

星間物理学特論 part IV

今井 裕

(鹿児島大学大学院理工学研究科物理科学専攻)

第4章

宇宙メーザーと星間物理学

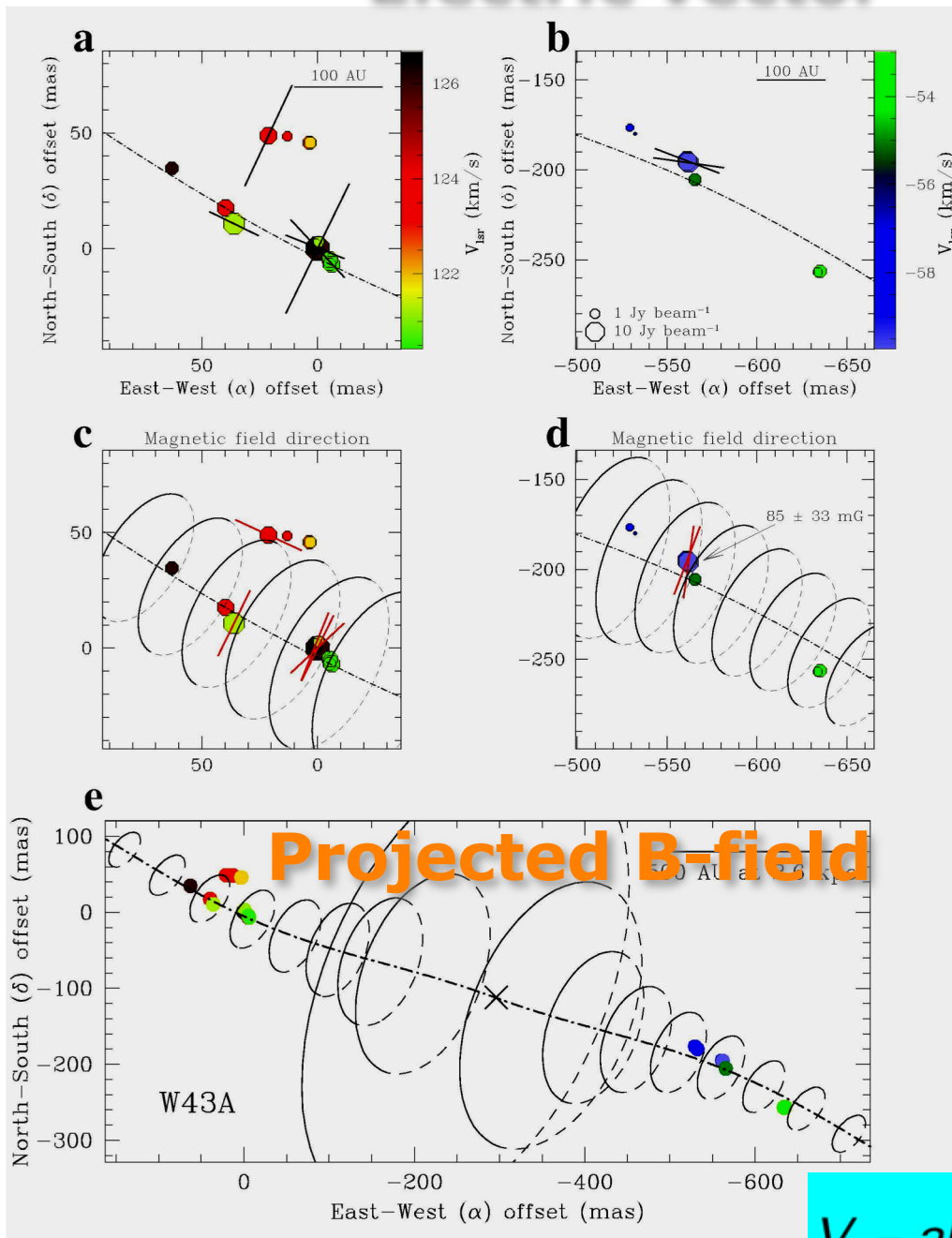
- 宇宙メーザーに関連した星間現象
 - 星形成： 原始星への質量降着、双極分子流
 - 巨大分子雲形成に関わる星間ガス運動の追跡？
 - 星団形成及び爆発的星形成（スターバースト）
 - 老星からの質量放出：星周ガスの拡散（非定常的・非等方的）
 - 超新星残骸の膨張
 - 活動銀河中心核（巨大ブラックホール）への質量降着
- 星間現象研究にとっての宇宙メーザーの意義は？
 - 宇宙メーザー源の偏在性（空間的・時間的・天体種別）
天体進化の探査装置 (probe)
 - メーザー放射付随天体の詳細な空間・速度構造の把握
解像度1ミリ秒角の世界
- 天文学の他分野とのつながり

宇宙メーザーの観測から推定できること

- メーザーの検出／未検出 — maser chronology —
- メーザースポット群の空間分布
- メーザースポット群三次元運動（視線速度＋固有運動）
- メーザースペクトル／スポット群の強度変化
- メーザー領域の電波／磁場構造
（ゼーマン効果＋直線偏波成分の方向）

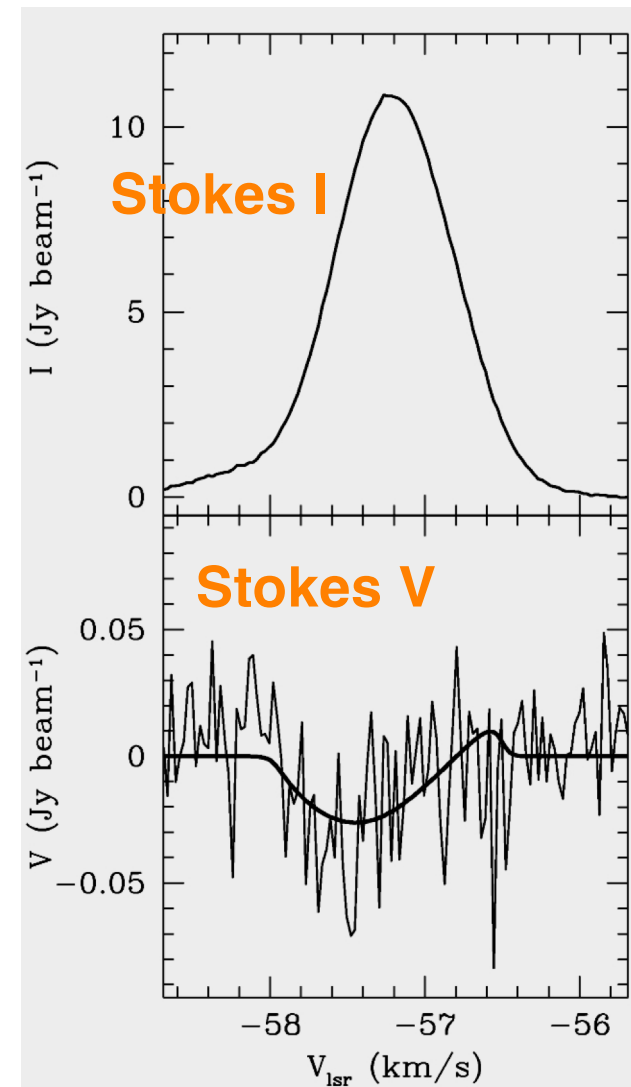
メーザー源の偏波計測 (maser polarimetry)

Electric vector



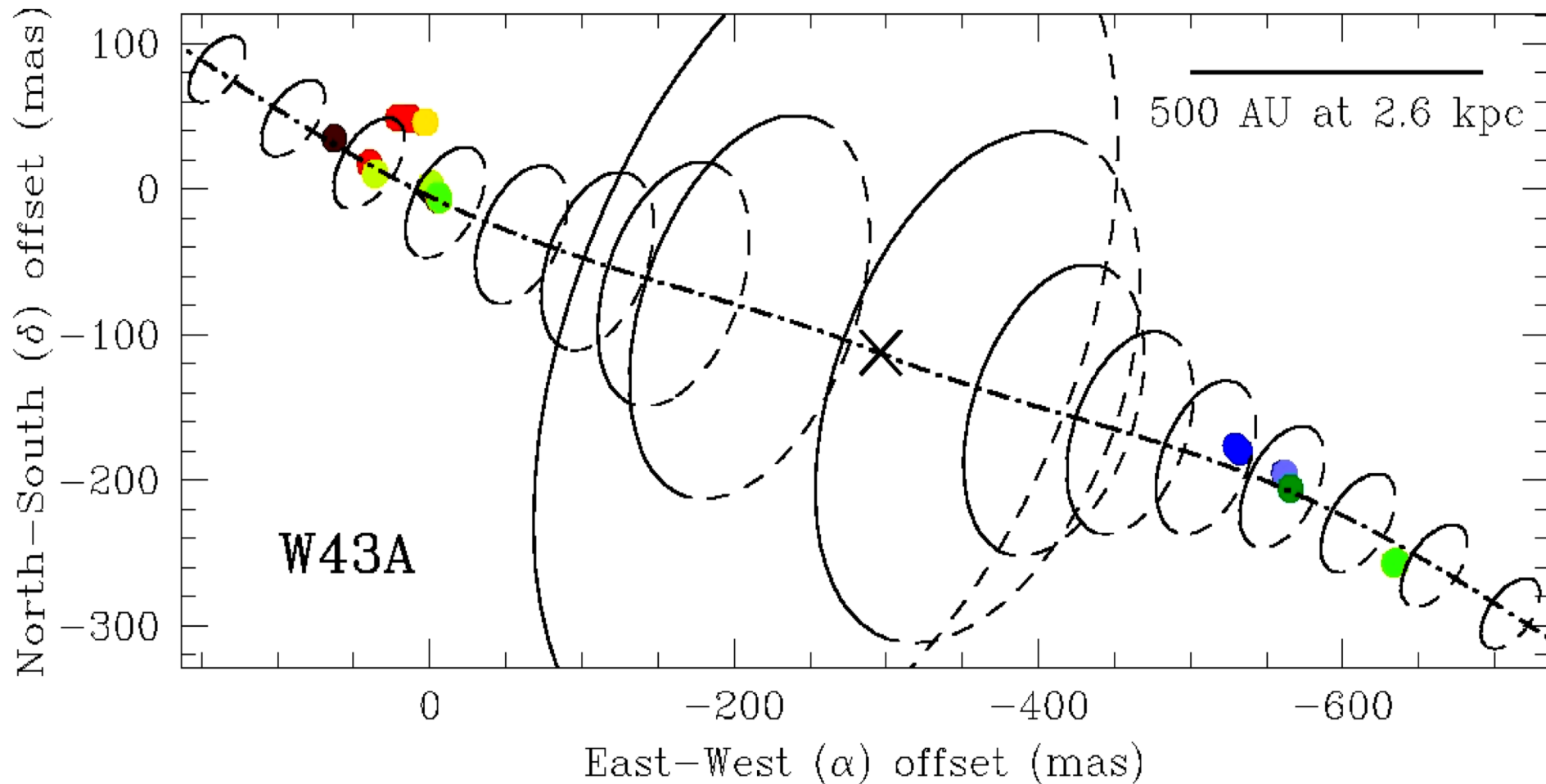
レーザー偏波計測

Zeeman effect



$$V_v = aI_v + \frac{f_{zeeman} B \cos \theta}{2} \frac{dI_v}{dv}, \quad EVPA = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right)$$

Magnetohydrodynamical (MHD) jet



- **Toroidal magnetic field around the evolved star**
(Vlemmings, Diamond & Imai 2006, Nature 440, 58)

第5章

宇宙メーザーと恒星質量放出

- 恒星質量放出とそのメカニズム
- 脈動変光
- 星周物質とメーザー放射
- 実際の研究進行状況

参考文献： 変光星ノート(竹内峯 2008年、柳町自然研究所)

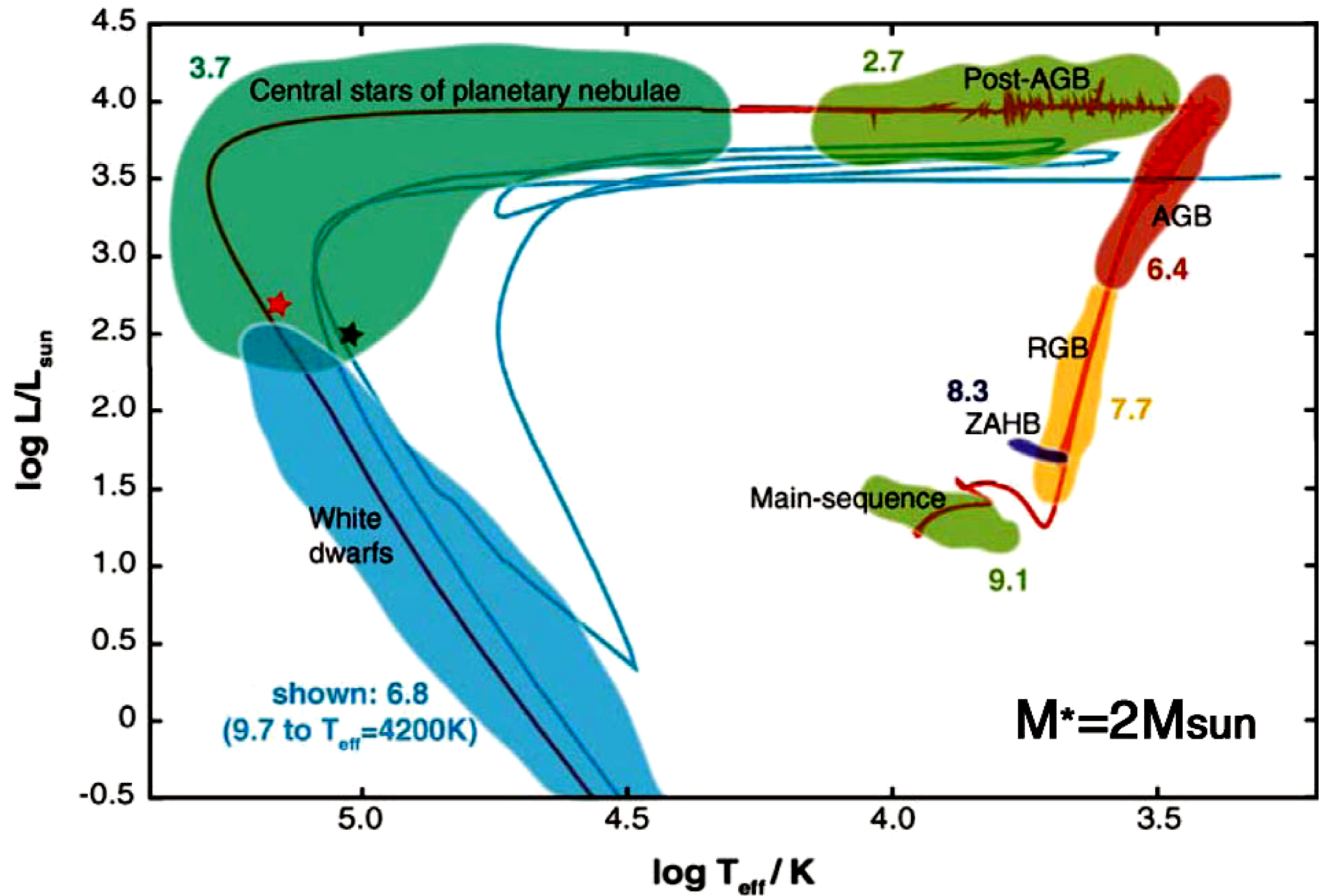
老星とは

- 晩期型星 (late-type star) と呼ばれていた主系列にあるスペクトル晩期 (赤色) の星と区別がつかない
- 表面温度: 2000–3000 K
表面すぐ内側で水素の部分電離、豊富な分子
- 赤色巨星・赤色超巨星
 - Red giant: $M_* \sim 1 M_{\text{sun}}$, $L_* \sim 10^4 L_{\text{sun}}$ 規則変光星 (Mira variable)
 - Red super giant: $M_* \sim 10 M_{\text{sun}}$, $L_* \sim 10^5 L_{\text{sun}}$ 不規則変光星
- 漸近巨星枝 (asymptotic giant branch, AGB) 星
 - 水素/ヘリウム殻燃焼 (hydrogen/helium shell burning)
 - 質量放出: $dM/dt > 10^{-7} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ ($dM/dt > 10^{-12} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ for Sun)

表面は低重力、分子／星間塵への放射圧による外側への加速

主系列後の恒星進化

(Harwig 2005, ARA&A, 43, 435)



恒星放射圧によるガスの加速

- 星からの赤外線が星周塵に放射圧をもたらす
- 塵とガスの混合物質を押し
(塵とガスとが衝突、塵はガス中で凍結)

単位体積あたりの混合物質に成り立つ運動方程式

$$\frac{dv}{dt} = qF \dots (1), q = \frac{n_d \sigma_d \langle Q \rangle}{c m_H n_H}, F = \frac{L_*}{4\pi r^2}$$

m_H : hydrogen atom mass, n_H : hydrogen number density

n_d : dust number density, $m_d \ll n_H m_H$

σ_d : collisional cross section of a dust against IR photon

$\langle Q \rangle$: frequency mean efficiency coefficient of radiative pressure

L_* : stellar luminosity

上記微分方程式(1)を解き、星周縁の速度場 $v(r)$ を求めなさい。
ヒント: 式(1)の両辺に v を掛ける

恒星放射圧が作る星周縁速度場

$$v^2 = v_\infty^2 \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \dots \dots (2), \quad v_\infty^2 = \frac{n_d \sigma_d \langle Q \rangle}{2\pi r_0 c m_H n_H} L_* \quad \varepsilon_r = \frac{\partial \ln v}{\partial \ln r} = \frac{r_0}{2(r - r_0)}$$

$v_\infty = v(r=\infty)$: 終端速度 (terminal velocity)

Logarithmic velocity gradient ε_r を導出し、星の近傍から遠方に向かって ε_r の変化とメーザー放射との関連を考察しなさい。

ヒント: (2) 式をとりあえず t で微分する

- 星の近くでは(小さいけれども)重力が効く
- 塵ができなければ放射圧(衝突断面積 σ_d)は小さい
- 放射圧効率 Q は赤外線波長に依存する
(特に吸収線波長で大きくなる)
- 衝突断面積 σ_d は塵の組成 (Si, C) で大きく異なるらしい
- 塵形成領域 ($\leq 1,000\text{K}$) までどうやってガスを運ぶ?
 - 脈動変光
 - 巨大対流ガス塊の浮上
 - Coronal mass ejection

質量放出率との関係

$$\dot{M} = 4\pi r^2 v \rho, \quad \rho = m_H n_H, \quad d\langle\tau\rangle = n_d \sigma_d \langle Q \rangle dr$$

$$\dot{M} \frac{dv}{d\langle\tau\rangle} = \frac{L_*}{c} \dots\dots\dots (3)$$

前々ページ式(1)から式(3)を導出しなさい。

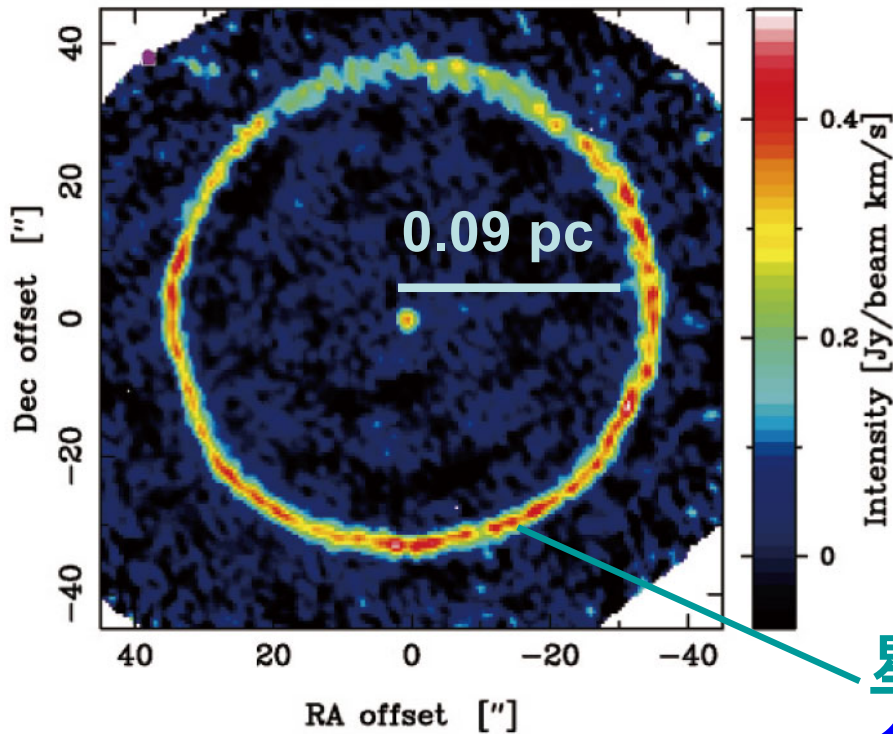
$$\dot{M} [v(r) - v_0] = \langle\tau(r)\rangle \frac{L_*}{c}$$

$$\dot{M} v_\infty = \langle\tau_\infty\rangle \frac{L_*}{c}, \quad \langle\tau_\infty\rangle = \int_{r_0}^{\infty} dr n_d \sigma_d \int dv Q_v F_v / F$$

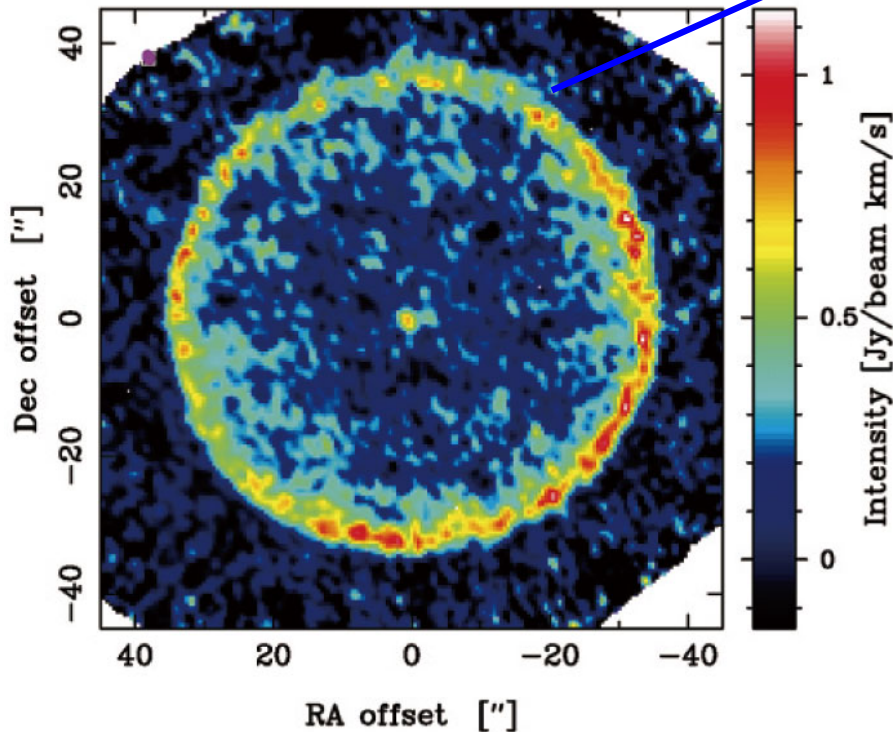
$$\dot{M} [M_{\text{sun}} \text{yr}^{-1}] = 2 \times 10^5 \langle\tau_\infty\rangle \left[\frac{L_*}{10^4 L_{\text{sun}}} \right] \left[\frac{v_\infty}{10 \text{km s}^{-1}} \right]^{-1} \dots\dots (4)$$

- v_∞ はCO輝線や**OHレーザー**のスペクトル線幅から測定
- τ や Q の推定は v, r に依存するので一般に難しい
 dM/dt を別の方法で求め、
 式(4)を用いて観測から推定できることが望ましい

星周縁 (circumstellar envelope) 最外縁部



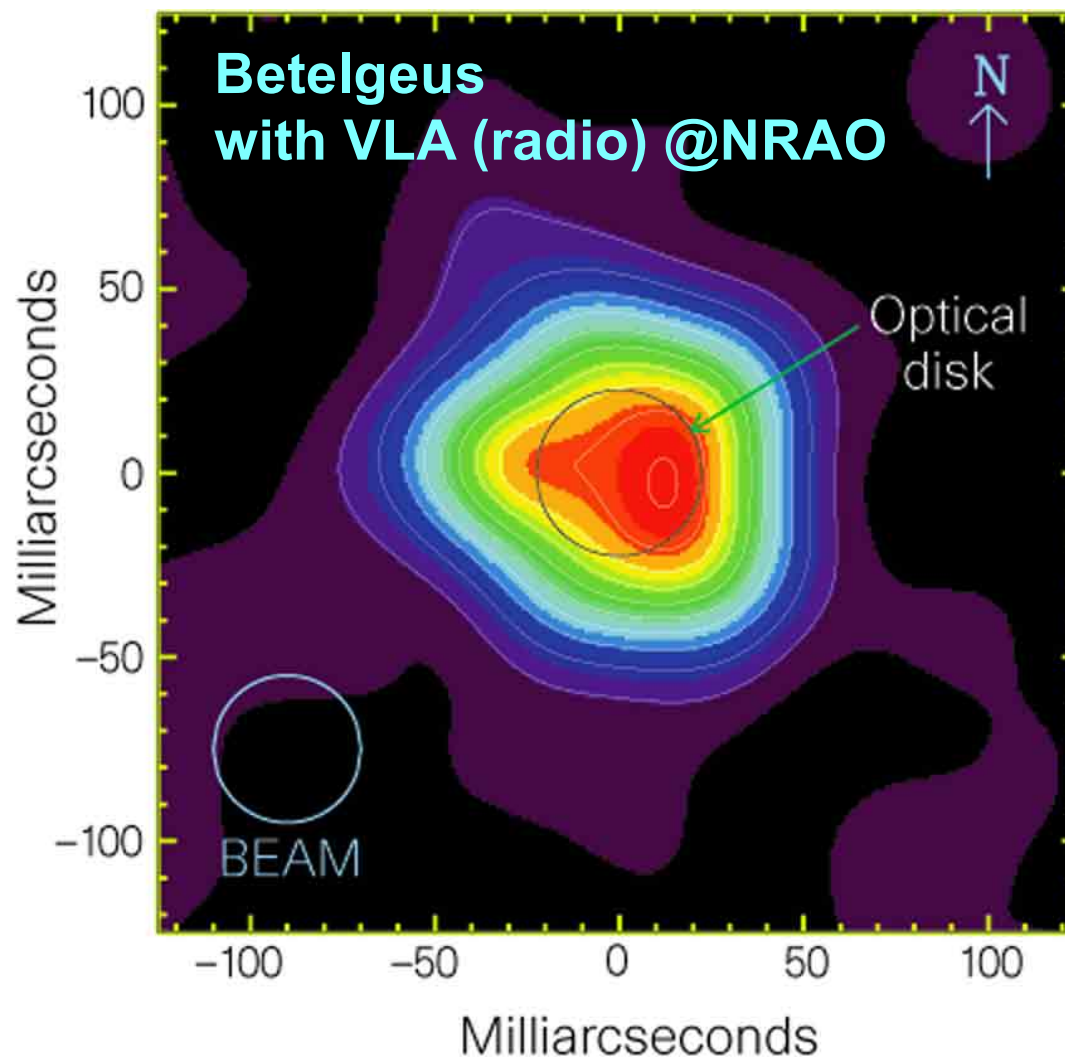
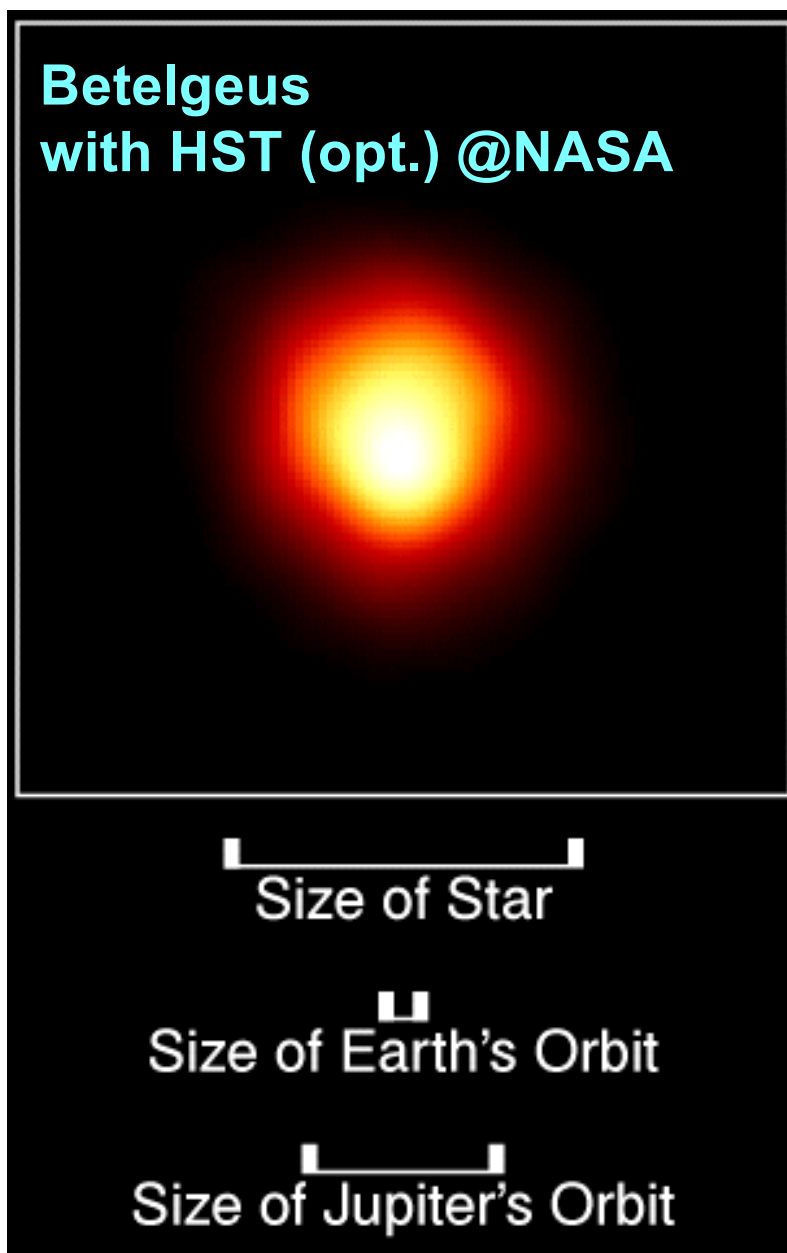
星と同じ視線速度
全視線速度範囲を積分



- 非常に真円
(球面の断面)に近い
- 7000年前に一時的に
激しい質量放出

CO J=2-1 in TT Cyg
(Olofsson et al. 2002)

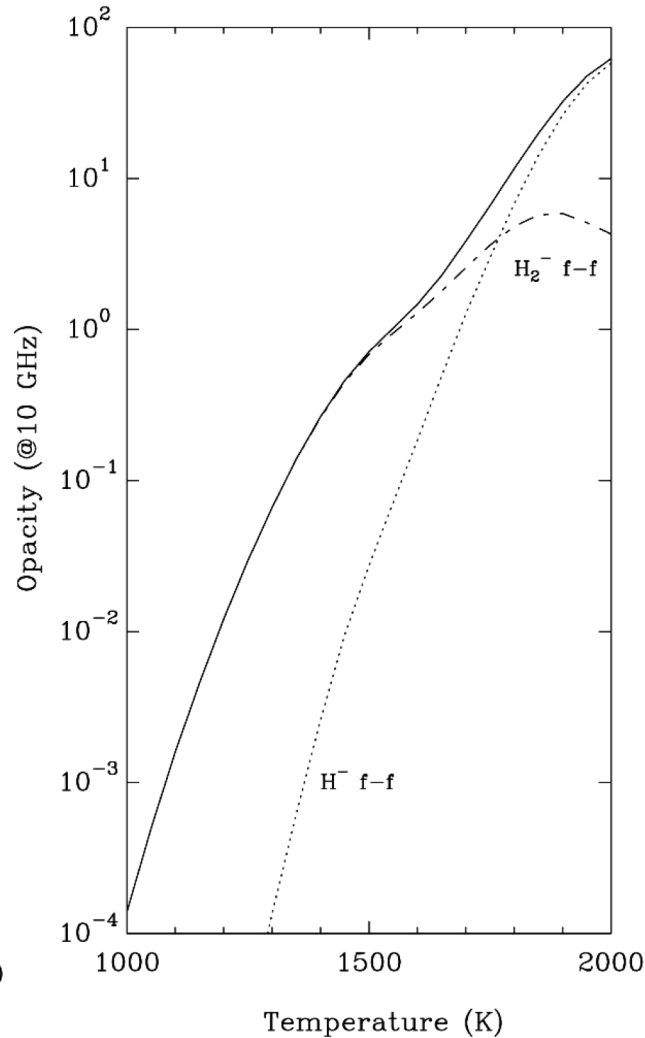
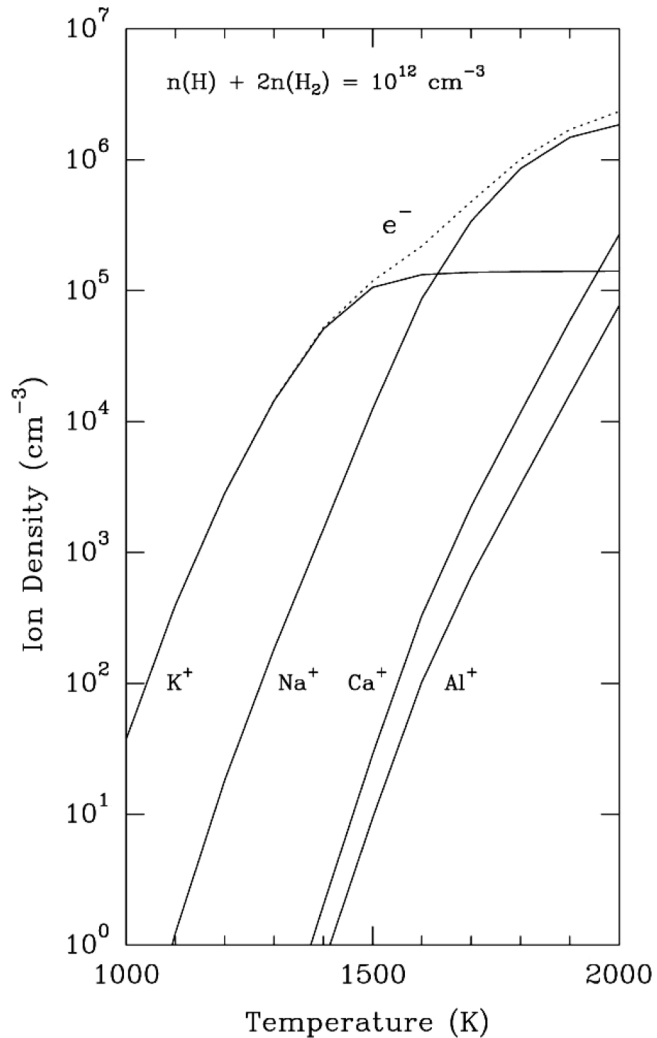
星周縁の内側：電波光球(radio photosphere)



真円ではない： 巨大な対流
ガス塊の浮上を見ている？

電波光球: 低温電離領域

- M型星光球の表面温度は2,000–3,000 K
- K (potassium), Na(sodium) 等はH, H₂と衝突



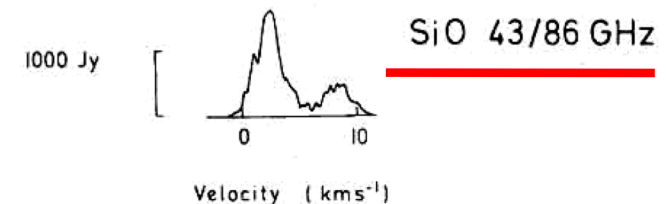
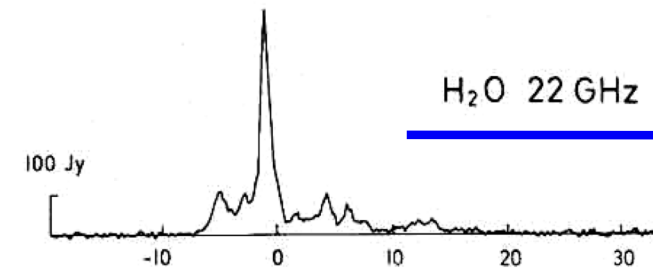
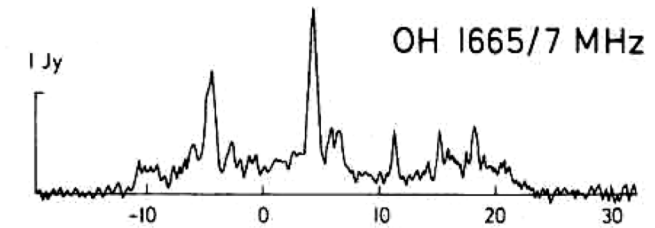
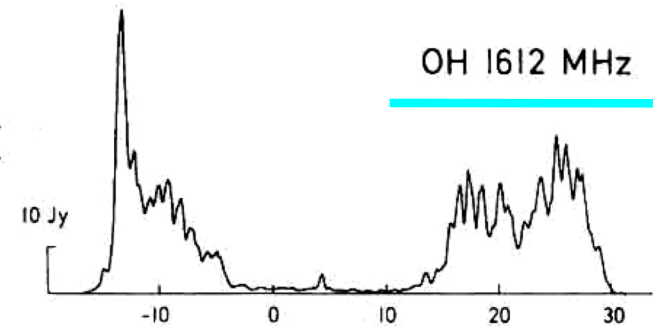
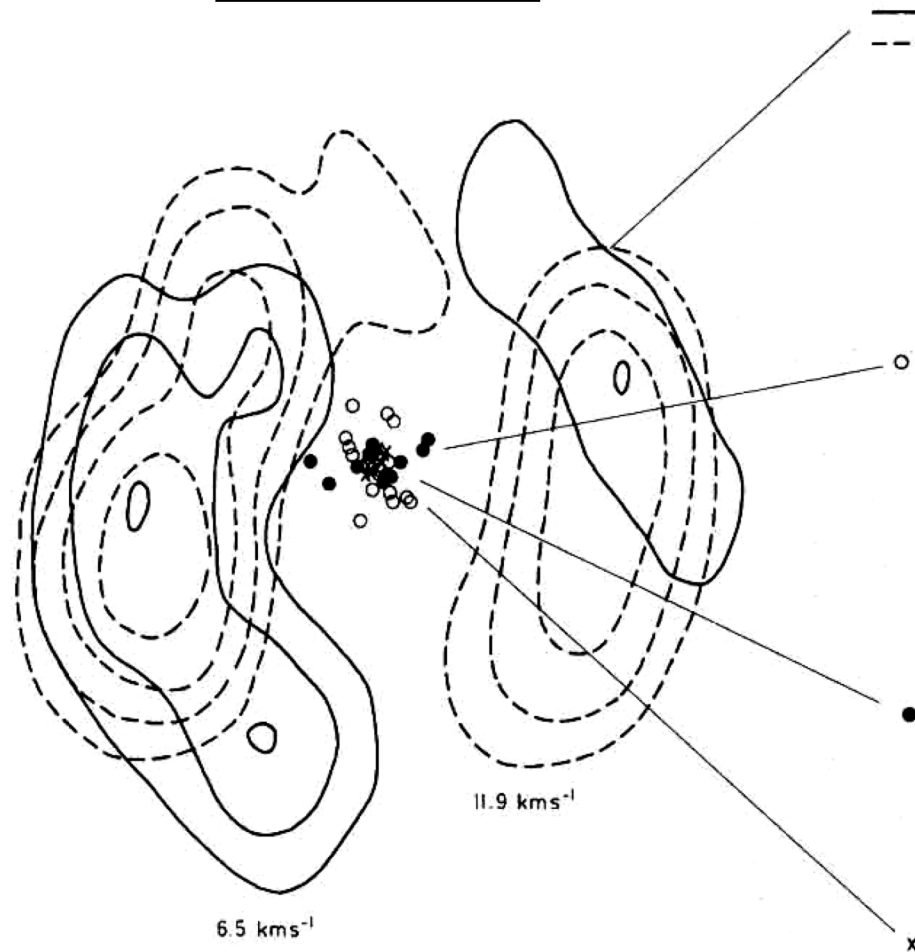
H, H₂ を
自由-自由

普通の電離領域
 $T \leq 8,000 \text{ K}$
自由電子による
自由-自由放射

Reid & Menten
(1997)

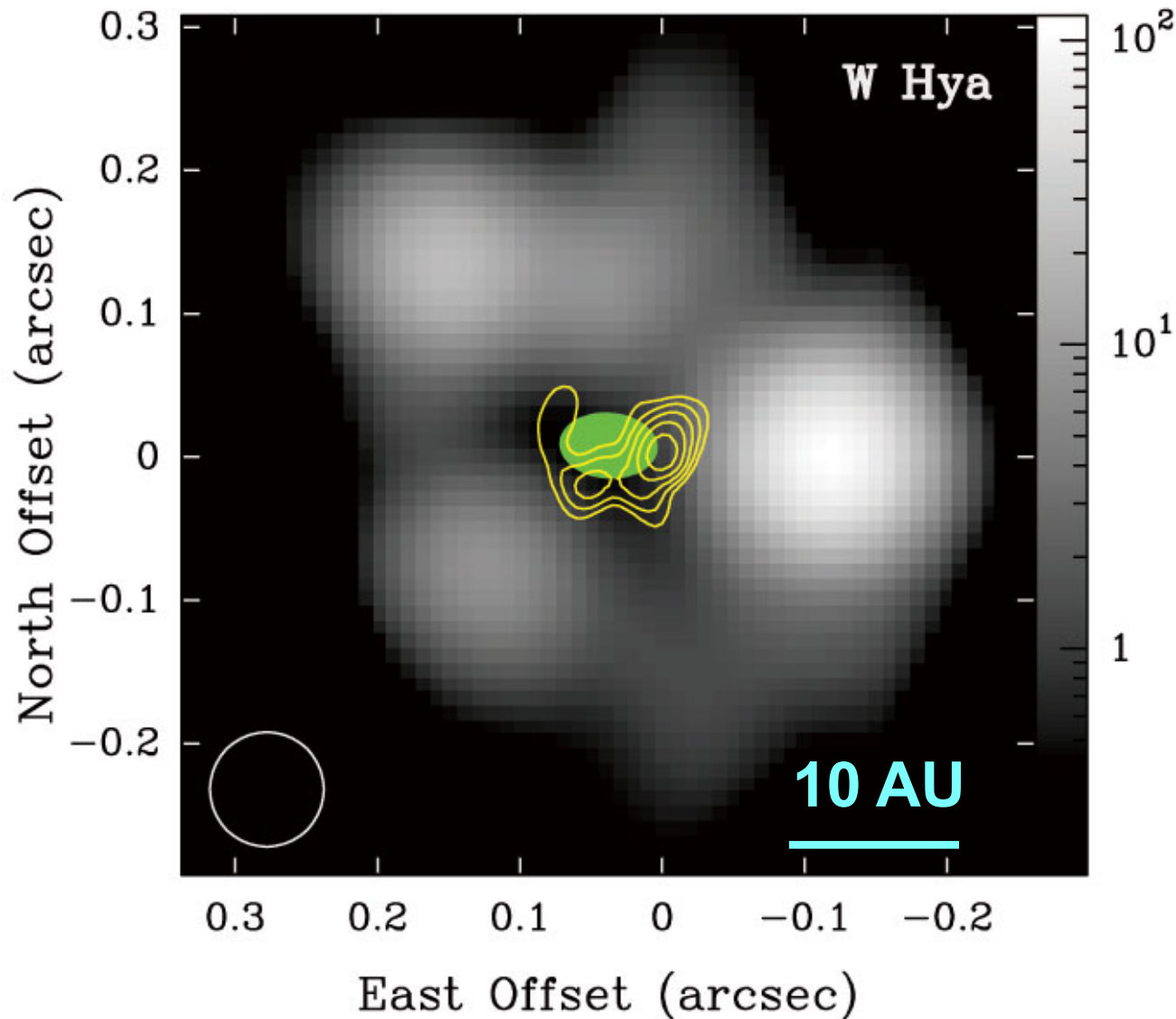
星周縁のメーザー放射

1 arcsec (~1000 AU)



**SiO/H₂O/OH masers in VX Sgr
(Chapman & Cohen 1986)**

星周縁のメーザー放射: 老星近縁



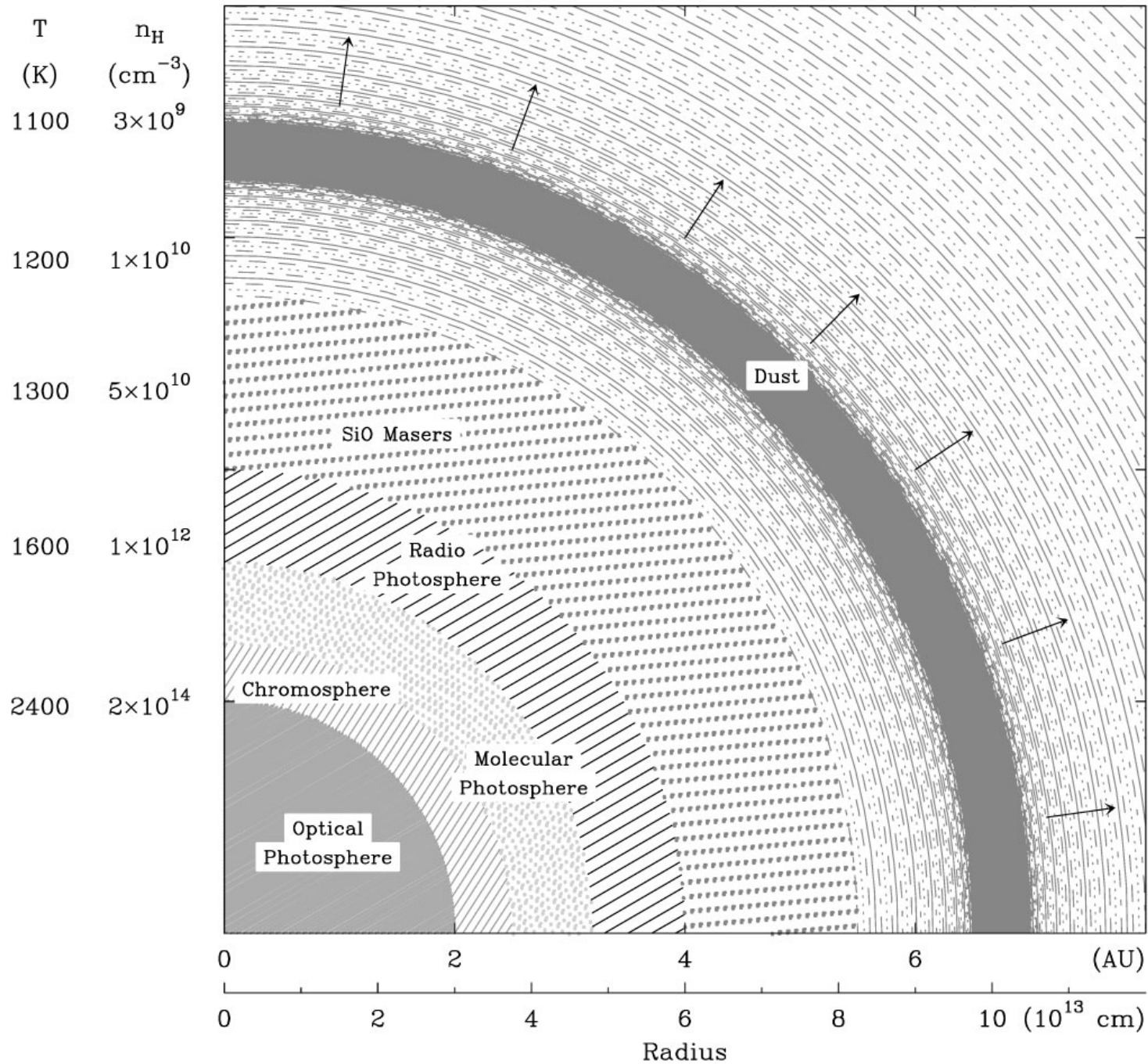
W Hydrae (SRb)

SiO J=1-0
(yellow contour,
Reid & Menten 2007)

H₂O
(grey scale,
Reid & Menten 1990)

Radio photosphere
(green,
Reid & Menten 2007)

星周縁モデル (Reid & Menten 1997)



星周縁の一般的描像(2008年現在 1/2)

- 光球 (photosphere)・彩層 (chromosphere):
 - そのすぐ下まで対流層:
 - 恒星中心でできた核生成元素が汲み上げられている
 - $T=2,000-3,000\text{K}$
- 分子ガス光球 (molecular photosphere)
 - $T \geq 1,000\text{K}$: CO, TiO, H₂O, SiO,等の分子の形成
 - 低質量星の場合: Cが過多、OがCと結合しCOとして存在
 - 中大質量星の場合: 余ったOがH₂Oを形成
 - 中間赤外線域で吸収線として観測される
 - 上層部でSiOレーザーが観測される
- 電離ガス光球 (radio photosphere)
 - 軽い電荷イオン (H, H₂⁻)による自由-自由(制動)放射
 - 制動放射の晴れ上がりの境界

星周縁の一般的描像(2008年現在 2/2)

- 星間塵形成層

- $T \approx 1,000$ K, $\text{SiO} \gg \text{SiO}_2$ (Cが多い場合は炭素質塵) など
- 全てのSiが星間塵に取り込まれてしまう
- 恒星放射圧を強く受けるようになる: 星周縁の加速膨張

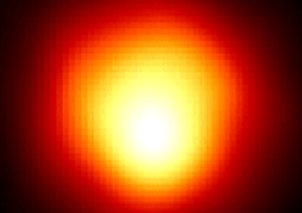
- H_2O レーザー領域の形成

- $n(\text{H}_2) \approx 10^9 \text{cm}^{-3}$
- より内側では個数密度が多過ぎる: 熱化されレーザー放射なし

- OHレーザー領域の形成

- 星間紫外線によって H_2O が解離しOHが作られる
- ほぼ一定速度で膨張していく
- 1612 MHz OHレーザー: 星周縁外縁部
- 1665/1667 MHz OHレーザー: 星周縁高温部($T > 1,000$ K)
 H_2O が衝突で壊されOHになる: 星の直近にある

Betelgeuse
(Mira variable)
© NASA



Size of Star

Size of Earth's Orbit

Size of Jupiter's Orbit

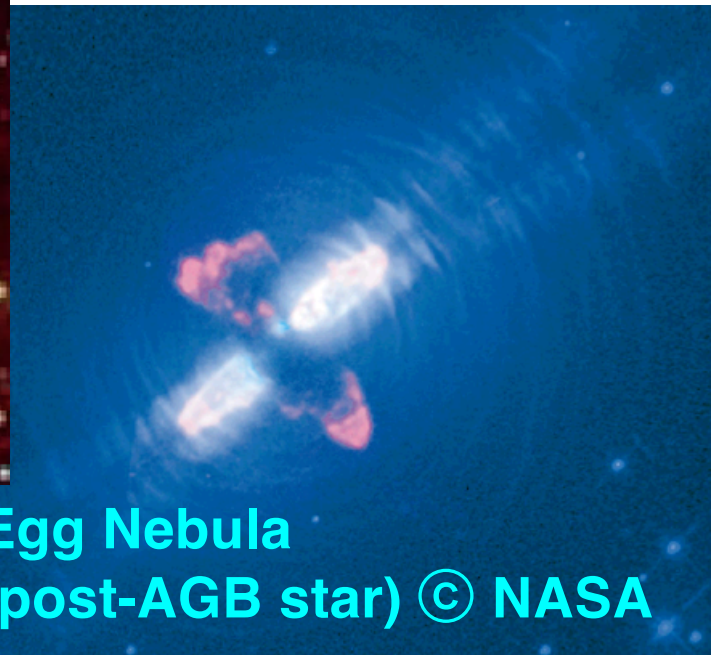
Asymmetric mass-loss flow and formation of stellar jets at final stellar evolution

Optical/Near-IR visible (Mira variables)

Mid-IR/OH maser visible
(OH/IR stars)

Optical visible
(post AGB stars)

W43A
(OH/IR star)
Deguchi et al. 2007



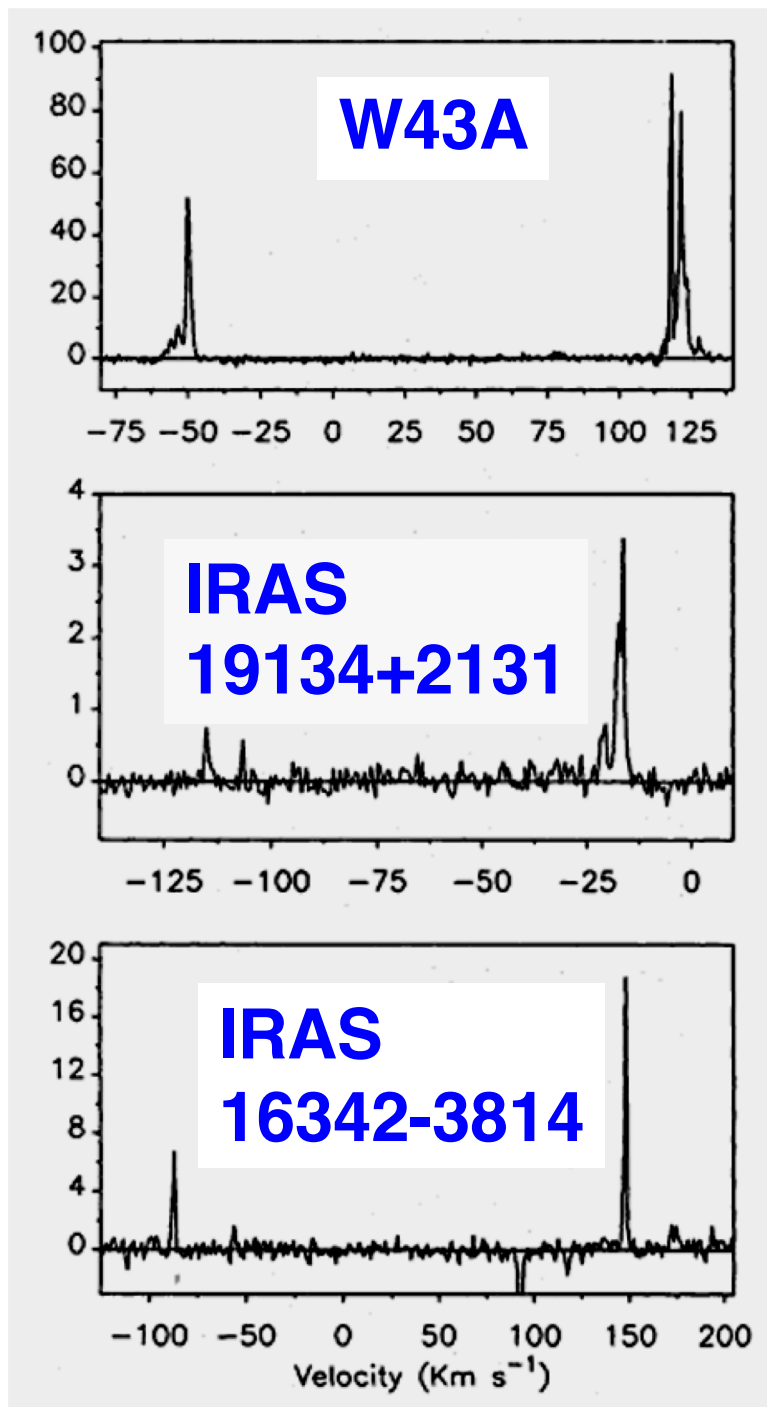
Egg Nebula
(post-AGB star) © NASA

- 何時どうやって
恒星ジェットができるの？
- 恒星進化解明へのインパクトは？

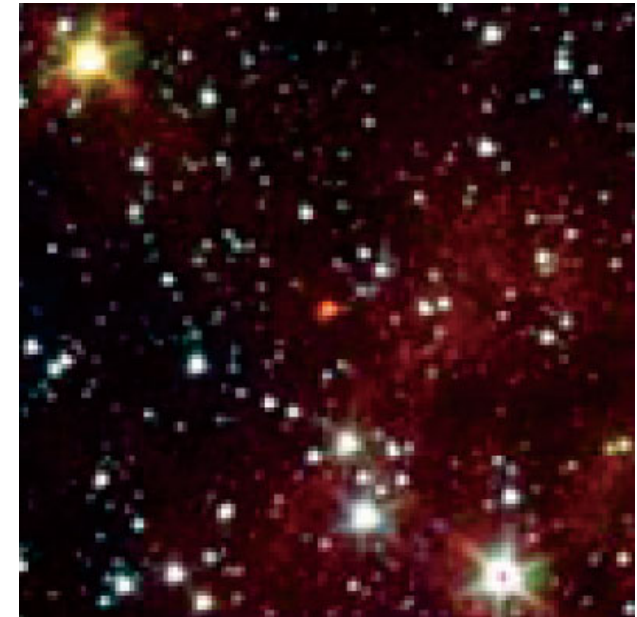
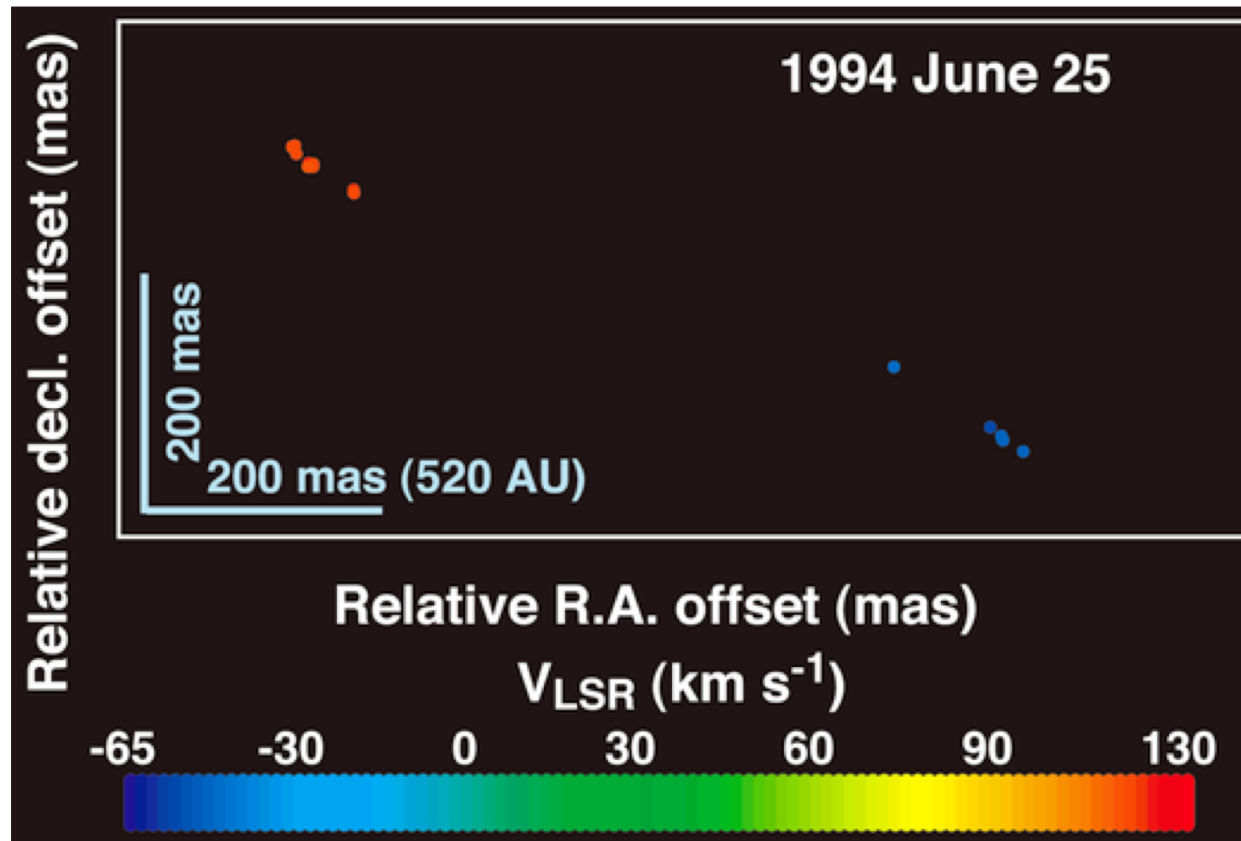
“Water fountains” in AGB/post-AGB phases

- **Faster than expansion velocity of OH maser shell**
($V_{\text{exp}} \gg 30 \text{ km/s}$)
- **Bipolar jet or spherical fast flow?**
(before 2002)
- **~10 water fountains discovered to date**

High velocity H₂O maser sources (Likkell et al. 1992)



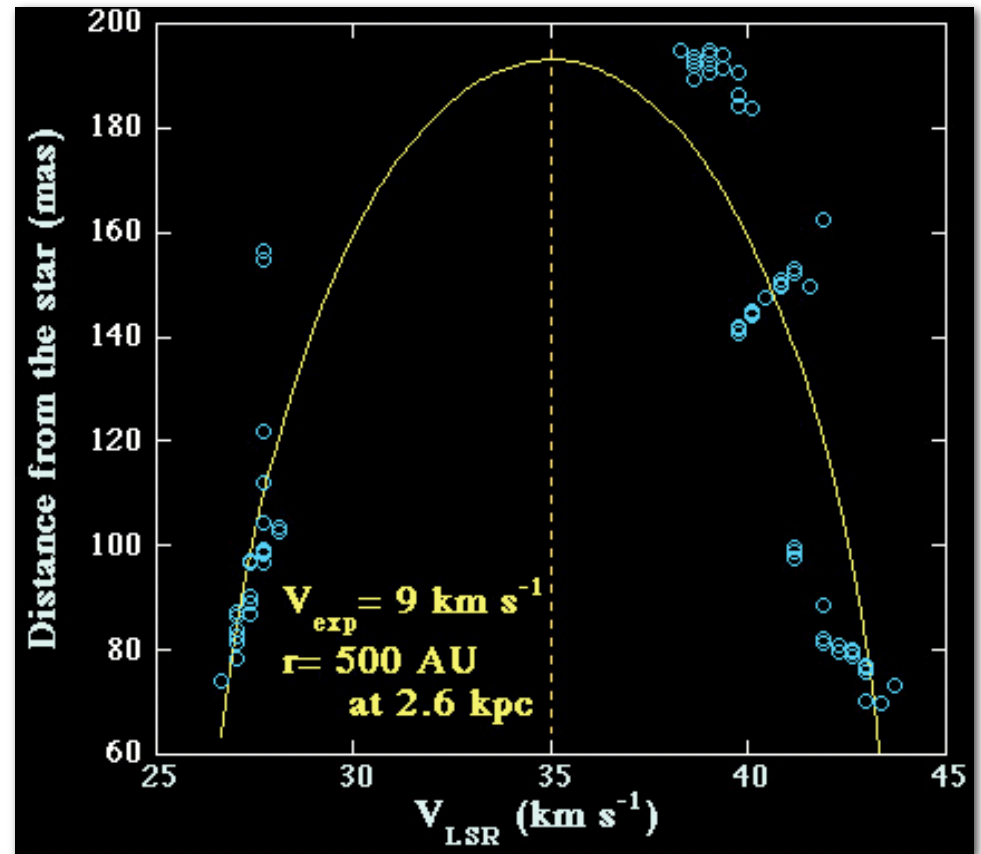
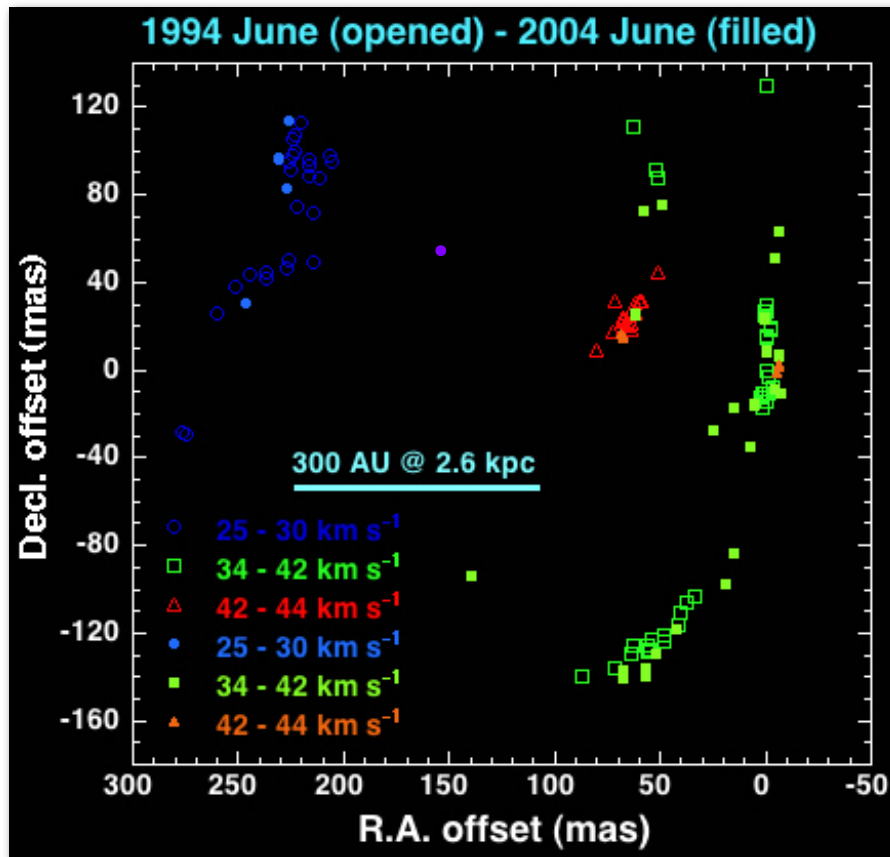
W43A: 最初に同定された”宇宙の噴水”



Imai et al. 2002
Nature, 417, 829
Imai 2007,
IAU Symp. 242

- 中間赤外線で同定(Deguchi et al. 2007)
- 変光星である: 周期的($P \sim 360\text{d}$)なOHメーザーの強度変化
- Jet velocity = 145 km/s
- Dynamical age ~ 50 years

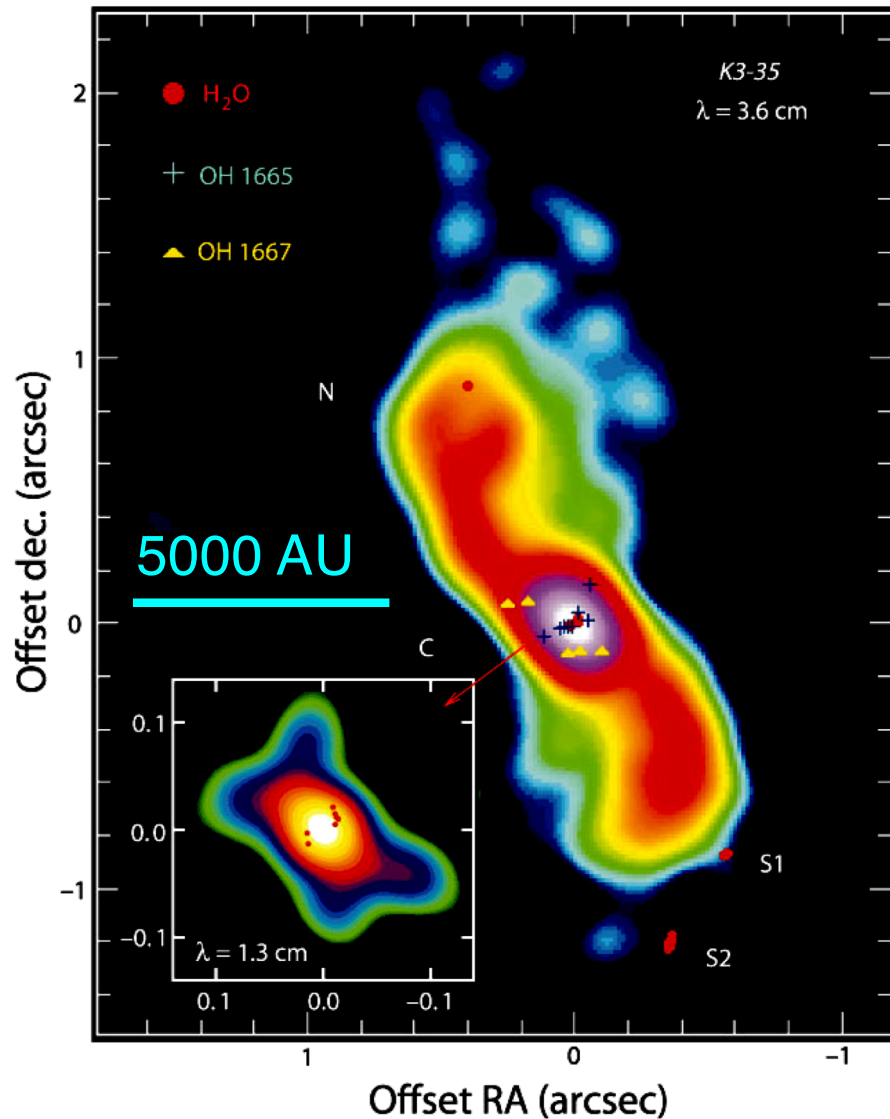
星周縁外縁部のOHメーザーとOH/IR星



W43A (Imai et al. 2007, in IAU Symp. 242)

- 星周縁の等速膨張 (10–30 km/s)
- 力学的年齢: 10³–10⁴ years
- OH/IR stars: 近赤外線では見えない,
最大質量放出率: 10⁻³ M_{sun}yr⁻¹

Quenching water fountain within < 1000 years



- **Dispersing water fountain**
- **Photodissociation destroying H₂O molecules**

**Continuum radio emission
(=planetary nebula) and
H₂O/OH masers**

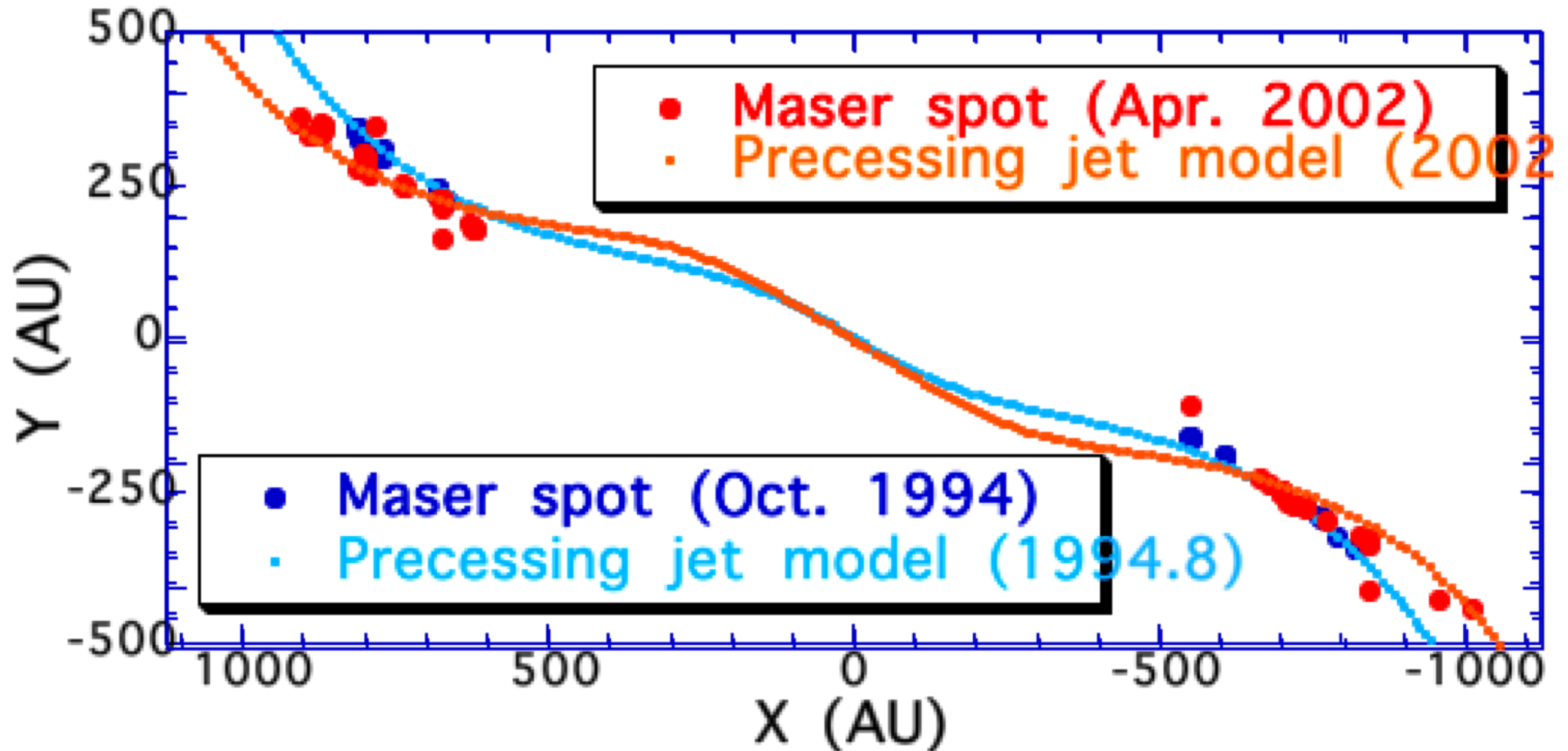
**($t_{\text{dissociate}} \sim 50$ years)
in K3-35**

(Miranda et al. 2001)

ジェット駆動天体本体へのアプローチ

- 老星ジェット駆動の仕組みは？
 - まずはジェットの性質を把握する
 - 理論モデル計算も進んでいる
 - 理論では連星系による駆動をやや強く支持
 - 観測事実は混沌としている
- 老星ジェット駆動天体の正体は？
 - 老星ジェット駆動星の質量は？
 - 老星ジェット駆動星の進化段階は？
 - コンパクトである（ジェットが細く絞られているから）
 - 白色矮星とは思えない
(電離ガスが見つからない、変光星である)
 - 老星ジェット天体の前身は？
 - 普通のAGB星が進化して老星ジェットを作る？

歳差運動を持つジェット



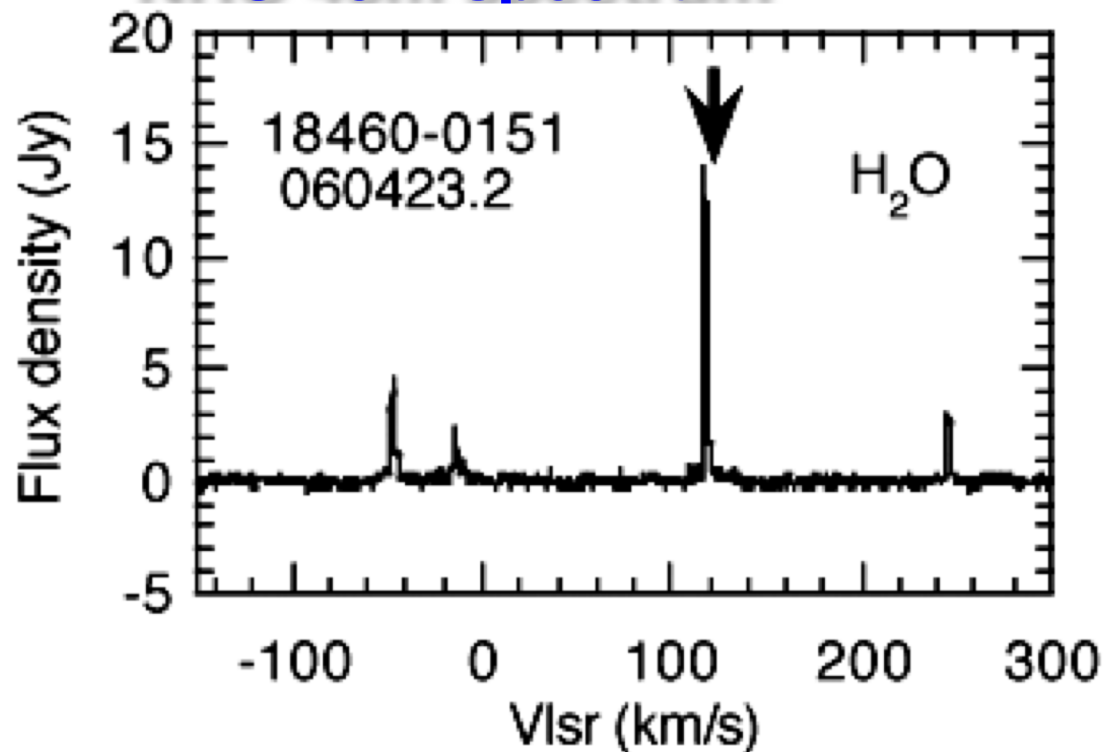
- Precession period ~ 55 years
- Precession angle amplitude $\sim 5^\circ$
- 分子ガス弾丸が星周ガス縁と衝突?

Imai et al. 2005

ジェット駆動天体 =星周縁母星？

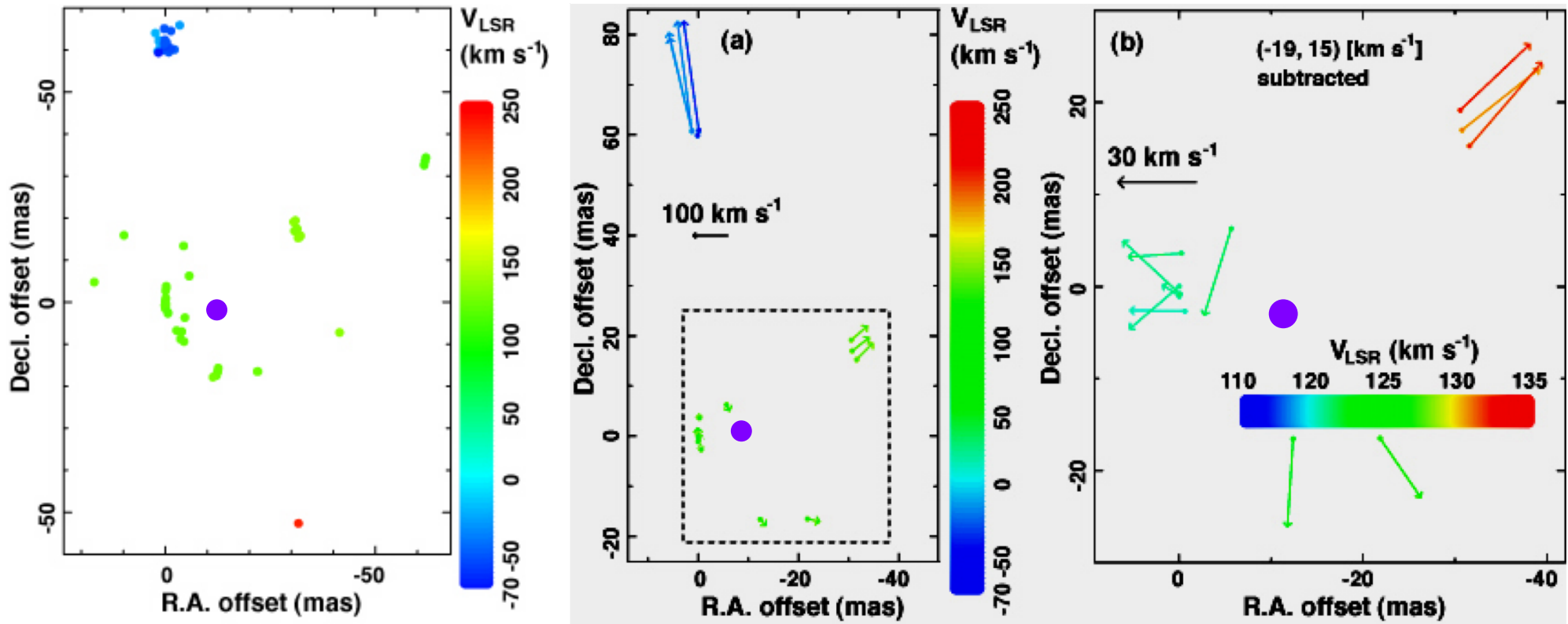


NRO 45m spectrum



IRAS 18460-0151
(Deguchi et al. 2007)

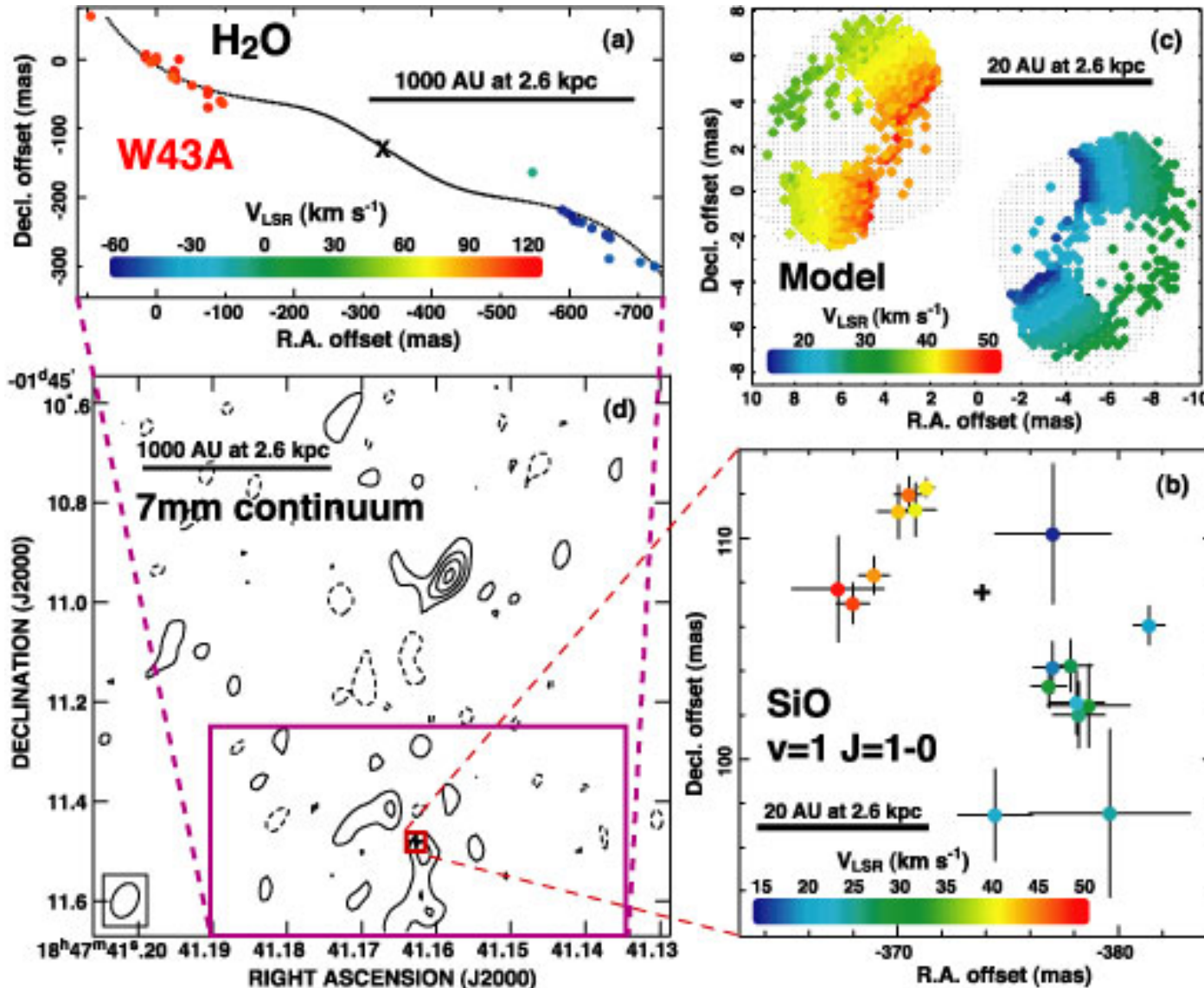
星周縁＝赤道流(ジェット点火の副産物)？



- Jet velocity $\sim 350 \text{ km/s}$
- Dynamical age ~ 5 years
- **Equatorial flow $\sim 30 \text{ km/s}$**
- **Both Driven by a single star?**

SiOメーザー源：ジェット駆動天体に近づく

降着ガス円盤が見えない！



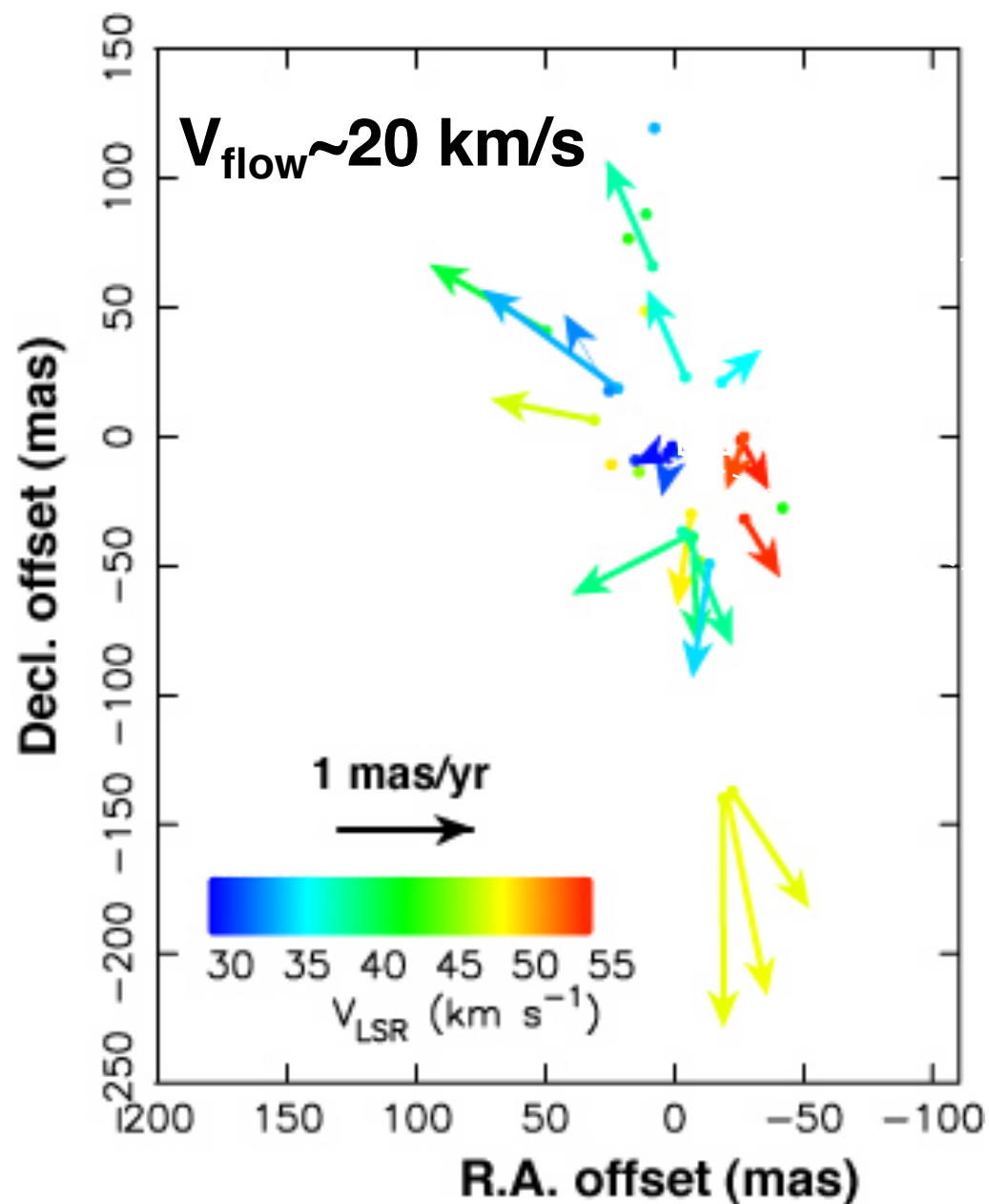
Biconical
SiO maser flow
(~15 km/s)

within 10 AU

H₂O maser jet

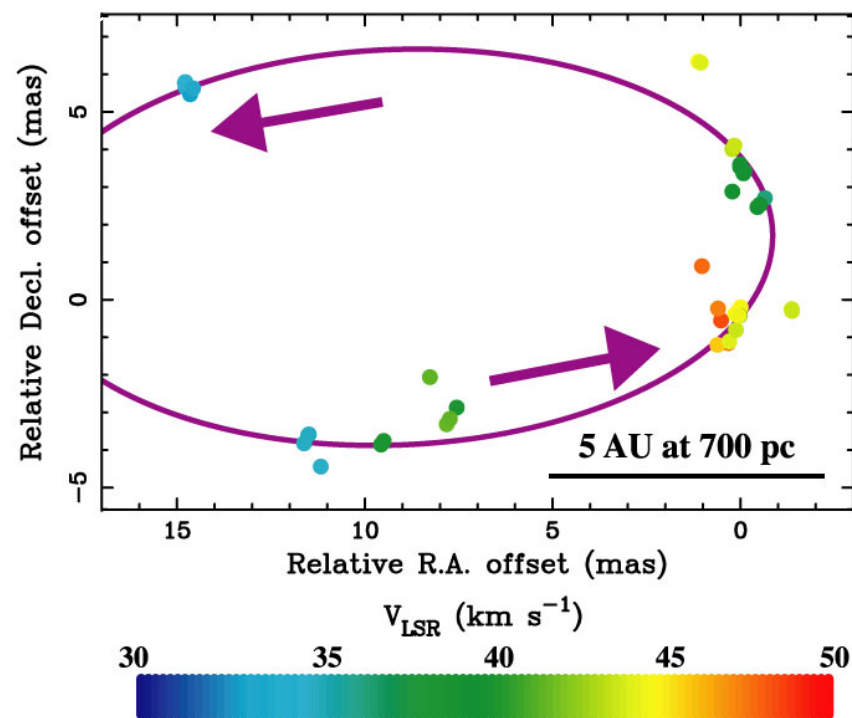
(Imai et al. 2005)
(Imai 2007,
in IAUS242)

H₂O masers (Maeda et al. 2008)



“宇宙の噴水”点火！

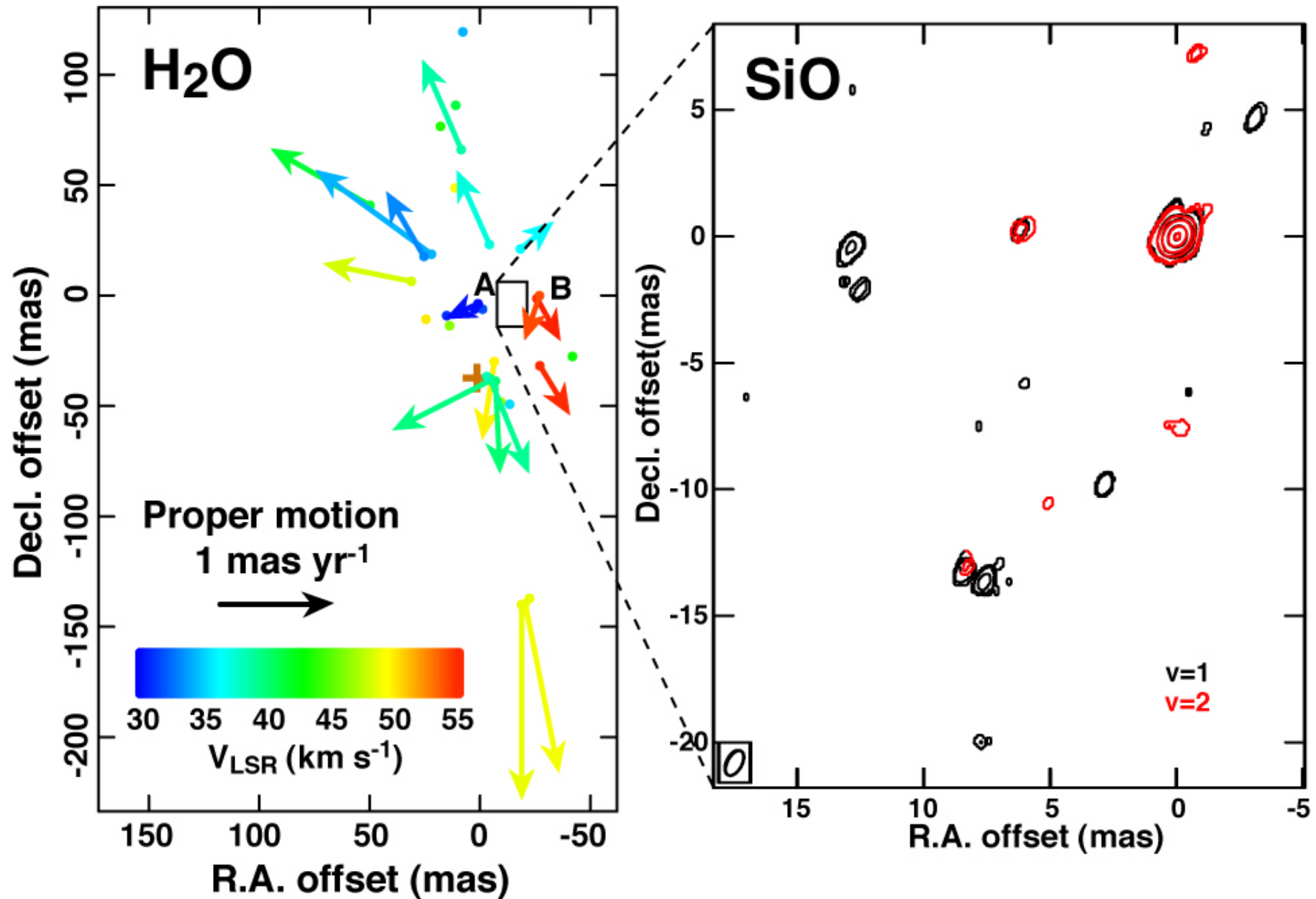
IRC-10414



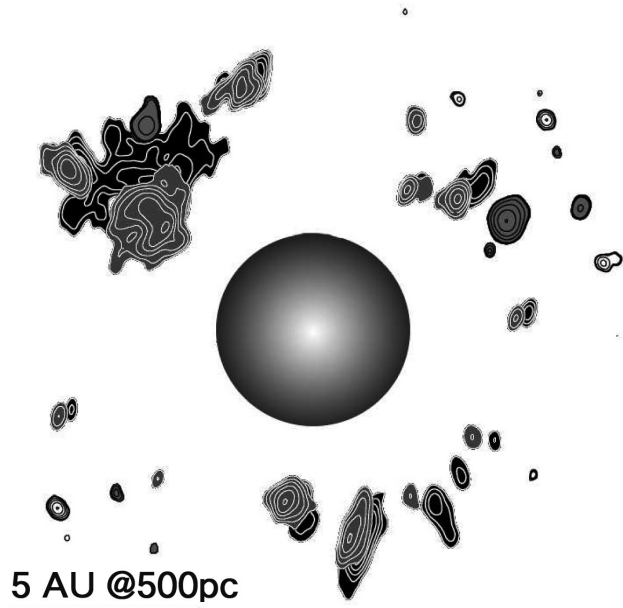
SiO v=1 J=1--0 (Imai et al. 1999)

スローな双極流+赤道流

根元にはガス円盤がない！



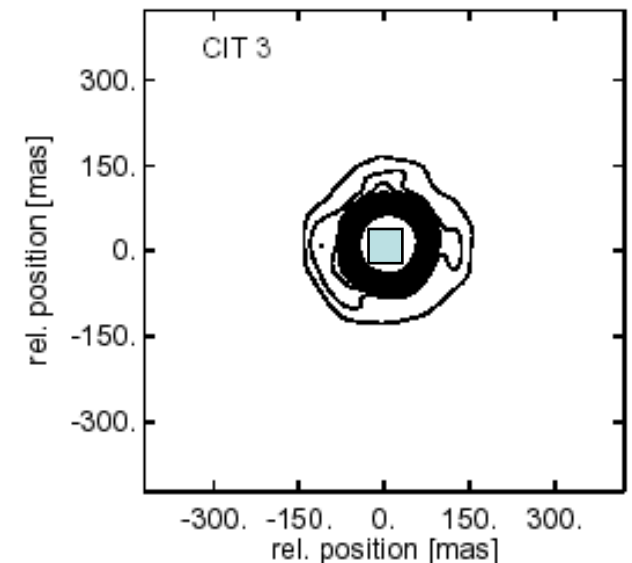
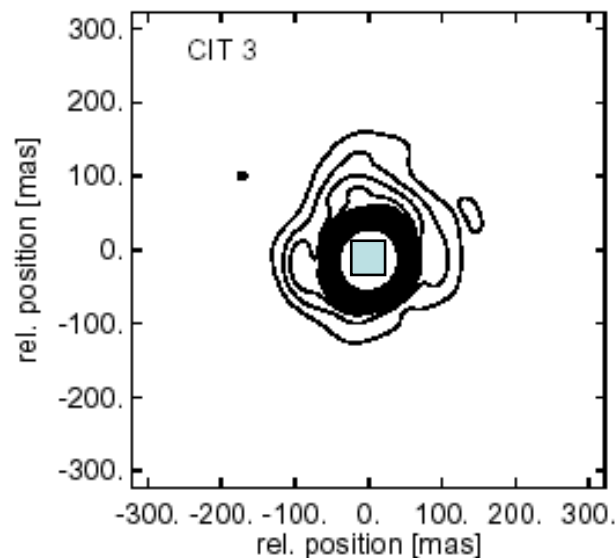
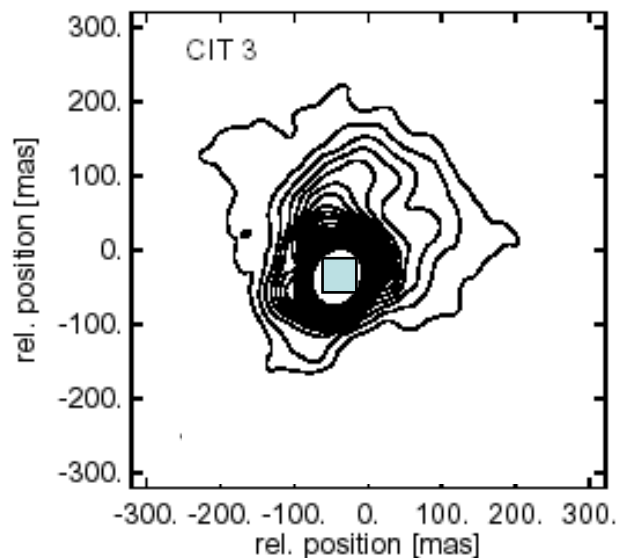
“宇宙の噴水”点火？



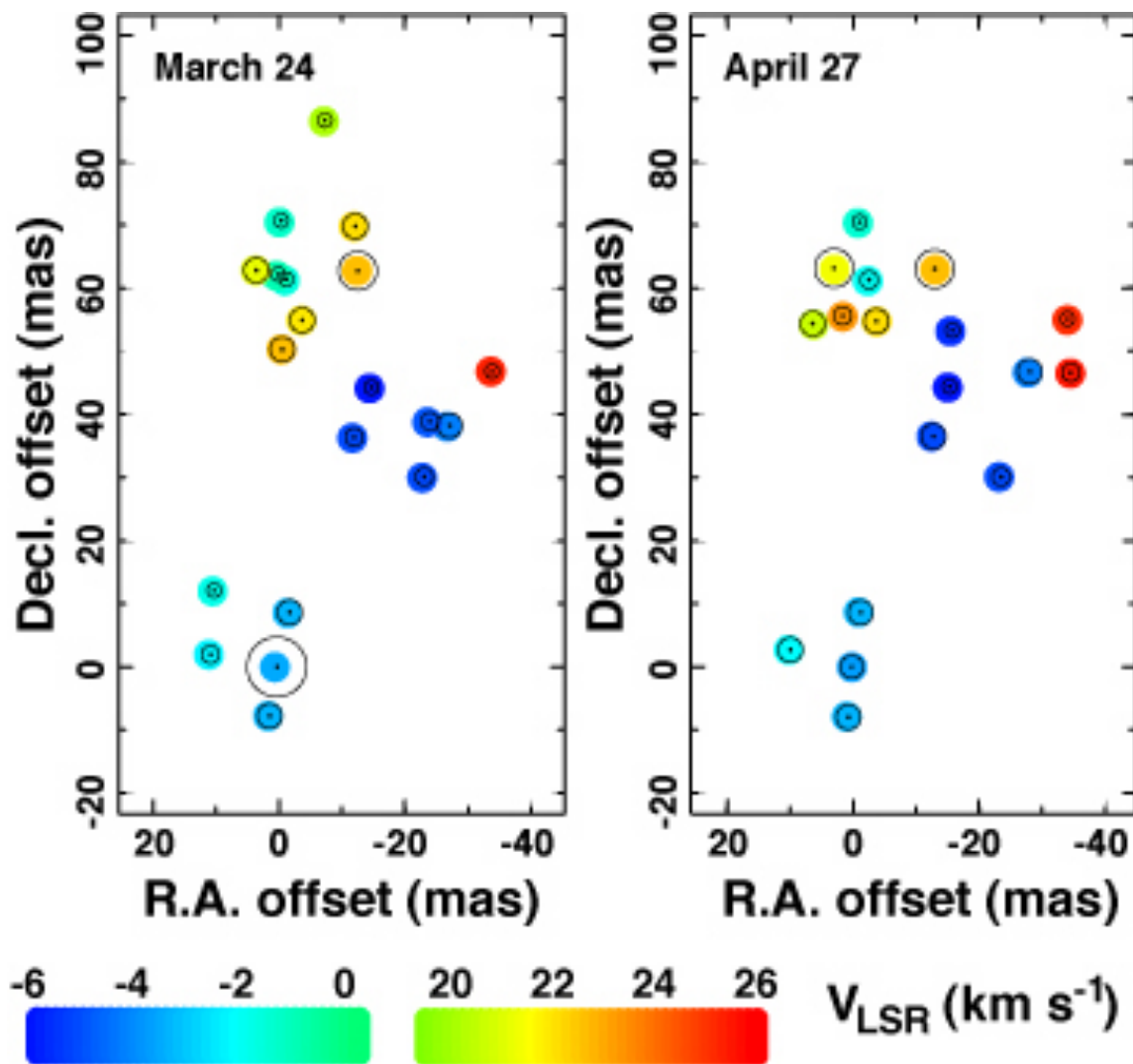
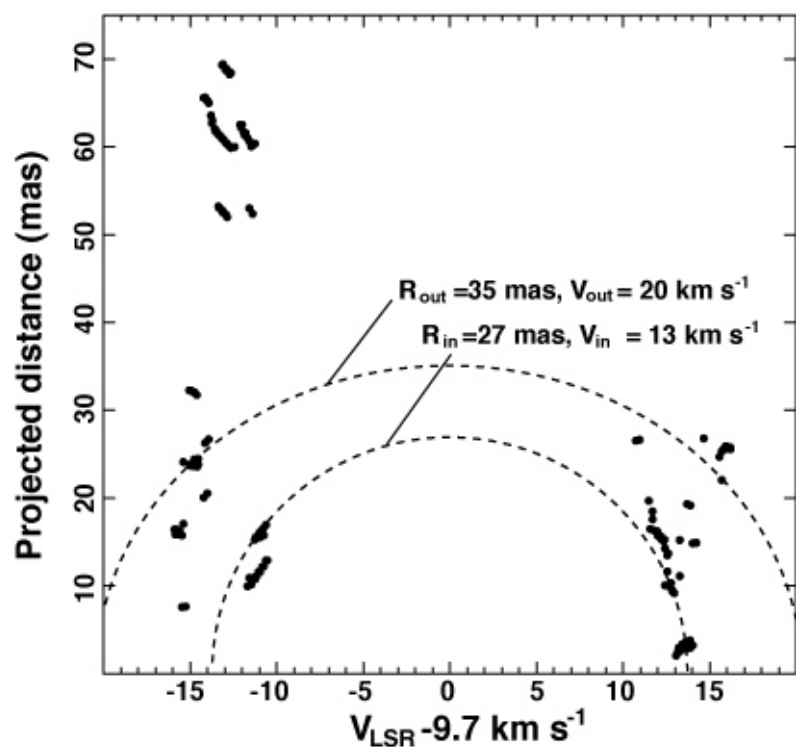
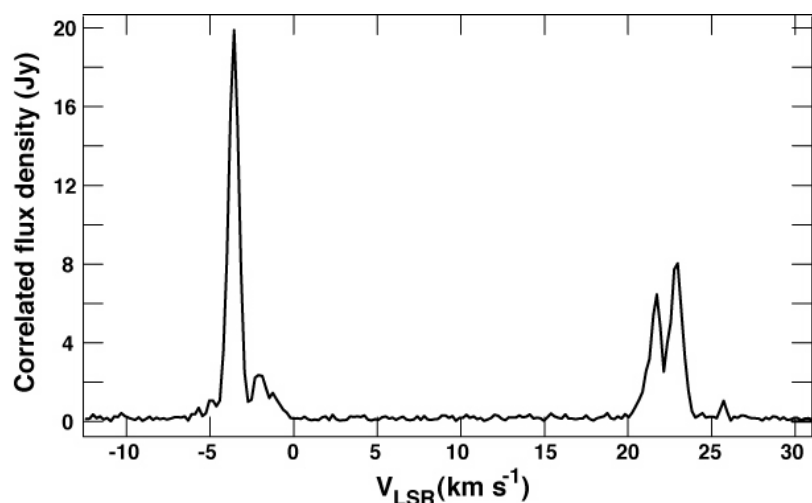
SiO masers
(Soria-Ruiz
et al. 2004)

**WX Psc
(IRC+10011)**

**Scattered light from
asymmetrical flow?
(Hofmann et al. 2001)**

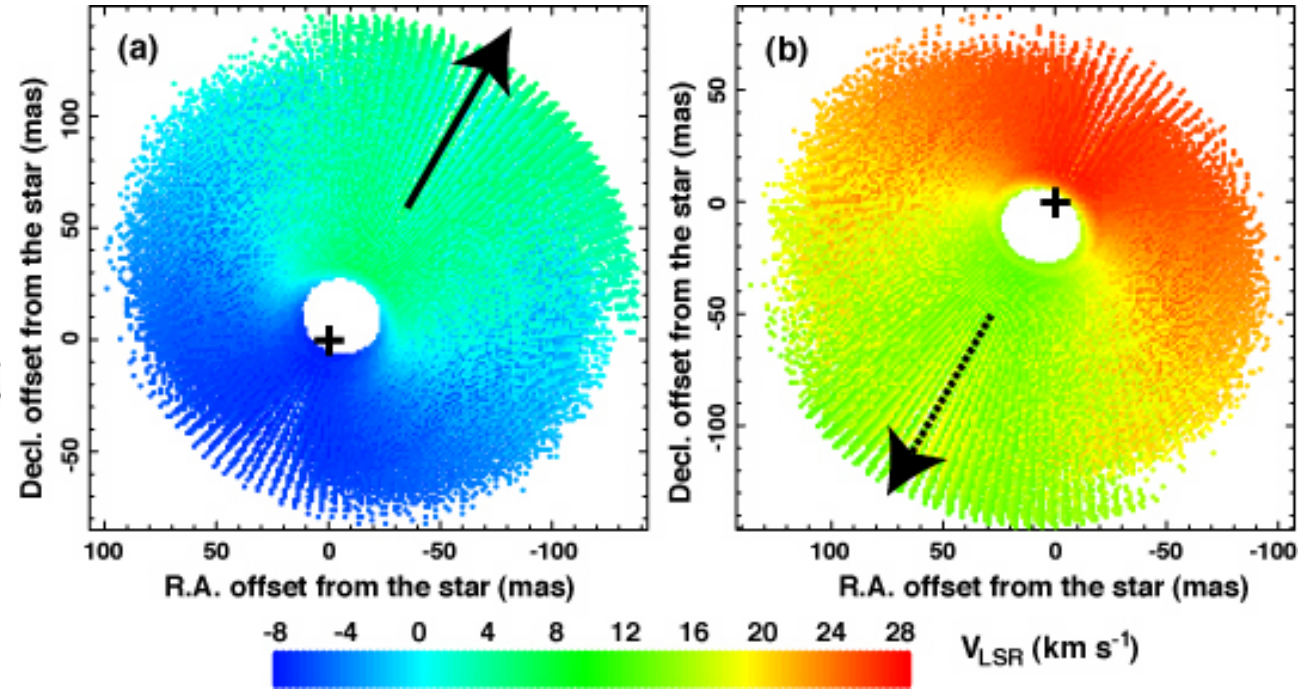
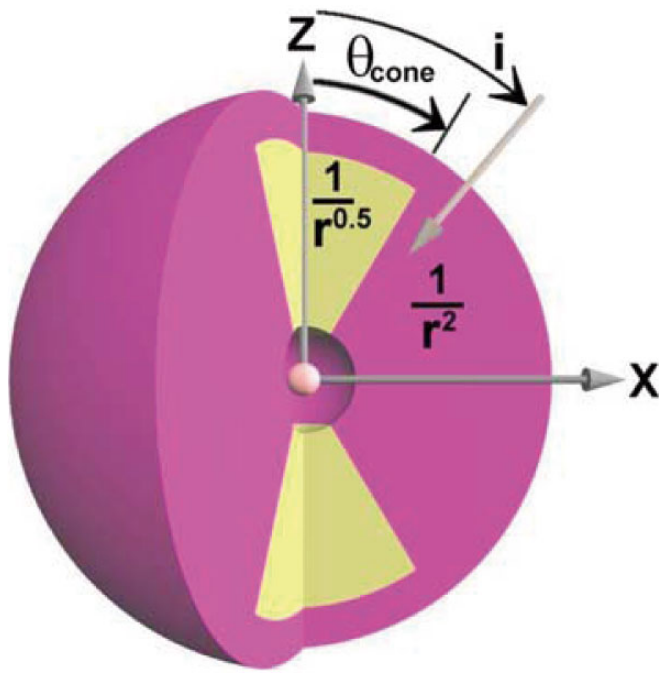


視線速度勾配が反転！



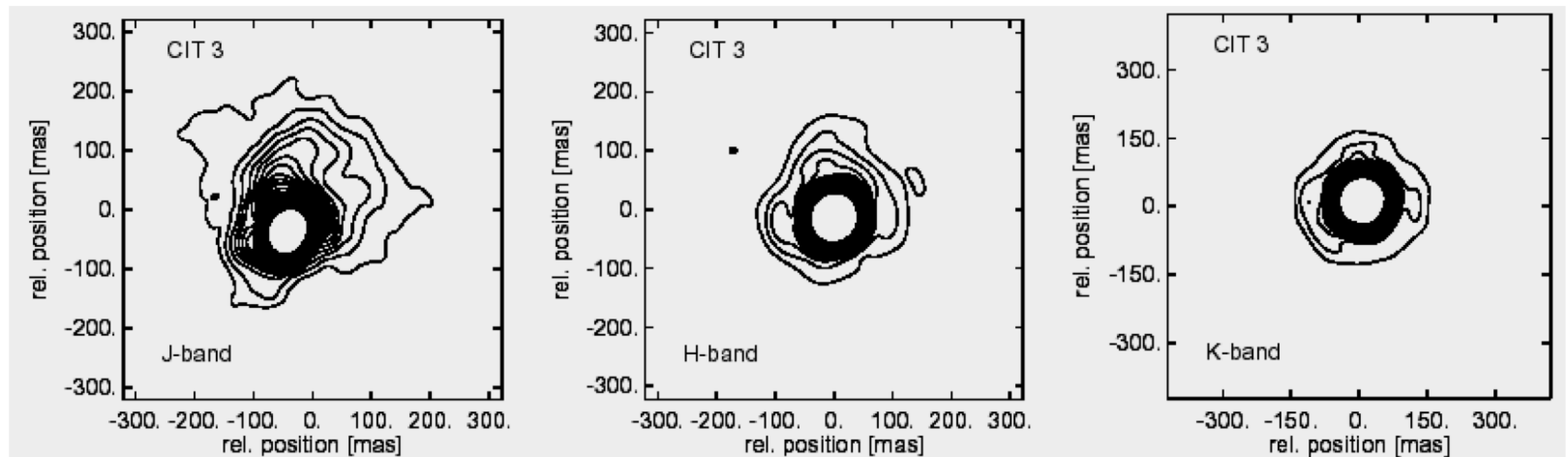
H₂O masers (Inomata et al. 2007)

H₂Oメーザーはまだ星周縁に付随している



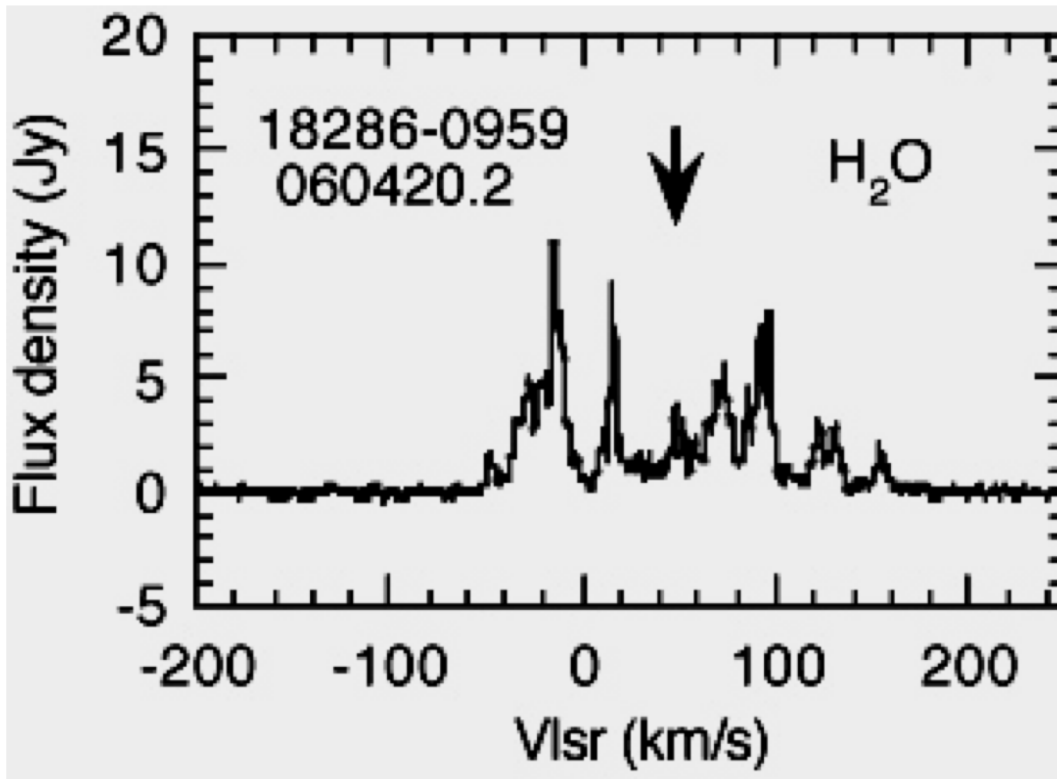
Vincovic et al. (2004)

Maser radial-velocity field model



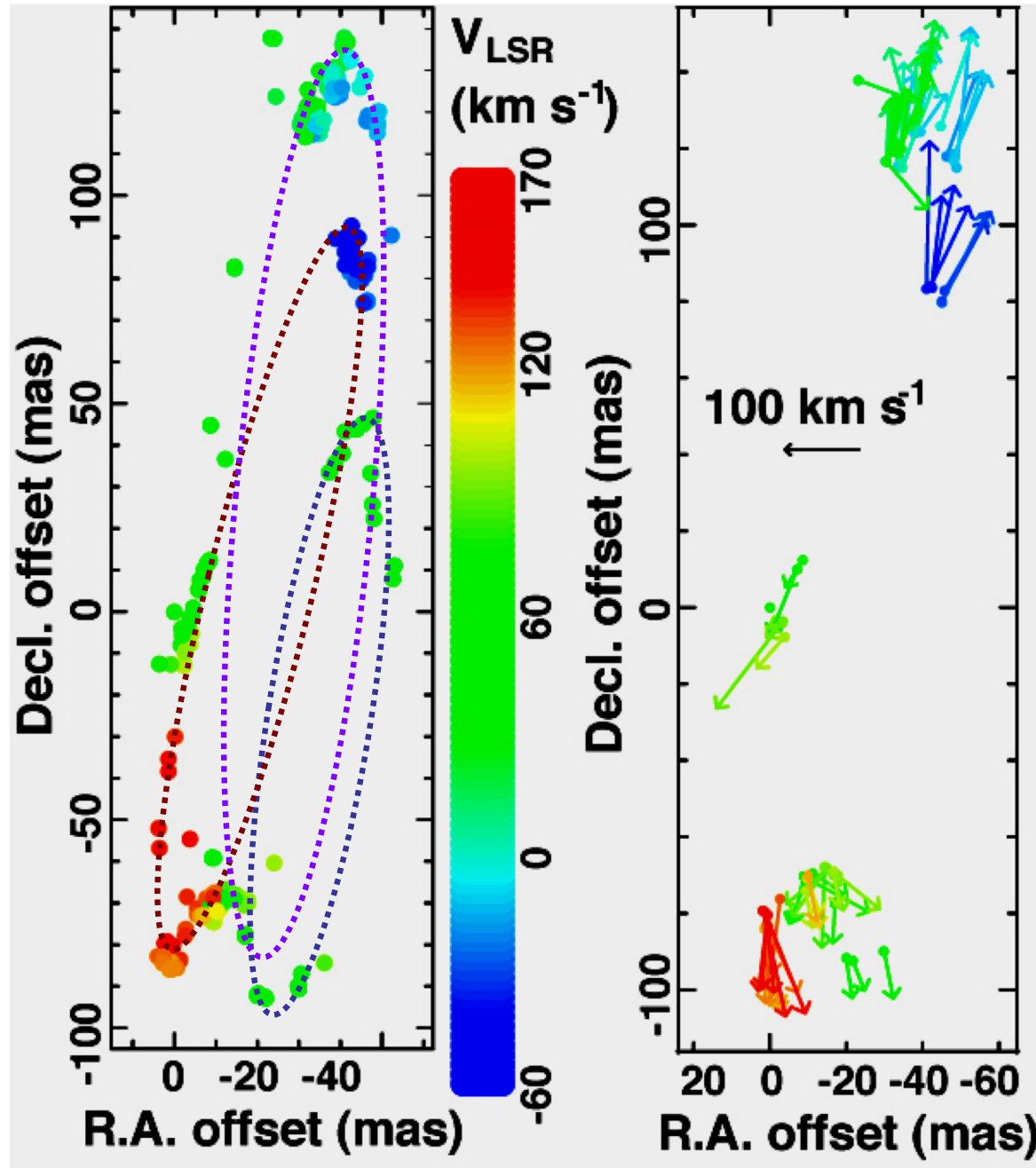
断続的質量放出？

NRO 45m spectrum



IRAS 18286-0959
(Deguchi et al. 2007)

複数楕円でフィットできる！



- Jet velocity
~ 180 km/s
- Dynamical age
~15 years

単一星？
複数星？
断続的質量放出？

※ジェット放出源が
移動して行くことに
注意

Summary

Magneto-hydrodynamical
Corkscrew/precessing jet
 $V > 100 \text{ km s}^{-1}$, $T \sim 100 \text{ years}$

$M_* < 8 M_{\text{sun}}$ single
AGB/post-AGB star
(or binary $< 10 \text{ AU}$?)

Equatorial flow
 $V \sim 30 \text{ km s}^{-1}$
Evolving from
AGB envelope?

Only 10 water fountains
in the whole Galaxy?

脈動変光

- 変光： その理由が判別つかないことがある
 - 食変光 v.s. 脈動変光
- 脈動： 星自身の形が変わる
 - 脈動が長期間維持されるための **調和モード (harmonic mode)** がある
 - 動径脈動
 - 半径の一律変化、脈動領域の端は自由端
 - 振動モード：
単振動 (fundamental tone)、一次陪振動(first overtone)
 - 非動径脈動： 半径の変化が緯度・経度で不揃い
 - 緯度・経度方向にぐるっと回って脈動位相が閉じる： 脈動領域は固定端

脈動に見られる周期－密度関係

- 脈動の一般的描像：重力と外向き圧力勾配が作り出す脈動

－ 運動方程式

$$\rho \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial R} - \frac{GM}{R^2} \rho$$

－ 平衡状態

$$\rho \frac{\partial^2 R_0}{\partial t^2} = 0 = -\frac{\partial P_0}{\partial R} - \frac{GM}{R_0^2} \rho, \quad \rho \approx \text{const}$$

－ 摂動：平衡状態からのずれ

$$r = R - R_0, \quad p = P - P_0$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial R} \approx \frac{\partial P_0}{\partial R} + \frac{\partial^2 P_0}{\partial R^2} r = -\frac{GM}{R_0^2} \rho + \frac{2GM}{R_0^3} \rho r, \quad \frac{GM}{R^2} \approx \frac{GM}{R_0^2}$$

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} \approx -\frac{2GM}{R_0^3} r \sim -\frac{8\pi G \bar{\rho}_*}{3} r, \quad \bar{\rho}_*: \text{ mean stellar den}$$

$$T \bar{\rho}_*^{1/2} \approx \text{const.}$$

**Pulsation parameter
(Q-parameter)**

$$\left[\frac{T}{1 \text{ day}} \right] \left[\frac{\bar{\rho}_*}{\bar{\rho}_{\text{sun}}} \right]^{1/2} \approx \begin{cases} 0.08 (\text{Shapley}) \\ 0.03-0.05 (\text{recent mo}) \end{cases}$$

上記摂動方程式から
左式に示した関係を
導出しなさい

脈動を持続させる仕組み

- 前頁で示した一般的描像：平衡状態へと脈動が減衰

- **κメカニズム**：部分電離層(H, He)の不安定性

温度低下－電離度低下－吸収係数上昇－光度低下

－放射圧低下へ

温度上昇－電離度増加－吸収係数低下－光度上昇

－放射圧上昇へ

半径－光度変化 $L_* = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$

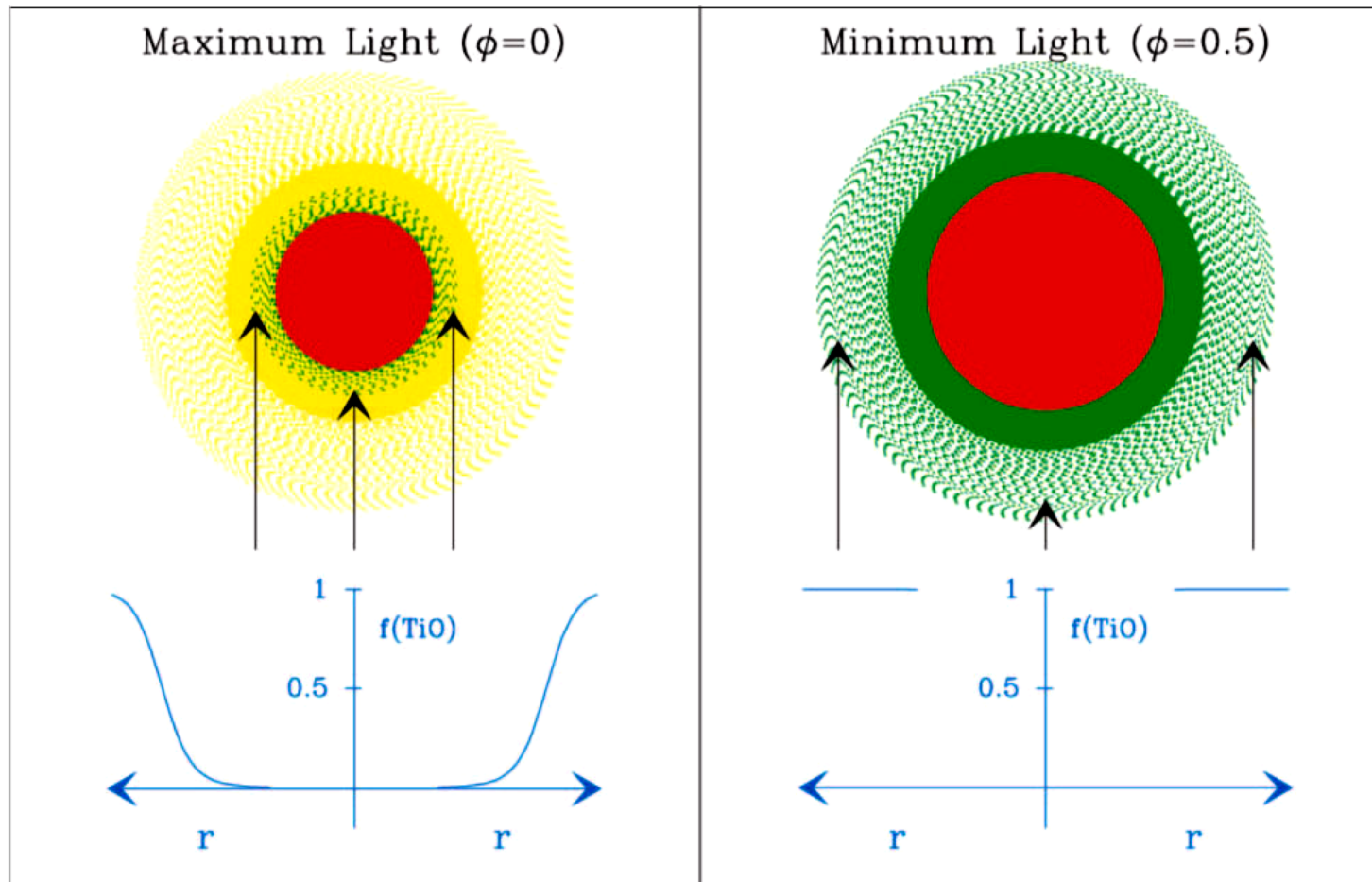
光度極大期⇒ **放射圧が卓越** ⇒ 半径拡大⇒ 低温域へ

光度極小期⇒ **重力が卓越** ⇒ 半径縮小⇒ 高温域へ

収縮から膨張の切り替わりにおいて衝撃波発生

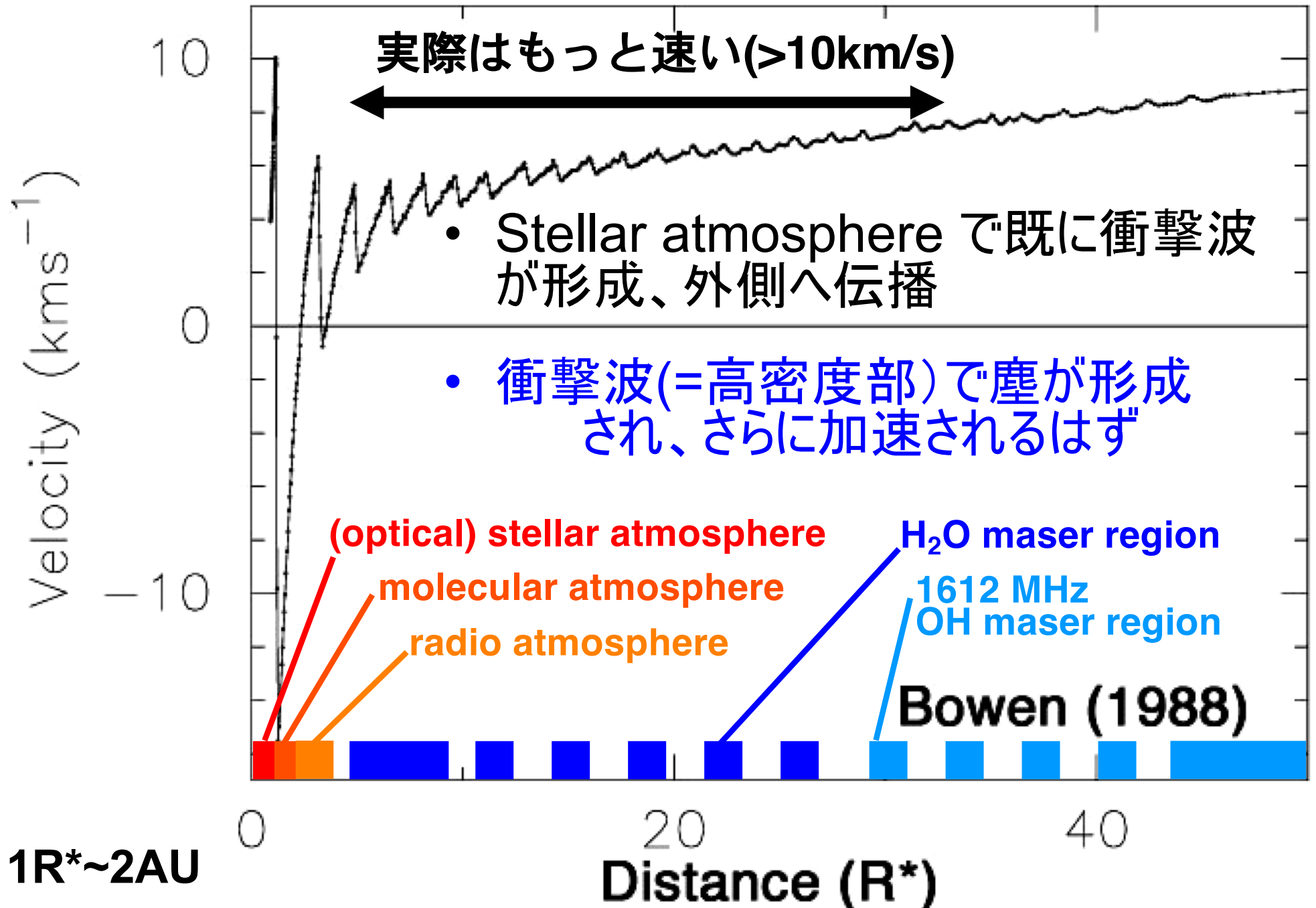
ミラ型変光星の脈動変光

- 可視光変光振幅が赤外線変光振幅よりも大きい
- 極小時に Si質(silicate)／C質(graphite) 塵の大量形成
- 形成された塵が可視光線を効率よく吸収

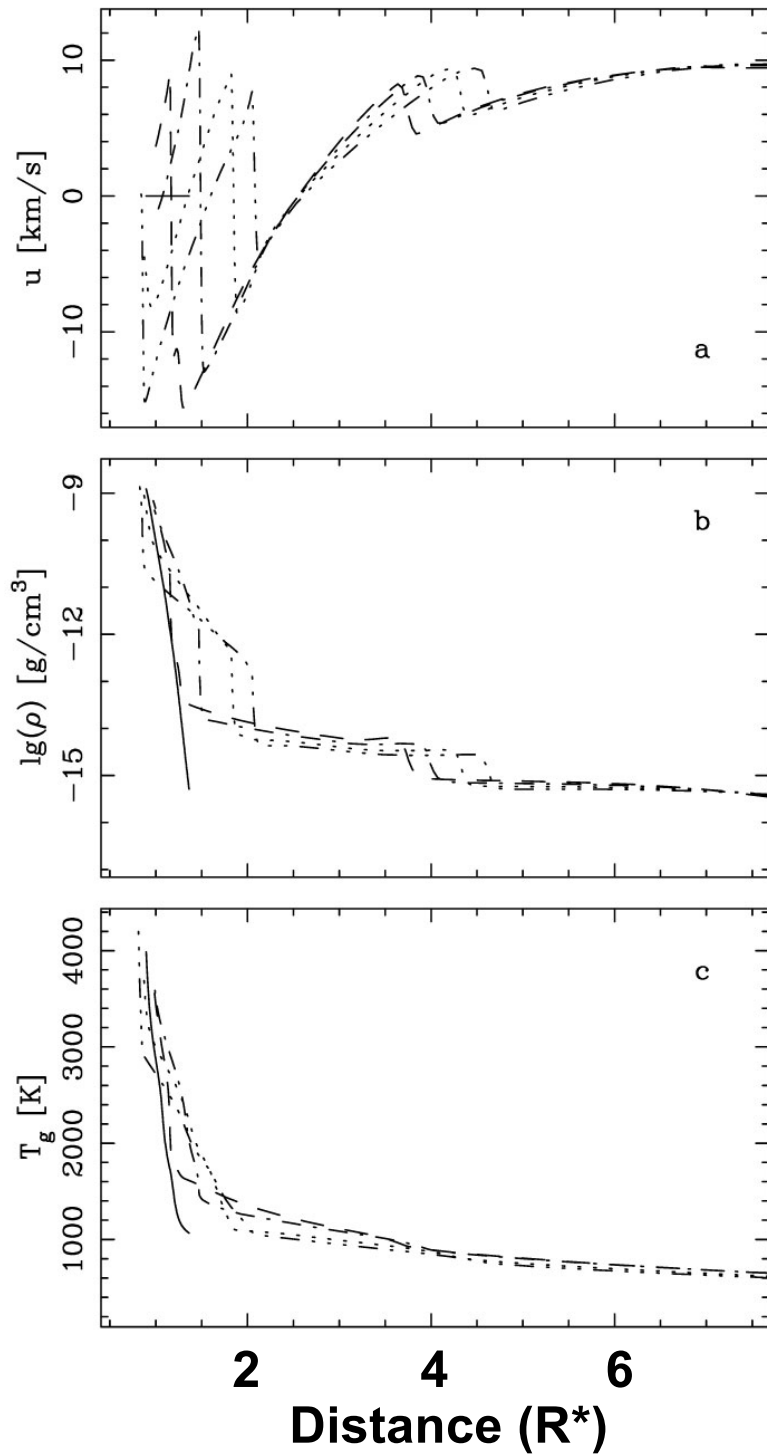


**TiO formation
(Reid &
Goldstone 2002)**

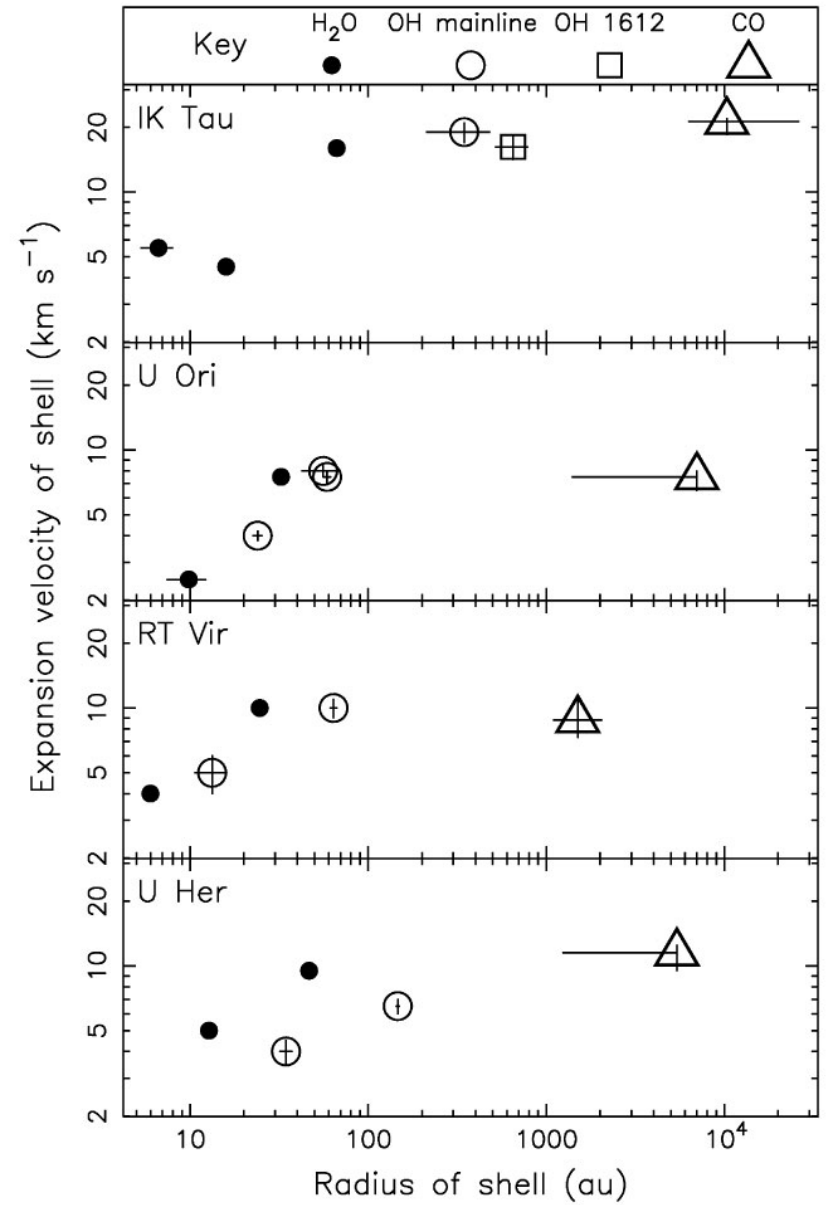
脈動変光衝撃波の星周縁への伝播



恒星風+脈動變光衝擊波



**C-rich model
(Hofner
et al. 2003)**



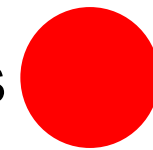
**Maser observations
(Bains et al. 2003)**

レーザーから脈動が見える

- 脈動に伴ってガスが浮上
- 重力によって引き戻される
- 上記2つの流れがぶつかり 衝
撃波と乱流を形成
- 海辺の波に似ている
- 減速の確認
 - IK Tauri
(Matsumoto et al. 2008)
 - TX Cam
(Diamond & Kemball 2003)



SiO masers
in TX Cam

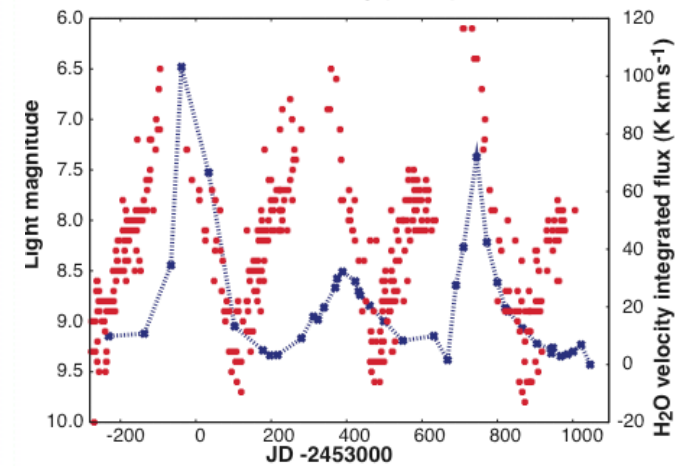
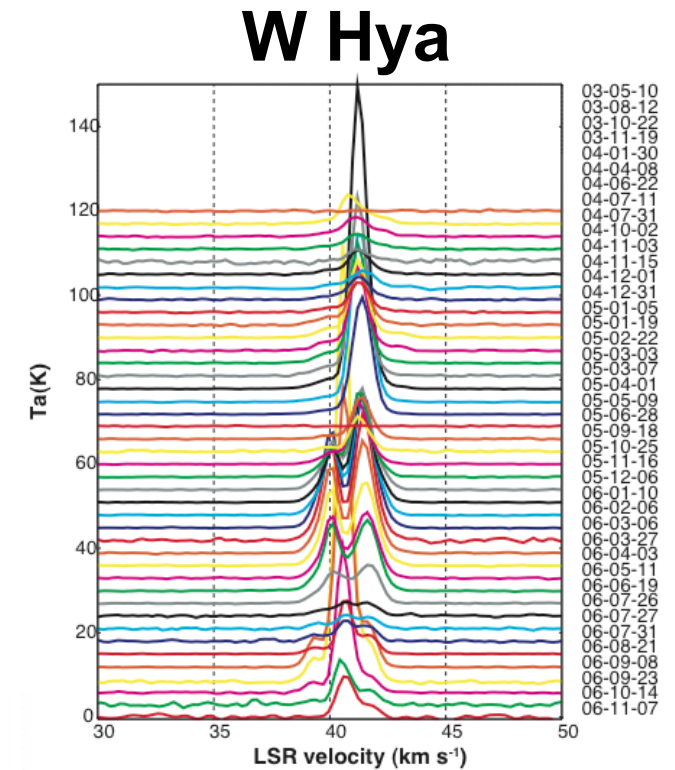
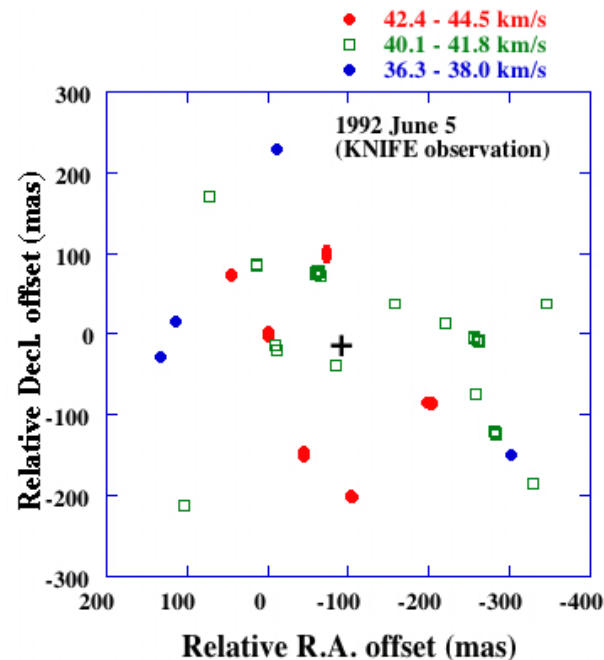
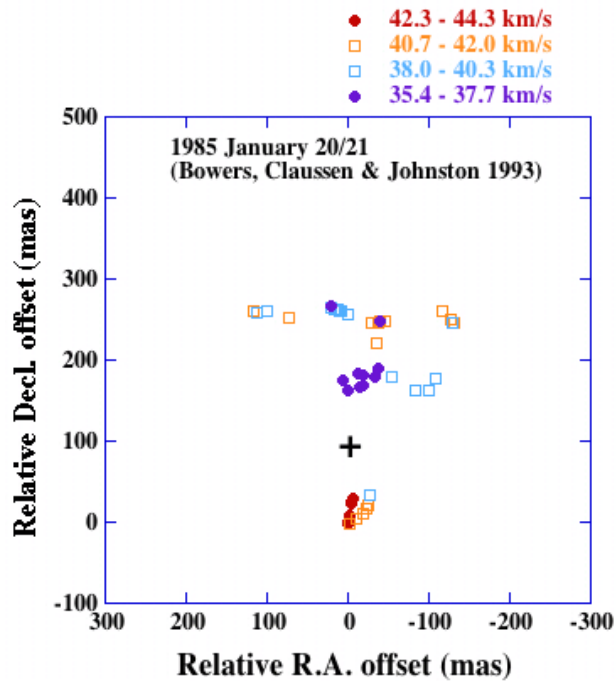


赤色超巨星
光球サイズ

(Diamond & Kemball 2003)

H₂Oメーザー領域への 衝撃波伝播

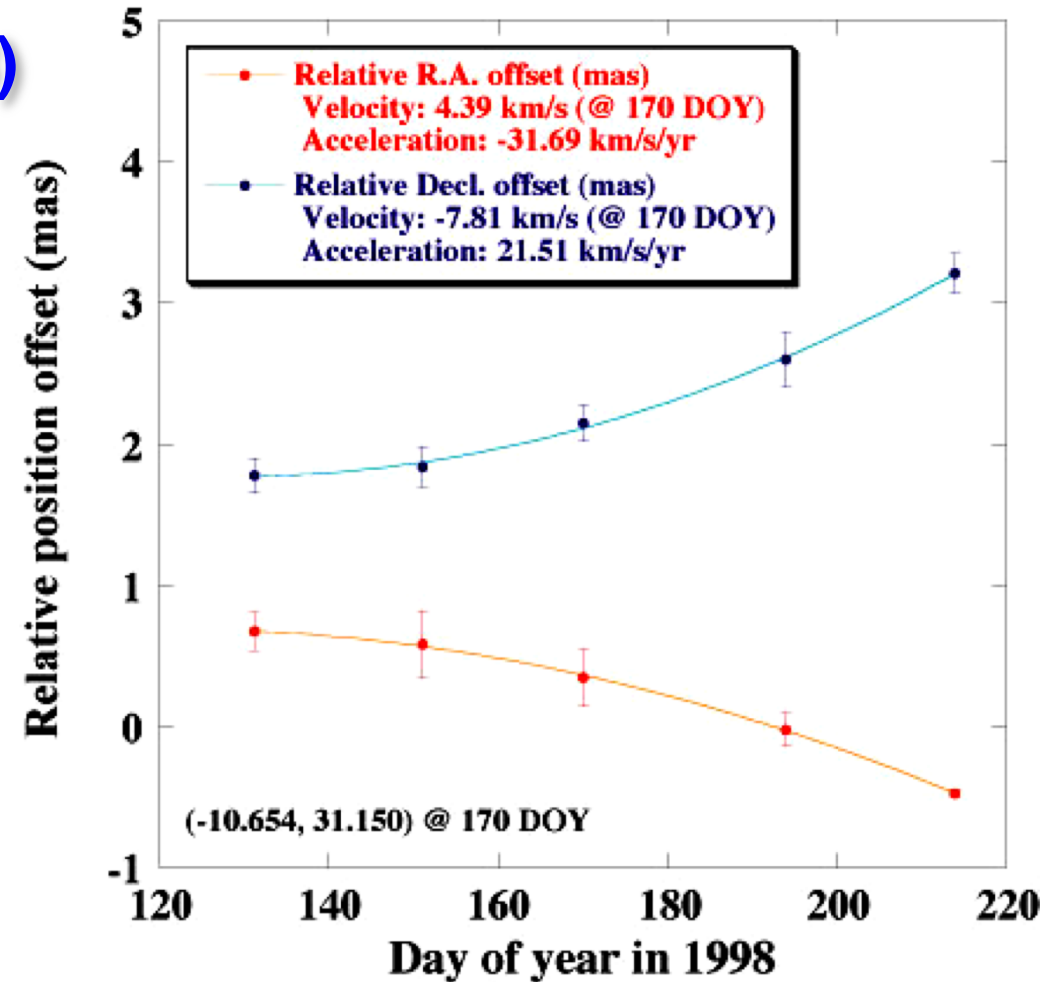
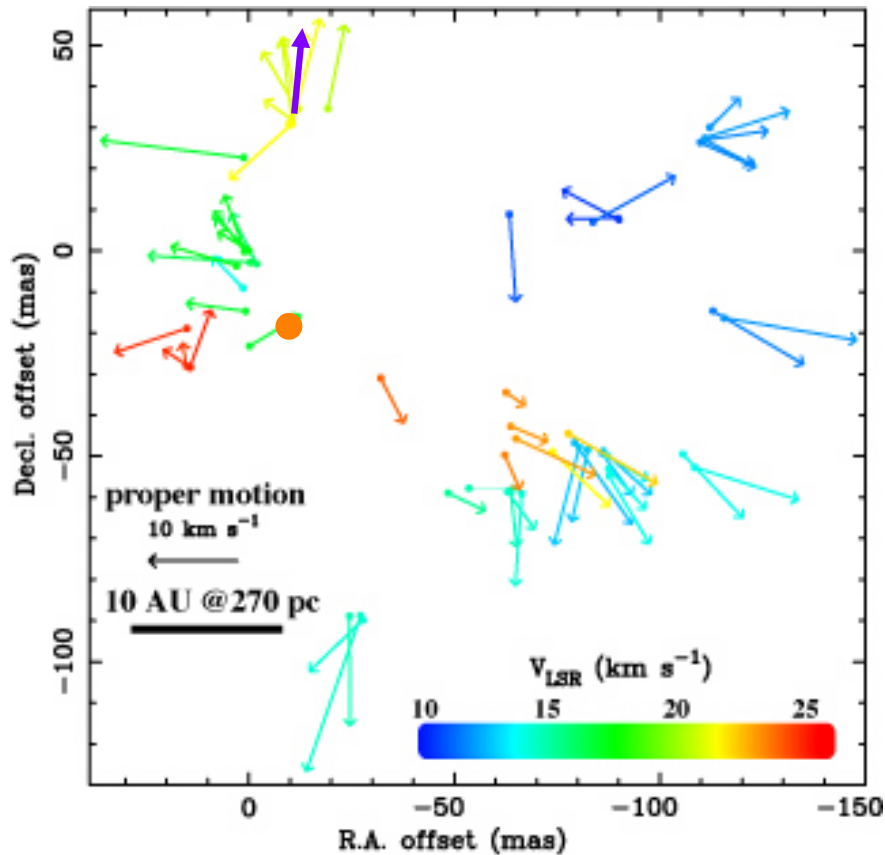
- H₂Oメーザーに見られる
はっきりした周期的変動
(強度・空間分布サイズ?)
- 可視光線の周期的等級変化に対し
て0.7-1.2周期分遅れて変動



Shintani et al. (2008)

H₂Oメーザー領域の加速=衝撃波伝播

RT Virginis (Imai et al. 2003)



O-rich 星周縁における衝撃波伝播モデル: 終端速度が C-rich よりも大きい (~30 km/s) (Hofner et al. 2003)

視線速度ドリフトでは見辛い

H₂Oメーザー領域の加速： 速度勾配が大きいため

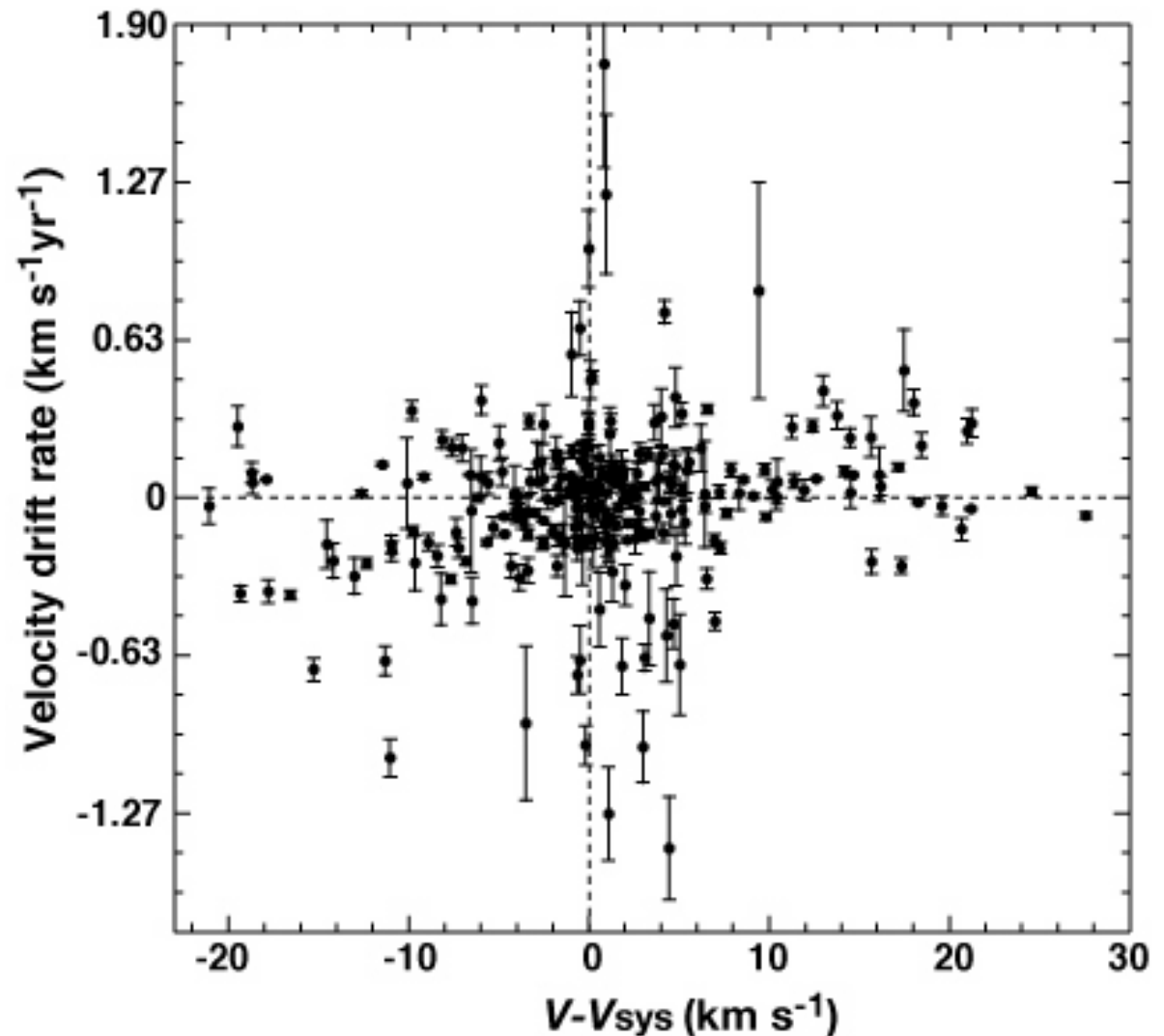
メーザーガス塊の
流体力学的扱い

$$\frac{dV(r,t)}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla \cdot \mathbf{V}$$

左辺:メーザーガス塊中
のある質点の加速度
右辺第1項:ある場所 r
における速度場の
時間変化 (定常状態で ~ 0)

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \approx V \frac{\Delta V}{\Delta r}$$

前頁の結果(天球面上加速は、
上式を満たしている)



Shintani et al. (2008)