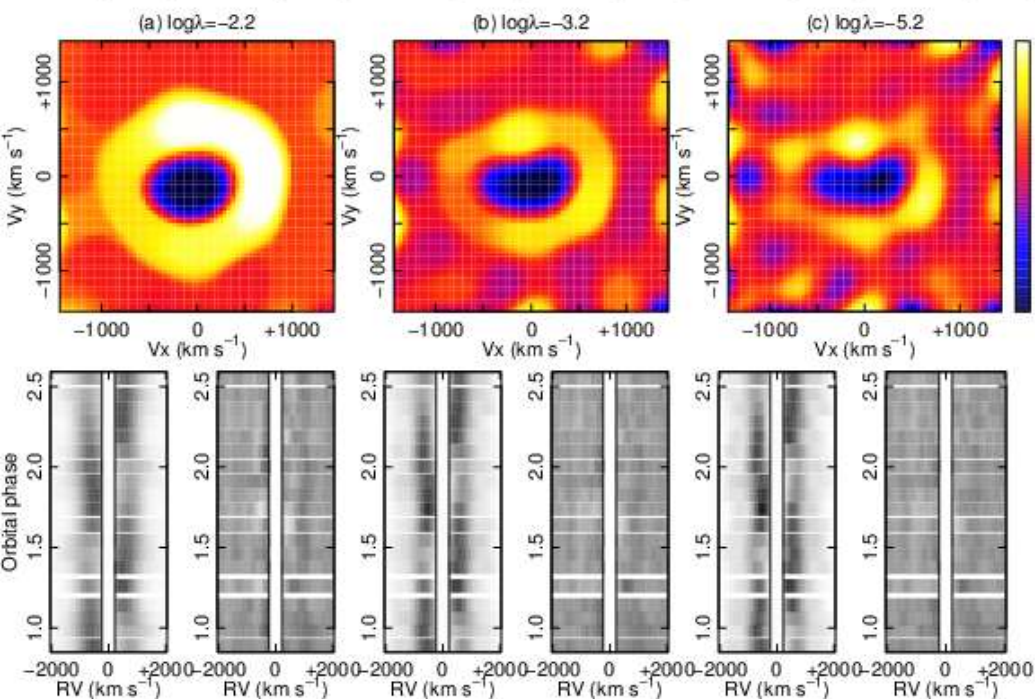
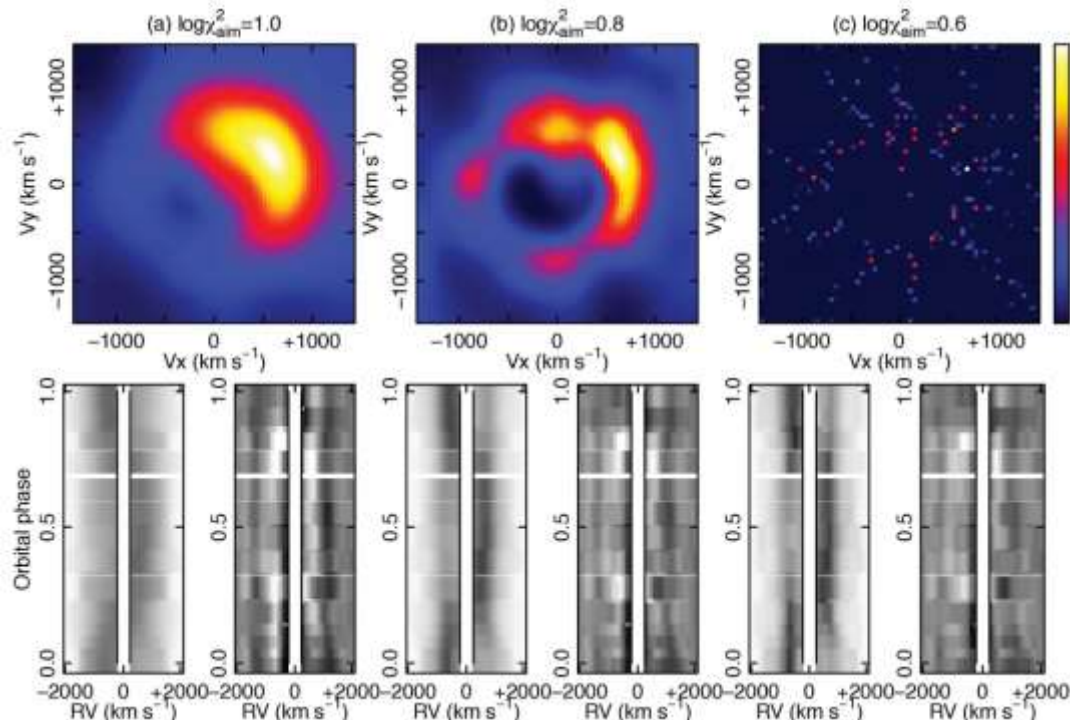
Doppler maps of WZ Sge

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

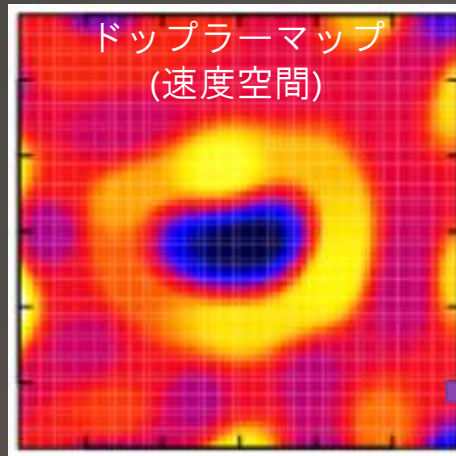
TVM (Uemura+2015)

- ✓ 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



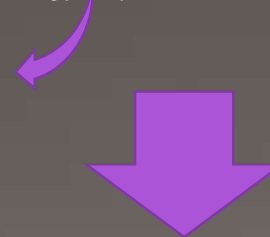
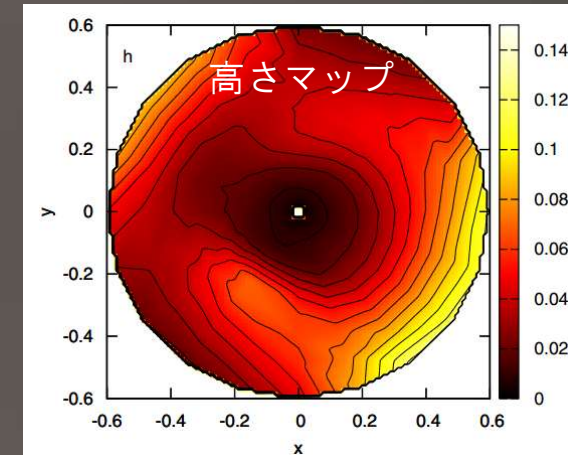
円盤の高さ構造と輝線マップを比較

- 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)
- 類似天体の類似アウトバースト時期



実空間上の速度場は制限三体問題の周期解を仮定

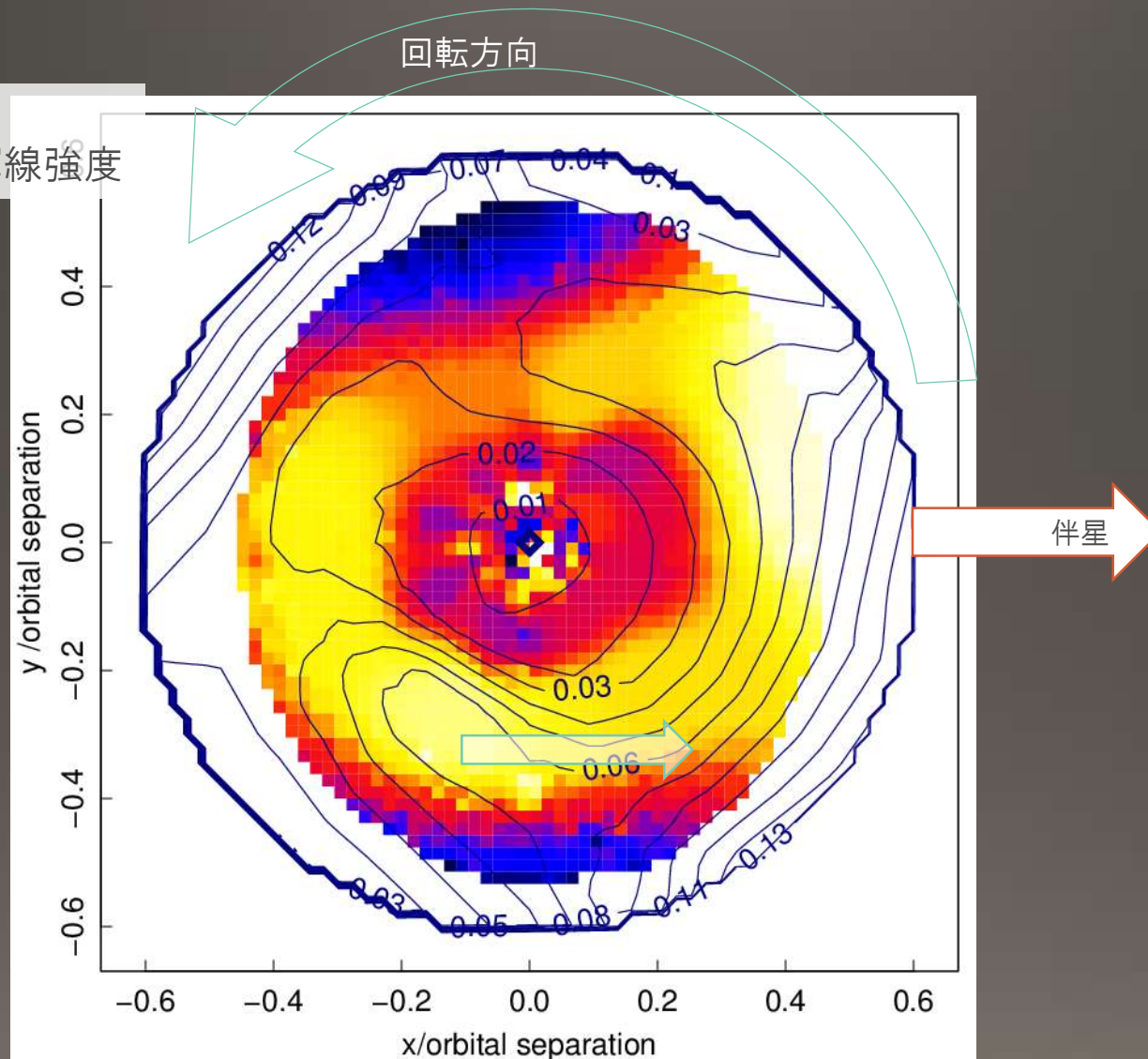
This text, in black, is located below the plus sign and points towards the height map. It translates to 'Assume the velocity field in real space is a periodic solution of the restricted three-body problem'.



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 $\neq$ 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？