2016/07/09,10 大学VLBI連携将来計画 WS @宇宙電波館,高萩



大質量原始星周囲で観測される
 周期的強度変動のモニターサーベイ

杉山 孝一郎 (茨城大学 宇宙科学教育研究センター)

共同研究者:米倉覚則,齋藤悠,永瀬桂,安井靖尭,佐藤宏樹,宮本祐輔,青木健悟,山口貴 大,百瀬宗武(茨城大学),元木業人,本間希樹,内山瑞穂(国立天文台),藤沢健太,蜂須賀 一也(山口大学),稲吉恒平(コロンビア大学),田中圭(フロリダ大学),細川隆史(東京大学)

1. 研究背景

大質量星の形成:pc (~10⁵ au)-scale



C-C Collision of RCW49 in Westerlund2 (Furukawa+ 09)

C-C Collision in M20 (Torii+ 11)

大質量星の形成: 10²-10³ au-scale



大質量原始星周囲の回転(+降着)円盤の存在

□ 理論:

- 非球対称 (e.g., Krumholz+ 09)
- 高降着率 > $10^{-4 -3}$ Mo/yr (e.g., Nakano+00)

□ 観測:

- 回転円盤の存在 from 空間分布 + Vlsr (e.g., Cesaroni+ 99; Hirota+14)
- VLBIによる 3次元速度構造を元にした
 回転/降着現象の検出
 (e.g., Goddi+ 11; Sugiyama+ 14)





Rotating and Infalling proper motions detected with JVN in HMPSs Cep A-HW2 (Sugiyama+ 14)

原始星"表面" (≦ 0.1 au-scale) へ降り積もるガスの 降着率に起因した大質量星の進化トラック

- □ 理論計算は、大質量原始星は、原始星"表面"におけるガス降着率に依存して、進化トラックが異なることを提唱(Hosokawa & Omukai 2009)
 - 原始星半径: 主系列直前に 10-100 R_☉ まで膨張
 - 空間スケール: ≦ 0.1 au-scale
- □ 大質量星の進化過程を高精度に理解するためには、微小な原始星表面における、ガス降着率の計測が必要



Evolutionary tracks depending on accretion rates onto the surface of HMPSs (Hosokawa & Omukai 09)

大質量原始星周囲の空間スケール vs 装置



 ≤ 0.1 au ~10-1000 au Ext.-ALMA ?? VLTI, ALMA, VLBI, SMA

~10000 au (~0.1 pc) NRO, Mopra, etc ...

6.7 GHzメタノールメーザーに見られる 周期的な強度変動

□ 6 Gメーザーの周期強度変動

- 大質量星周囲では初検出
- 既知: 20 天体 (e.g., Goedhart+ 04)
- 周期: 30-670日
- 変動傾向: 連蔵的 / 間欠的
- 全速度成分間で同期が多い

共通の励起源の変動現象に起因?

□ 考えられる要因(理論モデル)

- 原始星の脈動不安定 (Inayoshi+13)
 - ZAMS直前の~1000年 滞在
 - 大降着率下で成長: ≧ 10⁻³ Mo/yr
 - <u>周期-光度関係 (P-L relation</u>) を予言
- ・ 連星の恒星風衝突 (van der Walt 11)
- 連星降着円盤における周期的スパ イラルショック (Parfenov & Sobolev 14)



G 331.13-00.24, sin的変動 (Goedhart+ 07)



大質量原始星の脈動不安定モデル (Inayoshi+13) と そこから予想される sin的な強度変動

脈動変動モデルから予言されている Period-Luminosity relation



Period-Luminosity relation: 様々な物理パラメータとの相関関係



□ P-L relation を観測的に検証・確 立する必要がある

Period-Luminosity relation: 既知の周期天体 with 連続的パターン



Period-Luminosity relation: 解決すべき課題



2. 茨城単一鏡 長期・高頻度モニター

日立32-m モニタープロジェクト: 観測概要

ロターゲット天体: 442 sources

Dec > -30 deg の天体全て無バイアスに選出(2012/Dec 時点)
 □ 2012/Dec/30 から 日立32-m 電波望遠鏡を用いて開始

Parameter / Season	第 1, 2シーズン	第 3シーズン
Telescope, beam size	Hitachi (Ibaraki) 32-m, 4.6 arcmin @6.7GHz	
Duration	2012/12/30 – 2014/01/10 2014/05/07 – 2015/08/08	2015/09/18 – on-going
Observational frequency	9/10 days ⁻¹ / source	4/5 days ⁻¹ / source
Radio frequency	6664 – 6672 MHz	
Channel	8,192 (binned from 2,097,152 channels)	
Velocity resolution	0.044 km s ⁻¹	
Sensitivity (3 σ) with 5 min	~0.9 Jy	

茨城(日立・高萩)32-m電波望遠鏡(茨城大学宇宙科学教育研究センターHPより抜粋)

Histogram of periodic sources



Classified into variation pattern



P-L relation の改訂版



P-L relation の改訂版



P-L relation の改訂版





□ サンプル不足:日立モニターにより解決中

• 現在、第3シーズン継続中(茨城大M1,山口)

□ 距離不定性の改善: astrometry の必要性

□ 近赤外線モニター、及び比較

- 内山氏 (国立天文台) 主導
- 既知の周期天体で、近赤外線が点源に近い天体を選出し、鹿児島1-m光 赤外望遠鏡を用いて高頻度モニター(2014年秋季年会,内山氏,P136a)

3. VLBI観測への展開

VLBI観測による周期変動天体への 観測的アプローチ

- □ P-L relation の観測的確立へ向けた、距離の 高精度な計測 => astrometry
 - 北半球: VERA/JVN
 - 南半球: LBA/SKA
- □周期変動成分の空間分布との比較
 - 周期変動成分を、メーザースポット単位で同定
 - 共通の励起源で励起可能な範囲に存在?
 - 複数成分に共通の変動を示す天体で見られる、各成分間 における time lag と空間スケールとの関係を調査

P-L relation の確立における課題2: 距離の高精度な計測





- G 009.62 天体がモデルケース
- ほぼ同等の視線速度 (カラーで再現) により、スペクトル上では区別のつきにくい成分も、空間分布を取得し、メーザースポット単位でカウントすると、同定し易い (Sanna+15)
- 同様な観測により、そもそも一つの 共通励起源で励起可能な範囲に周 期変動成分が存在しているのか?
 を明らかに出来る
- JVNによる、周期変動期間における 新周期成分を含めた空間分布の取 得,スポットの同定を実施中(茨城 大M2,佐藤)



LBA (6G, 塗り丸) & VLBA (12G, 抜き丸) で取得された、G 009.62のメタノールメー ザー空間分布 (Sanna+ 15)。四角で囲まれた部分に、周期変動成分が密集。

Time lag と空間スケールの比較

- 複数成分に共通の変動を示す天体 で見られる、各成分間における time lag と空間スケールとの関係を調査
 - □ 共通の励起源に起因?
 - Time lag を 奥行き方向の空間ス ケール (light travel time) で説明 可能?
- □ G 009.62 に対して、日立局での新 検出成分も含めてVLBIモニターに よるスポット同定を実施中(茨城大 M2,佐藤)
- □ 他の要因も有り得る?
 - □ 励起源からの距離がそもそも異なる?
 - メーザーガス毎のガス密度が異なり、 加熱・冷却タイムスケールに差がある?



G 009.62 で検出された周期変動成分間 における相関関数: time lag (Goedhart+ 14). 2素子干渉計を用いた観測アプローチ: 放射サイズのカタログ作成~第3期中期計画を目処に~

- □6.7GHzメタノールメーザーの"各スポット毎の放射サイ ズを系統的に計測"した例は、ほぼ皆無
 - Core/Halo を区別・定義した Minier+(02) くらい
- □各天体・スポット毎のサイズ情報は重要
 - 空間分布の取得、及び形状把握に必要なメーザー成分の、 resolved out を考慮したフラックス密度情報は、観測目的の の達成の可能性、及び感度推定を事前に判断する上で必須
 - 周期変動天体のイメージングを狙う際の良い指標にもなる

□2021年までの第3期中期計画中の完成を目指す

北半球から観測可能な天体を無バイアスにサーベイ:
 Dec > -30 deg がメイン

4. まとめ

まとめ

□ 大質量星の進化過程を高精度に理解を目指す

- 原始星表面 (≦ 0.1 au)のガス降着率が進化トラックを決定, 観測必須
- □ 6.7 GHzメタノールメーザーの周期変動に着目
 - これまでに 20天体から検出: 周期~30-670日
 - 様々なメカニズム: 脈動, CWB, spiral shock, etc...
 - 脈動不安定に起因した周期変動天体に着目
 - ➢ P-L relation の観測的確立により、原始星表面のガス降着率を間接的に導出出 来る可能性を秘めているため!
- □ 茨城大学で長期・高頻度な大規模モニターを開始
 - 2012/Dec/30から, 442天体を対象, 9-10日に1度頻度でデータ取得
 - 2015/Sep/18からは、 天体を絞り、頻度を倍の 4-5日に1度へ改訂
 - 第1,2シーズンには 14天体から新検出, 第3シーズンは継続中
- □ VLBI観測への展開
 - アストロメトリ for P-L relation, スポットベースでの周期変動成分の同定, 変動タイムラグと空間スケールとの関係調査, etc...