



山口大学

2013, 03, 07-08

様々な変光現象とその観測的アプローチ@ 茨城大学

大質量(原始)星周囲で観測される 周期的な強度変動現象

杉山 孝一郎

(山口大学 大学院理工学研究科 藤沢研究室)

Collaborator: 藤沢 健太, 元木業人, 新沼 浩太郎, 下村 忠資 (山口大学), 面高 俊宏 (鹿児島大学), 米倉 覚則, 百瀬 宗武, 齋藤 悠 (茨城大学), 本間 希樹 (国立天文台), 稻吉 恒平, 田中 圭 (京都大学), 細川 隆史 (東京大学), 内山 瑞穂 (東京大学), Simon Ellingsen (UTAS), Jimie Green (ATNF)

発表の流れ

- 6.7GHz メタノールメーザー
 - 発生場所
 - 強度変動
 - 特に“周期的”な強度変動
- 周期変動を引き起こすメカニズム
 - 既存のモデル: Colliding Wind Binary (CWB)
 - 新(稲吉)モデル: 大質量原始星の脈動
- 今後の発展性・計画

6.7GHz メタノールレーザー

大質量星の形成過程

■ 謎な点

- (おそらく)質量降着 ~~or 合体?~~
- 星近傍(or 表面)の物理変動現象
- 角運動量の排出機構
- 磁場の役割

■ 可視光での直接撮像は困難

- 距離が遠い、絶対数が少ない、短寿命
- 多数の星を含むクラスター内で形成
- 濃い分子雲の奥深くで形成

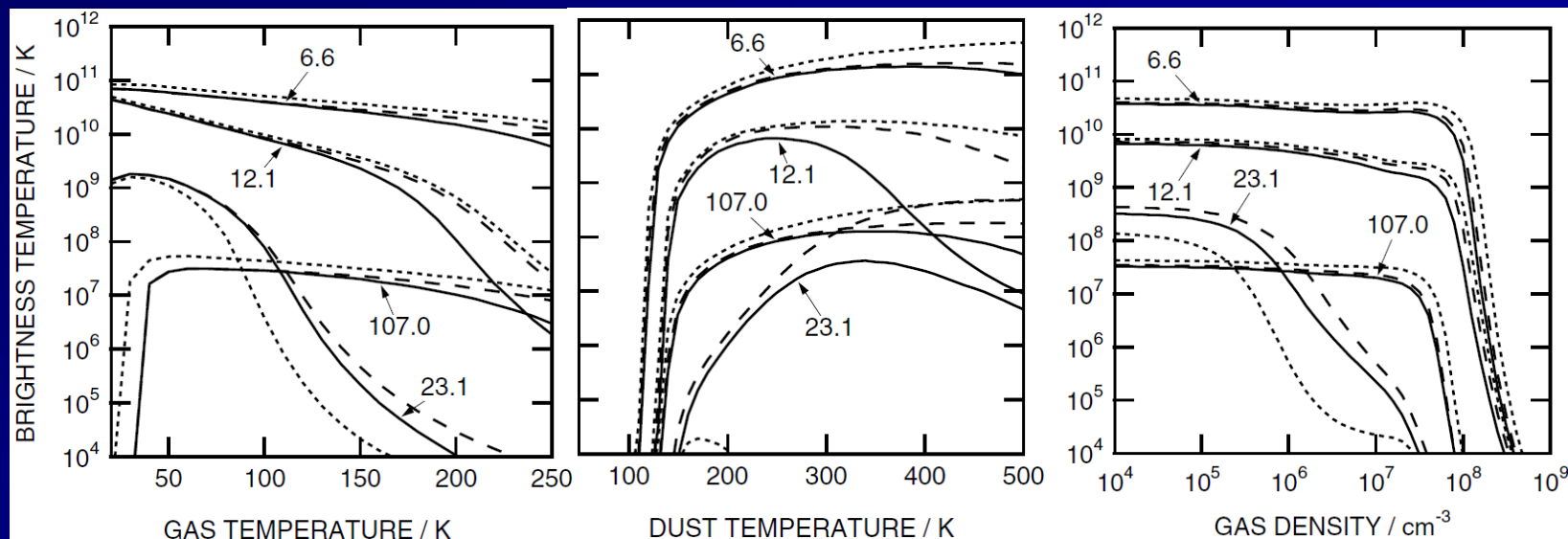
6.7 GHz メタノールメーザー その1: 励起機構・条件

■ 赤外線励起

– 中心星により暖められたダストからの赤外線

■ 適度な周辺環境で励起可能

– T_{gas} : 30-200 K, T_{dust} : 100-300 K, n_{H_2} : 10^4 - 10^9 cm^{-3}



Methanol maser excitation model (Cragg+ 05)

6.7 GHz メタノールメーザー その2: 出現時期

- ~900天体の大質量星形成領域から検出
- 大部分が UC HII 領域形成より前に出現
 - ~ 10^4 yr オーダー (van der Walt 05) の進化段階
- HMC or high-mass YSO から多く検出

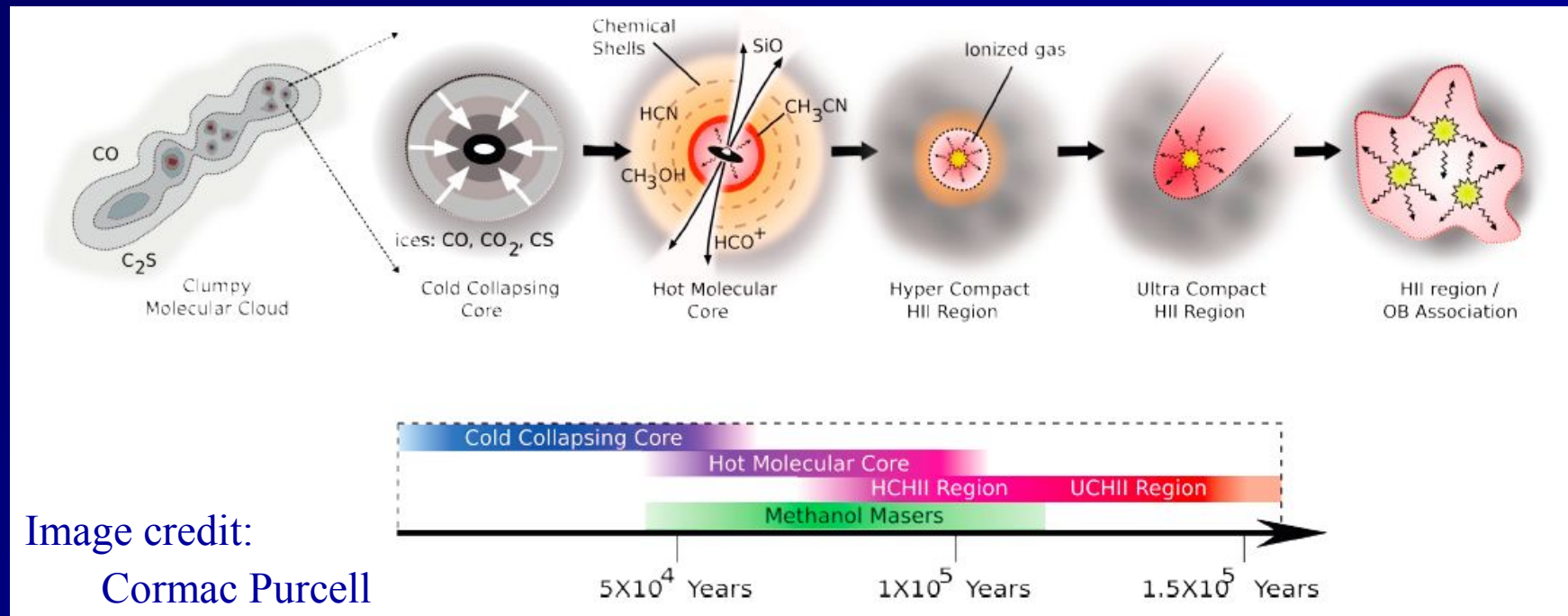
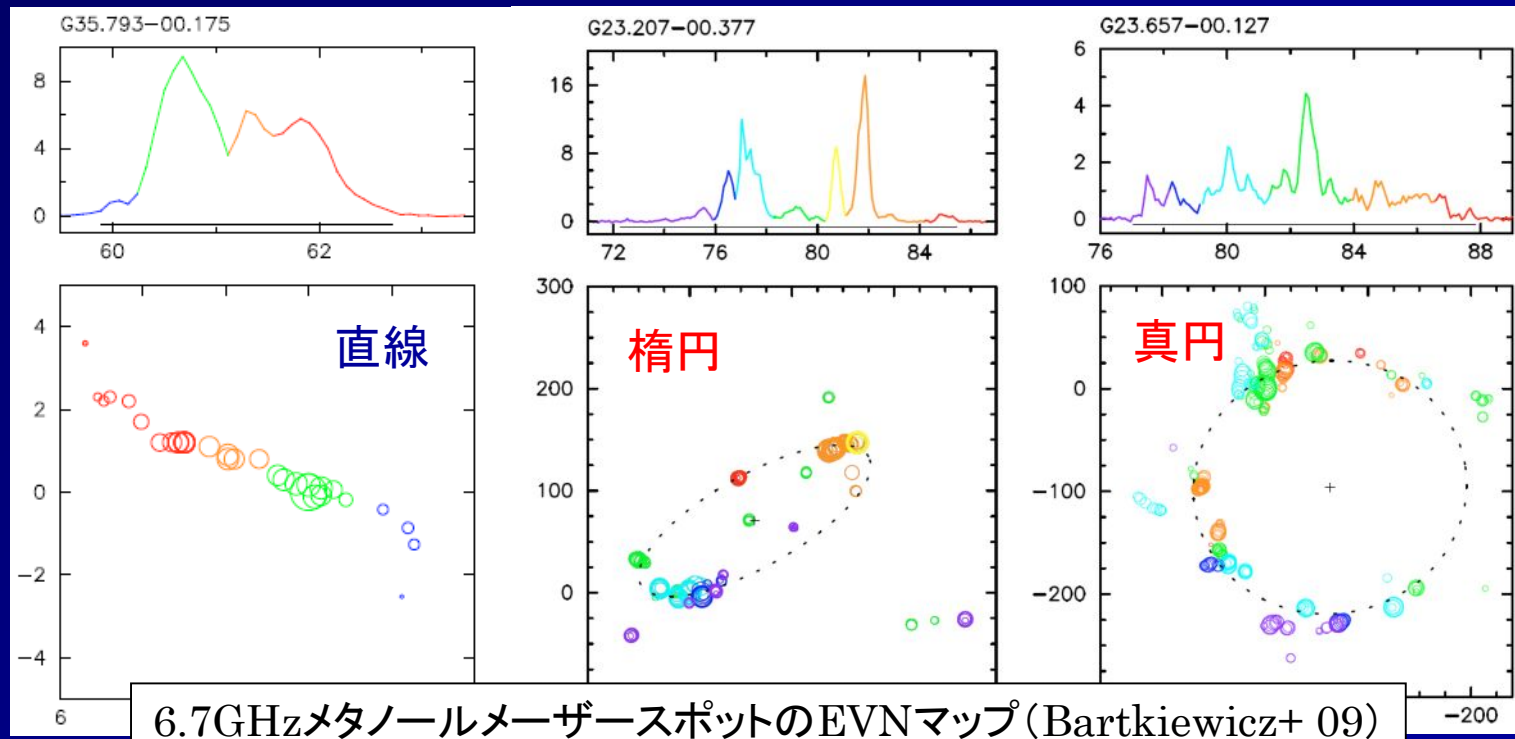


Image credit:

Cormac Purcell

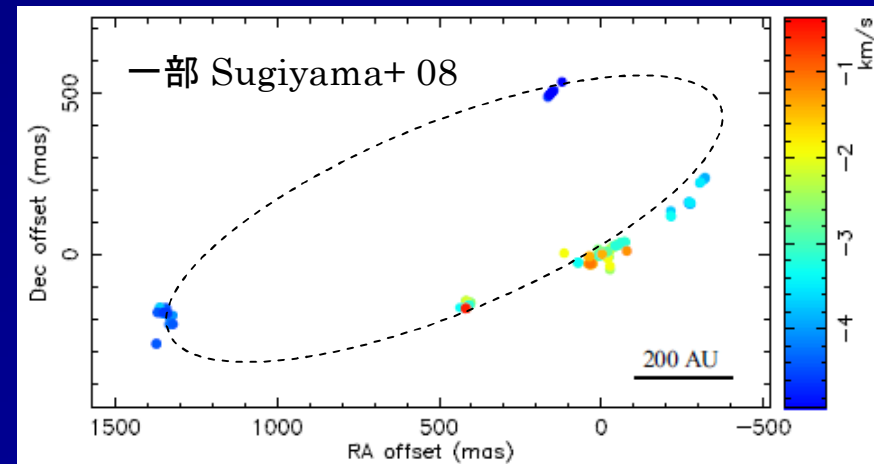
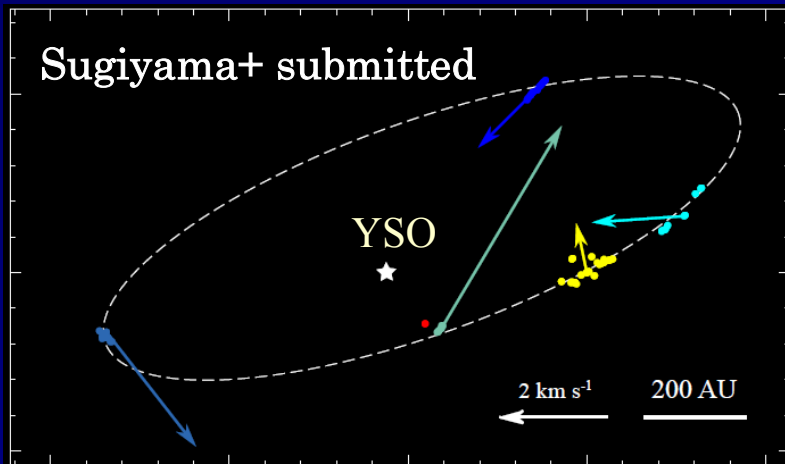
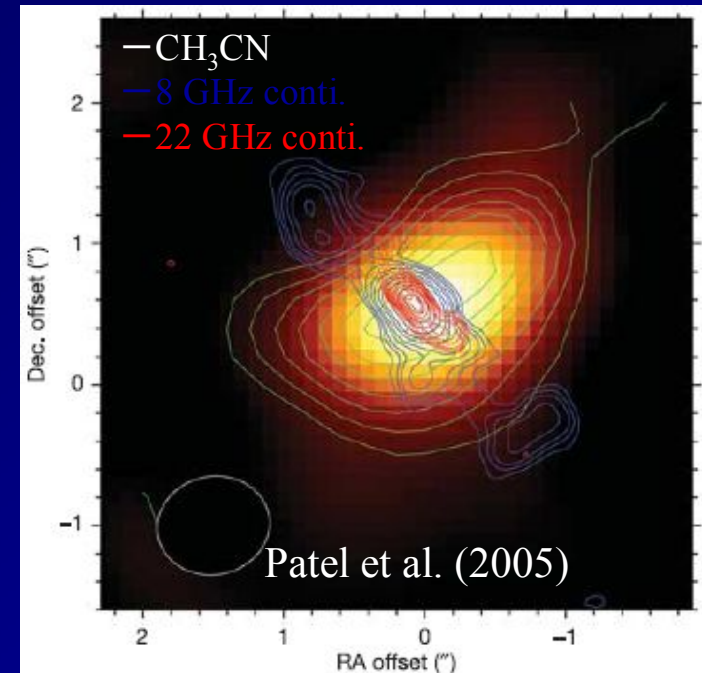
6.7GHzメタノールメーザー その3: 発生場所(空間分布)

- 大質量原始星に存在し得る降着円盤に付随?
 - 視線速度範囲が高々 10 km s^{-1} 程度
 - 直線形状 & 速度勾配: Keplerian edge-on disk
 - 楕円形状 & 速度勾配: some inclined (face-on) disk



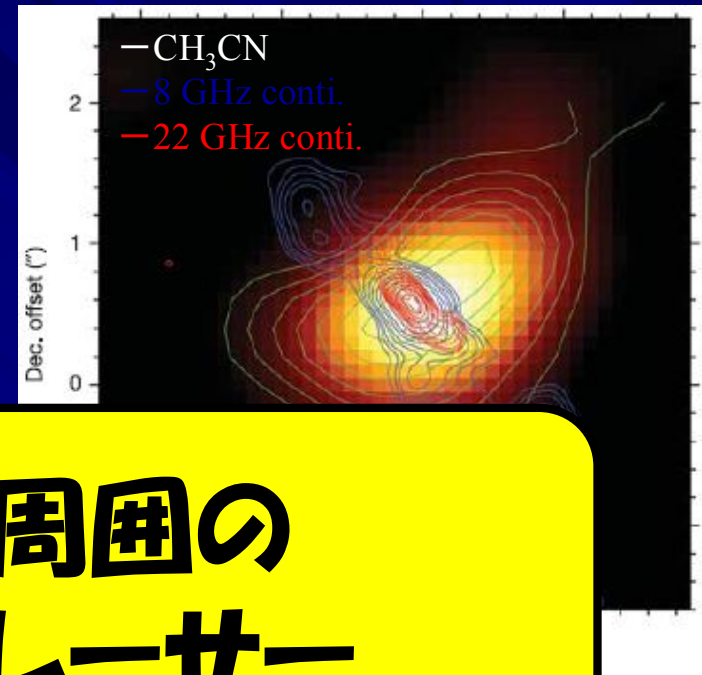
Cep A-HW2 の例

- 距離: 0.70 kpc
- 高速ジェット: ~ 500 km/s
 - 8, 22GHz 連続波 (e.g., Curiel+ 06)
- 分子回転円盤の検出
 - CH_3CN , NH_3 , SO_2 (e.g., Patel+ 05)
- 楕円状のメタノールメーザー
 - 分子回転円盤と一致
 - 励起星が中心に位置
 - 回転 + インフォール運動を検出

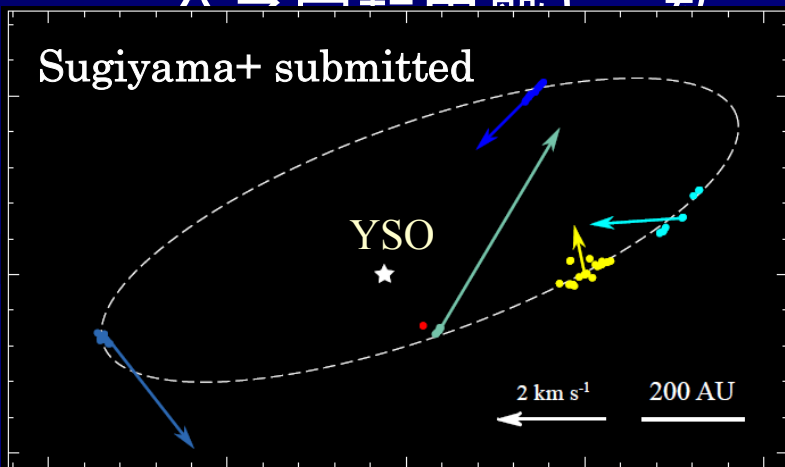


Cep A-HW2 の例

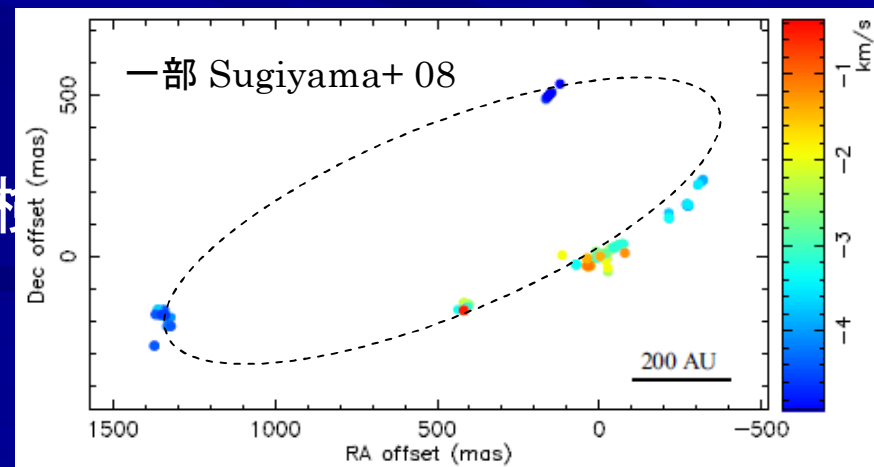
- 距離: 0.70 kpc
- 高速ジェット: ~ 500 km/s



大質量原始星周囲の 回転ガス円盤トレーサー



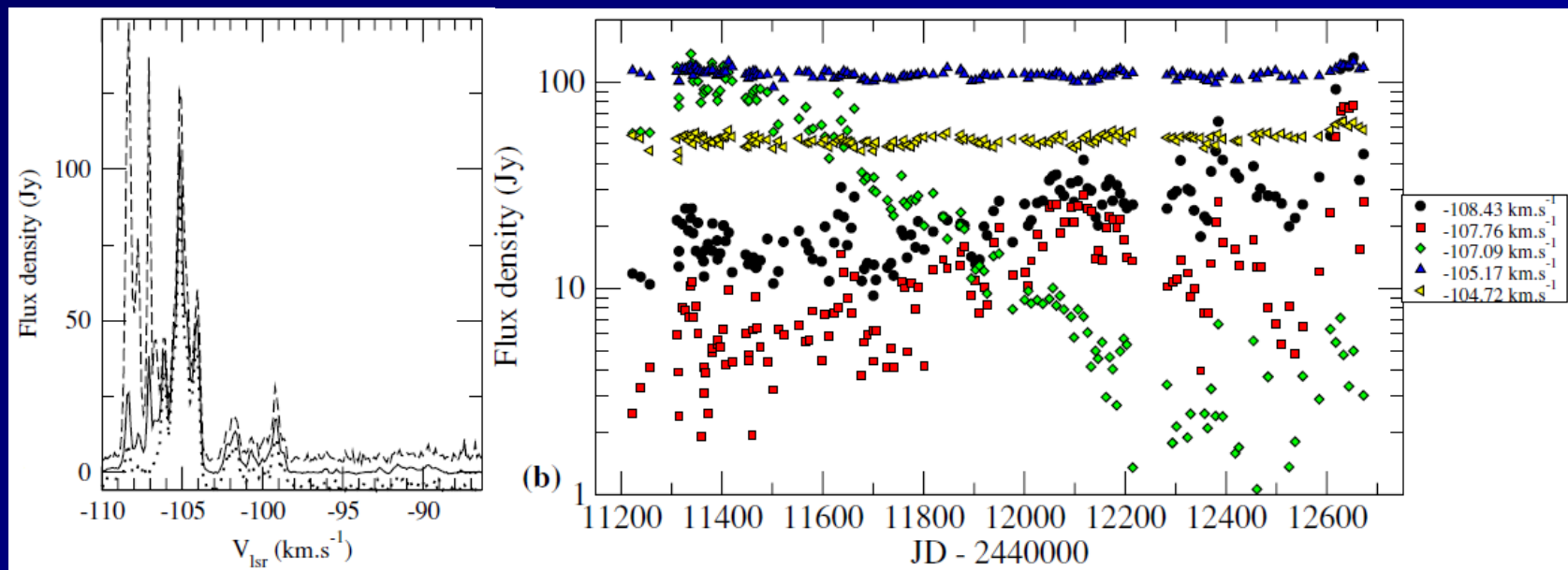
動を相



様々な強度変動

様々な強度変動 その1 ～ 単調増加・減少 ～

- 500日以上の長期間かけた単調増価・減少
- 全てのスペクトル成分が同期しているわけではない

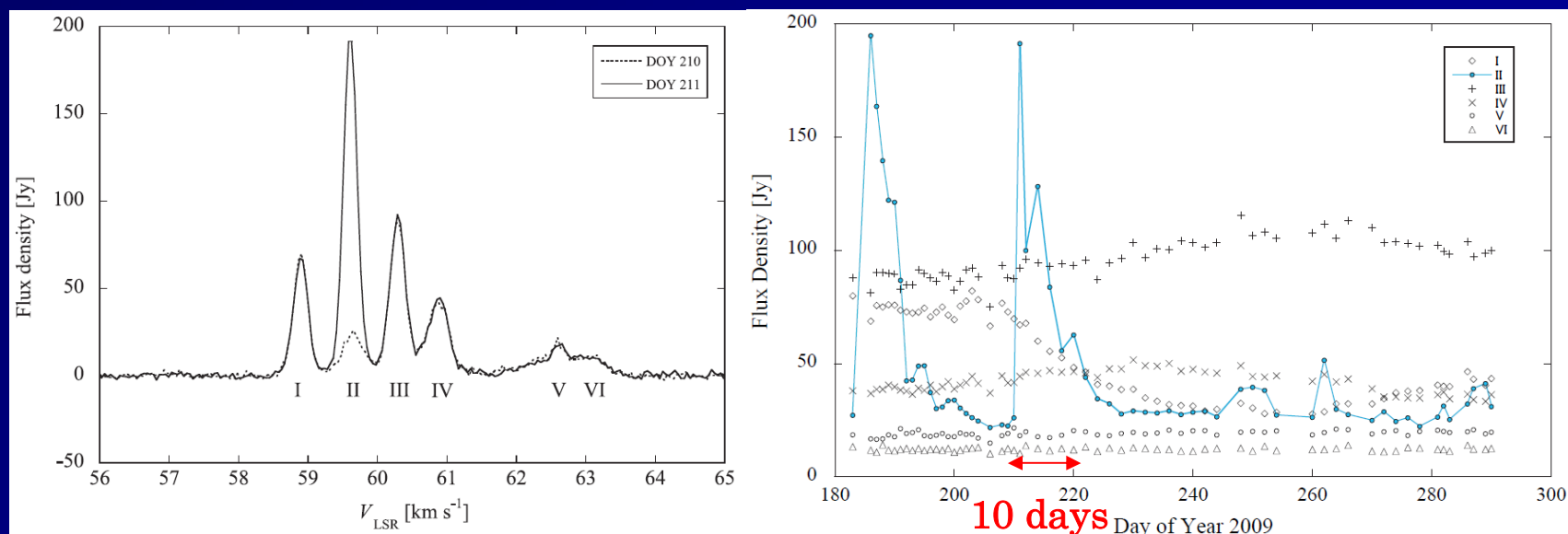


Hartbeestock 26m で観測された単調増加・減少強度変動 in G340.79-0.10 (Goedhard+ 04)

様々な強度変動 その2

～ バースト的 ～

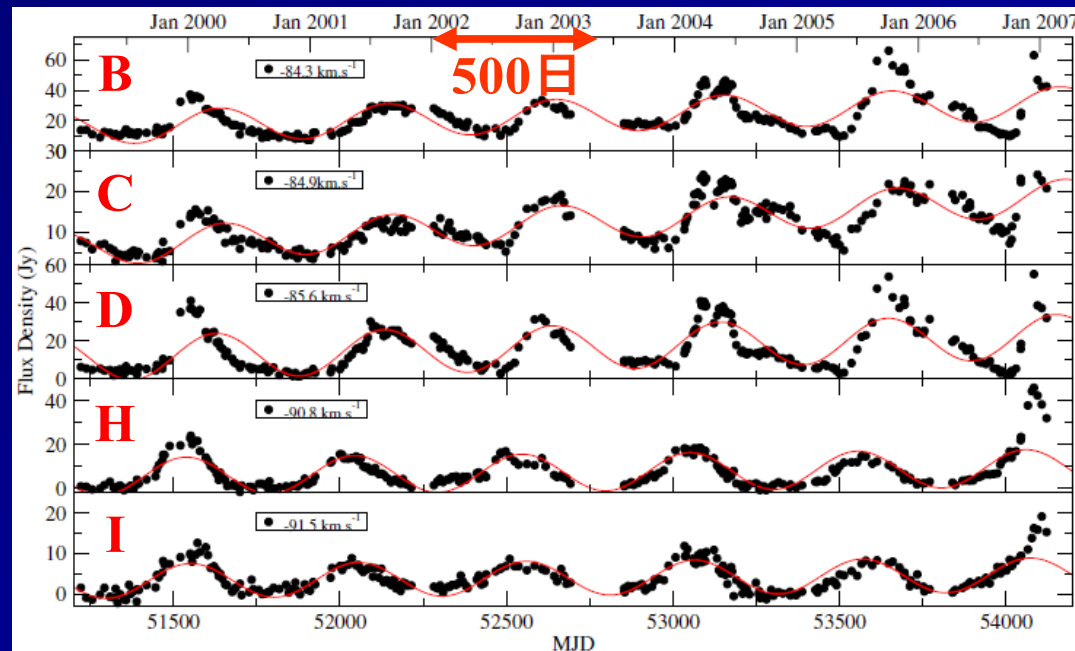
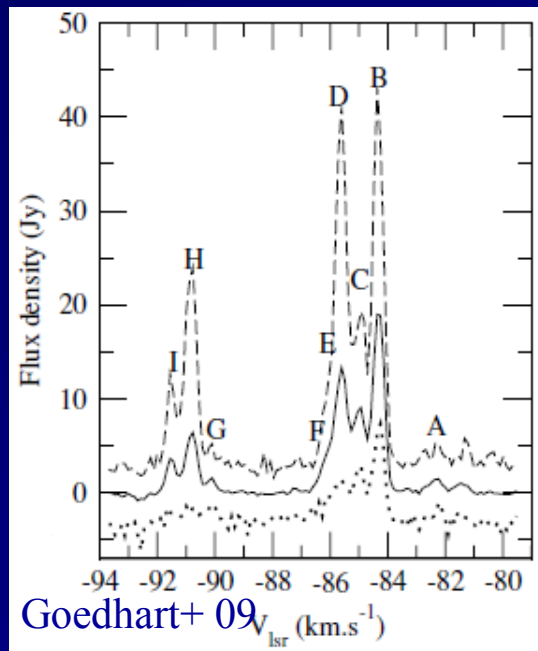
- 1日以内でフラックス密度が7倍以上に上昇
 - 1成分のみ、短期間に何度か出現
- 5日程度で減少 ⇔ 放射冷却タイムで説明可能
- 小質量星表面で生じる磁気リコネクションに起因？



Yamaguchi 32m で観測されたバースト的強度変動 in G33.64-0.21 (Fujisawa+ 12)

様々強度変動 その3 ～ 周期的 ～

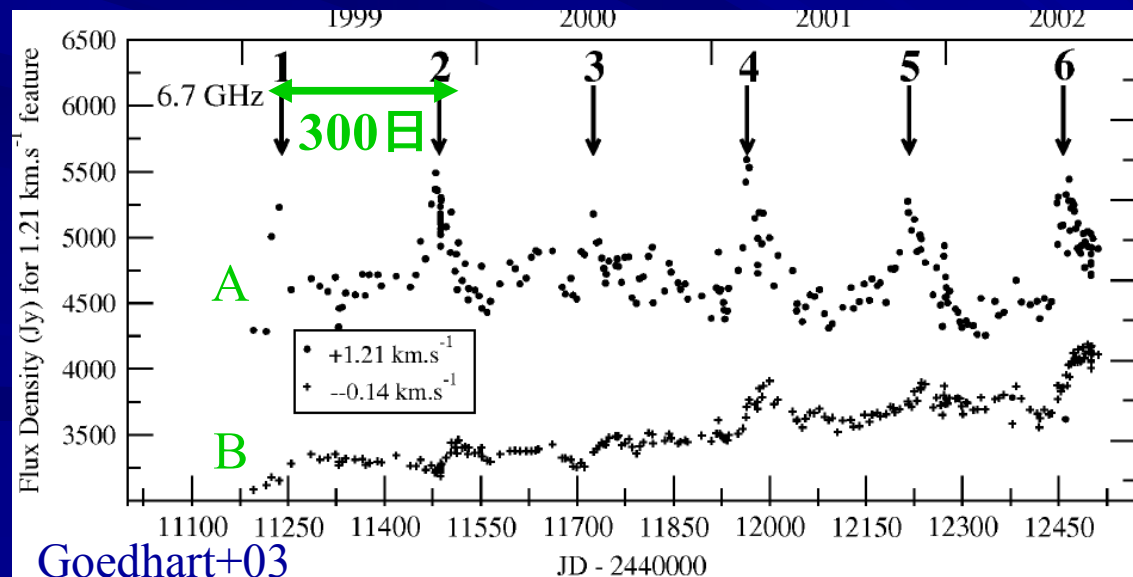
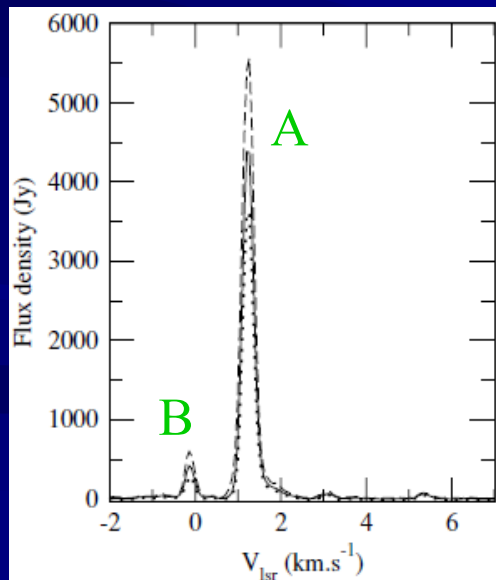
- 周期変動は大質量星周囲では初検出！
- 全スペクトル成分間で**同期** ⇒ 励起源の変動？
- 周期は 100-700日 程度
- 傾向は連続的 or 間欠的 の両方存在



様々強度変動 その3

～ 周期的 ～

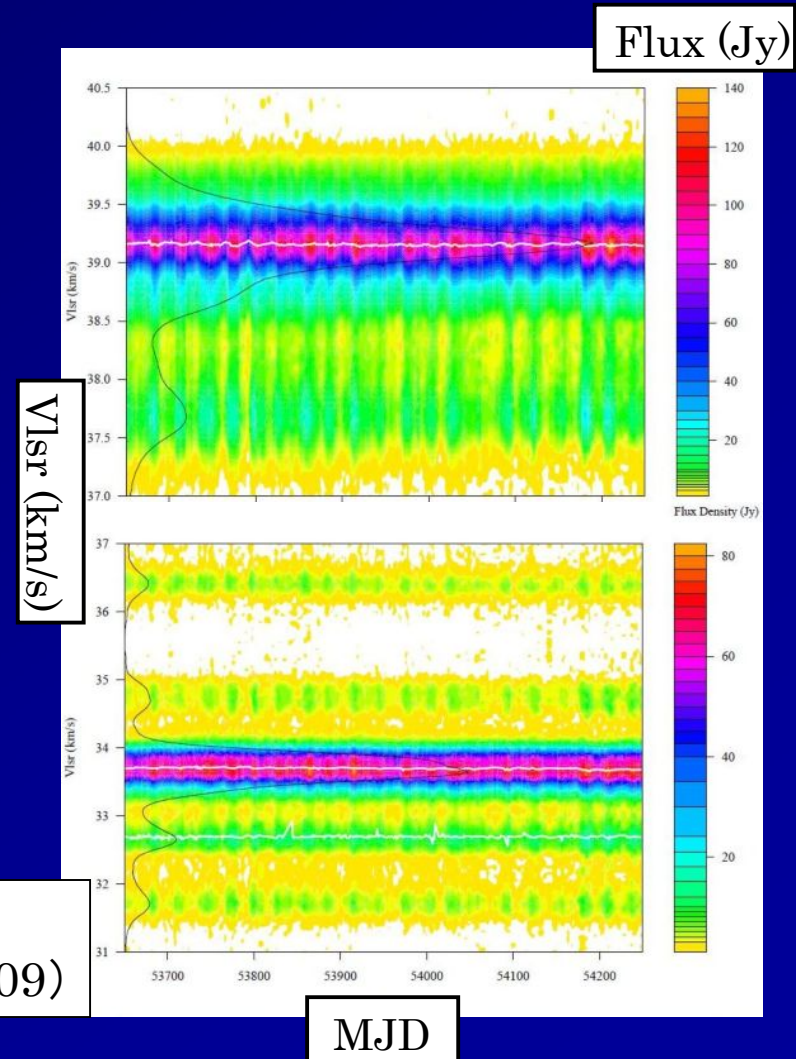
- 周期変動は大質量星周囲では初検出！
- 全スペクトル成分間で**同期** ⇒ 励起源の変動？
- 周期は 100-700日 程度
- 傾向は連続的 or 間欠的 の両方存在



G12.89+0.49 で顕著 (Goedhart+ 09)

- 周期変動天体の中で最も短期的
 - 周期: 29.5日
- 長期に亘り安定
 - 110サイクル
- 全スペクトル成分が同期
 - 遅延: 最大 5.7日

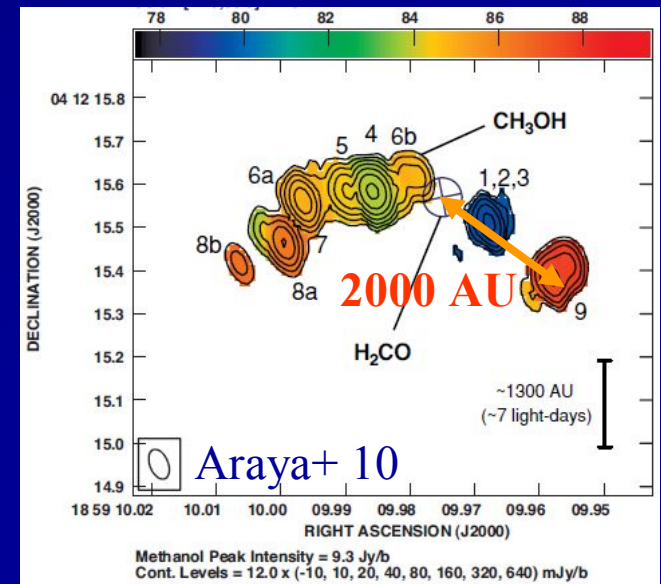
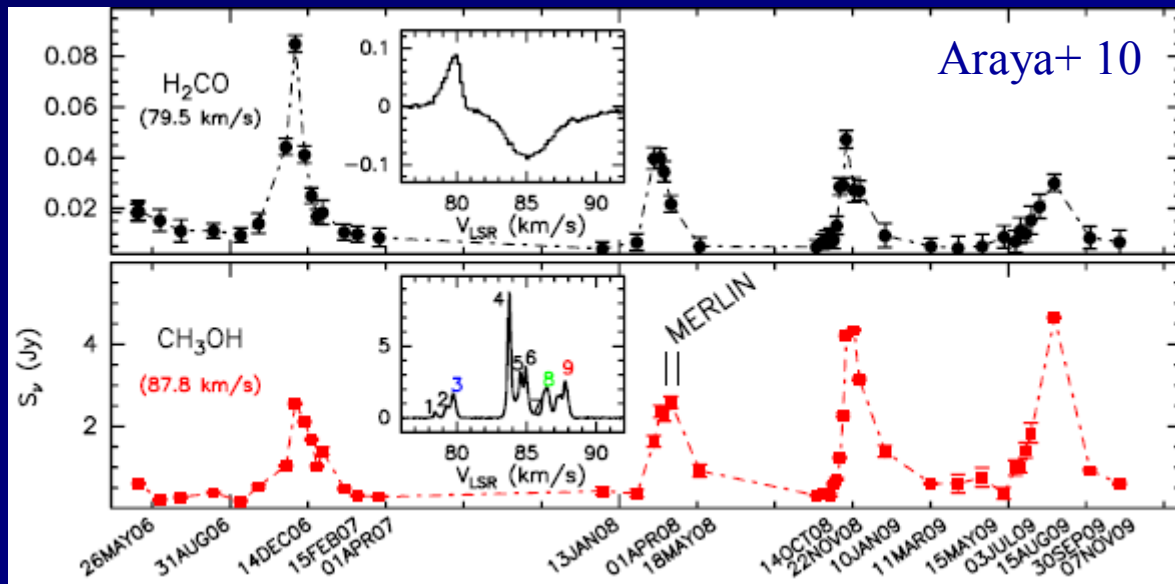
G12.89+0.49 メタノールメーザーの
ダイナミックスペクトル (Goedhart+ 09)



H₂COメーザでも周期的変動を検出 IRAS 18566+0408 (Araya+ 10)

- 4.8 GHz H₂COメーザでも周期的な強度変動
 - 準-周期的：234–244日
 - 6.7 GHz メタノールメーザーと同期した変動

大質量星形成期に特徴的な現象に！



幾何学的な変動ではない！？

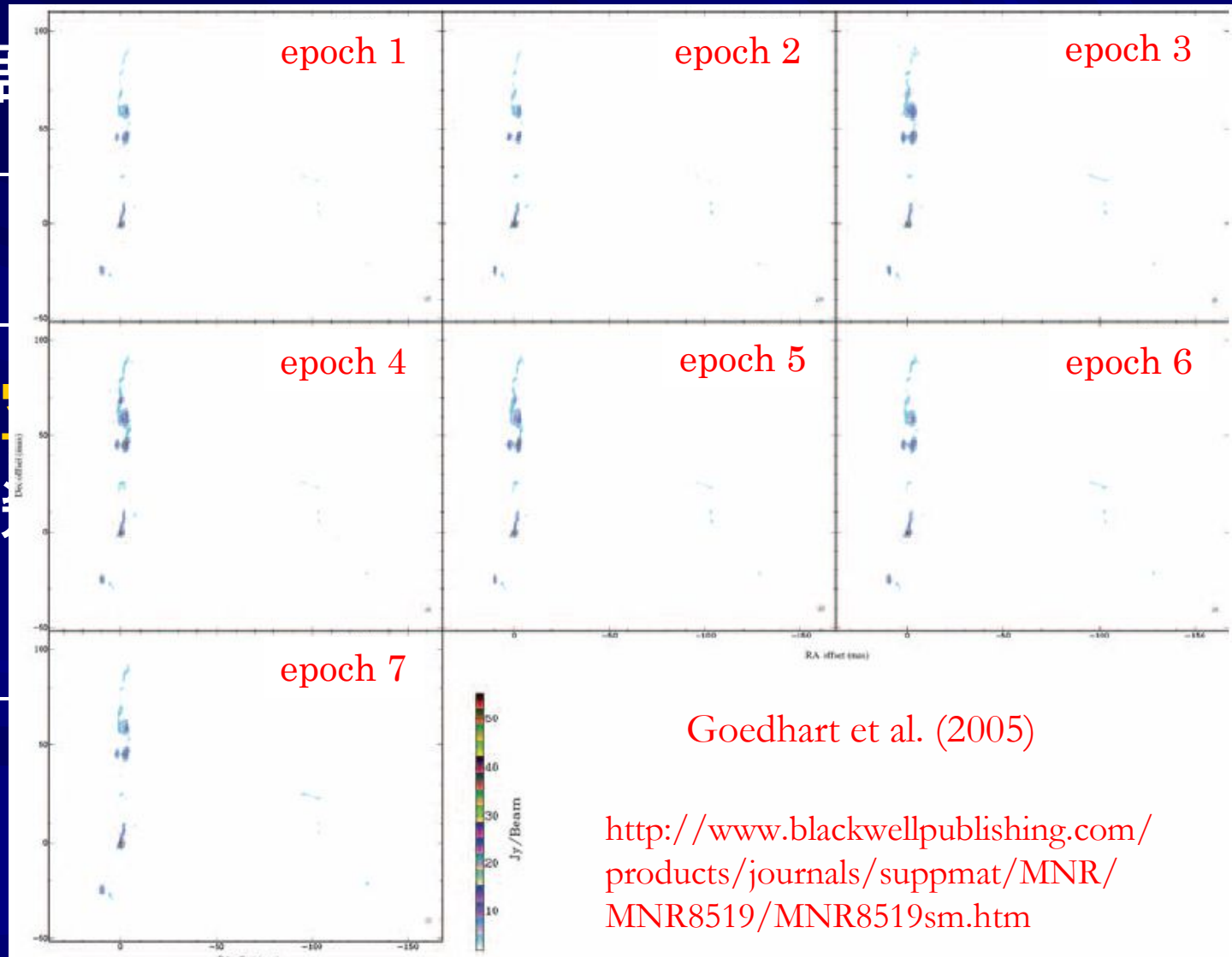
- 周期的強度変動に合わせたVLBIモニター
 - 全成分に同期した周期変動を起こす成分が、空間上でどのように関連するのかを調査
 - VLBAで7回観測
- ⇒ 空間分布は変動せず & 生成・消滅もなし
- ⇒ 幾何学的な変動 (shock通過など) には起因していなさそう
 - 励起源/星表面 or 種光子の強度変化が影響か？

幾何学的な変動ではない！？

■ 局

⇒

⇒



空間

し

因

か？

注目すべき点

■ 発生場所： 大質量原始星周囲のガス円盤

■ 強度変動：

- メタノールレーザーはダストからの赤外線励起
 - 大質量星周囲での“周期的”強度変動を初検出
 - 周期: 30-700日, 10サイクル以上で安定
 - 変動傾向は、連続的 or 間欠的
 - 全スペクトル成分が同期
 - Shock通過などの幾何学的な変動には起因していない
- ⇒ 励起源近傍 or 星表面で生じる物理現象！？

周期変動天体：まとめ

- 検出率：~20%
 - 長期モニター天体56天体中 11天体
- 周期は幅広い
 - 30-670 日
- 若い時代に多く出現
 - YSO: 8/11 天体
- 変動傾向は連続的な天体が多い
 - 連続的: 8/11 天体

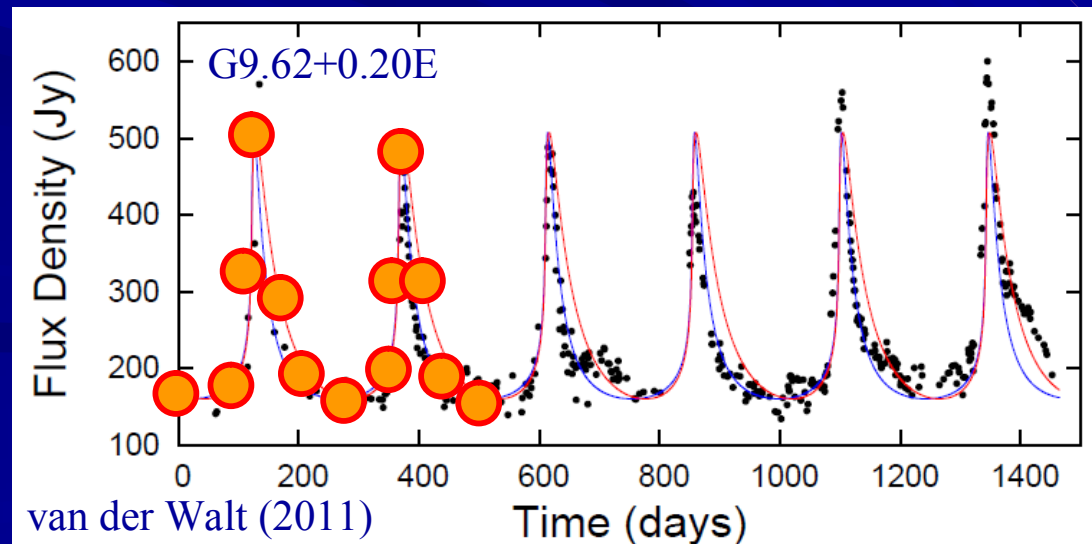
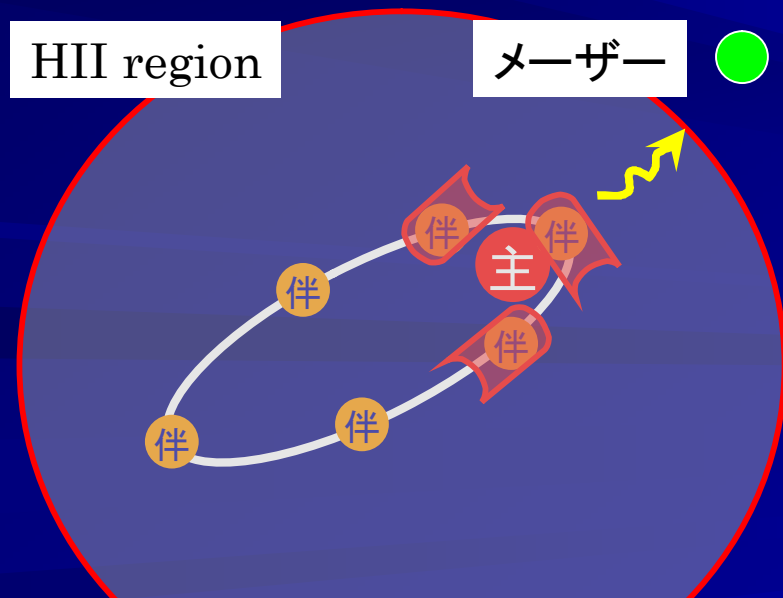
Source	Period	出現時期	変動傾向
009.621+0.196	244	HC HII	離散的
012.681-0.182	307	UC HII ?	連続的
012.889+0.489	29.5	YSO	連続的
022.357+0.066	179	YSO	離散的
037.550+0.200	237	YSO	離散的
188.946+0.886	404	HC HII	連続的
196.454-1.677	668	YSO	連続的
328.237-0.547	220	YSO	連続的
331.132-0.244	504	YSO	連続的
338.935-0.062	133	YSO ?	連続的
339.622-0.121	201	YSO	連続的

周期的な強度変動を 引き起こし得るメカニズム

Colliding Wind Binary (CWB)

(van der Walt 2011)

- 伴星が近接点を通過する際の bow shock
 - 30 eV ~ 1 keV の光子を放出
- 周囲に卓越したHII領域があれば通過可能
- 種光子であるHII領域からの自由-自由放射を増幅
- 離心率により間欠変動のquiescentな時期も説明可能



CWB の問題点

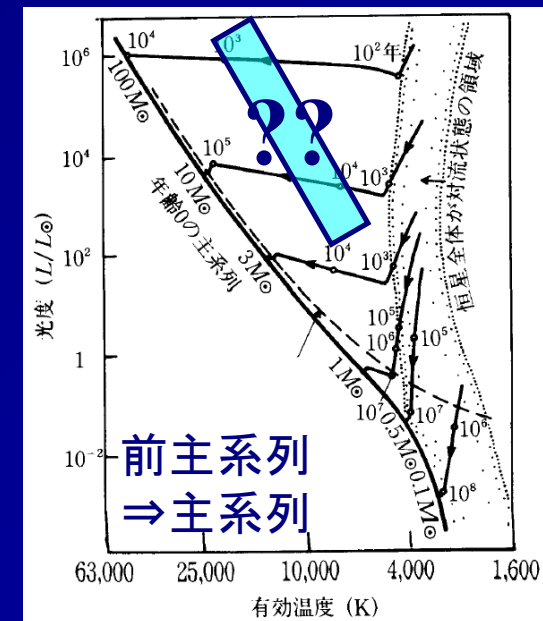
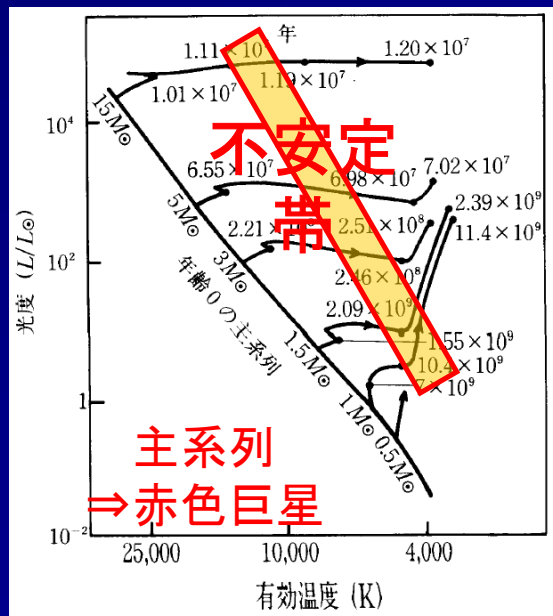
1. 天体数が少な過ぎる
 - 測光・分光観測により過半数が連星
 - 原始星時代の方がZAMSより2倍多い (Mathieu 92)
2. 周囲に卓越した電離領域が必要
 - 強い制限
 - メタノールの出現時期が大半YSOであることに矛盾
3. 連続的な変動を説明困難
 - 周期変動の大半が連続的であるにも関わらず

新たなモデル構築が必要！

AGB星に見られるような
中心(原始)星自身の脈動
(Inayoshi et al. submitted)

中心星の脈動

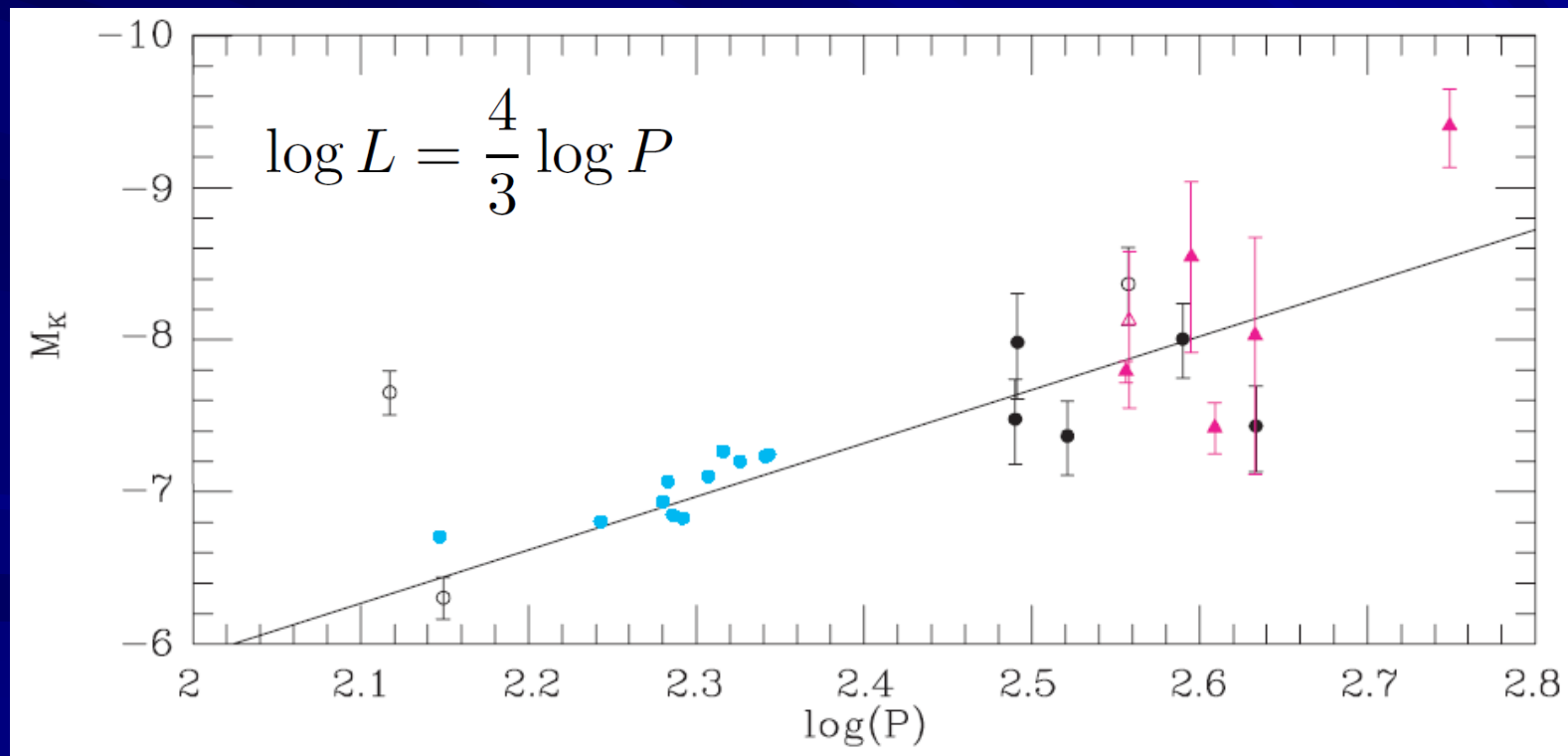
- 晩期型 AGB星では一般的
 - 主系列から赤色巨星へ進化する際の不安定帯
 - 表層の周期的な膨張・収縮
- 星形成期にも同様な不安定帯が存在？



大脇直明 ほか, 1989,
「天文資料集」

AGB星の周期-光度関係

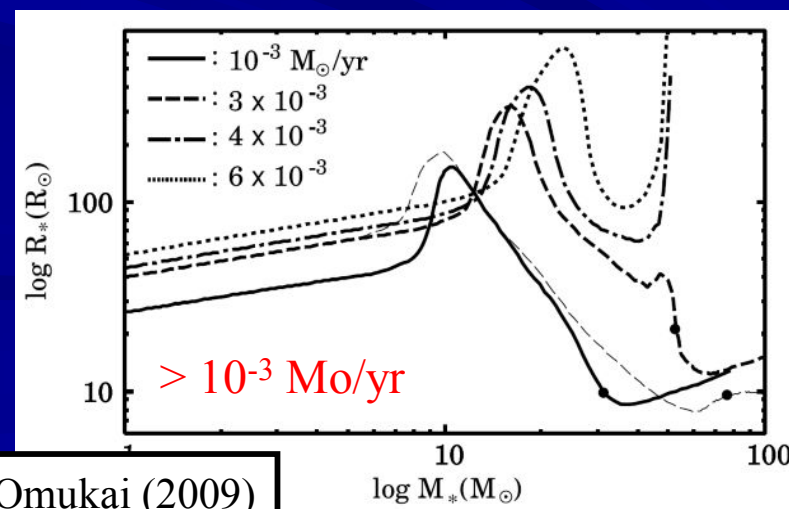
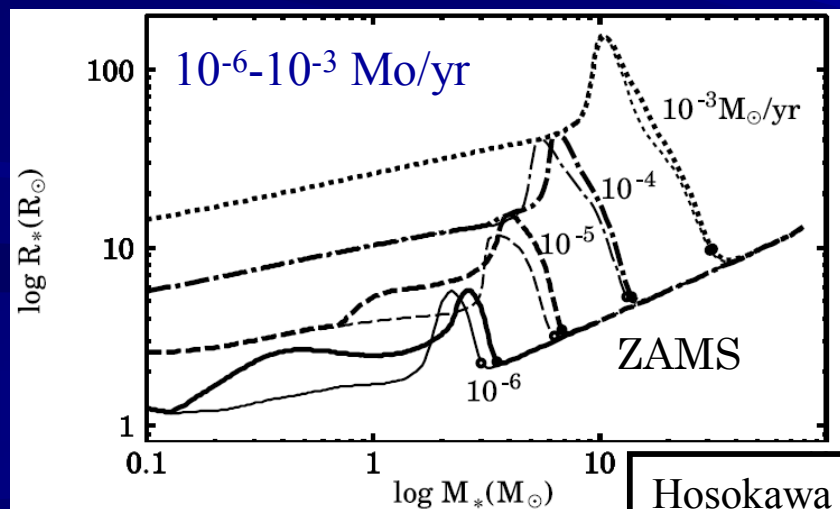
- 周期と光度の間に良い相関
- Distance ladder として重用



AGB星における周期-光度関数 (Whitelock+ 08)

なぜ原始星では考えられてこなかった？

- 星内部の構造が複雑だった
- Hosokawa & Omukai (2009) により解決
 - 特に大質量原始星の場合、ZAMS到達の前に10-100 R_{\odot} に膨張する期間が存在
- その瞬間に摂動を加えるとどうなるか？



Hosokawa & Omukai (2009)

大質量原始星の脈動モデル (Inayoshi et al. submitted)

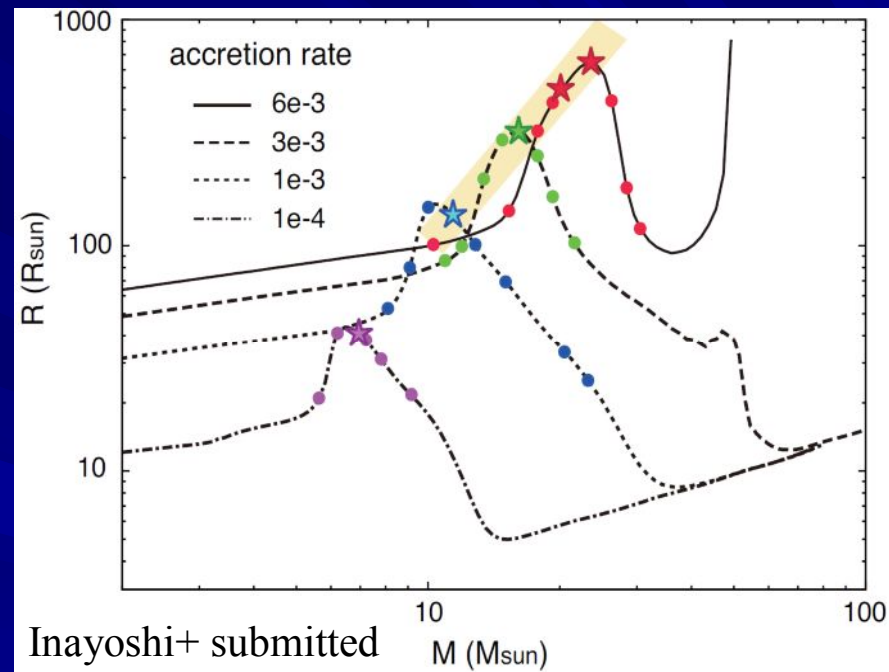
■ 半径最大の時期 に不安定が存在

- $>10^{-3}$ Mo/yr
- $\sim 10^3$ yr 滞在

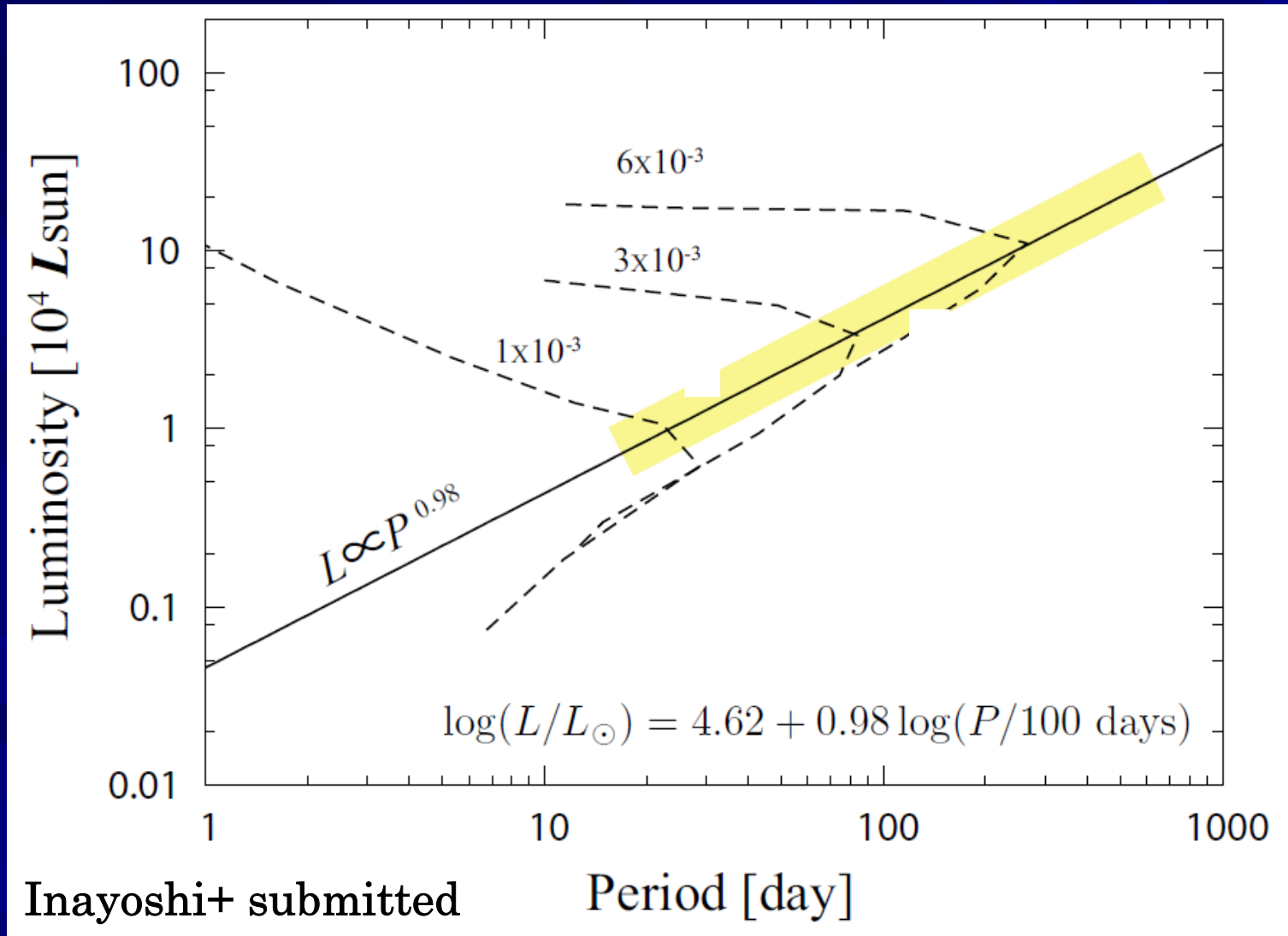
■ 滞在期間の見積 もりがコンパラ

- メタノールメーザーの出現時期: $\sim 10^4$ yr に出現
- 周期変動天体の検出率: $\sim 20\%$

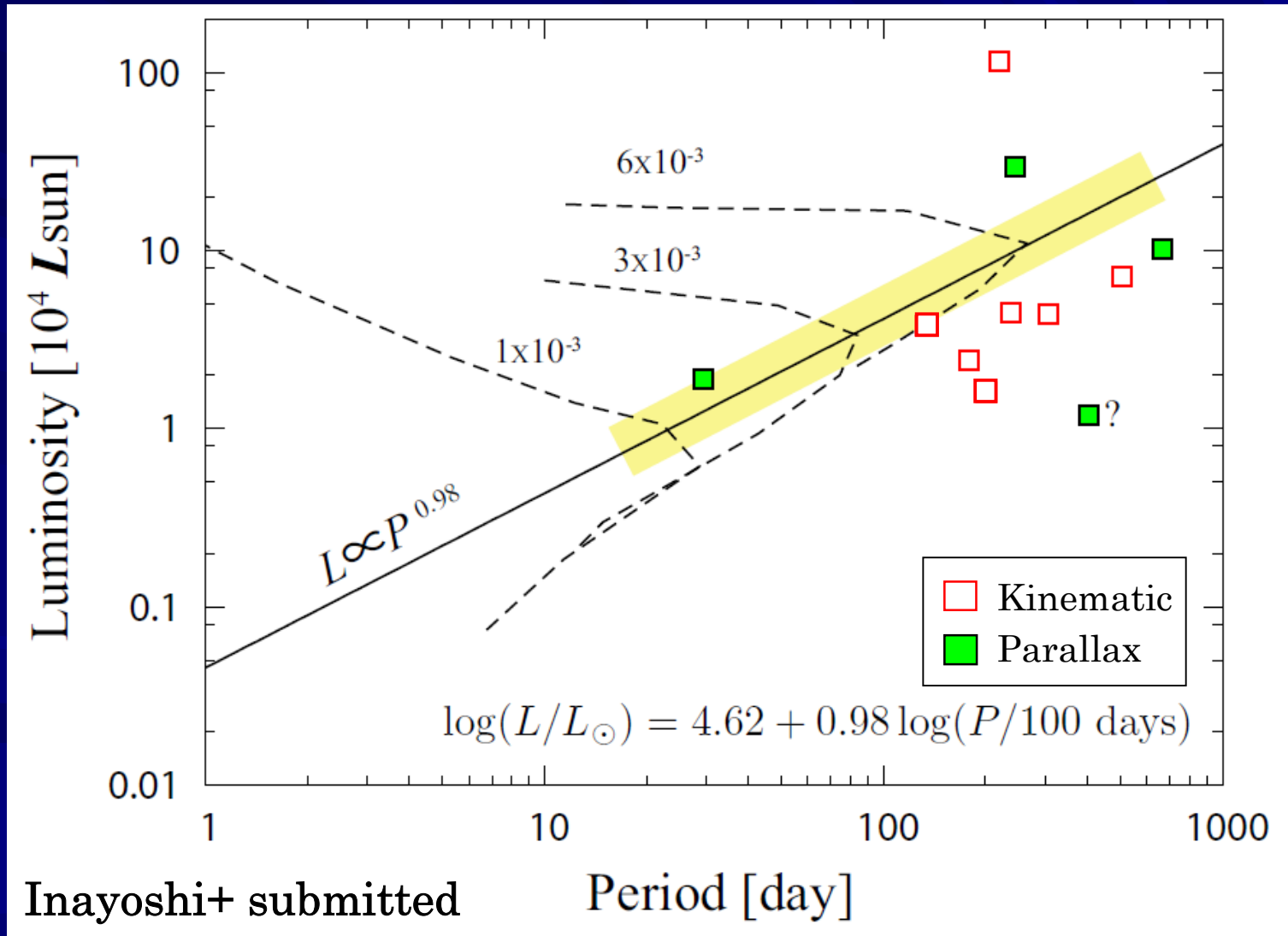
⇒ $\sim 10^3$ yr オーダーで矛盾しない結果



大質量原始星の周期-光度関係



大質量原始星の周期-光度関係



周期-光度関係の恩恵

- 原始星時代の物理パラメータ(質量、光度、半径、降着率 etc...)が直接測定可能に！
 - sub-AU スケール
 - 現存の最高空間分解能でも不可能な領域
 - それを低空間分解能な単一鏡で実行可能！

$$M_* = 17.5 M_{\odot} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.30},$$

$$R_* = 350 R_{\odot} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.62},$$

$$\dot{M}_* = 3.1 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.73}.$$

周期-光度関係の恩恵

- 原始星時代の物理パラメータ(質量、光度、半径、降着率 etc...)が直接測定可能！

- sub-AU スケール

- 現存の最高空間分解率可能な領域

- それを低空間分解率望遠鏡で実行可能！

観測による検証が必要

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.30}, \\ & 50 R_{\odot} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.62}, \\ & \dot{M}_{*} = 3.1 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.73} \end{aligned}$$

今後の発展性・計画

脈動モデルの今後

① 周期-光度関係の観測的検証

- 距離の高精度な測定
 - 年周視差計測
- 赤外線フラックスの高精度な見積もり
 - 高空間分解能 (~a few arcsec) なSED

② 周期変動を示す天体の正確な検出率の調査

- 北半球から観測可能な天体を全てモニター！

③ 母体ダストのそもそもの光度変動のモニター

- 近・中赤外線波長における高頻度モニター

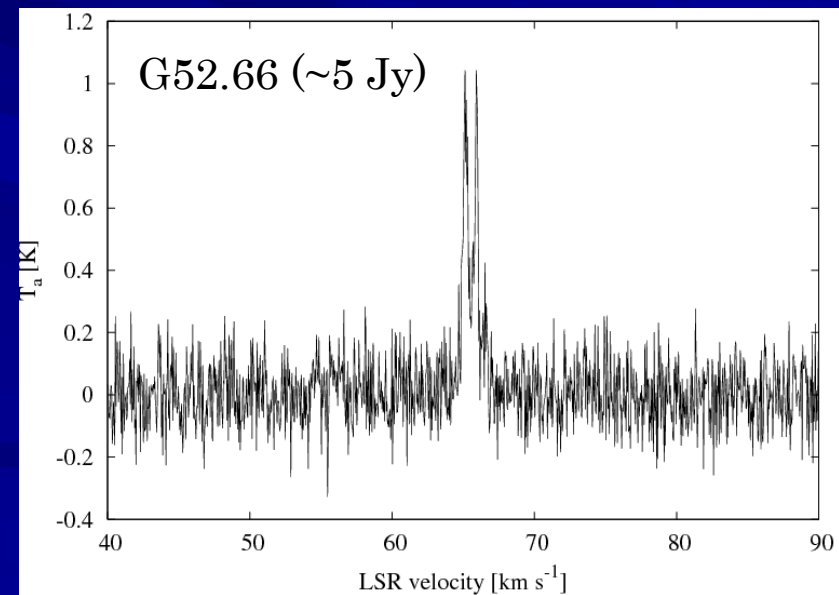
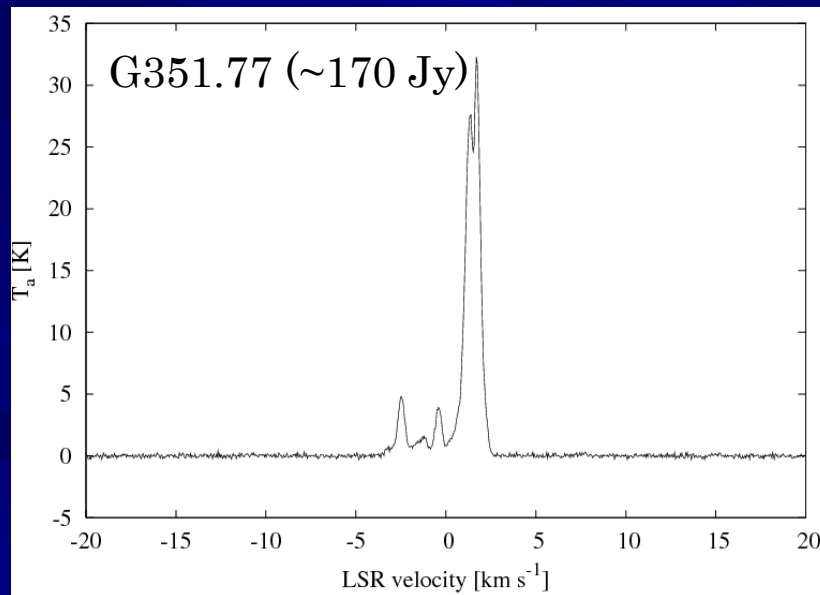
茨城局での大規模高頻度モニター

- 周期変動を示す天体の正確な検出率の調査
 - 北半球から観測可能な天体を全てモニター
 - 母体: ~900天体カタログ
 - 条件: Dec > -30 deg
- ⇒ 431天体
- + DBSM20天体 + 高瀬1天体 + その他6天体
- 茨城局でのモニター開始

速度範囲	速度分解能	積分時間	ノイズ 1σ
~360 km/s	0.044 km/s	5分	~0.3 Jy

モニター開始

- 試験観測 @ 2012/12/29 – 2013/01/11
– 候補を412天体まで絞る
- 本モニター開始 @ 2013/01/29 ~



試験観測結果の一部

脈動モデルの今後

① 周期-光度関係の観測的検証

- 距離の高精度な測定
 - 年周視差計測
- 赤外線フラックスの高精度な見積もり
 - 高空間分解能 (~a few arcsec) なSED

② 周期変動を示す天体の正確な検出率の調査

- 北半球から観測可能な天体を全てモニター！

③ 母体ダストのそもそもの光度変動のモニター

- 近・中赤外線波長における高頻度モニター

まとめ

- 大質量星／原始星の周囲での周期的な強度変動の検出 in メタノールレーザー
 - 星近傍 or 表面 (< 10AU) の物理現象の良いトレーサー
- 周期的強度変動の要因
 - Colliding Wind Binary
 - 中心星自身の脈動
 - 原始星時代の物理パラメータを直接測定可能に！
- 今後の観測による検証 & 発展性
 - 周期-光度関係の観測的検証
 - 距離の高精度計測 & 赤外線フラックスの高精度見積もり
 - 周期変動を示す天体の正確な検出率の調査
 - 茨城局を用いた北半球天体の系統的・高頻度モニター観測
 - 近・中赤外線によるダスト温度変動のモニター



ご清聴ありがとうございました