

日韓VLBI大型観測事業で探る 星周縁の動的振舞い

今井 裕

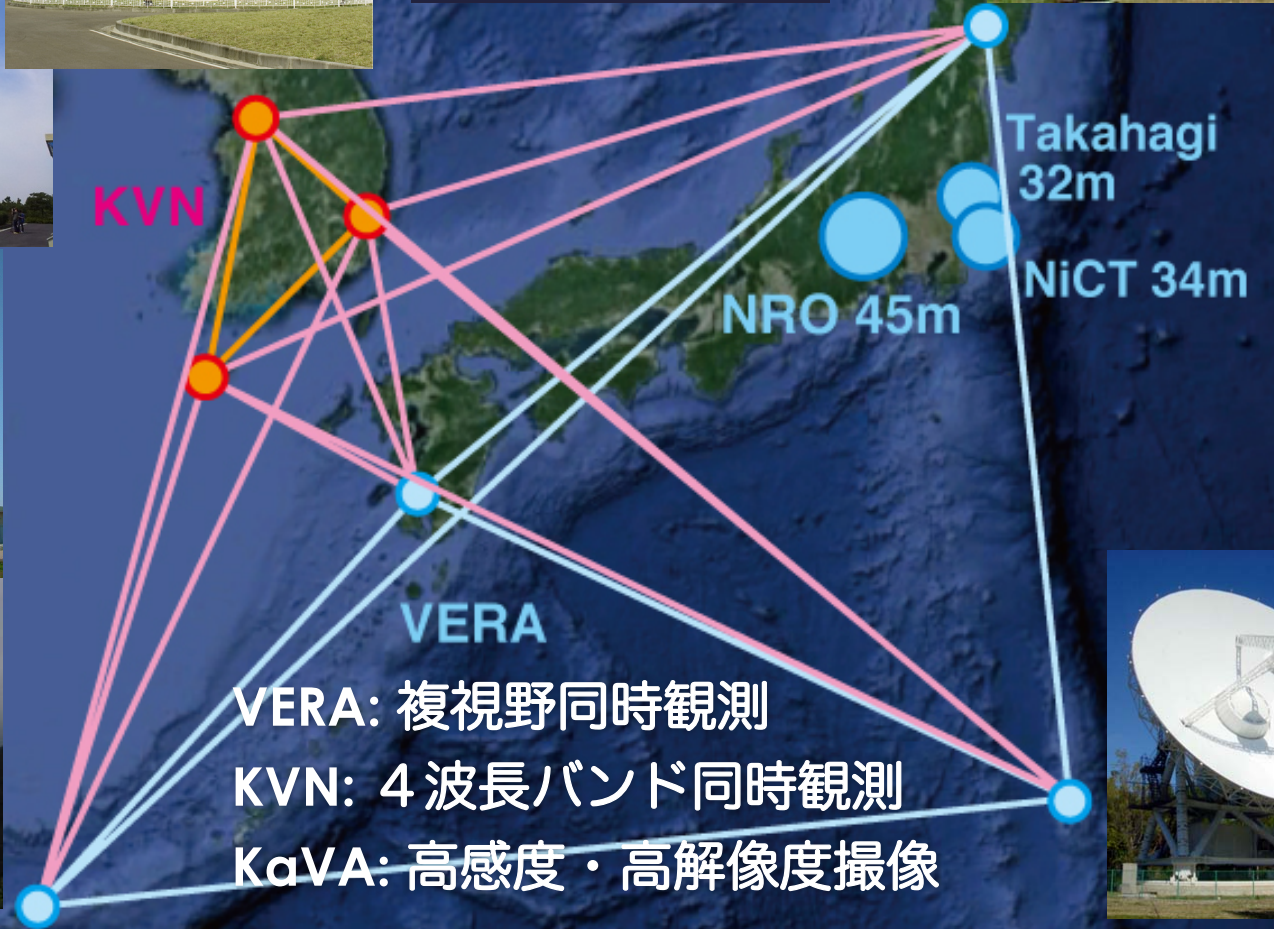
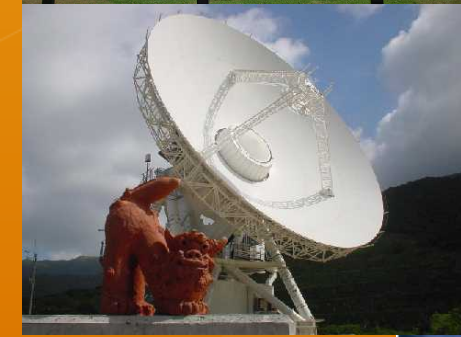
(鹿児島大学・

国際電波天文学共同研究推進室)

KaVA Evolved Stars sub-Working Group

ESTEMA team

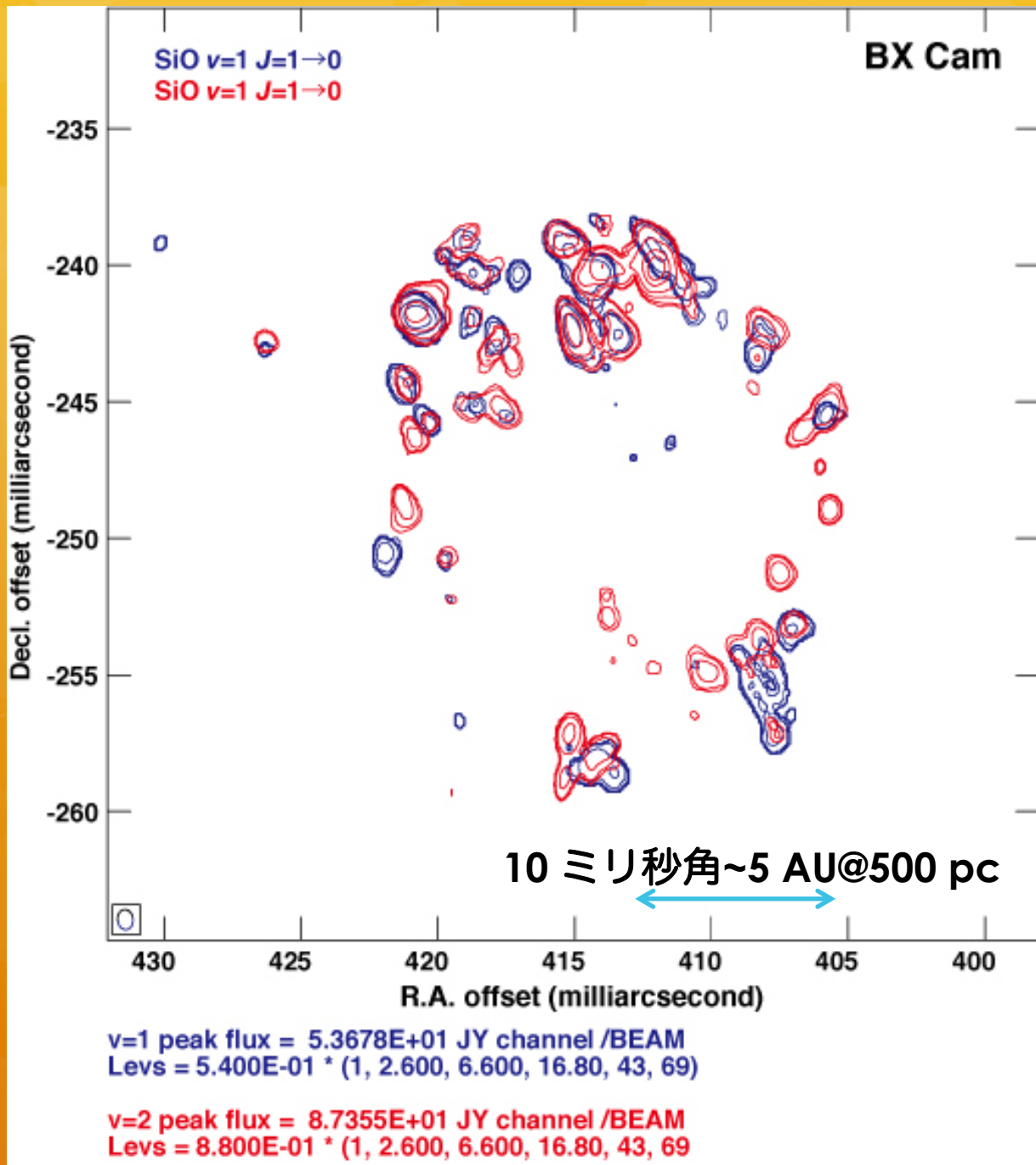
KVN and VERA Array (KaVA)



KaVAによる 星周メーザー撮像

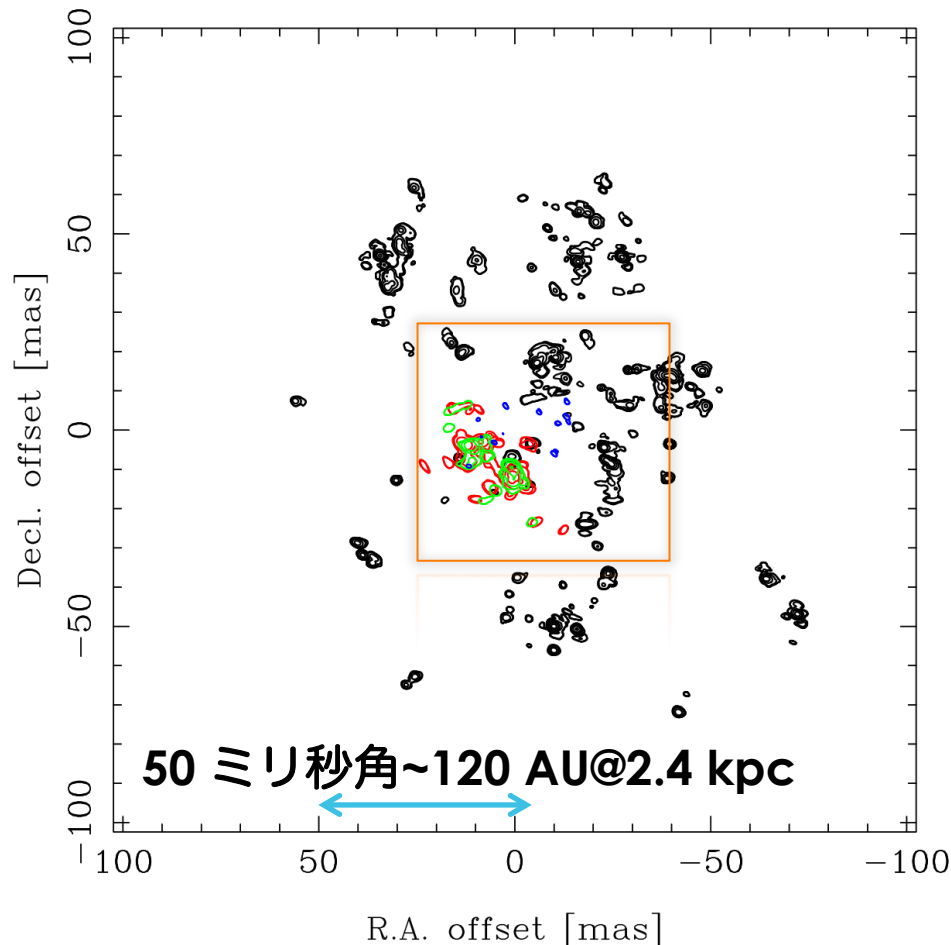


BX Cam
SiO ($J=1 \rightarrow 0$) masers
(Imai et al. in prep.)



3バンド同時VLBI分光撮像(KaVA+KVN)

S Per (Asaki et al. in prep.)

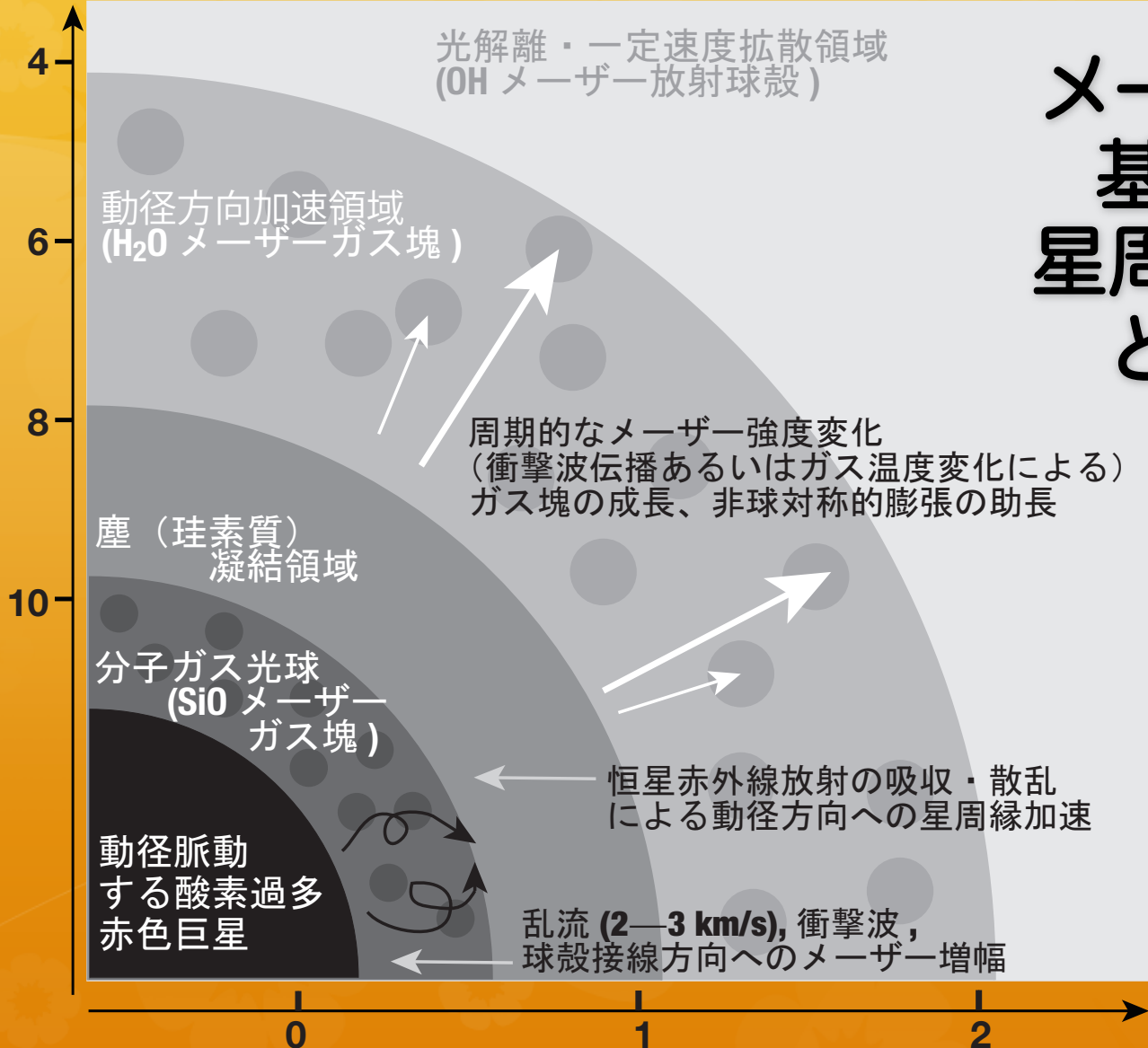


In preparation

H₂O (22GHz) **SiO J=1→0 v=1 (43GHz)** **SiO J=1→0 v=2 (43GHz)**
SiO J=2→1 (86GHz)

レーザー放射層と 基本的なAGB星 星周ガス縁の構造 との空間的關係

水素分子個数密度 [cm^{-3}] の対数



観測装置解像度

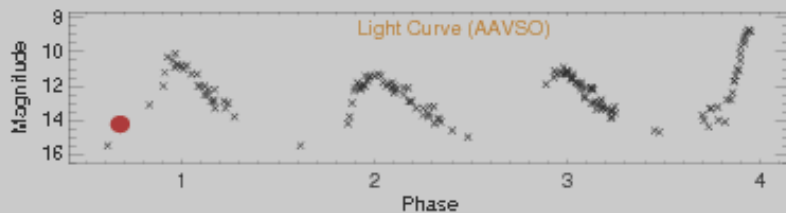
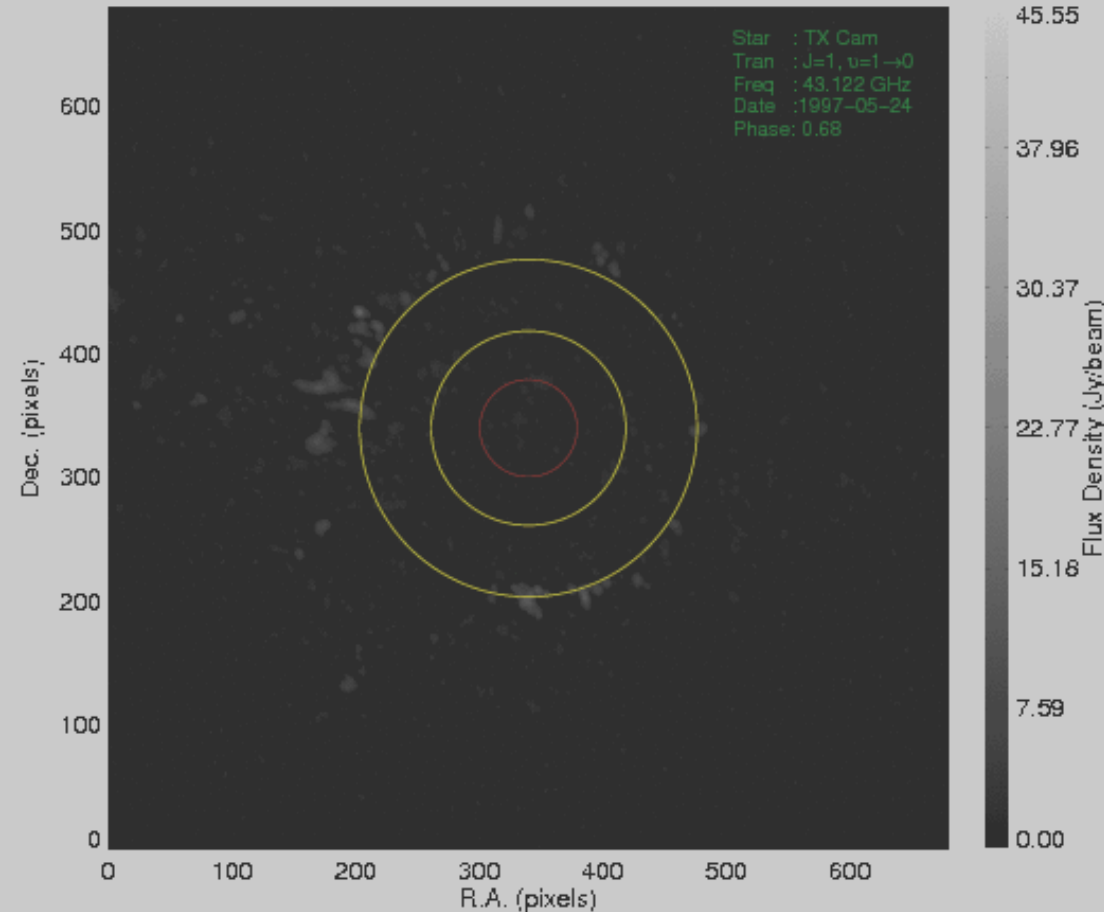
星中心からの距離 [AU] の対数

—— VLBI (H_2O 及び SiO レーザー観測)

———— VLTi (赤外線干渉計観測)

———— ALMA (ミリ波・サブミリ波の分子・塵放射)

KaVA 大型観測事業で実行したいこと



星周メーザーを使った 星周ガス縁運動の視覚化

- 膨張・収縮・対流・回転・
加速運動
- 実体運動と見かけ運動の分別
見たいもの

- メーザー励起の一部始終
 - 星内部対流によって
浮き上がり巻き上げられる
ガス塊
 - ジェットや枝状放出 (spurs)
 - 脈動変光衝撃波の伝播
- 一般公開で見せられる
電波動画を作る

SiO masers around TX Cam
(Gonidakis et al. 2014)

何故連続撮像?

測光をするならば周期の1/20くらいの間隔で
頻繁にやらないとね～ (by 竹内 峯 先生)

1 epoch

Movie of S Per H₂O masers (Asaki et al. in prep.)



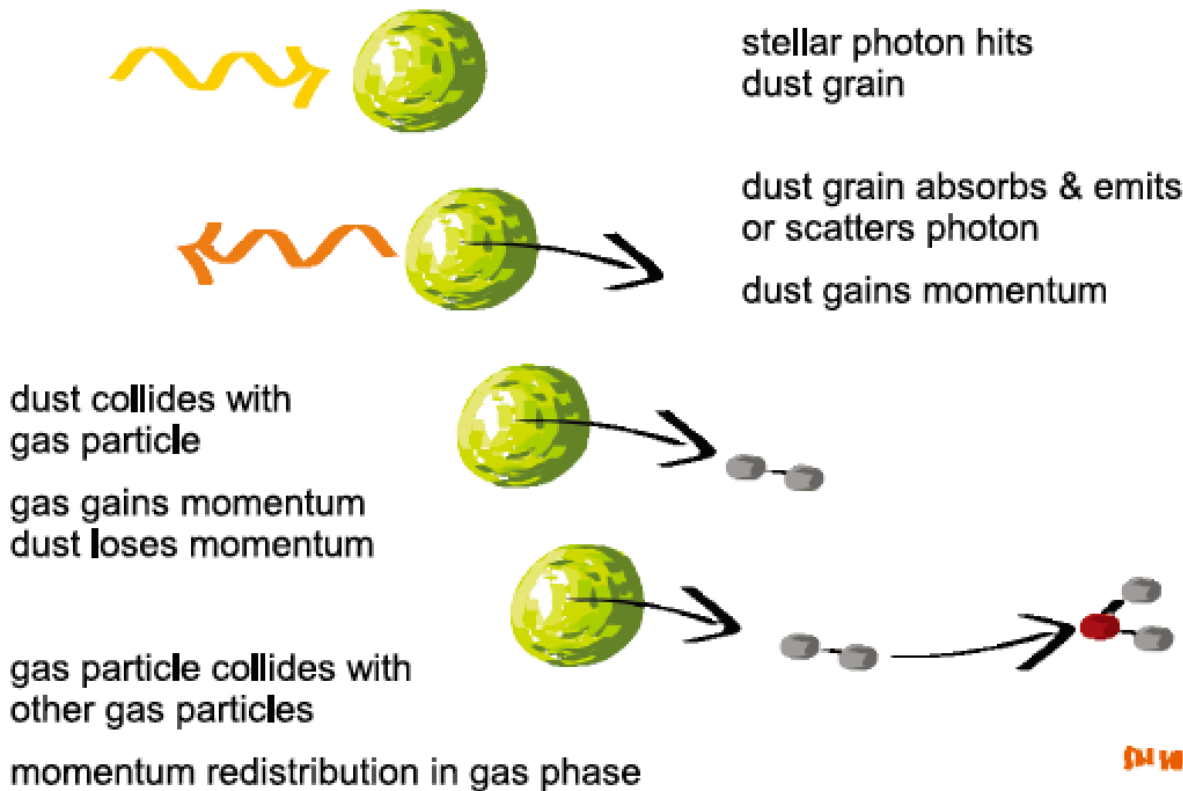
50 AU

メーザースポット運動の
誤認定の回避
Christmas tree 効果の同定
(メーザー励起領域の伝播)
衝撃波通過
(2-3カ月・加速+減速)
の検出

主な対象： ミラ型変光星
(周期300—1000日)

放射圧の起源と質量放出への影響力

Höfner (2011)



ミラ型変光星において
可視光線に見られる
大きな変光振幅は
TiO 分子の吸収
による？

(Reid & Goldston 2002)

❁ ガスの運動からダストの運動を探求する

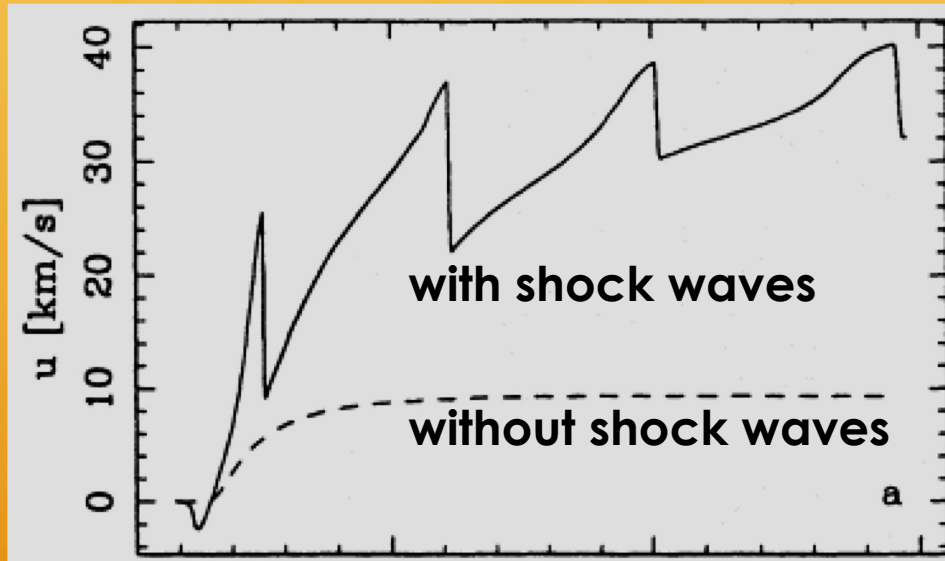
❁ ダストが増えれば放射圧が増大するはず ...

❁ **ダスト形成領域に凝固していない分子が多過ぎる！**

(Kaminski et al. 2013)

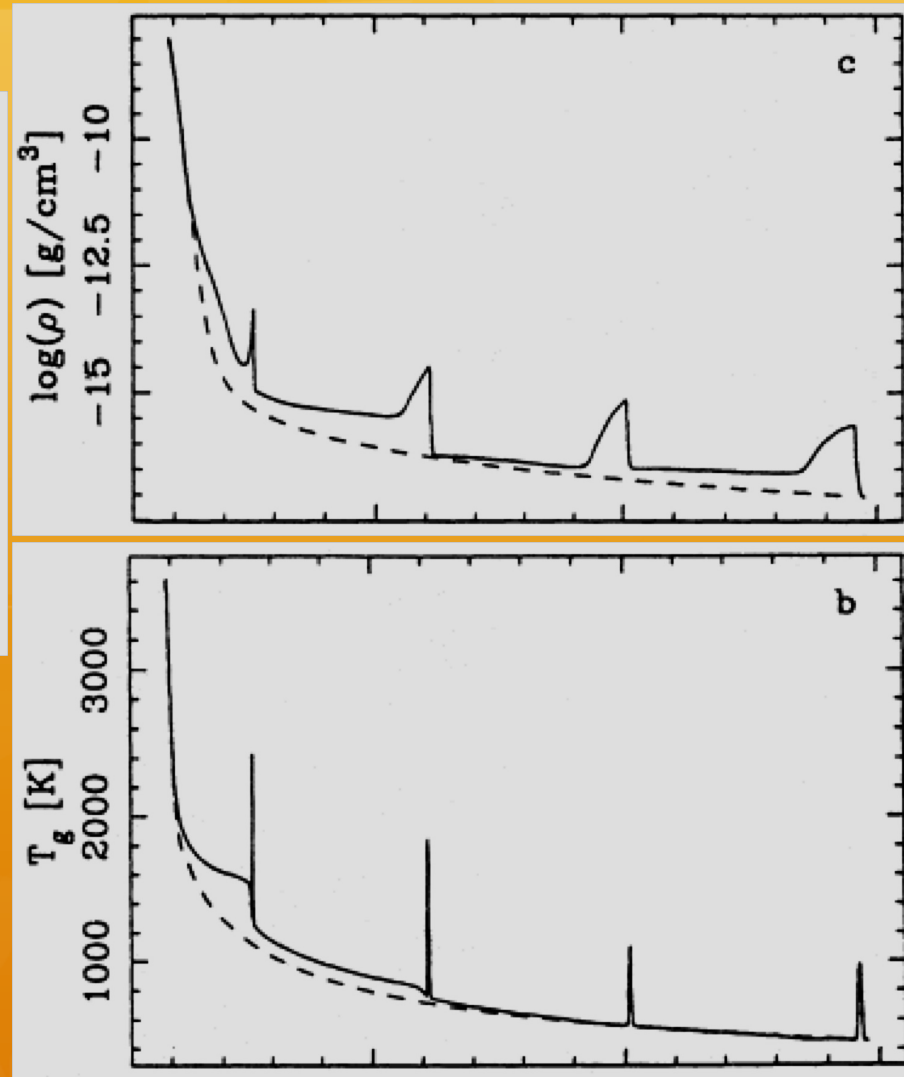
❁ **珪素系ダストは透明： 吸収ではなく散乱が放射圧を作り出す**

脈動変光が作り出す衝撃波の大きさは？



Distance from star (stellar radius)

酸素過多星のダストは透明だが、衝撃波ができる？



Shock waves in C-rich envelope Höfner et al. (1995)

同じ領域に見られる複数メーザー輝線は どうやって励起される？

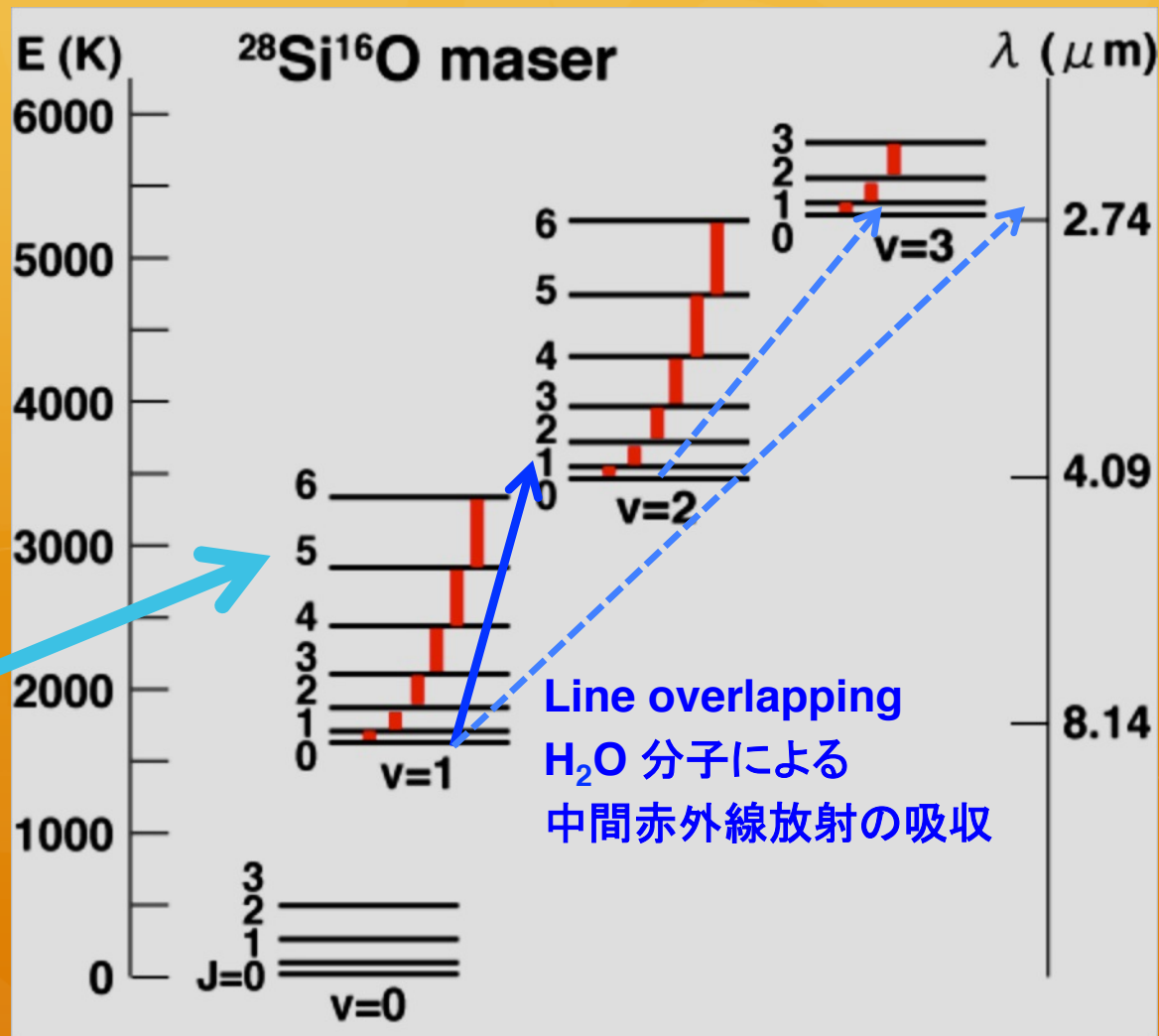
- 放射励起
(星・分子ガス・塵)
- 衝突励起(H₂分子)

SiO メーザー輝線
($J \rightarrow J-1, J=1, 2, 3, \dots$;
周波数 $\approx 43 \times J$ [GHz])

$$T_{\text{envelope}} = T_* \left(\frac{R}{R_*} \right)^{-2/5}$$

$$T_* \approx 3000 \text{ K}$$

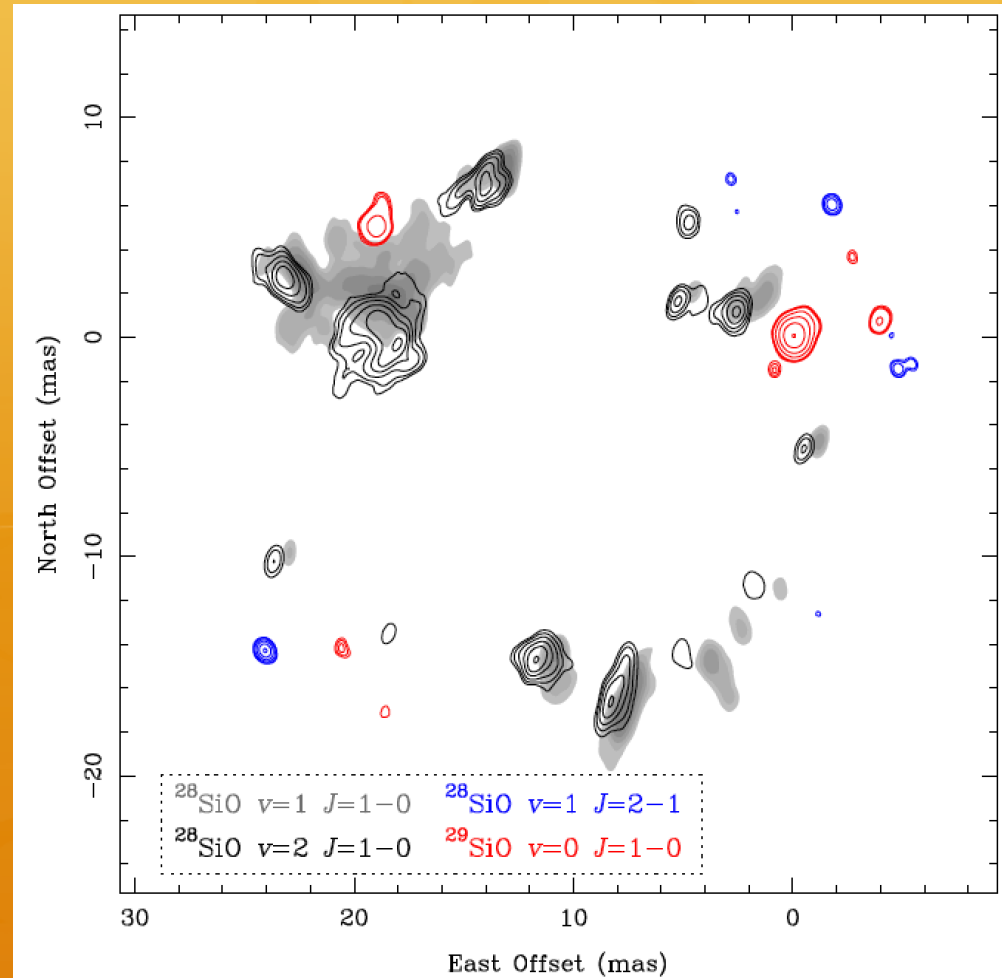
$$R_* \approx 1-10 \text{ AU}$$



異種レーザーマップの重ね合わせ

異なる振動励起状態ではなく異なる回転励起状態のレーザーで分布が重なる
高精度のアstrometri (VERA) or バンド間位相準拠(KVN)が必要

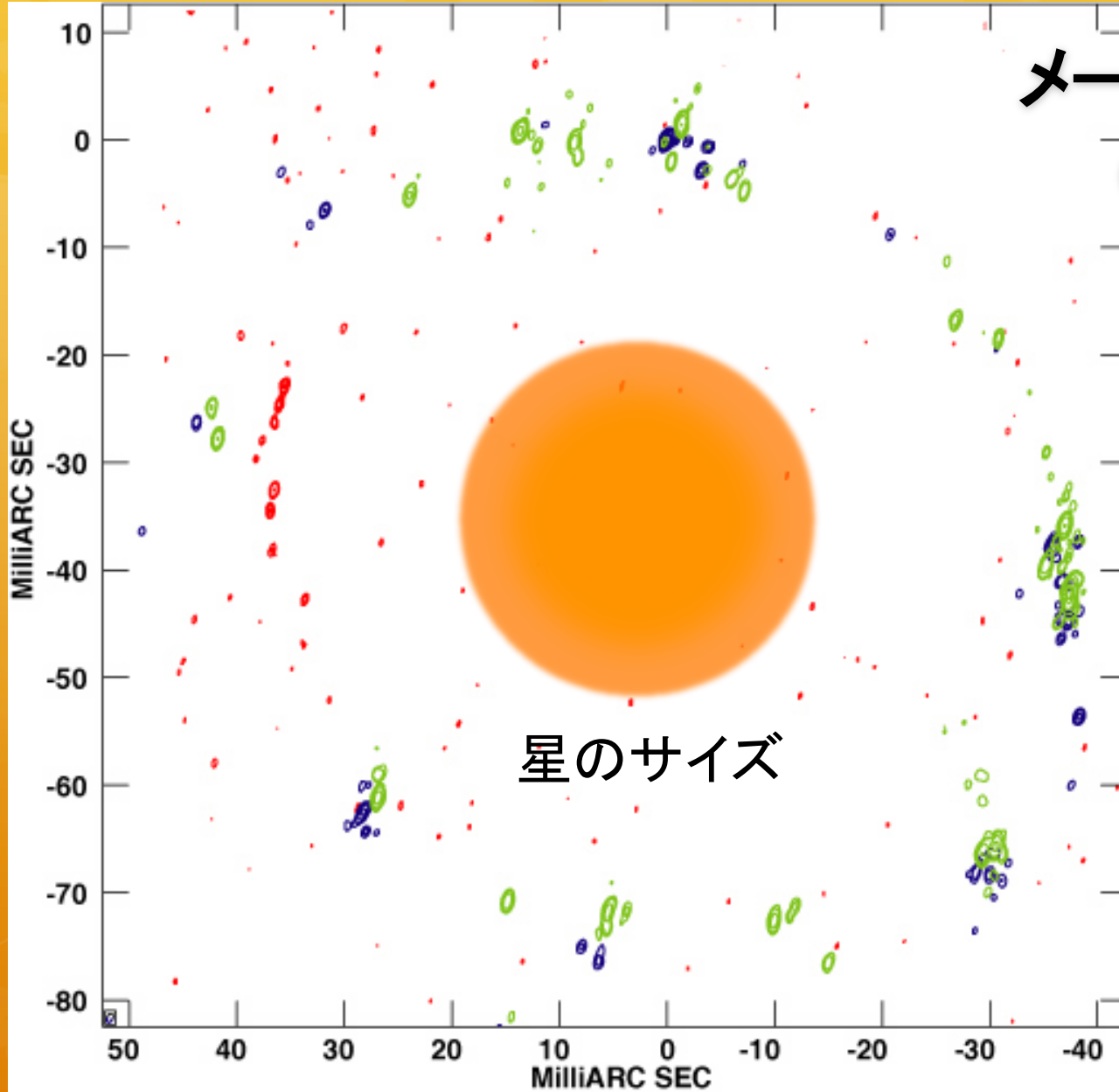
In preparation



S Per (Asaki et al. in prep.)

WX Psc (Soria-Ruiz et al. 2004)

メーザー励起条件 の時間変化



W Hya

On 2009 Feb. 27-28

(Imai et al. 2010)

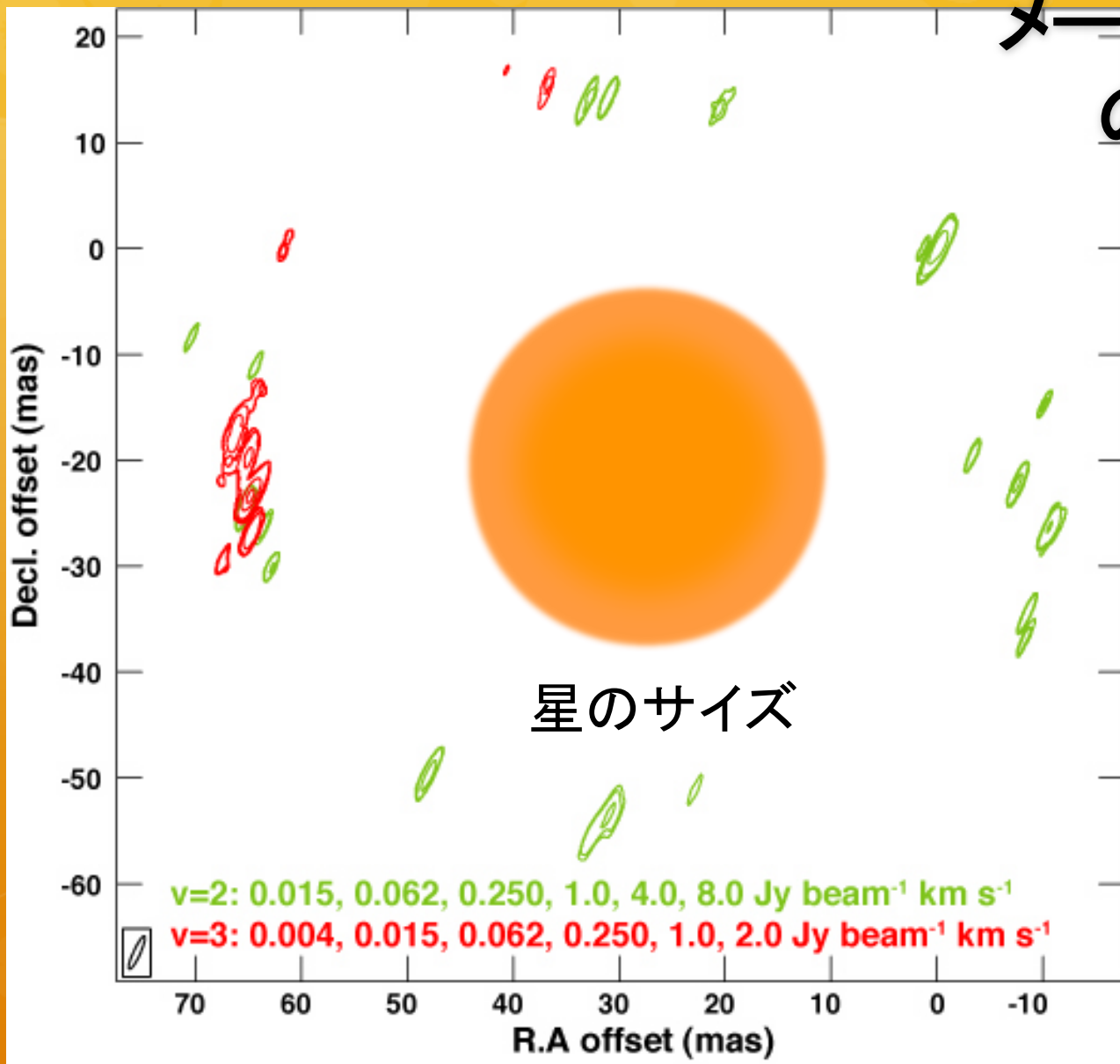
異種メーザーマップ
重ね合わせ誤差は
2 mas以内

SiO v=1, J=1-0: 0.43, 1.30, 3.91, 11.72, 35.15, 52.73 Jy beam⁻¹ km s⁻¹

SiO v=2, J=1-0: 0.44, 1.31, 3.94, 11.83, 35.47, 53.21 Jy beam⁻¹ km s⁻¹

SiO v=3, J=1-0: 0.02, 0.04, 0.08, 0.16 Jy beam⁻¹ km s⁻¹

メーザー励起条件 の時間変化



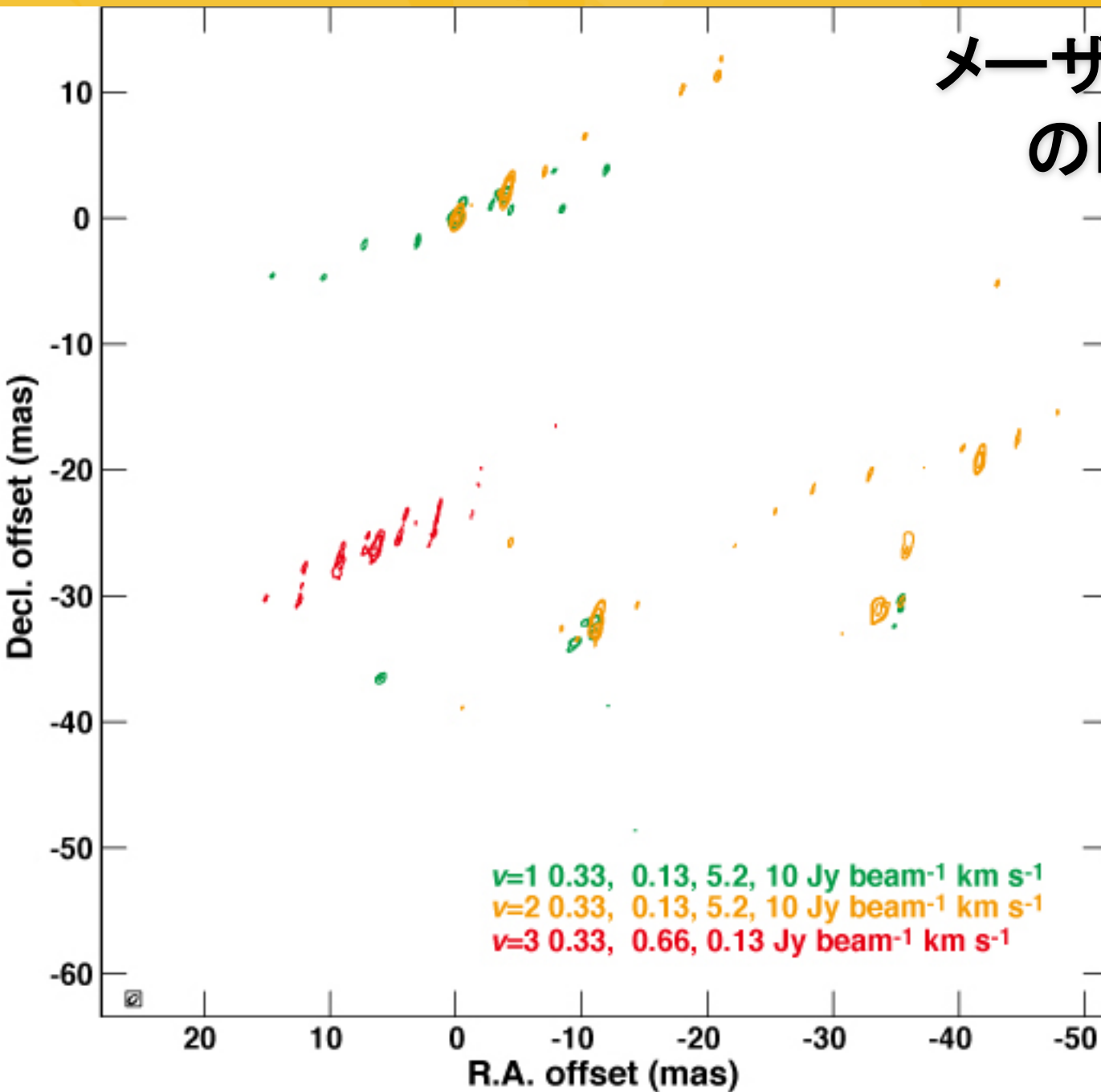
W Hya

On 2009 Apr. 11-12

(Imai et al. 2010)

異種メーザーマップ
重ね合わせ誤差は
2 mas以内

メーザー励起条件 の時間変化



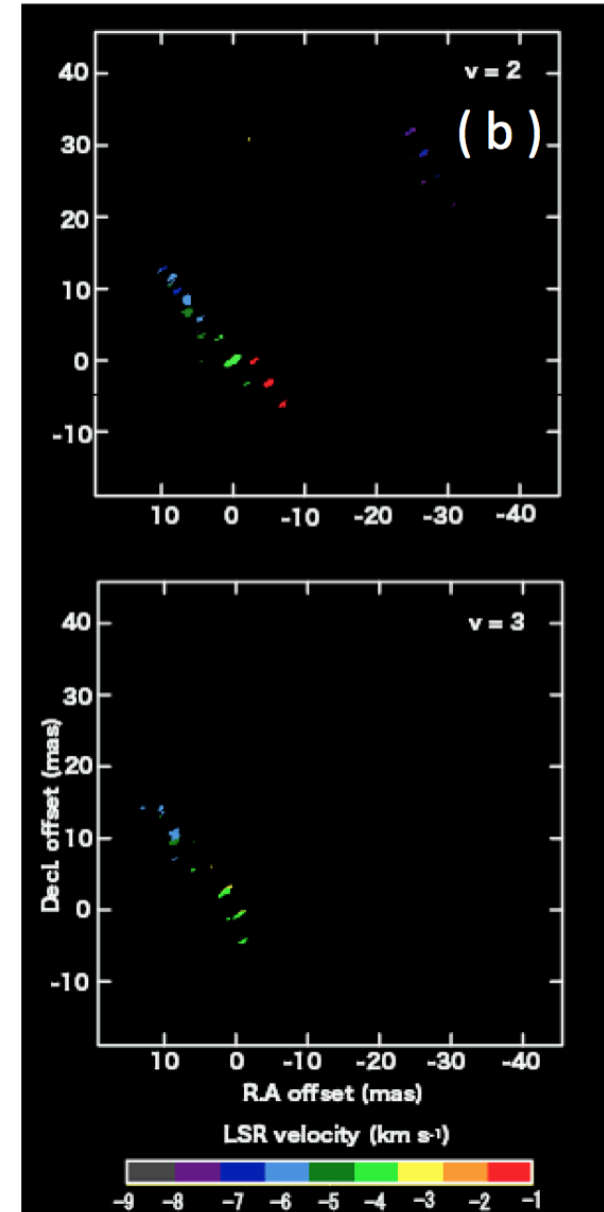
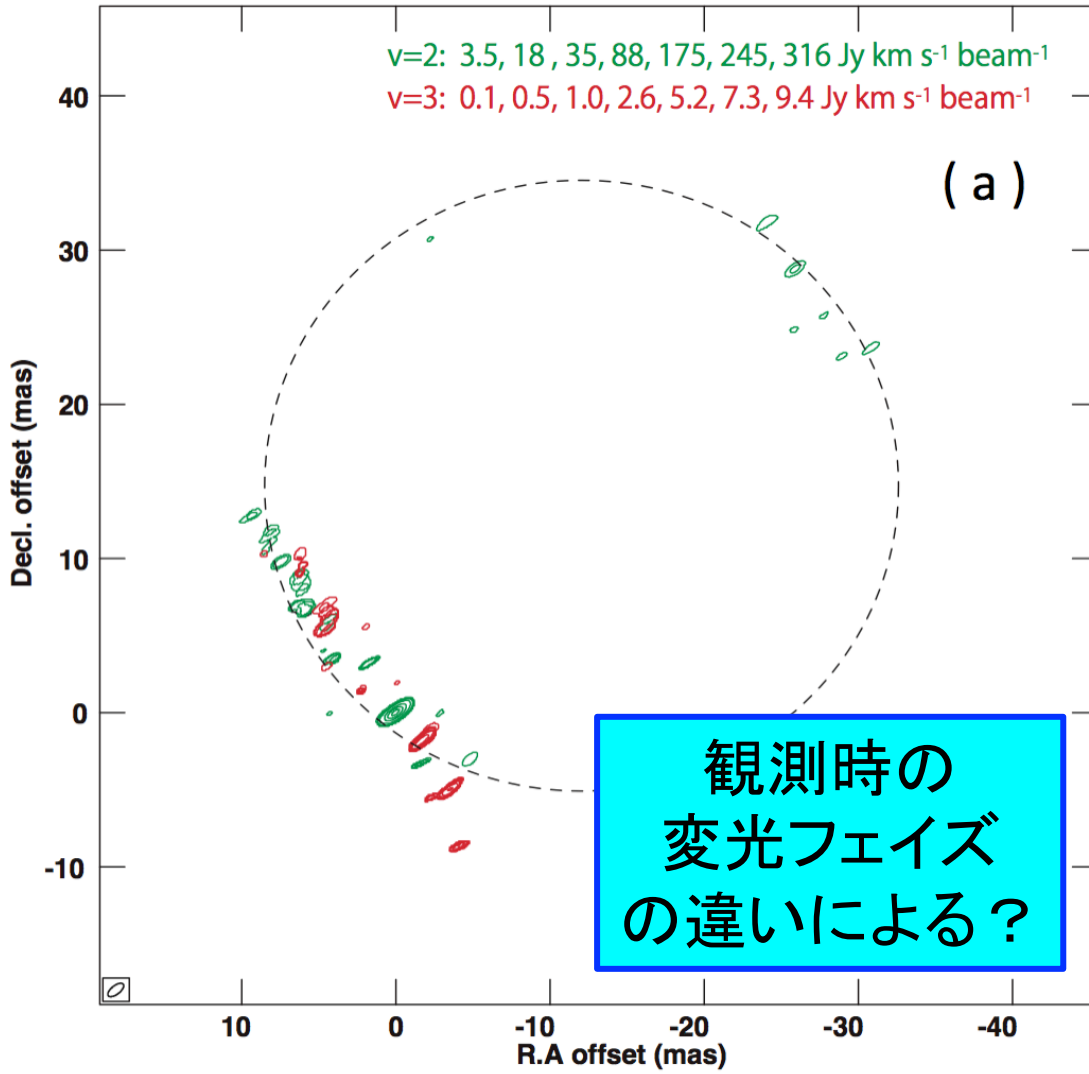
R Cas
(Imai et al. in prep)

観測時の
変光フェイズ
の違いによる？

メーザー励起条件の時間変化

T Cep

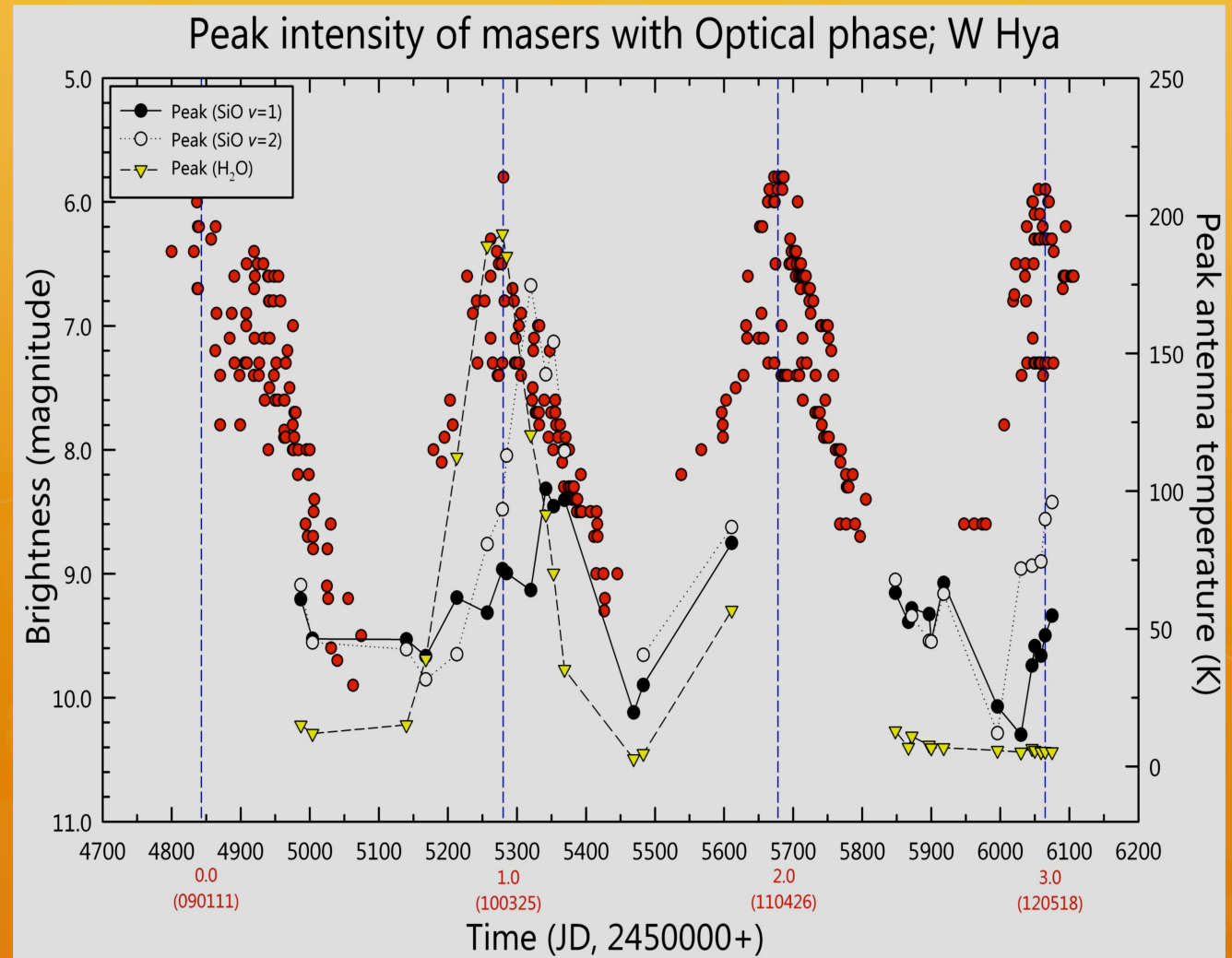
(Oyadomari et al. in prep)



周期的メーザー放射の強度変化

1. 周期的変光によるもの： メーザー領域の温度の変化
2. 周期的な脈動変光衝撃波の伝播

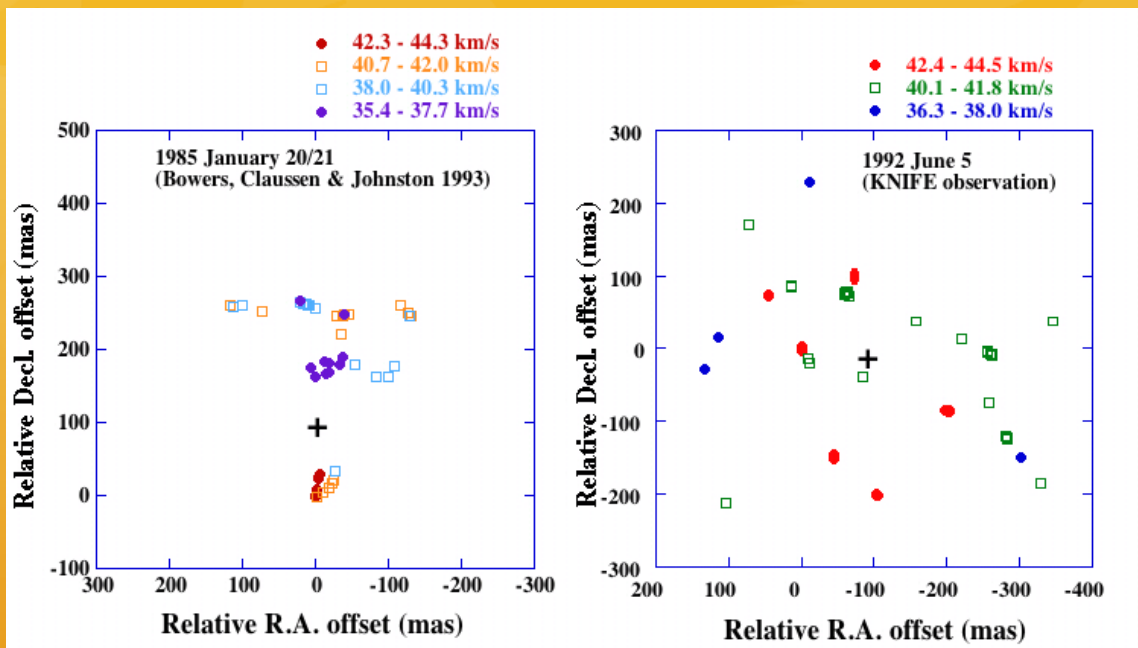
空間分布の
情報が必要



(Kim et al. 2014)

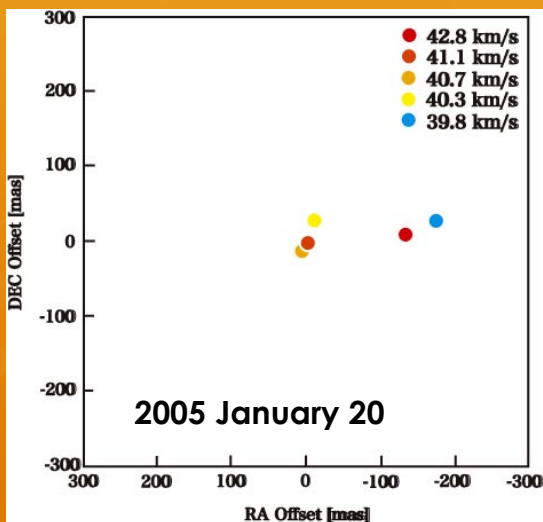
H₂O メーザー領域の物理状態変化を連続的に捉える

H₂O masers in W Hya

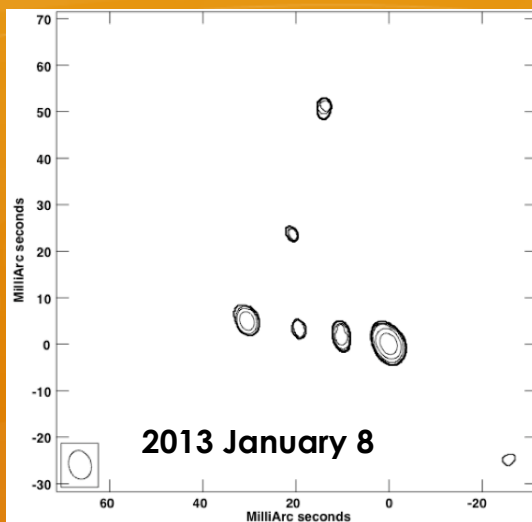


VLA (baseline 30 km)

KNIFE (200 km)



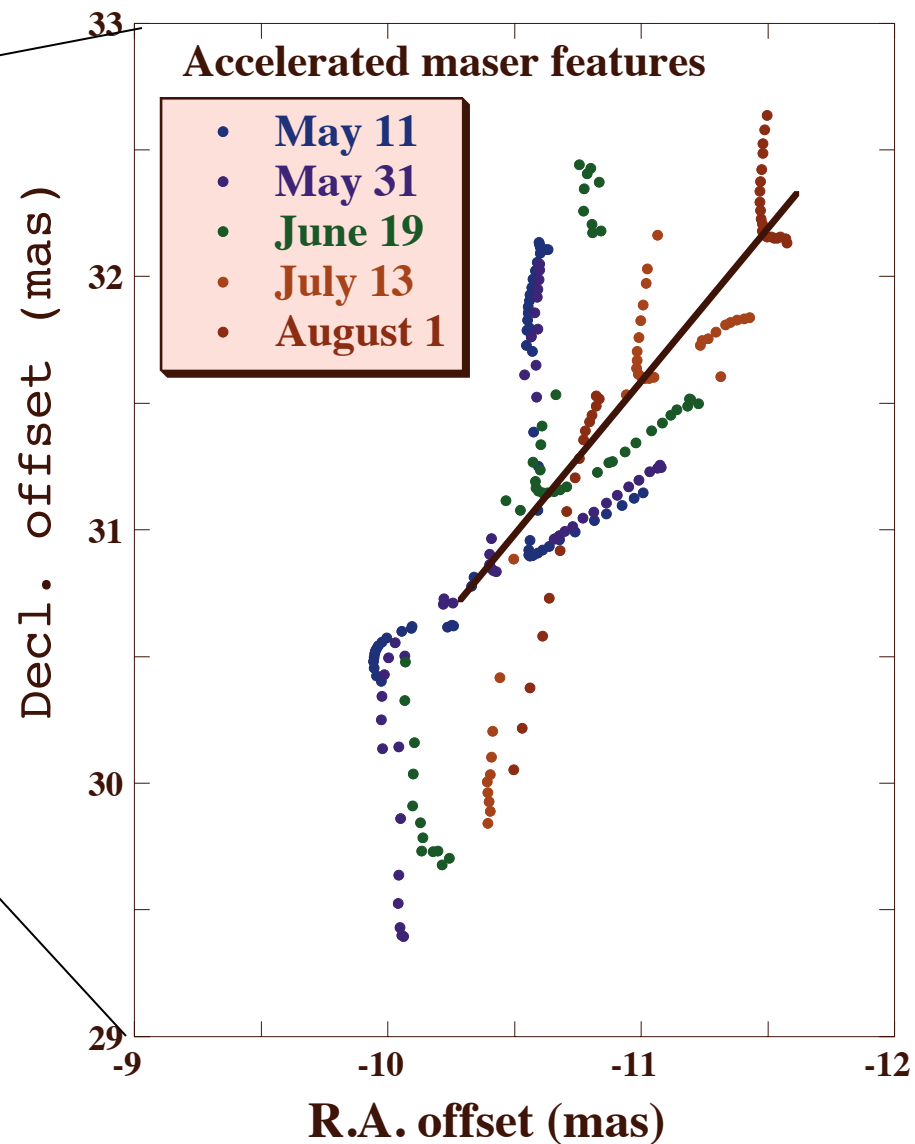
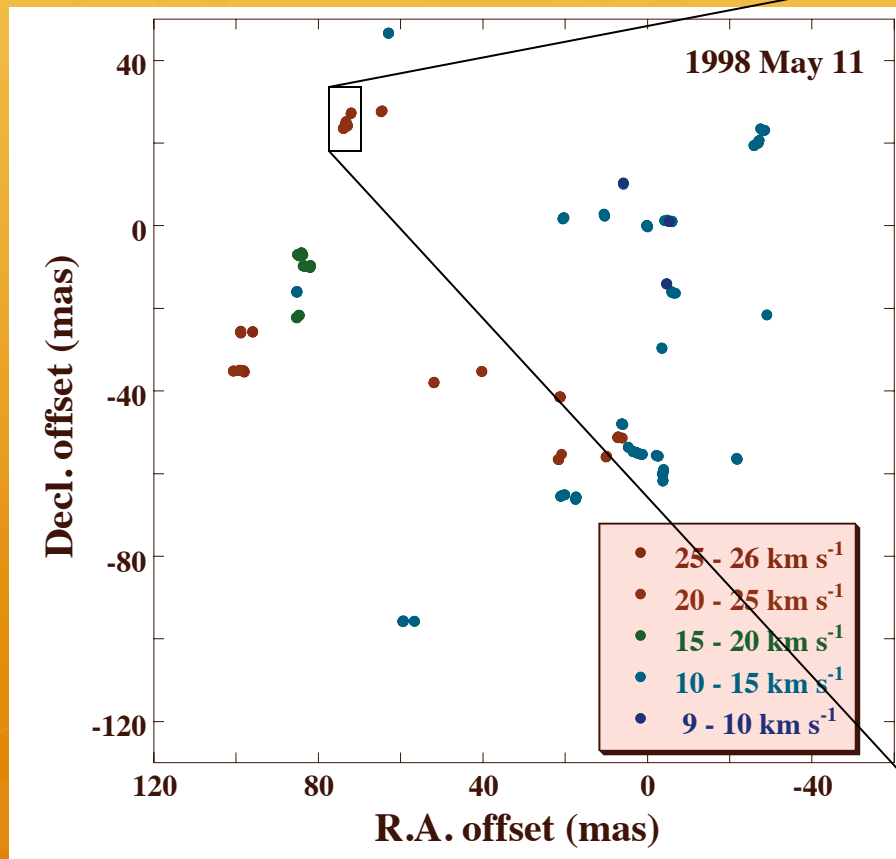
VERA (1000 km)



KaVA (400 km)

- ⚙️ 周期的?
- ⚙️ メーザー領域の発生/消滅の仕組みは?
 - ⚙️ 衝撃波通過
 - ⚙️ 脈動変光
- ⚙️ 変光周期以上の長期的変化の原因は?
 - ⚙️ 断続的質量放出
 - ⚙️ 連星系

H₂Oメーザー領域に見られた メーザーガス塊急速加速



RT Vir (Imai et al. 2003)

レーザースポット形状の時間変化を捉える

レーザービーム角

~

見かけのスポットサイズ

÷

レーザーガス塊
(maser features)サイズ

↓

衝撃波通過

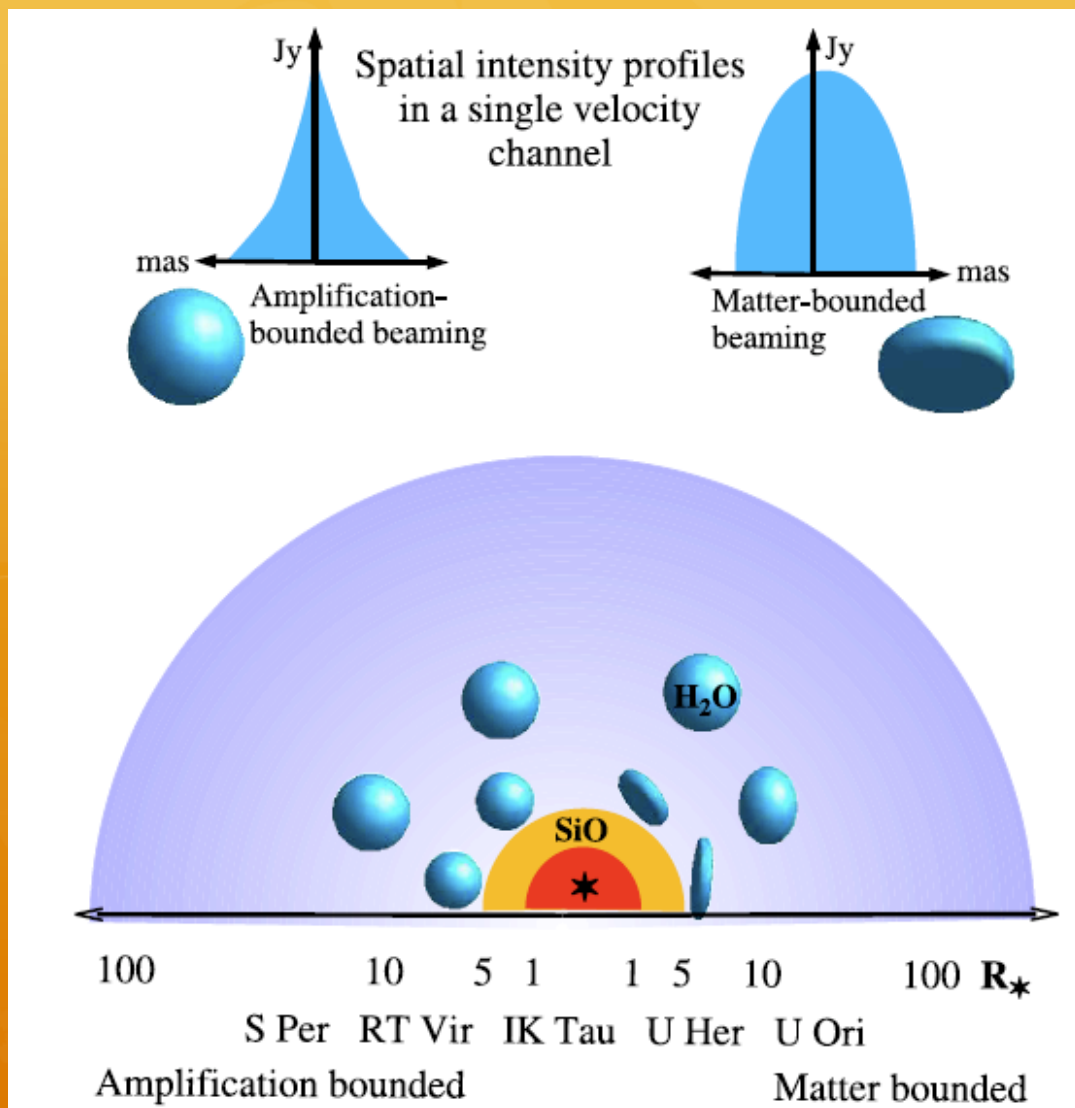
→matter bounded

or

弾丸状ガス塊

→amplification bounded

Richards (2010)



KaVA 星周メーザー大規模観測事業(2015—2025)

❁ 長周期変光星20天体のメーザー源観測を今後10年間

❁ **1/20変光周期**(2—12 週間に一度)毎に
2—3変光周期(最長10年間)にわたる連続電波撮像

❁ **SiO 7mm, 3mm, 2mm SiO及び 13 mm H₂O** メーザーの
同時観測 (完全同時+24時間以内に1バンドずつ)

❁ 年間500時間以内のKaVA望遠鏡時間

❁ 基本的な着想点

❁ 微視的 (メーザースポット, <1AU) から
巨視的 (星周ガス縁, ~100 AU) までを網羅的にカバー

❁ 星表面付近 (SiO) から星周縁加速領域(H₂O) まで

❁ 球対称的から質量放出からジェット放射まで

❁ 世界最大サンプル(**1回撮像80天体**、**モニター20天体**) に
基づく星周センチ波・ミリ波メーザー放射源の統計的研究

KaVA Large Program ESTEMA (Expanded Study on Stellar Masers)

Running during 2015—2016

**Hiroshi Imai^{1*}, Se-Hyung Cho^{2*}, Yoshiharu Asaki³, Yoon Kyung Choi²,
Jaeheon Kim², Youngjoo Yun², Richard Dodson⁴, Maria Rioja⁴,
Cheulhong Min⁵, Tomoaki Oyama⁵, Sung-Chul Yoon⁶,
Dong-Whan Yoon⁶, Dong-Jin Kim^{2,7}, Miyako Oyadomari¹,
Ross A. Burns¹, Gabor Orosz¹, Akiharu Nakagawa¹,
James Chibueze O.⁸, Andrey M. Sobolev⁹, Jun-ichi Nakashima⁹**

※co-PI

**¹Kagoshima Univ.; ²KASI; ³ISAS/JAXA; ⁴ICRAR/UWA; ⁵NAOJ/VERA;
⁶SNU; ⁷Yonsei Univ.; ⁸Univ. Nigeria; ⁹Ural Fed. Univ.**

KaVA ESTEMA (2015—2016)

- 連続KaVA撮像に適した星周メーザー源 (約20星) の探査
- 変光星80 天体のスナップショット撮像 (120時間×2年間)
 - H_2O , SiO ($v=1, 2, 3, J=1 \rightarrow 0, v=1 J=2 \rightarrow 1, v=1 J=3 \rightarrow 2, {}^{29}\text{SiO } v=1 J=1 \rightarrow 0$)
 - 約40星の星周メーザー源マップの獲得
- 統計的分析
 - 微視的描像 ($\sim 0.1 \text{ AU}$) から巨視的描像 ($\sim 100 \text{ AU}$) まで
 - 個々のメーザーガス塊から星周ガス縁全体まで
 - 異なる変光周期・恒星進化段階の間に見られる相関
- Phase-2 (2017~?)連続KaVA撮像につなげる
 - VERA: 年周視差計測 (KaVAで実行)
 - ALMA Cycle-5 Large Projectの提案?
 - Nano-JASMINEとの連携: 中心星との相対位置

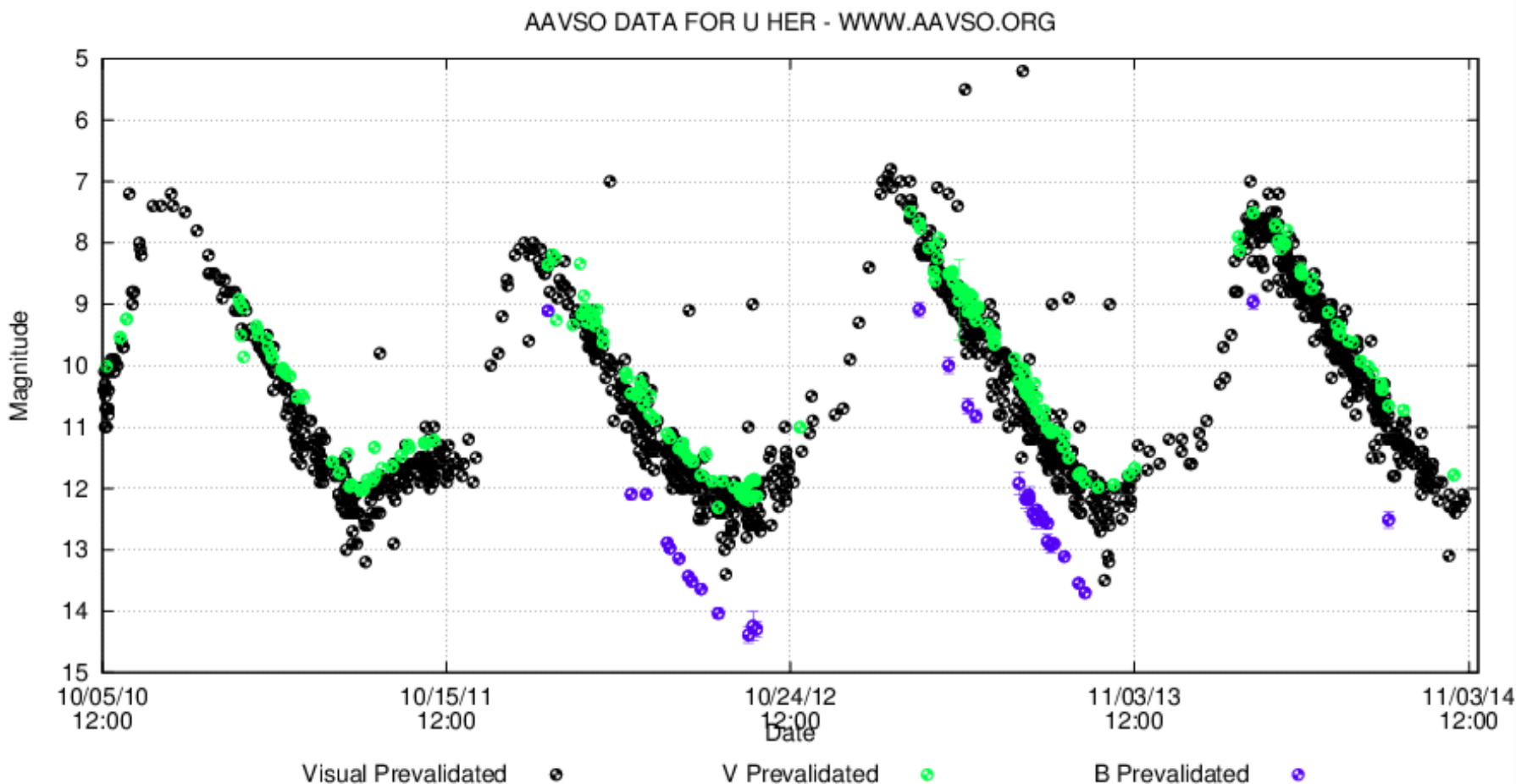
KaVA ESTEMAの科学的目標

— 過去最大の星周メーザー源の統計的分析 —

1. 微視的描像: 個々のガス塊 (0.1—1 AU)の構造
 - スパー・弧状構造: Matter- / amplification-bounded maser?
2. 巨視的描像: 星周ガス縁の構造及び速度場
 - 中心星(\approx SiOメーザー環中心) に対するSiO、 H_2O メーザーの分布
 - 動径方向への加速の大きさ、非等方的ガス放出流
 - 力学的時間尺度や質量放出率の導出 (可能であれば)
3. 変光周期・変光位相と上記メーザーの特徴の相関
 - 周期的なメーザー放射の振舞いの解明
 - 特徴的構造の出現と消滅の傾向の把握
4. 星・星周ガス縁の物理状態と上記メーザーの特徴の相関
 - 星周ガス縁のSED、恒星の光度、スペクトル型との相関
 - 恒星進化段階との相関

可視光・赤外線測光・分光観測との連携

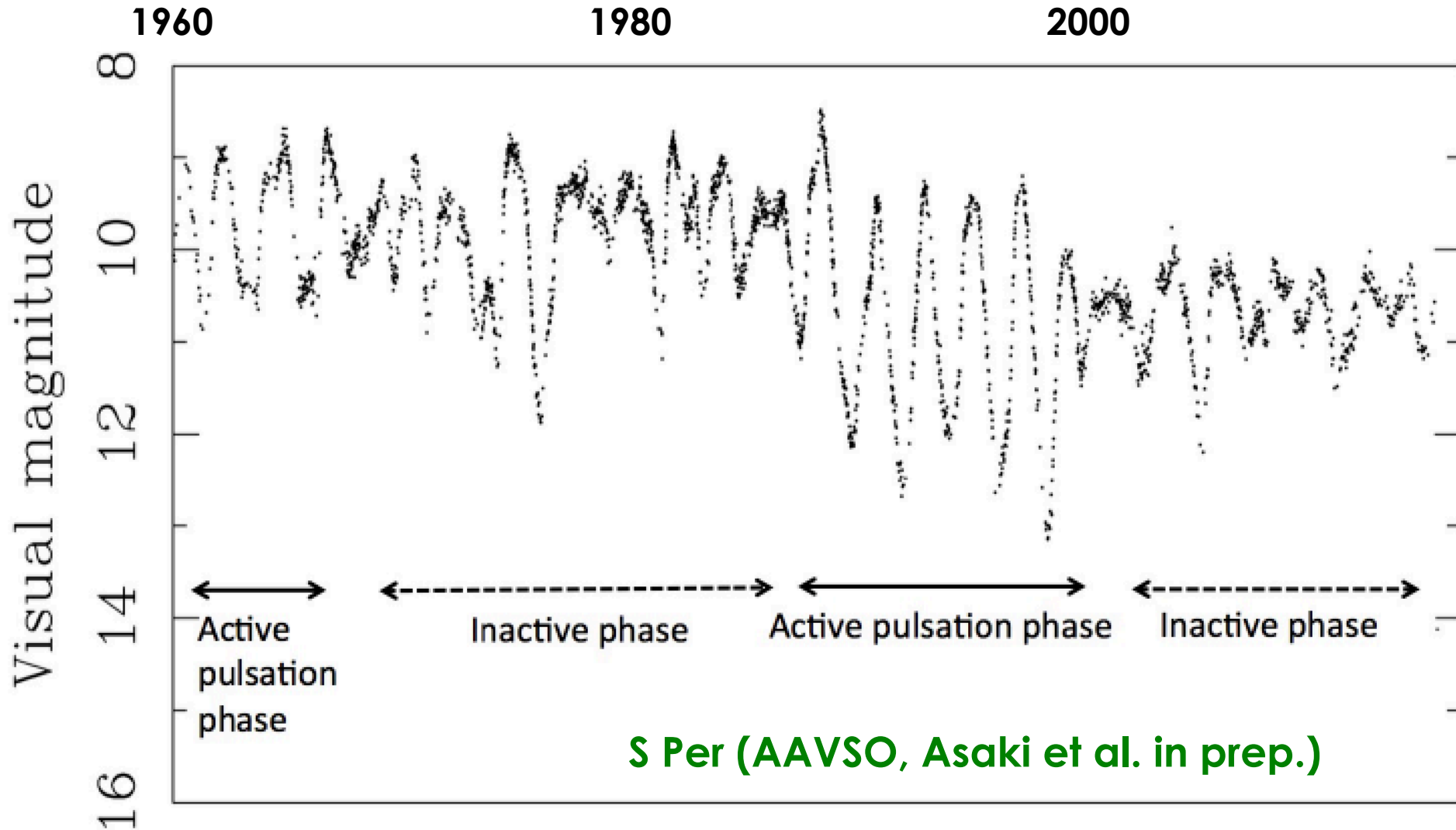
- ❁ 変光の周期と基準日における位相さえ分かれば良い？
- ❁ 正弦関数で近似できる？ ×可視光線 ○近赤外線？
- ❁ 光度曲線（波形・振幅とその変化）は何で決まる？



赤色超巨星における「間欠的」質量放出？

気長に測光するのに良いテーマ？

より細かい時間変動→非等方的質量放出との関連？



まとめ・今後

❁ 星周ガス縁の空間分解： VLBI & ALMA

❁ メーザー源動画：

詳細な動画は20年間でたった1例しかない

歴史に残るVLBI連続多波長分光撮像

→ **KaVA大型観測事業(2015-2025?)**

❁ 光度曲線： 正弦関数で近似しても良い？

❁ 気長にかつ綿密に

→ 天体観測実習の積み重ね、**昼間に測光（赤外）可能？**

❁ メーザー源の振舞いに注目したら面白いかも

❁ 分光（組成、速度場？）・偏光観測（非等方性）

→ 脈動変光に伴う時間変化の追求