

Are 6.7-GHz methanol masers associated with protostellar outflow?

~ A study of internal proper motion in HMSFR G 59.783+0.065 ~

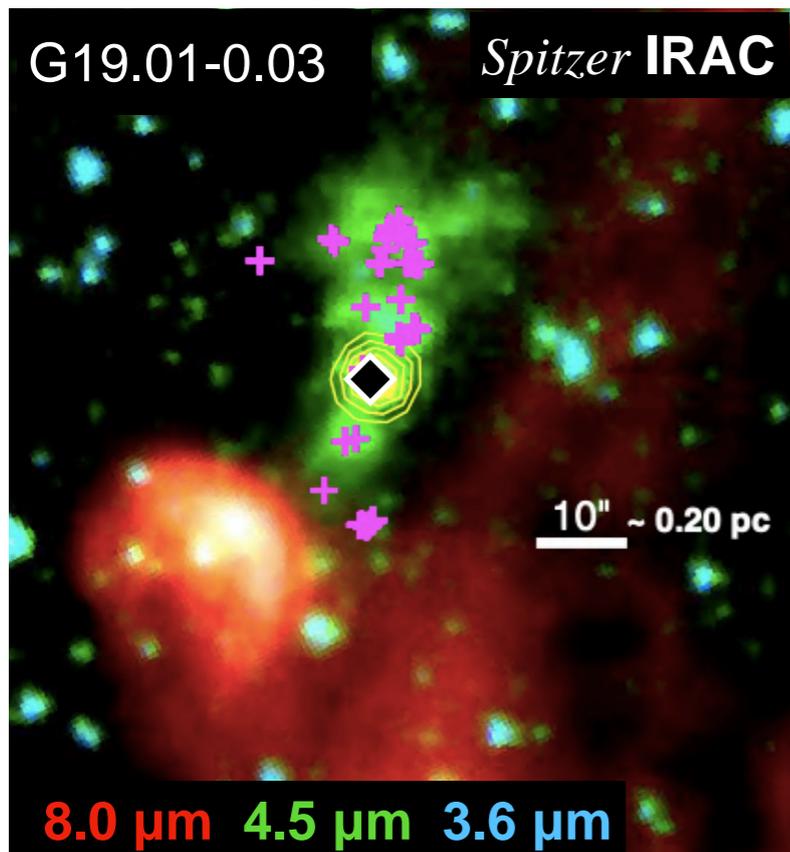


中村 桃太郎 (山口大学 M2)
Co-I. 元木 業人, 藤沢 健太

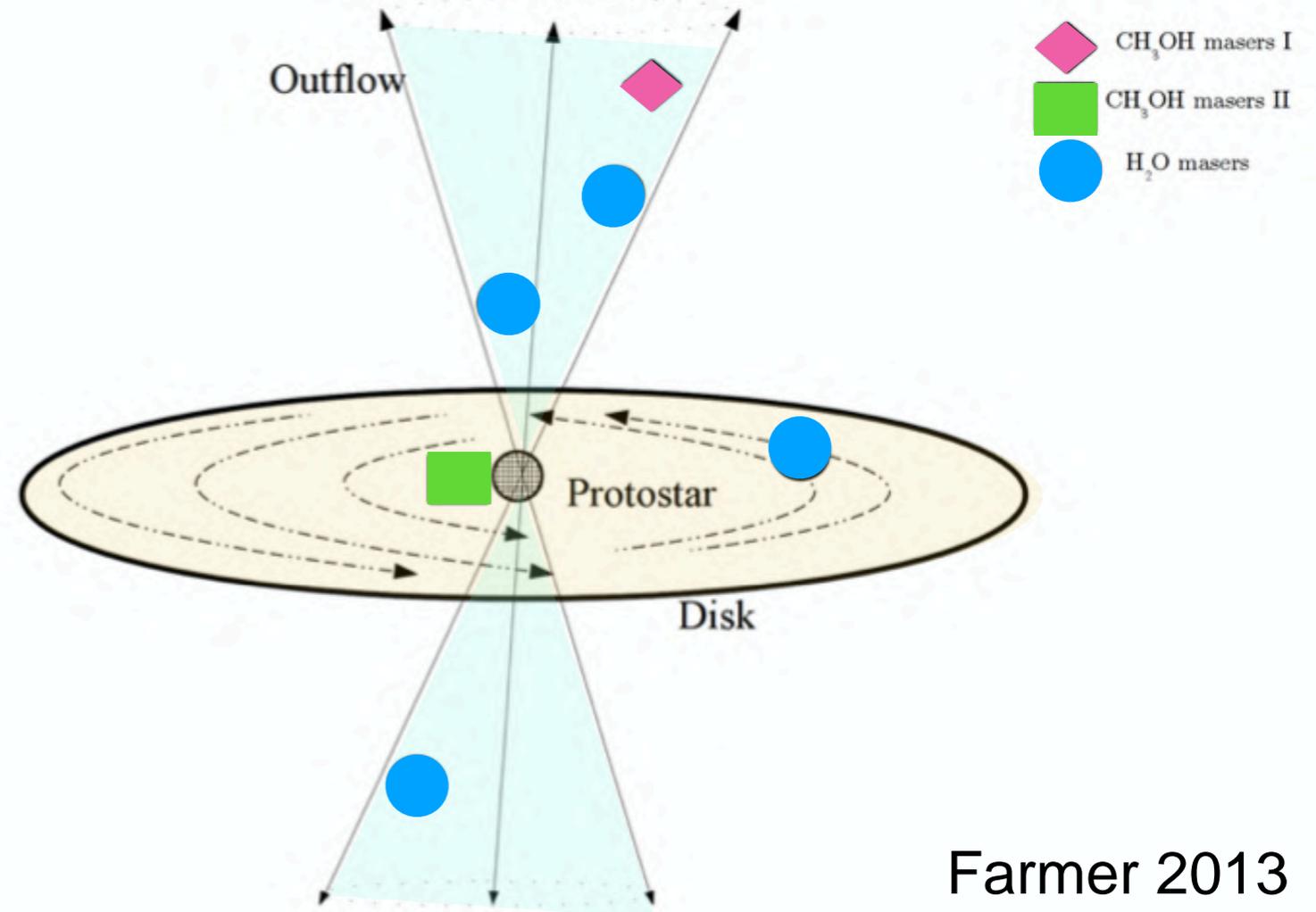
VERA Users meeting @ zoom, 2020. 9. 24

大質量星形成領域におけるメーザーの付随場所

Cyganowski et al. 2009



- + 44 GHz CH₃OH maser (VLA)
- ◆ 6.7 GHz CH₃OH maser (VLA)
- ⊙ 24 μm MIPS GAL contour

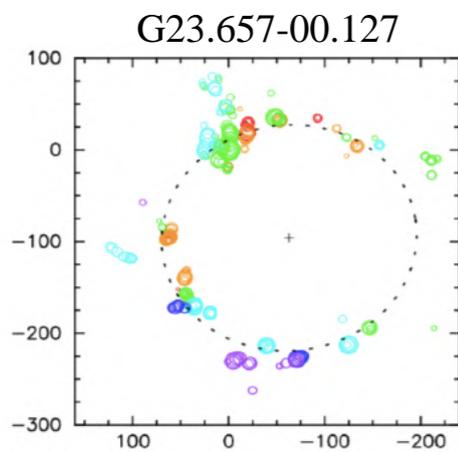


Maser	22 GHz H ₂ O	Class I CH ₃ OH	Class II CH ₃ OH
Pumping	Collision	Collision	IR Radiation
Association	Outflow	Outflow / shock front	Circumstellar disk ?
Extent	1 - 10"	~ 10"	< 1"

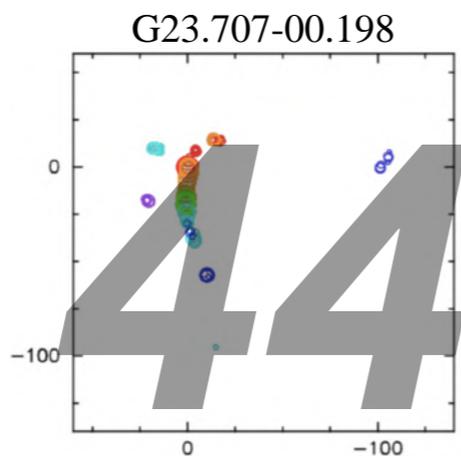
6.7 GHz メタノールメーザーを円盤付随と解釈してよいか？

● 分布形状

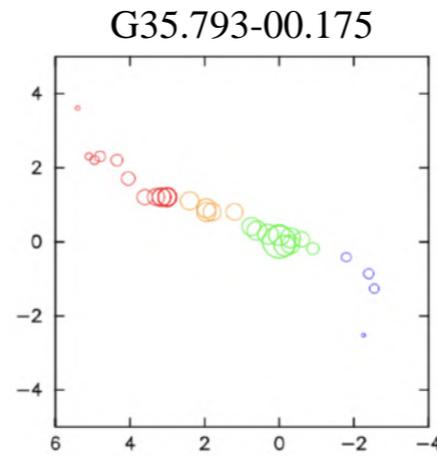
Bartkiewicz et al. 2009, 2014, 2016, Fujisawa et al. 2014



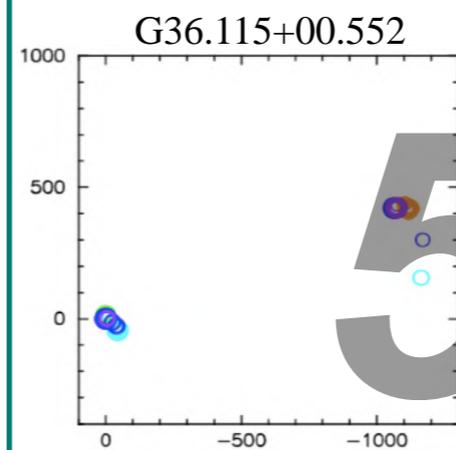
リング/楕円
(18天体)



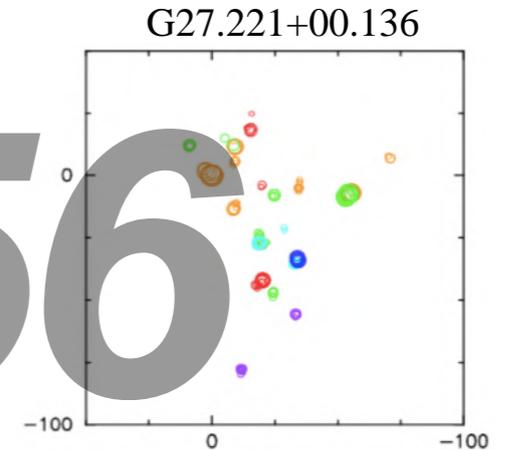
円弧
(9天体)



直線
(17天体)



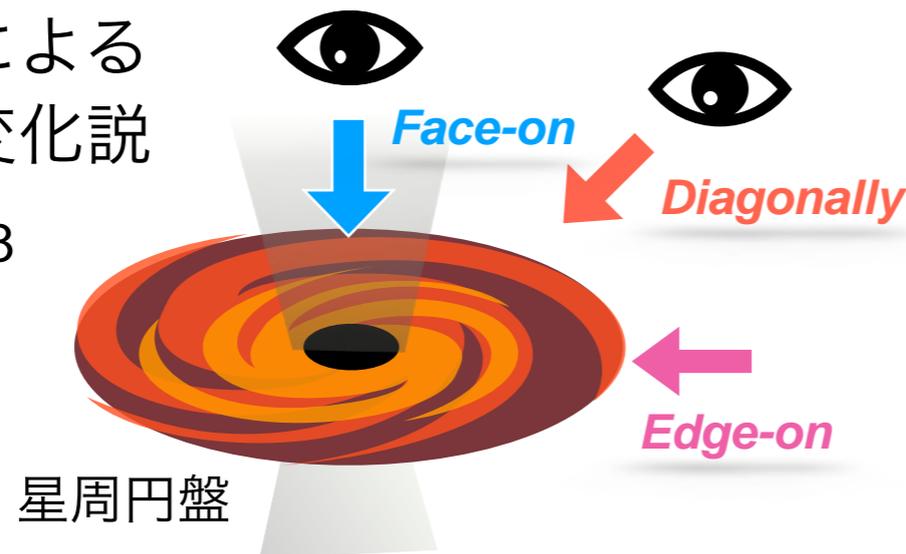
ペア
(12天体)



コンプレックス
(44天体)

円盤の傾斜角による
みかけの形状変化説

Norris+ 1993, 1998
Phillips+ 1998 etc.



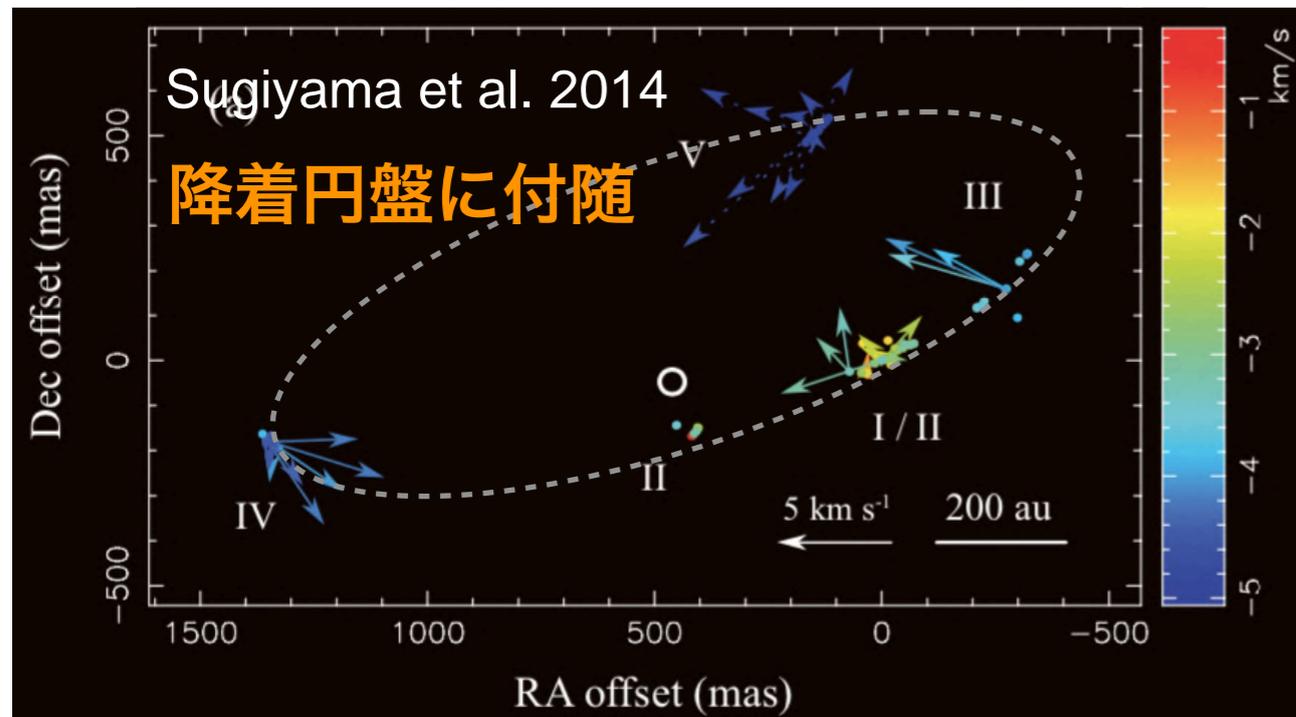
運動など詳細な研究例が **少**
少なくとも円盤付随として
説明するのが困難。

→ **アウトフロー** など他の物理
現象に付随する可能性が **高**

6.7 GHz メタノールメーザーを円盤付随と解釈してよいか？

● 内部固有運動

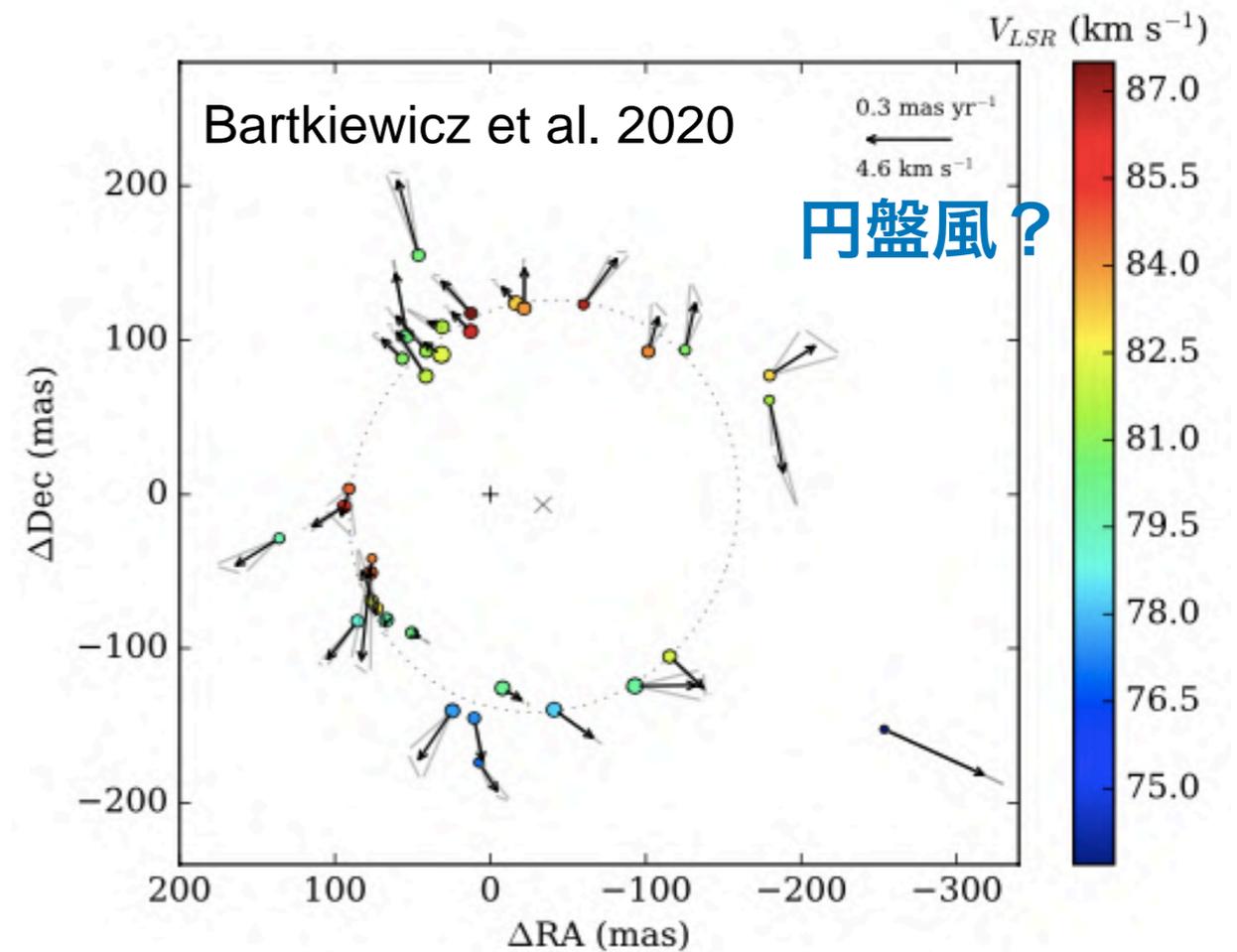
Cep A HW-2 (円弧)



Contour : Radio Jet

(VLA 22 GHz continuum)

G23.657-0.127 (リング)



必ずしも 星周円盤の回転 or インフォールの運動とは限らず、

円盤風のような膨張する運動に付随する可能性もある。

▶ リングだからといって円盤に付随していると思っ込んでではダメ？

6.7 GHz メタノールメーザーを円盤付随と解釈してよいか？

● メタノールメーザーの速度幅

- 平均値 7.2 km/s (MMB 972 sources)

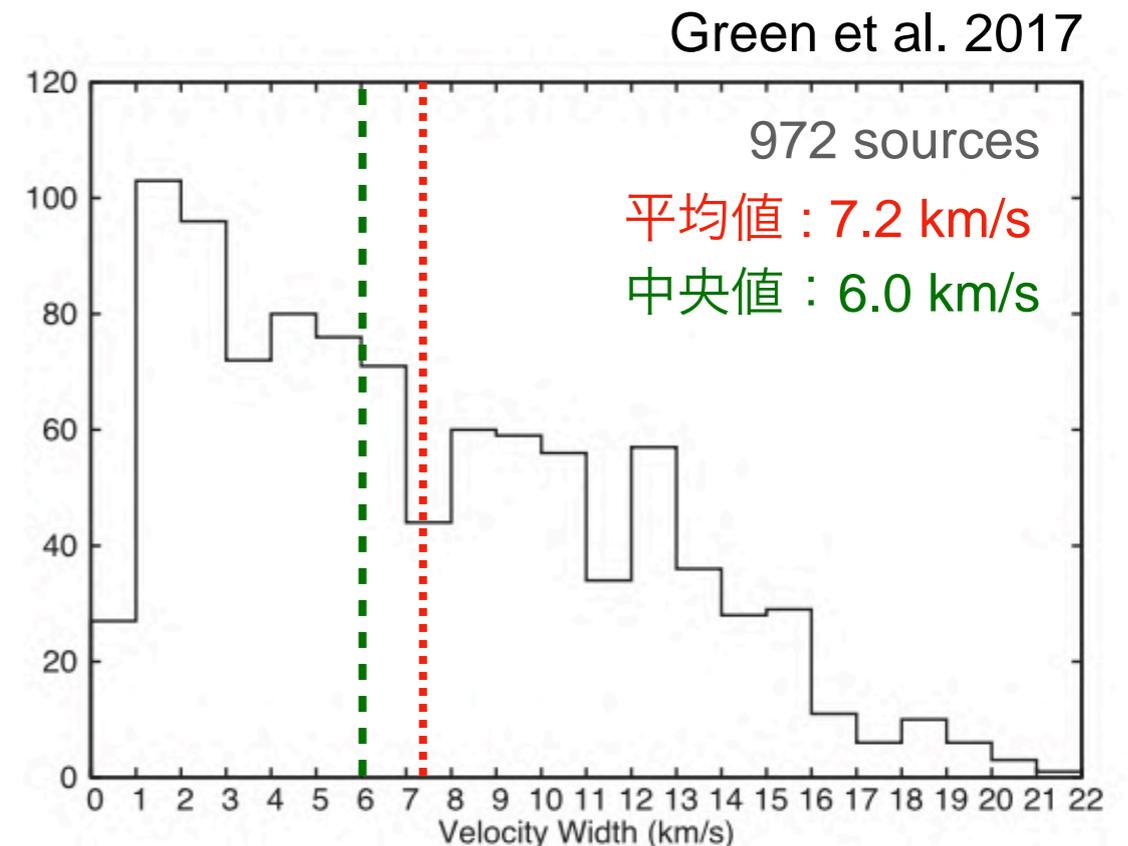
0 - 10 km/s : 710 sources (73 %)

10 - 20 km/s : 251 sources (26 %)

> 20 km/s : 11 sources (1 %)

- 大質量星において、ケプラー速度に典型的なケプラー半径, 質量を代入しても 10 km/s を超える速い円盤の運動は考えにくい

- 一方、アウトフローの典型的な速度は **10 - 100 km/s** (Arce et al. 2007 他) であり、広い速度幅をもつメーザーは アウトフローに付随する可能性が高い と考えられる



My study

ペア・コンプレックス

で

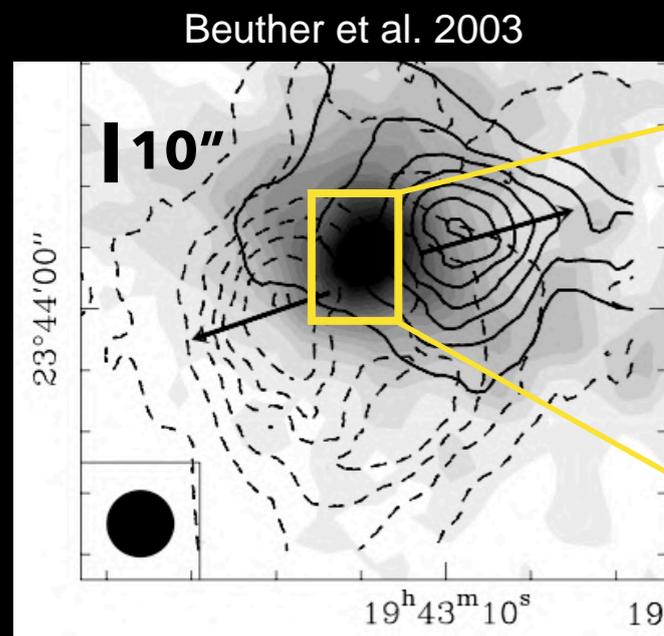
速度幅の広い

6.7 GHz メタノールメーザー

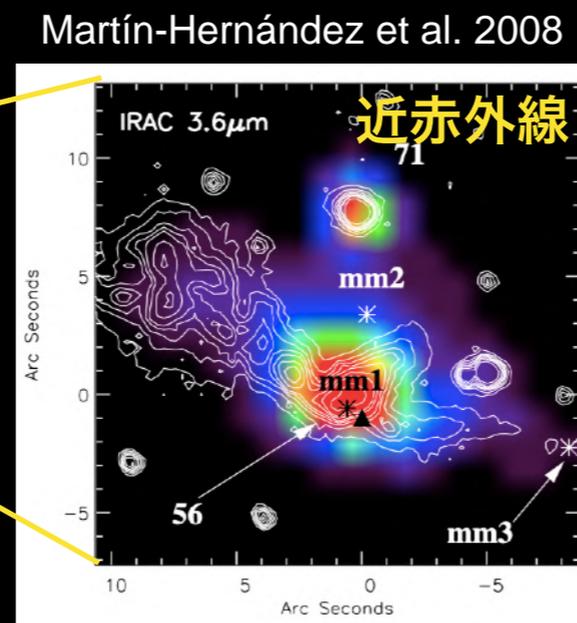
の内部固有運動を求めることで、アウトフローとの関連を直接検証する

ターゲット : G 59.783+0.065

- 赤道座標 : 19h 43m 11.25s, +23° 44' 03.3"
- 距離 : 2.16 kpc (~7,000 光年) *1
- 赤外線光度 : $\sim 10^4 L_{\odot}$ *2
- EGO 天体 (=4.5 μm で 10" 以上広がった放射)
→ アウトフローと周辺ガスの衝突励起を示唆 *3



CO (2-1) map



Contours : Ks-band (1.99-2.31 μm)
▲ : 3.6 cm cont. * : 2.6 mm cont.

東西方向に広がるアウトフロー

Spitzer IRAC 3 color composite image
8.0 μm (red) 4.5 μm (green) 3.6 μm (blue)

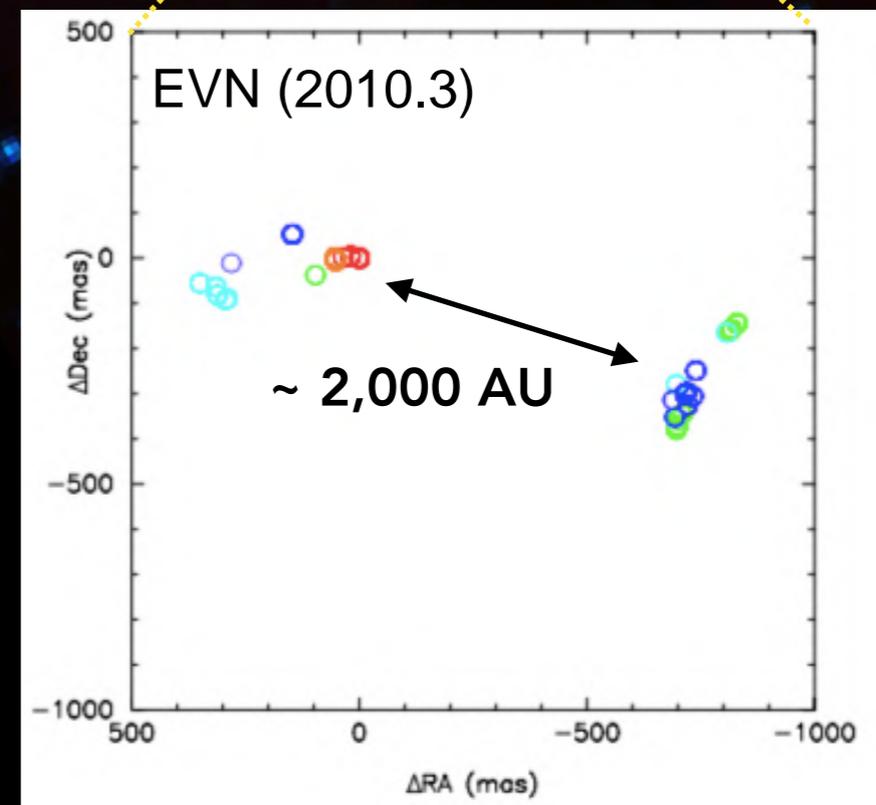
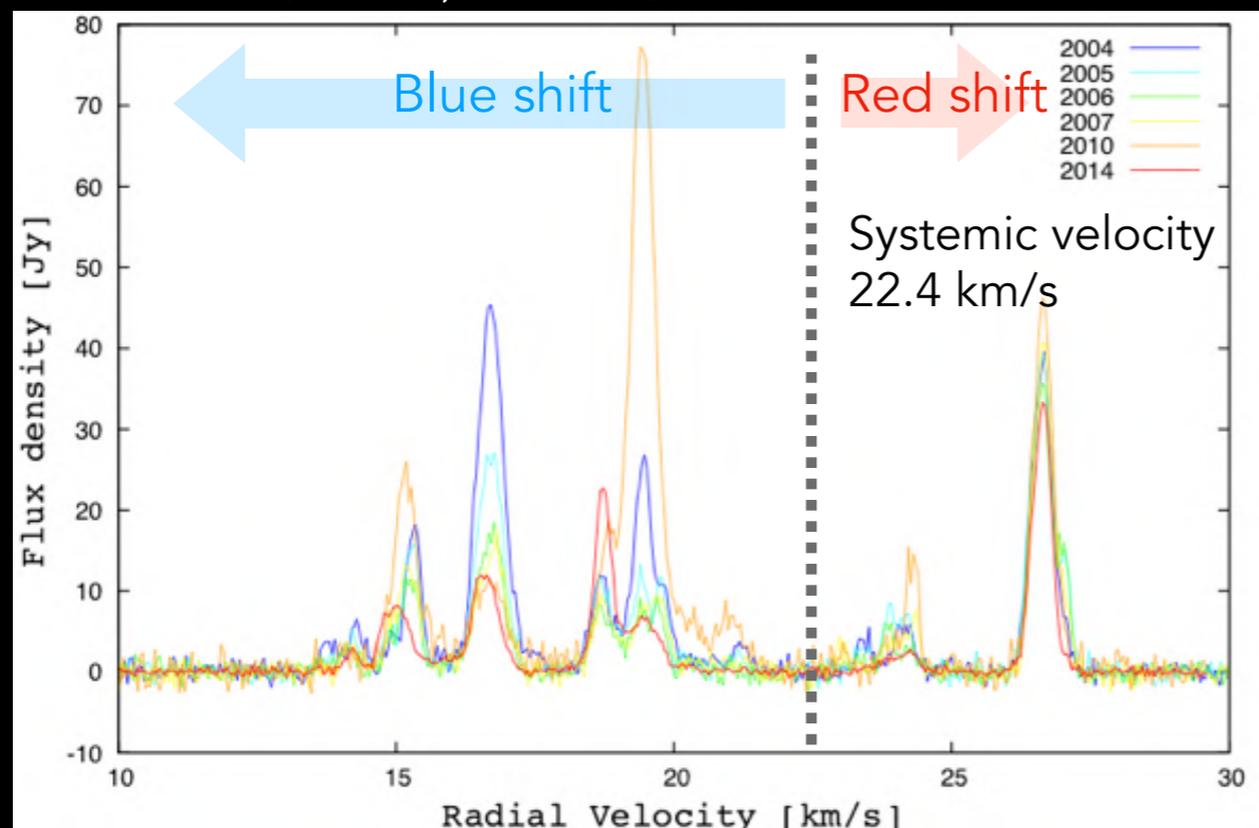
*1 Xu et al. 2009 *2 Martín-Hernández et al. 2008
*3 Cyganowski et al. 2008

ターゲット : G 59.783+0.065

● 6.7 GHz メタノールメーザー : 先行研究

- ・ **広い** スペクトル幅 : ~ 13 km/s
- ・ 強度変動が大きい
e.g. 19 km/s 成分 : 5 Jy \rightarrow **80 Jy** \rightarrow 5 Jy
(2007) (2010) (2020)
- ・ 分布形状 : ペア or コンプレックス

中村 拓, 山口大学卒業論文 2015

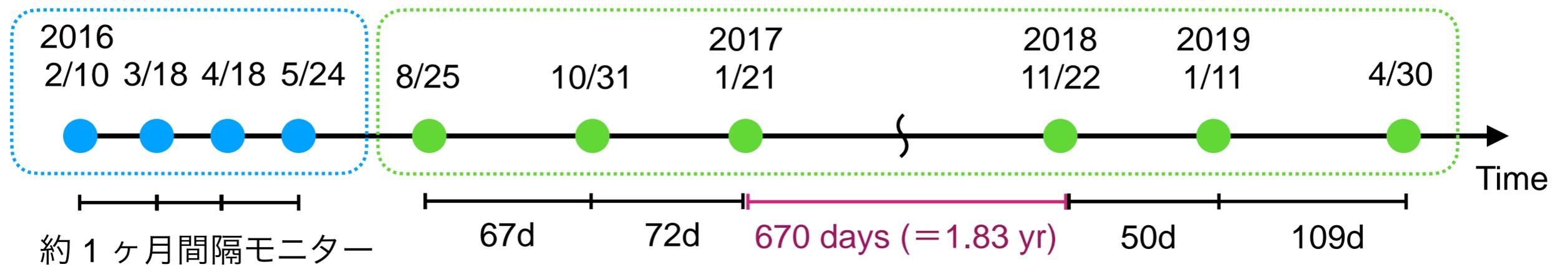


Observation

● 22-GHz H₂O ● 6.7-GHz CH₃OH

VERA 22 GHz
共同利用観測 2016A

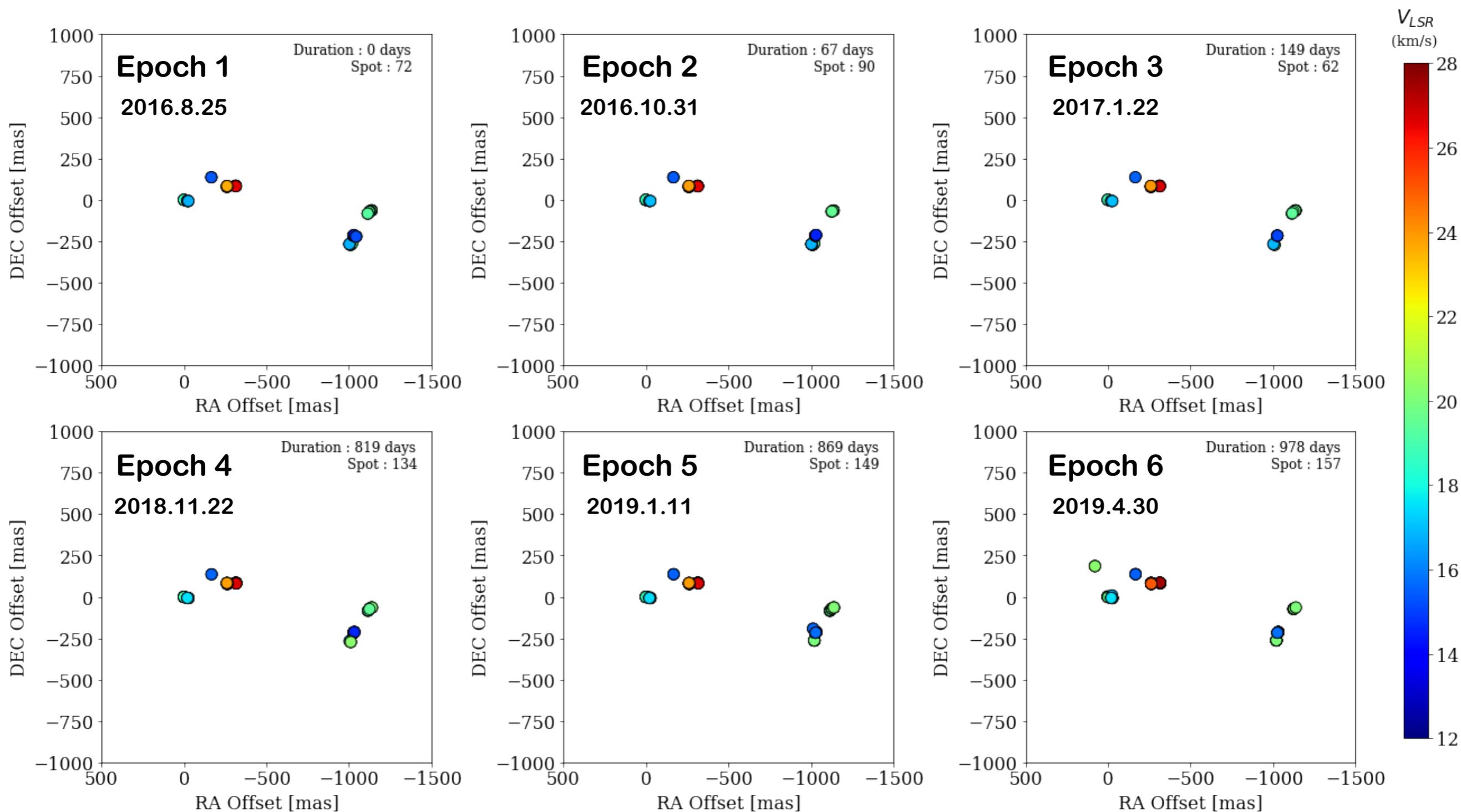
JVN 6.7 GHz (VERA + 日立 + 山口)



6.7 GHz 帯 JVN 観測諸元

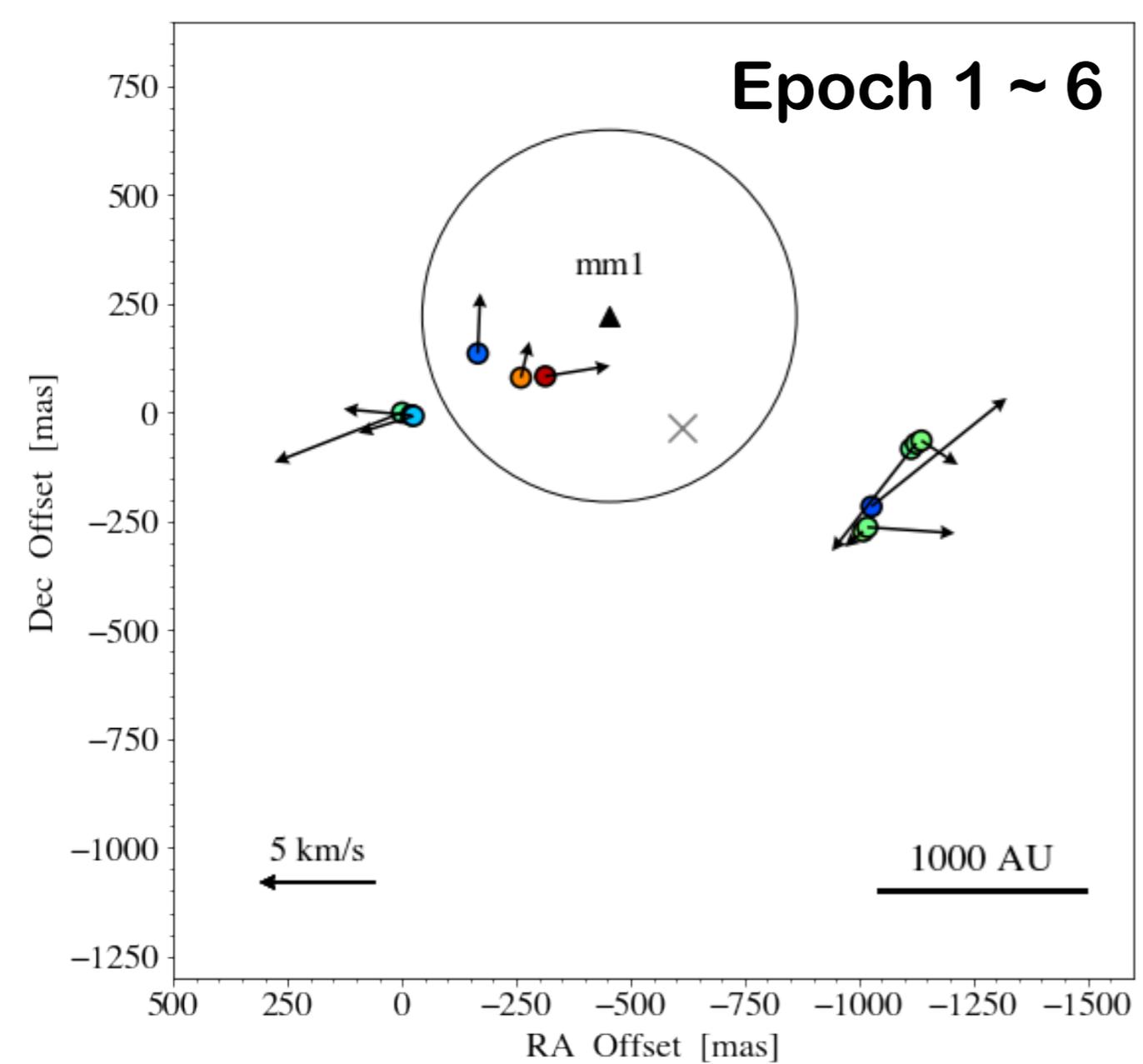
Epoch	1	2	3	4	5	6
観測日(UT)	2016.8.25	2016.10.31	2017.1.22	2018.11.22	2019.1.11	2019.4.30
経過日数	0	67	149	819	869	978
観測周波数 (MHz)	6667-6669			6667-6671		
速度分解能 (km/s)	0.176	0.088		0.044		
image r.m.s 1 σ (mJy/beam)	20	70	150	~300		
Beam size	~ 5 × 3 mas ²					
Calibrator	3C454.3 (bandpass, fring finder), J1931+2243 (phase, separation 2.89°)					

Results : 空間分布

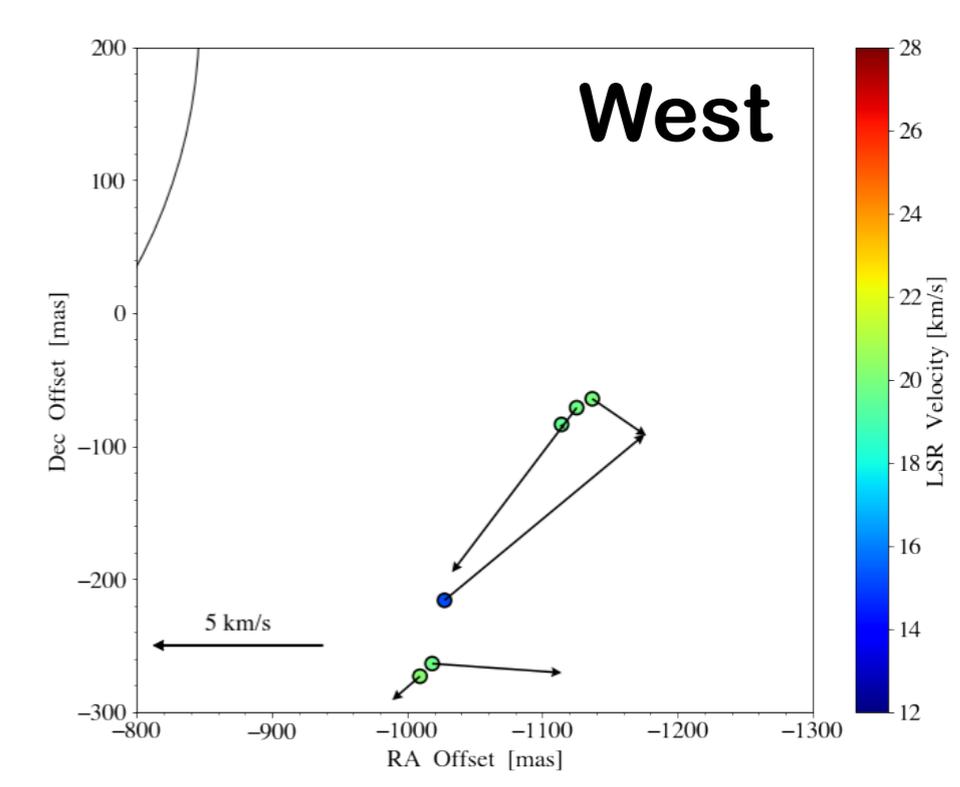
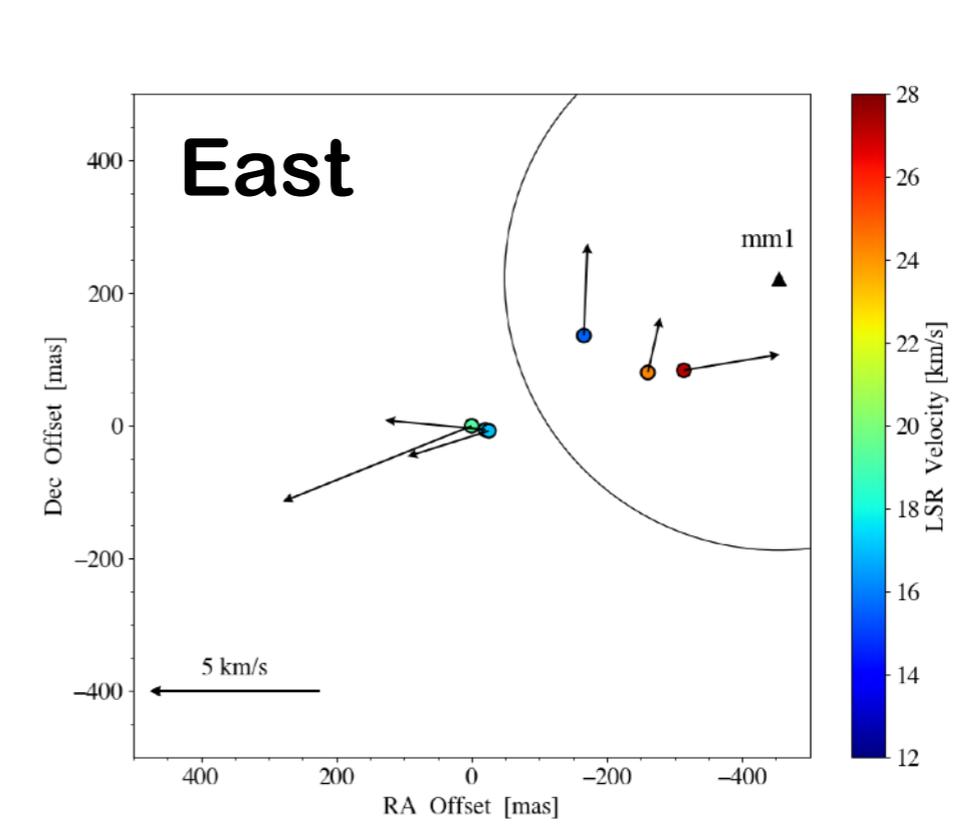


Epoch 1 ~ 6 (2016-2019) まで **約 1000 日間** 大きな形状変化はみられない

Results : 内部固有運動



- ⊖ : 6.7 GHz メタノールレーザー
- × : 重心位置 (barycenter)
- ▲ : 2.6 mm continuum peak (PdBI)
- = ▲ の位置誤差 (Beuther+, 2003)



考察1：先行研究との比較 (水メーザー, mm source)

22 GHz 水メーザー

先行研究：中村 拓 2017修論

- **東西方向**の膨張運動
→ アウトフロー
- 速度 10 - 40 km/s (avg. 20 km/s)

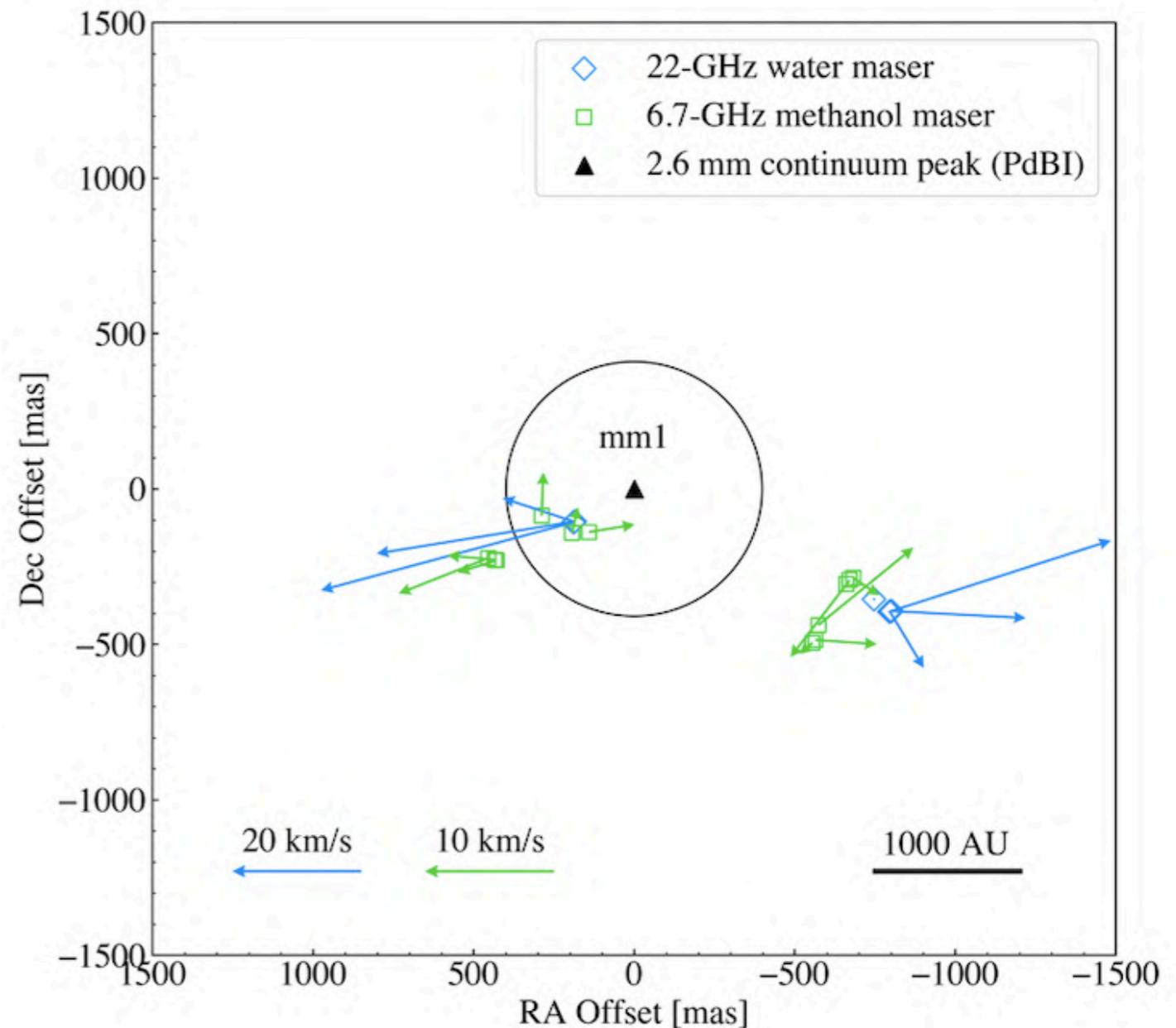
6.7 GHz メタノールメーザー

- おおむね**東西方向**の膨張運動
→ アウトフロー？
- 速度 1 - 8 km/s (avg. 3 km/s)

2.6 mm continuum

Beuther et al. 2003

- Dense core = 原始星が存在
- 位置誤差内でメーザーの分布の中央付近
→ 中心原始星



<まとめ> 観測結果から分かったこと

● アウトフローっぽい点はどこか？

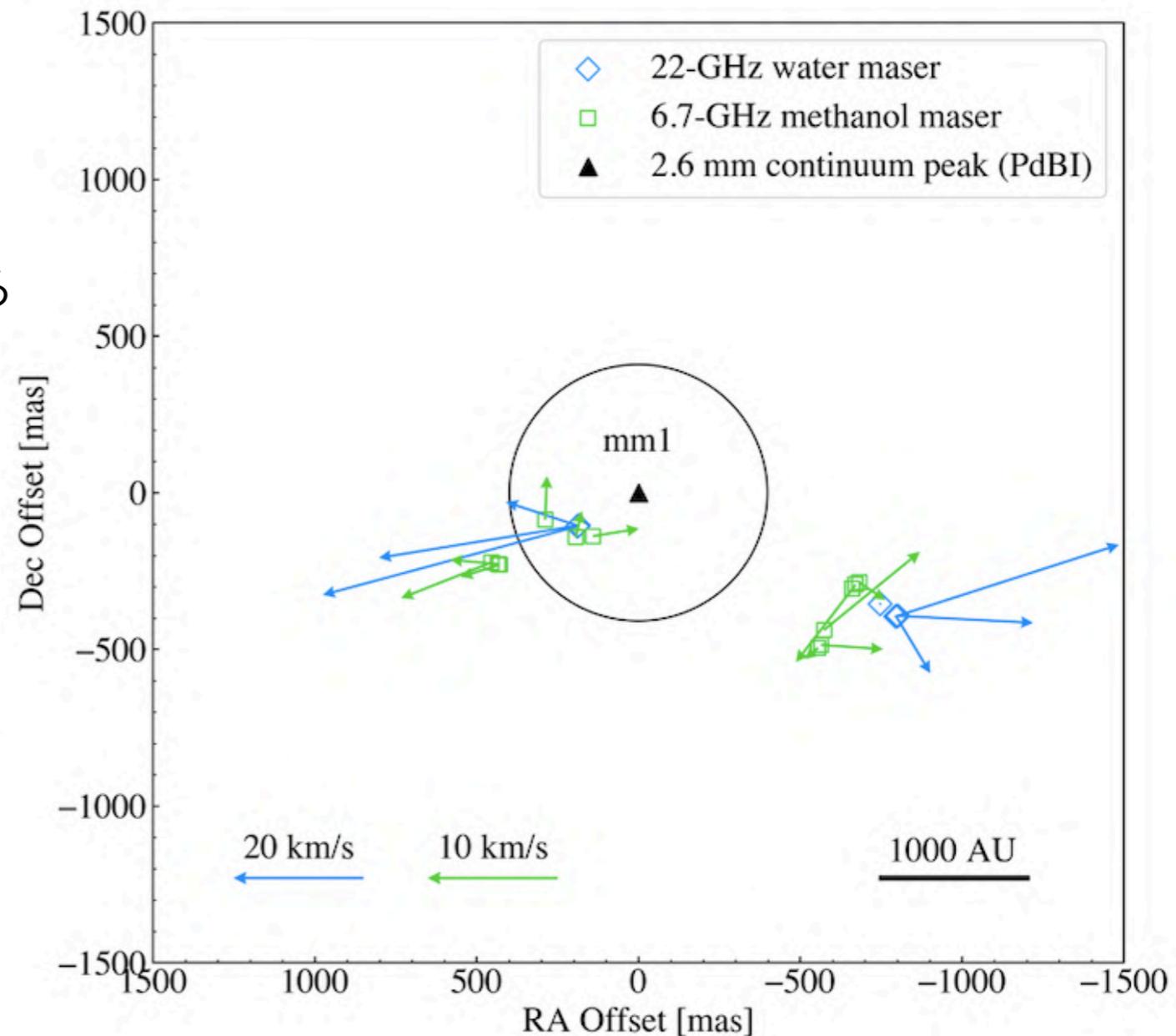
: A. 水メーザーとの類似点が多い

- ・ 分布：東西に分かれたペア形状
(分子輝線 (CO, H₂) など観測されている
東西方向のアウトフローと矛盾しない)
- ・ 運動：水と向きが一致している成分も

● 気がかりな点

- ・ 一部の運動が単純なアウトフローの膨張運動では説明できない
- ・ 水メーザーとの速度差が説明不能
- ・ 励起メカニズムが異なる2つのメーザーが近接する理由は？

→ 3次元的な運動 なら説明可能？



Wide-opening angle outflow なら運動を説明可能か？

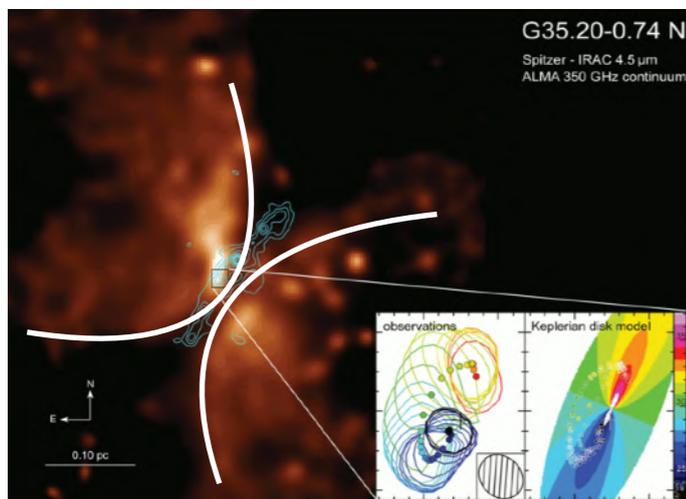
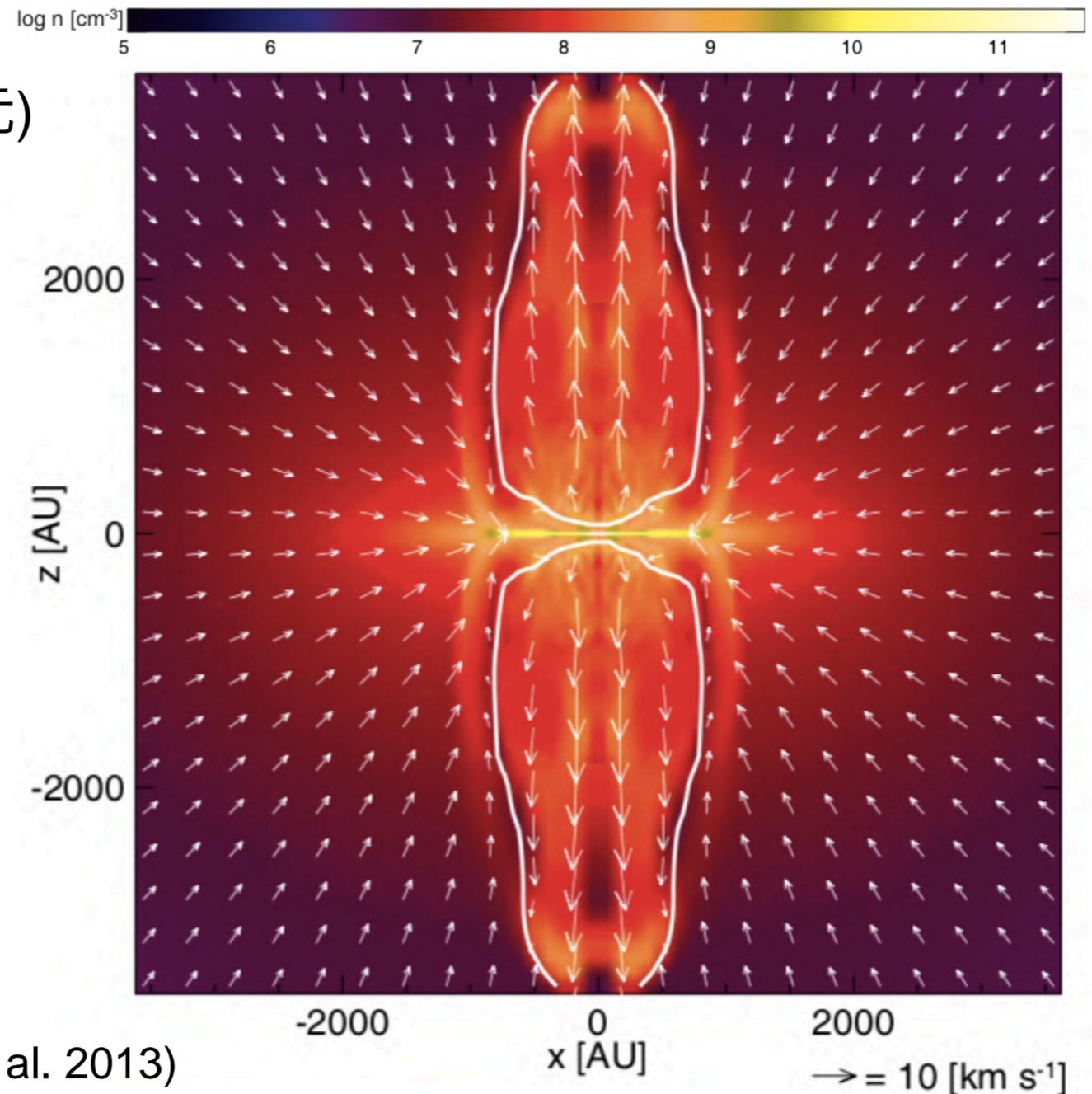
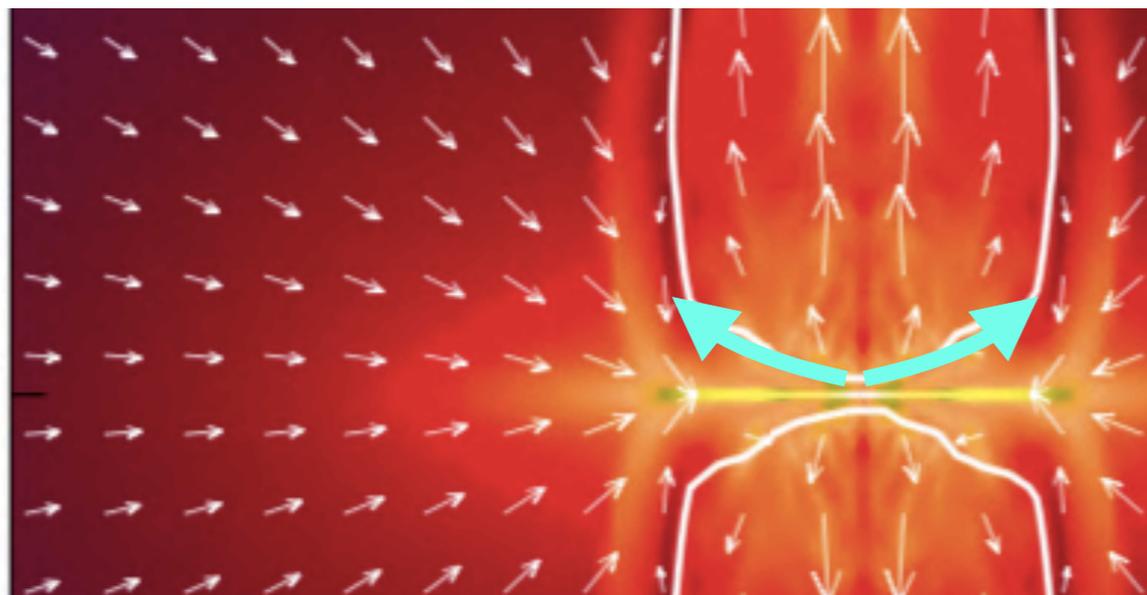
- 大質量星形成のMHDシミュレーション (Matsushita et al. 2018)

メタノールメーザーが付随している
100 - 1000 au 付近 (アウトフローの根元)
→ Opening angle が広い

原始星質量 $M_{ps} = 12.5 M_{sun}$

計算開始後の経過時間 $t = 22478.5 [yr]$

アウトフロー出現後の時間 $t_{ps} = 2541.5 [yr]$

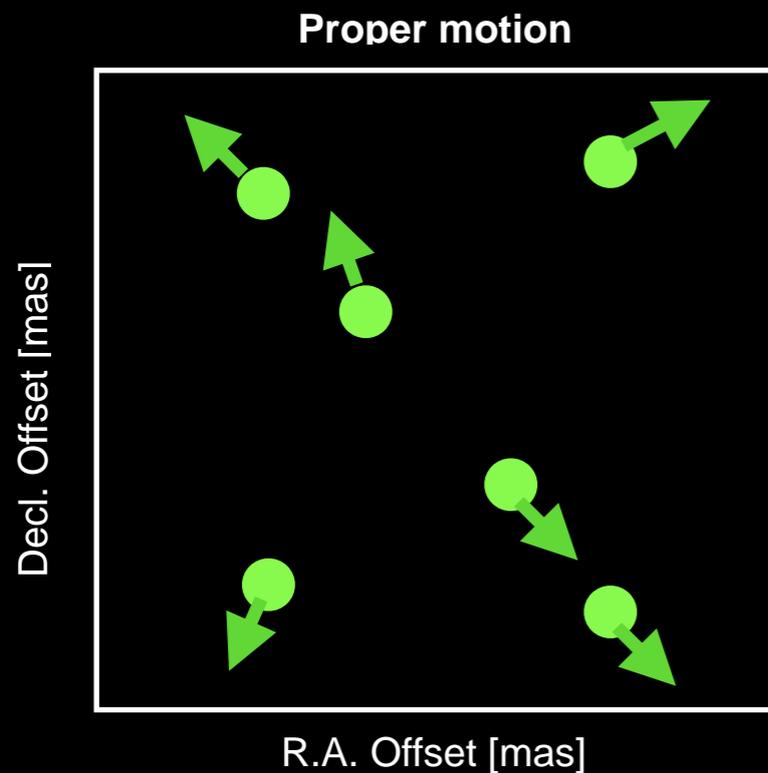


大質量星形成領域
G35.20-0.74 N の
広角アウトフロー
(Sánchez-Monge et al. 2013)

考察2：円錐アウトフローによるモデルフィッティング

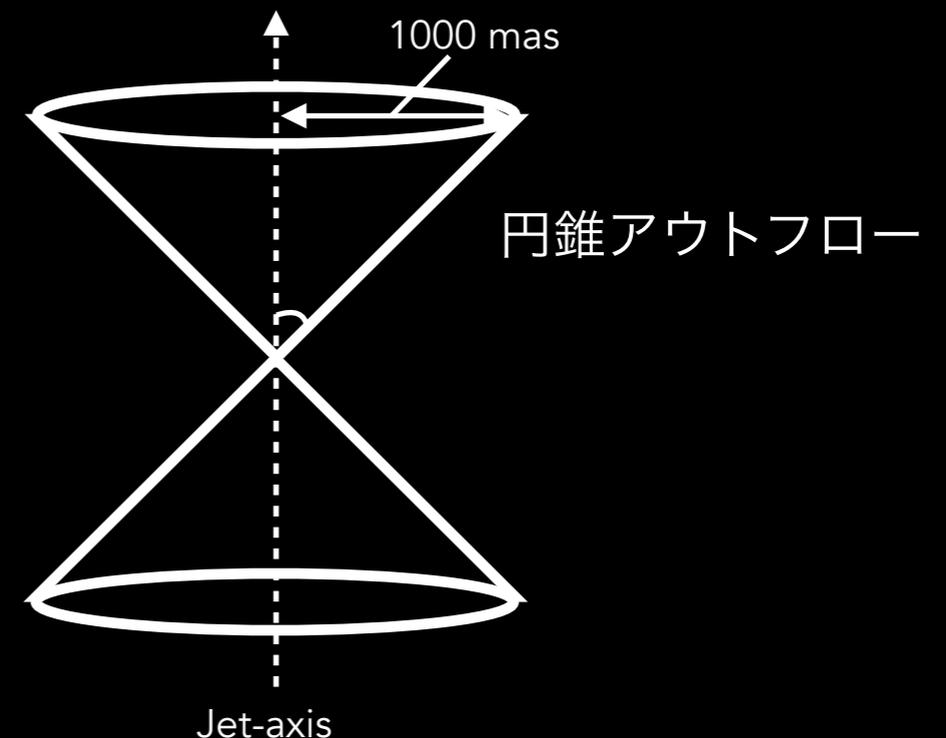
観測データ

- 空間マップ (R.A. , Decl.)
- 3次元速度
 - 固有運動速度 (V_{RA} , V_{DEC})
 - 視線速度 ($V_z = V_{LSR} - V_{sys}$)
- Position angle (P.A.)



モデルデータ

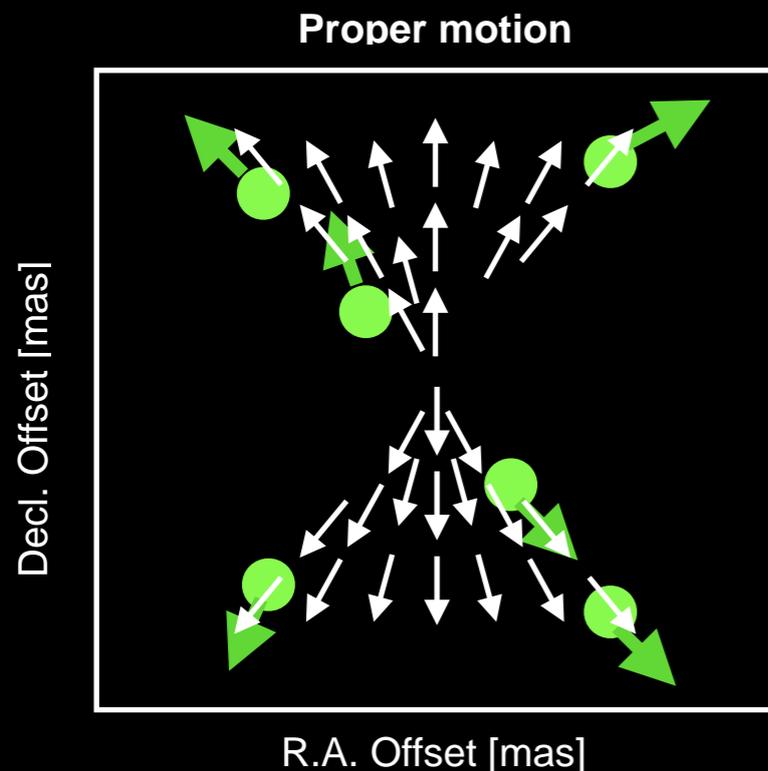
- モデル関数
$$x = r \cos \theta$$
$$y = r \sin \theta$$
$$z = \pm r \cdot (\tan \alpha)^{-1}$$
- Opening angle α
- Inclination angle i



考察2：円錐アウトフローによるモデルフィッティング

観測データ

- 空間マップ (R.A. , Decl.)
- 3次元速度
 - 固有運動速度 (V_{RA} , V_{DEC})
 - 視線速度 ($V_z = V_{LSR} - V_{sys}$)
- Position angle (P.A.)



モデルデータ

- モデル関数
$$x = r \cos \theta$$
$$y = r \sin \theta$$
$$z = \pm r \cdot (\tan \alpha)^{-1}$$
- Opening angle α
- Inclination angle i

観測結果とベクトルの向きが
もっともよく合う
Inclination angle, opening angle
を決定し、3次元アウトフロー
の運動で説明できるか検証

考察2：円錐アウトフローによるモデルフィッティング

● テストパラメーター

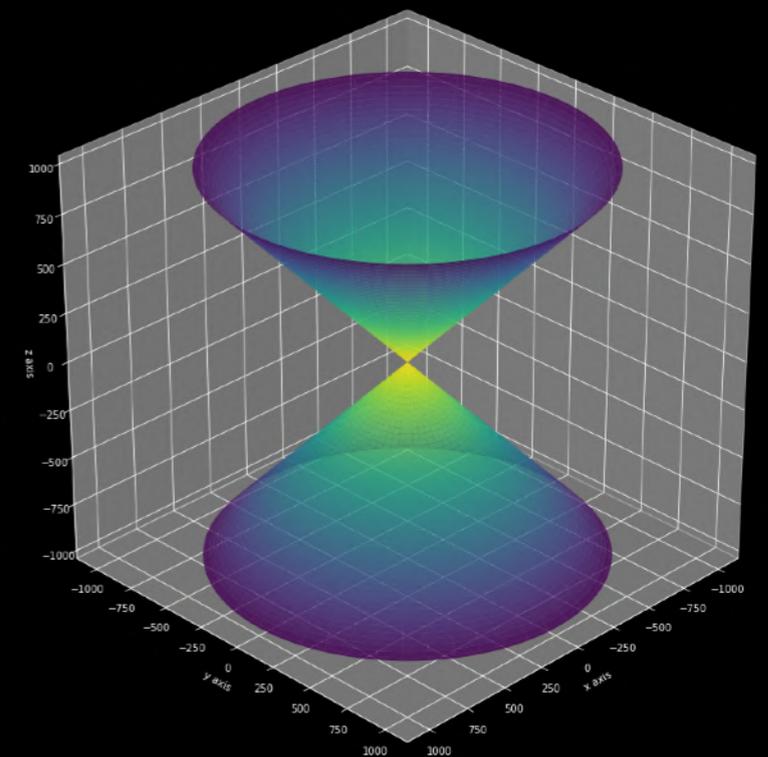
Opening angle	Inclination angle	P.A. (固定)
20° ~ 60°	-90° ~ 85°	73.9°
Search by 5°	Search by 5°	Fit by H ₂ O maser

● メッシュグリッド

円周：360° separate by 720 grids

半径：1000 mas separate by 1000 grids

→ Total : 720,000 grids



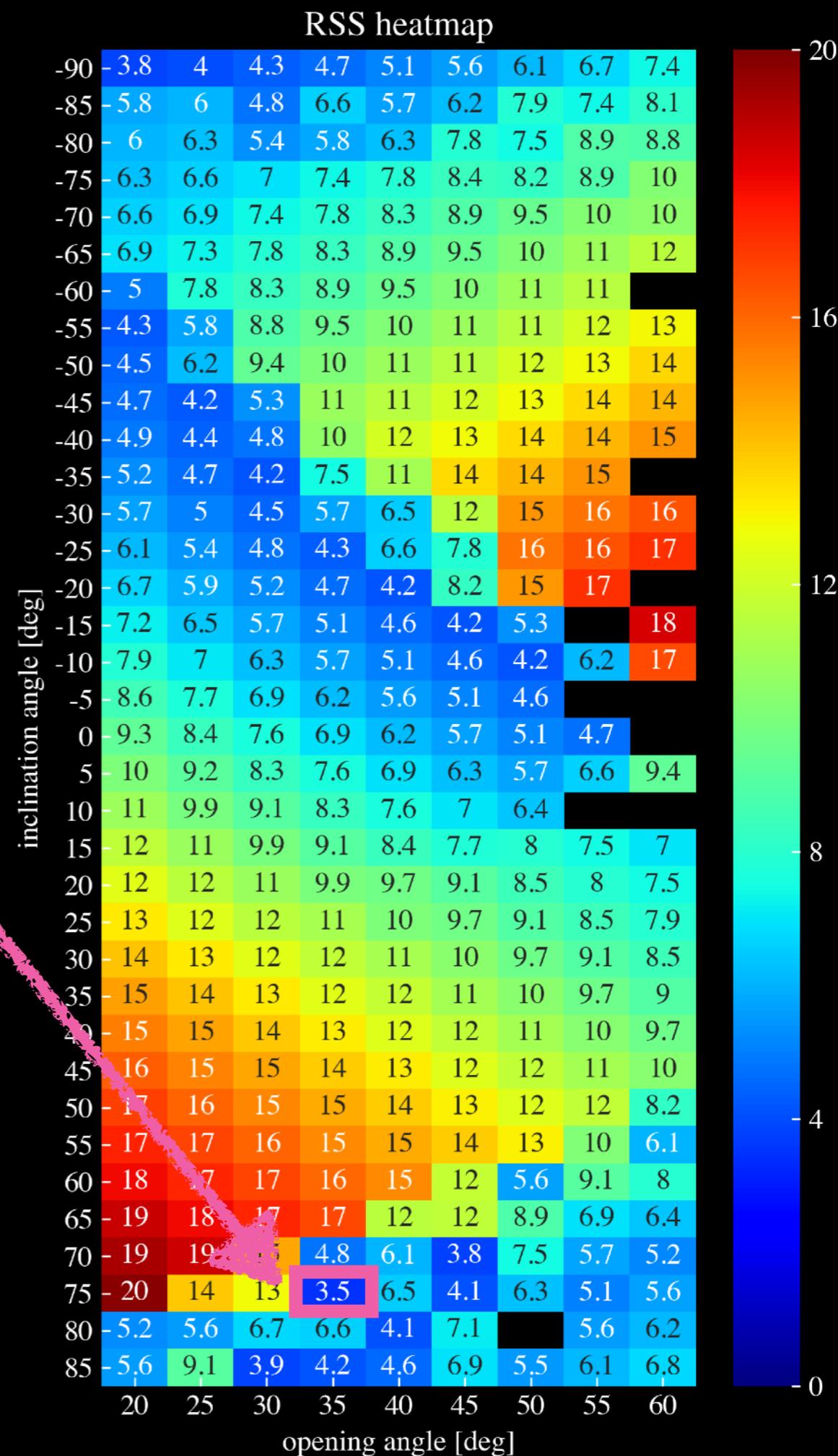
モデルフィット結果

- RSS (残差平方和)

$$RSS = \sum_{\substack{\text{観測値} \\ \text{モデル}}} (x_{obs} - x_{mod})^2$$

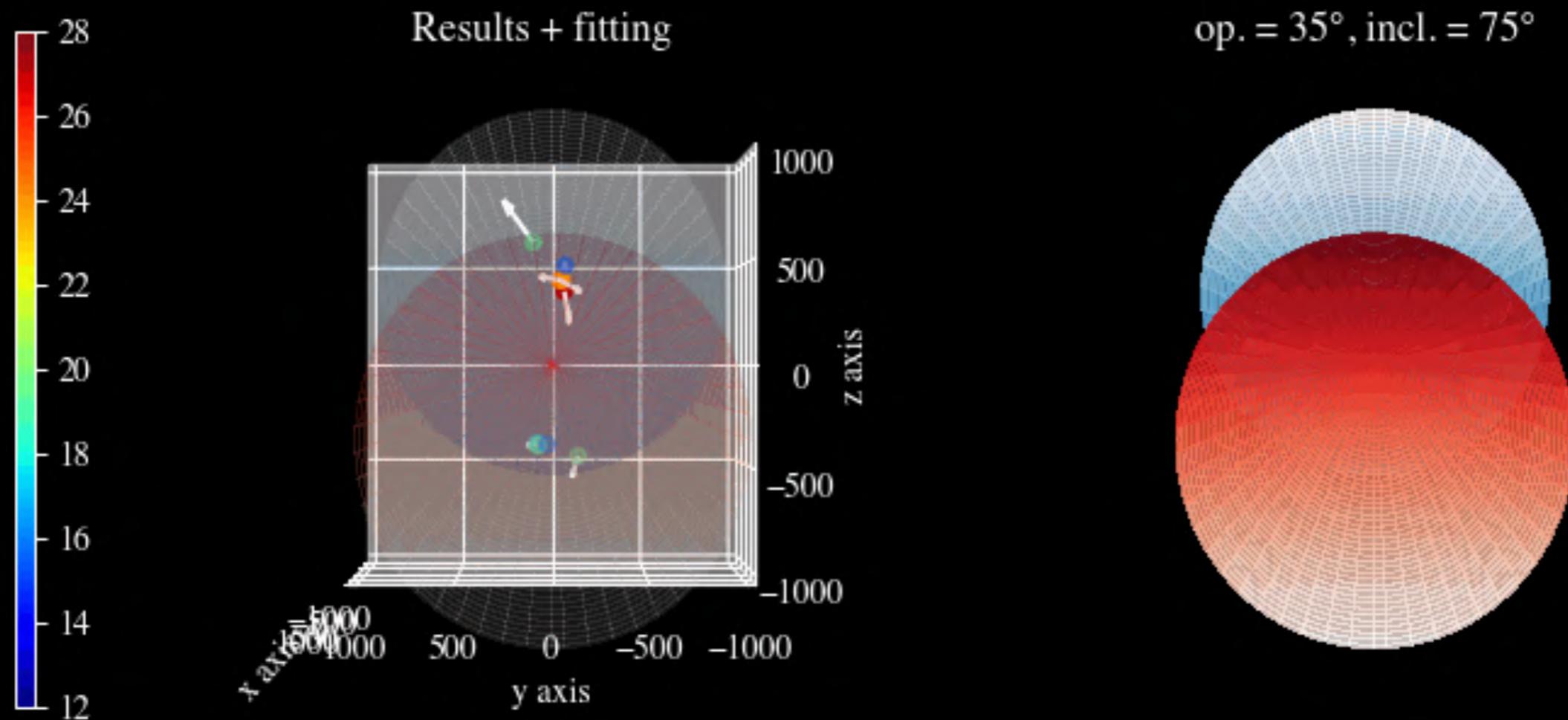
* Chi-square による評価は現在実行中

	Opening angle	Inclination angle	RSS
1	35	75	3.49
2	45	70	3.79
3	20	-90	3.84
4	30	85	3.90
5	25	-90	4.04



モデルフィット結果

- Opening angle = 35° , inclination angle = 75° のとき

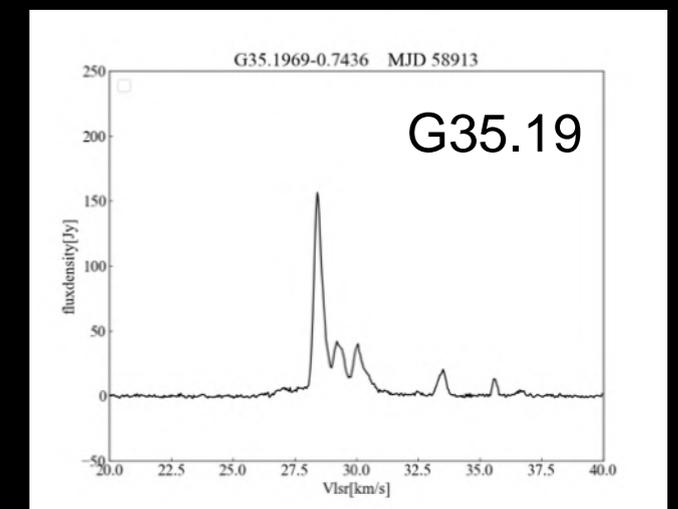
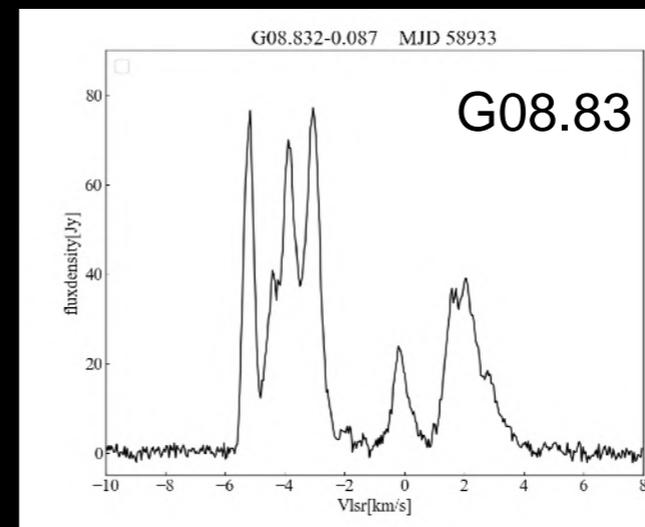
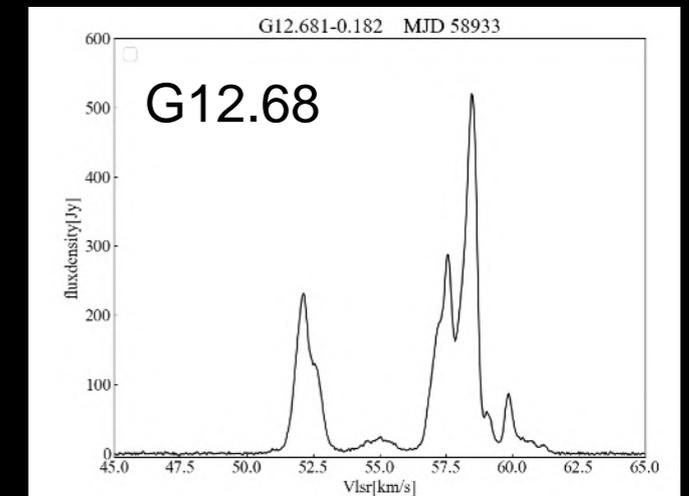
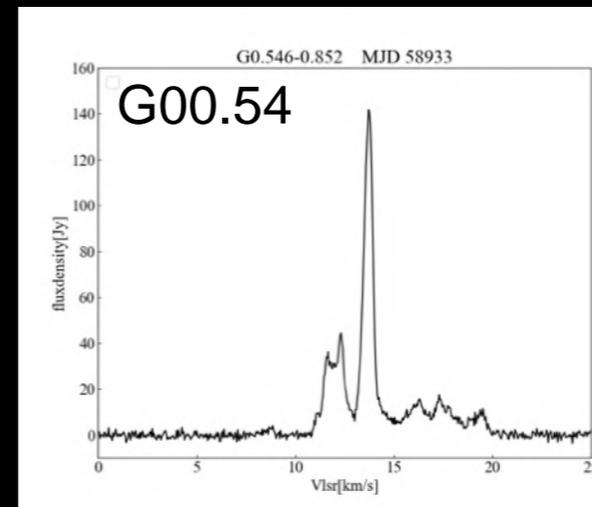
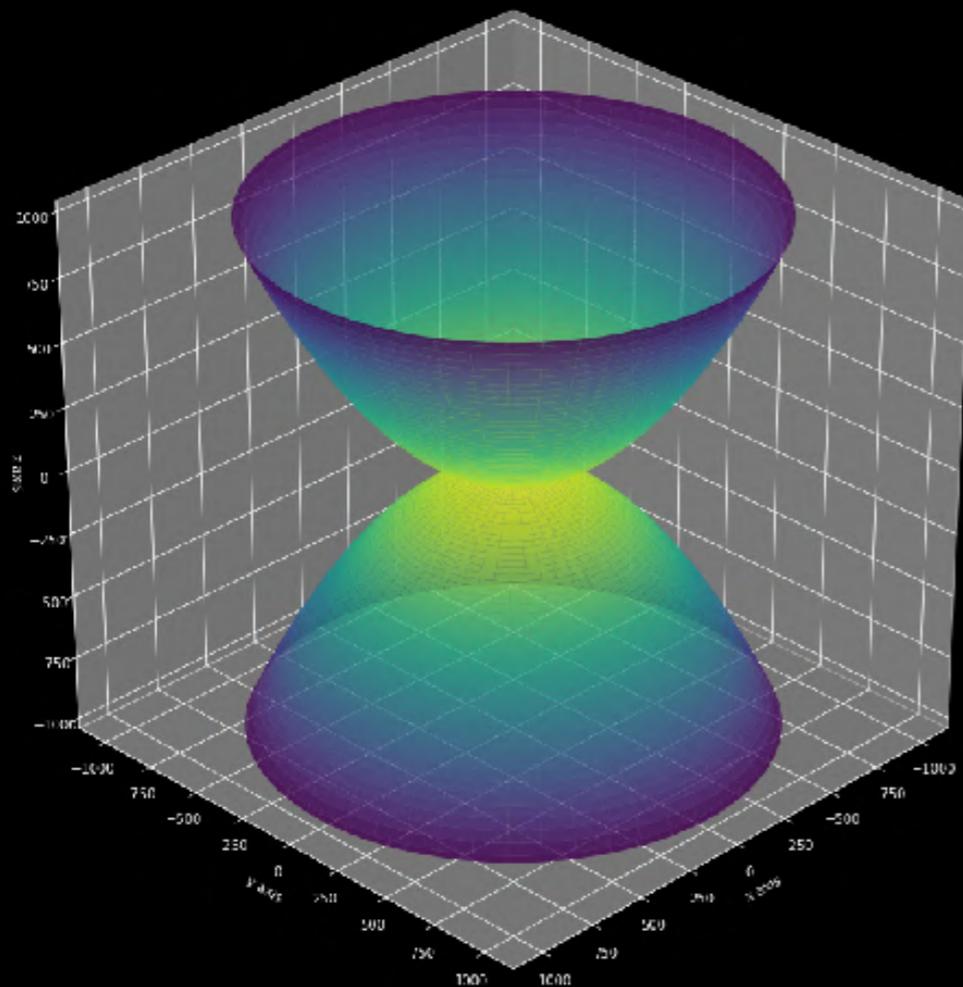


今回のモデルセットではまだまだベクトルがうまく合っていない
パラメータの設定やグリッドのセットアップをもう少し厳密に考える必要がある

今後の展望

より詳細なモデル

他天体による一般性の検証



パラボリックなアウトフロー
で同様のモデル評価

「速度幅」が 10 km/s をこえる
メタノールメーザーの VLBI モニター

Summary

目的

半数以上存在する **複雑な分布(ペア, コンプレックス)** の
6.7 GHz メタノールメーザーが **アウトフロー** に付随するか？



▶ 活発なアウトフローを有する G59 の内部固有運動から直接検証する

観測

2016.08 ~ 2019.05 までの約 1000 日間に計 6 回
活発なアウトフロー天体 G59.783+0.065 の VLBI 観測を実施

結果

分布：ほぼ変化なく、水メーザーと近接
運動：おおむね東西方向、水メーザーの向きとほぼ一致。

▶ **アウトフローに付随している可能性が高い**

今後

- ・ 広角なアウトフローのより具体的な関数でモデルフィット
- ・ アウトフロー付随説の一般性：他候補天体の VLBI 観測予定 (来月?)