

銀河系外縁部における星形成領域の観測的研究

(Observational study of star forming regions in the Outer Galaxy)

2020年3月

小出 風人

概要

本論文は、銀河系外縁部に位置する大質量星形成領域について行った VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) による年周視差測定と、ミリ波望遠鏡によるサーベイ観測から得られた付随分子ガスのデータ解析に基づき、銀河系外縁部における大質量星形成についての考察をまとめたものである。

第1章では、大質量星形成に関する研究の背景と現状、特に銀河系外縁部における星形成の研究の意義と目的について述べる。大質量星は小・中質量星と比較して数が少なく、その形成過程は従来のガス降着のみによるシナリオでは説明が困難である等、未だ解明されていない点が多い。近年、大質量星の形成過程を説明するシナリオとして、分子雲衝突による急激なガス圧縮が注目されている。分子雲衝突は、分子ガス密度の高い銀河系内縁部で議論されることが多いが、分子ガス密度の低い銀河系外縁部ではあまり議論されてこなかった。しかし、銀河系外縁部では差動回転が小さく、大質量星形成の誘発に有利な、遅い相対速度の衝突の割合が高いと考えられるため、その観測的調査が重要である。

第2章には、VERA による IRAS 01123+6430 の年周視差測定と、銀河系内における位置と運動に関する議論が述べられている。この測定から、年周視差は 0.151 ± 0.042 mas、距離は $6.61^{+2.55}_{-1.44}$ kpc となり、固有運動は $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (-1.44 \pm 0.15, -0.27 \pm 0.16)$ mas yr⁻¹ と求められた。この距離と赤外フラックス密度から、この領域は B1-B2 のスペクトル型の YSO (Young Stellar Object) を有し、強い UV 放射を伴う HII 領域であることが分かった。一方、計測した距離から、この領域は銀河系第2象限における、はくちょう座腕に位置していることが分かった。しかし、運動学的距離に基づいて求められた位置とは、誤差の範囲内で一致しなかった。この領域にあるメーザー源の運動を考慮したところ、銀河中心方向とは反対の向きを示す動径成分の運動により、見かけの視線速度が小さくなっていることによるものであることが分かった。

第3章では、FCRAO 14m ミリ波望遠鏡による銀河面分子雲サーベイデータの解析結果に基づき、IRAS 01123+6430 に付随する分子雲の構造と星形成との関係についての議論が述べられている。FCRAO データでは、¹²CO($J = 1 - 0$) 放射がトレースする円弧状の構造と直線状の構造を持った分子雲が検出された。そして、VERA による年周視差測定から得られた距離 6.61 kpc を用いて、この分子雲の物理量を求めたところ、サイズ $35 \text{ pc} \times 46 \text{ pc}$ 、光度 $1.1 \times 10^4 \text{ K km s}^{-1}$ 、質量 $4.3 \times 10^4 M_{\odot}$ と見積もられた。この分子雲の形状は Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のモデルが示す特徴と一致しており、直線状の構造が $3-5 \text{ km s}^{-1}$ の比較的遅い相対速度での衝突の際に生じているものだと分かった。また、このシミュレーションで、遅い相対速度の分子雲衝突で分子雲コアの質量が増加することが示されていることから、IRAS 01123+6430 では、遅い相対速度の分子雲衝突で大質量星形成が起こったと考えられる。

第4章では、銀河系外縁部大質量星形成領域 WB886 について、VERA による VLBI 位置天文観測の観点から行った議論について述べる。WB886 は、銀河系第3象限に属しており、年周視差測定から 0.349 ± 0.052 mas、距離は $2.86^{+0.50}_{-0.37}$ kpc と見積もられた。そして、年周視差測定から得られた距離と

赤外線フラックス密度との見積もりから、この領域に付随する YSO のスペクトル型は B0.5-B1 であることが分かった。IRAS 01123+6430 と同様、B3 より早期型の星が存在することから、この領域が強い UV 放射を伴う HII 領域であることが分かった。

第 5 章では、WB886 に付随する分子雲について、野辺山 45m 望遠鏡を用いた銀河面サーベイ計画 FUGIN (FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with Nobeyama 45m telescope) による $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ データの解析結果と、その議論について述べる。検出された分子雲について、年周視差測定から得られた距離 2.86 kpc を用いて物理量を計算したところ、サイズは $9.8 \text{ pc} \times 9.6 \text{ pc}$ 、光度は $2.58 \times 10^2 \text{ K km s}^{-1} \text{ pc}^2$ 、質量は $1.06 \times 10^3 M_{\odot}$ と見積もられた。この分子雲が、IRAS 01123+6430 に付随していた分子雲と同じく円弧状の形状をしていることから、分子雲衝突によって大質量星形成が起こったという可能性が考えられた。また、この円弧状の構造の分子雲に加え、近傍に三角形の形状を持つ分子雲が付随していることが分かった。この三角形の構造の成因について考察した結果、分子雲衝突を起こした後にアウトフローを伴い移動する星形成領域のトイモデルで説明できることが分かった。

第 6 章では、Arcetri カタログから選出した銀河系外縁部における H_2O メーザー源に付随する分子雲について、FCRAO と FUGIN の $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ データの調査を行い、分子雲衝突の痕跡の候補として考えられる天体についての議論を述べる。カタログにおける 1013 個の H_2O メーザー源の内、FCRAO データでは 14 個 (IRAS 01123+6430 を含めると 15 個)、FUGIN データでは 8 個 (WB886 を含めると 9 個) の H_2O メーザー源に分子雲が付随していることが分かり、そのうち FCRAO データでは 7 個が、FUGIN データでは 3 個、計 10 個の H_2O メーザー源に付随する分子雲が、分子雲衝突の兆候を示す円弧状の形状をしていることが分かった。

第 7 章は、本論文全体のまとめである。本研究では、IRAS01123+6430 および WB886 の年周視差測定および付随する分子ガス分布の調査から、円弧状構造を伴う大質量星領域は分子雲衝突によって形成されたとするシナリオでよく説明できることを示した。本研究を通して、銀河系外縁部は内縁部に比べて星形成の頻度自体は低いものの、遅い相対速度の分子雲衝突の割合が高く、むしろ分子雲衝突による大質量星形成には有利な環境であることが分かった。大質量星領域に付随する円弧状の構造を示す分子雲は銀河系外縁部における大質量星形成過程を解明する上で重要な天体であることが示唆される。

目次

1	序論	3
1.1	星形成および分子雲衝突研究の背景	3
1.2	大質量星形成と H ₂ O メーザー	6
1.3	銀河系外縁部	9
1.4	銀河系外縁部研究の意義	9
1.5	本研究の目的	10
1.6	VERA	12
1.7	ORC	13
2	IRAS 01123+6430 の年周視差計測	14
2.1	IRAS01123+6430	14
2.2	観測	15
2.3	解析	17
2.4	結果	31
2.5	議論	38
2.5.1	YSO のスペクトル型	38
2.5.2	内部運動	38
2.5.3	銀河系内における位置	41
2.6	2章まとめ	44
3	IRAS 01123+6430 の付随分子雲	45
3.1	FCRAO	45
3.1.1	観測	45
3.1.2	解析	49
3.2	付随分子雲 HC5506	50
3.2.1	HC5506 の物理量	50
3.2.2	分子雲衝突モデルとの比較	52
3.2.3	大質量星形成のシナリオ	55
3.3	3章まとめ	56
4	WB886 の年周視差計測	57
4.1	WB886 (IRAS06446+0029)	57
4.2	観測	58
4.3	解析	62
4.4	結果・議論	64

4.4.1	年周視差計測	65
4.4.2	YSO のスペクトル型	66
4.4.3	銀河系内における運動について	66
4.5	4 章まとめ	67
5	WB886 の付随分子雲	68
5.1	FUGIN	68
5.1.1	観測	70
5.1.2	解析	70
5.2	付随する分子雲について	71
5.2.1	三角形の構造とアウトフロー	71
5.3	5 章まとめ	74
6	銀河面 CO 観測と H₂O メーザー源に付随する分子雲	75
6.1	Arcetri カタログ	75
6.2	H ₂ O メーザー源の距離計測について	75
6.3	分子雲衝突の判断基準について	76
6.4	FCRAO&FUGIN サーベイに含まれる H ₂ O メーザー源	77
6.5	調査結果の考察	84
6.6	6 章まとめ	86
7	まとめ	87
A	VERA データの解析と三次元運動について	94
A.1	年周視差測定	94
A.2	3次元運動の導出	96
A.3	誤差伝播	97
A.4	誤差計算スクリプト	99
B	FCRAO データの解析について	105
B.1	FITS データの処理	105
B.2	解析スクリプト	107
C	FUGIN プロジェクト観測の手順とデータの解析	115
C.1	観測ログ (2016/05/22)	115
C.2	解析スクリプト	119

1 序論

夏の夜空を見上げると「天の川」が見える。これは、我々が住む「銀河系」と呼ばれる、星・ガス・暗黒物質からなる系を内側から見たものである。銀河系は、「バルジ」、「ディスク」、「ハロー」の3部分で構成され、特にディスク内では多くの星が誕生している。これまで、小・中質量星の形成過程についての理解はかなり進んできたが、いまだ大質量星の形成過程については分かっていない点が多く、これまで観測的観点 (Fukui et al. 2014; Torii et al. 2015; Takahira et al. 2014; Haworth et al. 2015) から分子雲衝突による大質量星形成の誘発に関して多くの研究が進められている。本章では、星形成のシナリオ・要因・環境について触れ、銀河系外縁部での星形成の背景について述べる。

1.1 星形成および分子雲衝突研究の背景

銀河系には数千億個の星が存在している。銀河系内の星は、太陽の0.1～8倍以下の質量を持つ小・中質量星、8倍以上の質量を持つ大質量星に大きく分けられ、それぞれについての星形成に関する研究が進んできた。この小・中質量星と大質量星については、それぞれ質量の違いだけでなく、形成や進化等の物理過程も異なっている。

まず、小・中質量星の形成および進化過程については、次のようなシナリオが考えられている。まず、分子雲の中で密度にムラができ、分子雲コアが生成される。続いて、生成された分子雲コアに重力不安定が生じ、自己重力で収縮して原始星が形成される。そして、原始星に向かって周囲からガスが降着することにより質量が増加していき、失われた分の角運動量がアウトフローとして降着円盤に対して垂直方向に放出される (Shu et al. 1987)。

ここで、小・中質量星の降着時間について、自由落下時間として考えてみる。小・中質量星の質量は $0.1 \sim 8 M_{\odot}$ で、ガス温度 10 K として、以下の Jeans 質量の式 (Zinnecker & Yorke 2007)

$$M_J \simeq 1.1 M_{\odot} \left[\frac{T_{\text{gas}}}{10 \text{ K}} \right]^{\frac{3}{2}} \left[\frac{\rho_{\text{gas}}}{10^{-19} \text{ g cm}^{-3}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

より、ガス密度を計算すると、 $\rho_{\text{gas}} \simeq 10^{-19} \sim 10^{-17} \text{ g cm}^{-3}$ となり、これより、自由落下時間は以下の式

$$t_{\text{ff}} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

から、おおよそ $10^4 \sim 10^6 \text{ yr}$ となる。この結果から、小・中質量星の降着率はおおよそ $\sim 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となる。次に、KH (Kelvin-Helmholtz) タイムスケールについて考えてみよう。KH タイムスケールとは、分子雲内で星形成が始まり主系列星に達するまでの間、星が重力収縮によってエネルギーを放射で失う時間である。このタイムスケールは以下の式で表され (Zinnecker & Yorke 2007)、

$$\tau_{\text{KH}} \sim \frac{GM_*^2}{R_* L_*} \quad (3)$$

Zinnecker & Yorke (2007) によると、 $0.1 \sim 8 M_{\odot}$ の小・中質量星の KH タイムスケールはおおよそ $10^6 \sim 10^9 \text{ yr}$ である。よって、ガスの自由落下時間、つまり降着時間 ($t_{\text{ff}} = t_{\text{acc}}$) とこの KH タイムスケールを比較すると、 $t_{\text{acc}} \leq \tau_{\text{KH}}$ となり、主系列星に達する前に降着が終了する。

ガス降着が終了した後の中心星は、対流状態を示す”林トラック”、放射状態を示す”Heneyy トラック”を通じて、主系列星に達することになる (Ward-Thompson & Whitworth 2011)。主系列星に達した後は収縮が終了し、水素の核融合のみで光り続ける。ここまでが、小・中質量星の形成・進化過程である。

一方、大質量星の形成および進化過程については、小・中質量星とは大きく異なる。小・中質量星については、前述の通り降着が終了してから林→Heneyy トラックを通り主系列星に到達するが、それに対して大質量星は、林・Heneyy トラックの過程でも降着が続く。つまり、ガス降着の過程で対流・収縮等の物理過程が同時進行するという段階を踏まない進化過程であるため、降着が終了する前に主系列星に到達する。したがって、小・中質量星では”地道に”進化段階を踏みながら主系列星に達するのに対して、大質量星では”いきなり”主系列星に達することになる (Ward-Thompson & Whitworth 2011)。

また、大質量星形成では「輻射圧障壁」という問題が生じる。これは、ガスの降着により質量が増加した中心星が主系列星に到達した時、中心星からの輻射圧がラム圧に勝り周囲のガスを吹き飛ばすことで中心星が大質量星になる前に質量増加が停止するという問題である (Hosokawa & Omukai 2009)。例えば、中心星の質量が $10 M_{\odot}$ 、半径 $2 R_{\odot}$ 、ガス温度が 10 K の時、式 (1) から、ガス密度は $\rho_{\text{gas}} \simeq 10^{-21} \text{ g cm}^{-3}$ となり、ラム圧 ρv^2 を計算すると、

$$\rho v^2 = \frac{\rho GM}{R} \sim 10^{-6} \text{ Pa} \quad (4)$$

となる。一方、典型的な OB 型星の光度は $\sim 10^4 L_{\odot}$ (Zinnecker & Yorke 2007) なので、輻射圧 $L/(4\pi c R^2)$ は、

$$\frac{L}{4\pi c R^2} \sim 541 \text{ Pa} \quad (5)$$

となり、輻射圧がラム圧よりも大きく勝る。

ここで、小・中質量星形成におけるタイムスケールの比較と同様、大質量星形成についても自由落下時間と KH タイムスケールとの比較を行ってみよう。まず、ガス降着による自由落下時間について、大質量星の質量 $10 M_{\odot}$ の時、ガス温度を同じく 10 K として、式 (1) から、ガス密度は $\rho_{\text{gas}} \sim 10^{-21} \text{ g cm}^{-3}$ となり、式 (2) から、ガスの自由落下時間、つまり降着時間はおおよそ $t_{\text{acc}} \sim 10^6 \text{ yr}$ となる。そして、大質量星の質量に対して KH タイムスケールは、Zinnecker & Yorke (2007) によると、 $\tau_{\text{KH}} \sim 10^5 \text{ yr}$ となる。ここで、ガス降着による自由落下時間と KH タイムスケールを比較してみると、 $t_{\text{ff}} > \tau_{\text{KH}}$ となり、降着が終了する前に中心星が主系列に到達する。そして、中心星からの輻射圧によるバリア（輻射圧障壁）が生じることでガス降着が停止し、中心星の成長も停止する (Hosokawa & Omukai 2009)。このことにより、ガス降着による大質量星形成は長年の疑問となっていた。

この輻射圧障壁の問題を解決し、大質量星の質量増加を促すためには、中心星が主系列星に達する前に大量のガスを降着させなければならない。そのために必要な条件として、自由落下のタイムスケールが KH タイムスケールを下回る、つまり、 $t_{\text{ff}} < \tau_{\text{KH}}$ となる必要がある。ここで、降着時間 $t_{\text{acc}} = M_*/\dot{M}_*$ (Hosokawa & Omukai 2009) と KH タイムスケールの両者のタイムスケールを考えてみよう。大質量星の質量 $M_* = 10 M_{\odot}$ 、KH タイムスケール $\tau_{\text{KH}} \sim 10^5 \text{ yr}$ から、降着率は $10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ とな

り、大質量星形成には $\geq 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 以上の高い降着率が必要となる。この降着率の実現には、従来の自発的な星形成ではなく、外部からの誘発的な星形成のシナリオが必要となる。そのシナリオには以下の3つが挙げられる。

1つ目のシナリオとして、C&C (Collect&Collapse) がある。これは、大質量星からの放射圧によって周囲のガスが押しつけられることで高密度のガス殻が形成され、ガス殻の中で重力不安定により分子雲コアが生成され大質量星が形成されるというシナリオである (Elmegreen & Lada 1977)。このシナリオによって、 $7 M_{\odot}$ 以上の中～大質量星を形成することが知られている (Whitworth et al. 1994)。

2つ目のシナリオとして、RDI (Radiatively Driven Implosion) がある。これは、大質量星からの放射圧により、周囲に点在している重力的に安定した分子雲クラumpが圧縮され、大質量星が形成されるというシナリオである (Bertoldi 1989)。このシナリオは前述の C&C と似ているが、相違点としては、すでに重力的に安定したガスのクラumpが分布しているという点である。このシナリオによると、降着率を1-2桁上昇させるという (降着率 $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ を $10^{-4}-10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ に上昇) (Motoyama et al. 2007)。

3つ目のシナリオとして、分子雲衝突がある。その過程 (figure 1) としては、(1) 小型分子雲が大型分子雲に衝突する。(2) 衝突によってガスが急激に圧縮される。遅い相対速度の衝突の場合、小型分子雲が通過した後に自己重力で圧縮された直線状の構造が生成される。(3) 圧縮層の中で大質量星が形成され、形成された大質量星から放射される強い UV によって周囲のガスが電離され、電離水素領域 (HII 領域) が生成される。分子雲衝突により乱流が増幅され、 $\dot{M} = 10^{-4}-10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ もの高い降着率 (Inoue & Fukui 2013) を実現することができる。前述の C&C や RDI は、元から大質量星が存在しているという前提で大質量星形成が起こっているのに対し、分子雲衝突は、大質量星が存在していないという前提で大質量星形成が起こっているという違いがある。

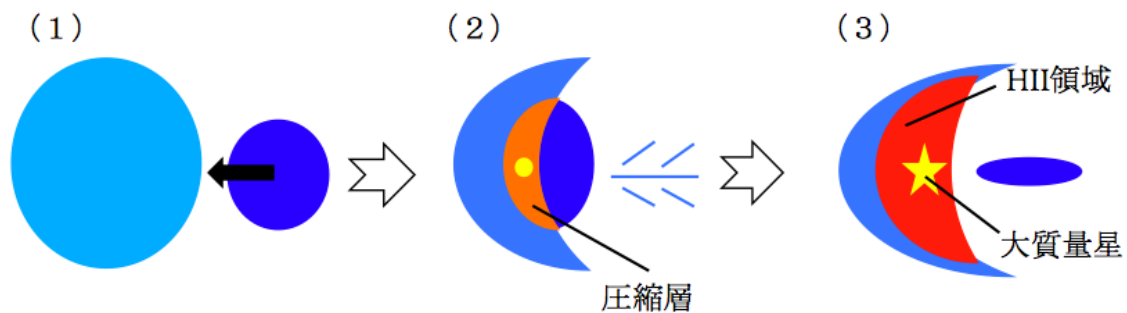


Figure 1: 分子雲衝突の模式図。Habe & Ohta (1992) を元に作成。

分子雲衝突による星形成の研究は、観測的観点・理論的観点から多く行われており、以下に先行研究の例を示す。

まず観測的観点については、Torii et al. (2011) では、三裂星雲 M20 の NANTEN2-4m サブミリ望遠鏡による $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線観測を行い、スペクトル型 O7.5 の YSO からの UV 放射により電離した HII 領域に付随している分子雲が検出された。この分子雲の Mopra 22m 望遠鏡による $^{12}\text{CO}(J=1-0)$

輝線の高分解能観測では、4個の細かい分子雲に分かれており、速度方向に調べてみると、それぞれをつなぐ3つの Bridge 構造が確認され、これらの構造が分子雲衝突における衝突面で起こるガス乱流を支持していた (Torii et al. 2017)。他にも、Fukui et al. (2014) では、NANTEN2-4m サブミリ望遠鏡による super star cluster である NGC 3603 の ^{12}CO , $^{13}\text{CO}(J=2-1, 1-0)$ 輝線観測を行い、 $3.2\text{--}34.7\text{ km s}^{-1}$ の速度範囲に渡り分子雲が検出された。そして、 15 km s^{-1} の速度差の Bridge 構造が検出され、分子雲衝突のタイムスケールが $\sim 1\text{ Myr}$ と導出されている。また、Torii et al. (2015) では、リング星雲 RCW 120 について NANTEN2 望遠鏡を用いた分子輝線観測を行い、O 型星の YSO に 20 km s^{-1} の速度差の Bridge 構造を持った分子雲が検出された。

理論的観点については、Takahira et al. (2014) で、Habe & Ohta (1992) により確立された分子雲衝突モデルをもとに、低密度の大型分子雲と高密度の小型分子雲を衝突させるシミュレーションが行われた。このシミュレーションでは、 $3, 5, 10, \text{ km s}^{-1}$ の3つの異なる速度で2つの分子雲を衝突させ、その結果、 $3, 5\text{ km s}^{-1}$ の比較的遅い相対速度の衝突が分子雲のコア質量増加を促し、大質量星形成に有利であることが分かった。さらに、このシミュレーションにおいて衝突時の構造が円弧状の形状を示していた。また、Haworth et al. (2015) では、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突シミュレーションに基づき、中心星からの放射フィードバックを考慮したシミュレーションを行い、横軸を位置、縦軸を速度にとった P-V (**P**osition-**V**elocity) 図を調査した。結果として、中心星からの放射を考慮した分子雲衝突のシミュレーションのスナップショットの形状が、Mopra 望遠鏡による三裂星雲 M20 の P-V 図と、Bridge 構造が検出されたという点で一致した。

これまでの分子雲衝突の先行研究において、観測された分子雲に注目してみると、M20 (Haworth et al. 2015; Torii et al. 2011, 2017) は $(l, b) = (5.5^\circ\text{--}7.5^\circ, -0.8^\circ\text{--}+0.7^\circ)$ (銀河系第1象限)、NGC3603 (Fukui et al. 2014) は $(l, b) = (291.6^\circ, -0.5^\circ)$ (銀河系第4象限)、RCW 120 (Torii et al. 2015) は $(l, b) = (348.1^\circ\text{--}348.4^\circ, +0.4^\circ\text{--}+0.6^\circ)$ (銀河系第4象限) と、ほとんどが銀河系内縁部の分子雲について議論されており、銀河系外縁部の分子雲についてはあまり議論されてこなかった (1.3 節参照のこと)。しかし、Enokiya et al. (2019) では、 $(l, b) = (206.5^\circ, -16.4^\circ)$ (銀河系第3象限) に位置する銀河系外縁部分子雲について議論されており、異なる速度成分間の補完的構造と bridge 構造が分子雲衝突の観測的証拠として報告されている。また、理論的な面と併せて考えると、分子雲衝突の観測的証拠として bridge 構造が挙げられる (Fukui et al. 2014; Haworth et al. 2015) が、Higuchi et al. (2014) では円弧状の構造の存在自体が分子雲衝突の痕跡として示されており、円弧状の構造の検出が分子雲衝突の観測的証拠の裏付けに重要であることが示されている。

1.2 大質量星形成と H_2O メーカー

大質量星が形成されると、 $> 50\text{ km s}^{-1}$ の強い解離ショックにより H_2 分子が H 原子に解離され、解離された H 原子が O 原子と結合することで H_2O 分子が生成される (Elitzur et al. 1989)。水分子には、”オルソ (Ortho)” と ”パラ (Para)” の2種類が存在する。オルソは、酸素原子と結合している2つの

水素分子のそれぞれのスピンの向きが平行の状態を指し、パラは2つの水素原子のスピンの向きが互いに反対向きになっている状態を指す (figure 2)。オルソは、エネルギー準位の上限が $< 1000 \text{ cm}^{-1}$ 、パラは、エネルギー準位の上限が $< 300 \text{ cm}^{-1}$ となっている。オルソの準位では 5_{23} (446.56 cm^{-1})、 6_{16} (447.3 cm^{-1}) が挙げられ、水分子の回転の指数 (下付き添字を指す) の和が奇数となっている。一方で、パラの準位では 3_{22} (206.68 cm^{-1})、 4_{04} (222.39 cm^{-1}) が挙げられ、水分子の回転の指数の和が偶数となっている (Green 1980)。

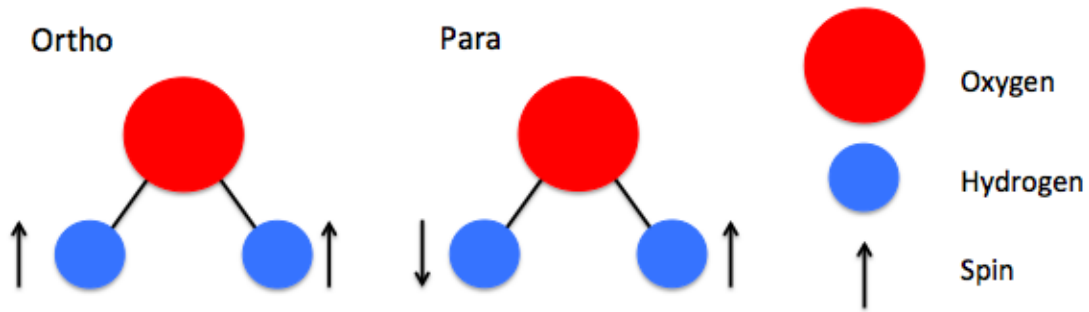


Figure 2: H_2O 分子の模式図。スピンの向きが揃っているものがオルソで、反対方向を示すものがパラとなっている。

Reid & Moran (1981) によると、 H_2O メーザーは活動的な星形成領域と進化した星の重要なトレーサーとなっている。特に星形成領域においては、原始星の進化段階が class 0, I にあり、質量降着が起こり、アウトフローが生じる段階であると考えられる (Motogi et al. 2011)。また、特に OB 型星のような高い光度を持つ大質量星は、メーザー源を発生させるのに必要な反転分布をもたらすポンピングに十分なエネルギーを持っている (Reid & Moran 1981)。

反転分布が起こる仕組みについて、 4_{14} 、 5_{05} 、 5_{23} 、 6_{16} 、 7_{07} の準位間の遷移を用いて説明する。まず、自然放射によって $5_{23} \rightarrow 4_{14}$ と準位が下がる ($A_{5_{23} \rightarrow 4_{14}} = 0.42 \text{ s}^{-1}$) (1)。次に、 H_2 分子が H_2O 分子に衝突することで、ポンピングにより $4_{14} \rightarrow 5_{05}$ に準位が上がる (2)。その後、同じくポンピングにより $5_{05} \rightarrow 6_{16}$ (3)、 $6_{16} \rightarrow 7_{07}$ (4) へと準位が上がり、自然放射により $7_{07} \rightarrow 6_{16}$ に準位が下がる ($A_{7_{07} \rightarrow 6_{16}} = 1.19 \text{ s}^{-1}$) (5) (figure 3)。

ポンピング機構として、光子によるエネルギー供給、星間分子同士の衝突によるエネルギー供給、化学エネルギーによるエネルギー供給が考えられている (Elitzur et al. 1989)。ここでは衝突によるポンピングに焦点をおくこととする。まず、分子の衝突頻度は衝突係数 $C = C_{4_{14} \rightarrow 5_{05}}$ 、 $C_{5_{05} \rightarrow 6_{16}}$ 、 $C_{6_{16} \rightarrow 7_{07}}$ で表され、 $C = n\sigma v$ (n : 分子ガス密度 [cm^{-3}]、 σ : 衝突断面積 [cm^2]、 v : 分子の速度 [km s^{-1}]) で評価される。典型的なメーザースポットについては密度 $n \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ (Elitzur 1992) で、衝突断面積については、分子の直径が $1 \text{ \AA} (= 10^{-8} \text{ cm})$ 程度なので $\sigma \sim (1 \text{ \AA})^2 = 10^{-16} \text{ cm}^2$ 、分子速度 $v \sim 100 \text{ km s}^{-1} = 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ より、衝突係数 $C_{4_{14} \rightarrow 5_{05}} = C_{5_{05} \rightarrow 6_{16}} = C_{6_{16} \rightarrow 7_{07}} = C = 1 \text{ s}^{-1}$ と見積もられる。

ここで、例として、 $t = 0 \text{ ms}$ で 10^{20} 個の H_2O 分子のエネルギー準位が 5_{23} であるとしよう。エネルギー

遷移 $5_{23} \rightarrow 4_{14}$ の A 係数は $A_{5_{23} \rightarrow 4_{14}} = 0.42 \text{ s}^{-1}$ なので、 1 ms (ミリ秒) 後に $10^{20} \times 0.42 \times 10^{-3} = 4.2 \times 10^{16}$ 個の分子が $5_{23} \rightarrow 4_{14}$ の放射をして 4_{14} に遷移する。次にエネルギー準位が 4_{14} にある 4.2×10^{16} 個の分子は、衝突により $C_{4_{14} \rightarrow 5_{05}} = 1 \text{ s}^{-1} = 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ の頻度でエネルギー準位 5_{05} に遷移する。よって $t = 2 \text{ ms}$ におけるエネルギー準位 5_{05} の分子数は 4.2×10^{13} 個となる。同様に $t = 3 \text{ ms}$ には 4.2×10^{13} 個の分子がエネルギー準位 6_{16} に遷移する。しかし自然放射による $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ の遷移確率は $1.9 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ と非常に低く、 $t = 4 \text{ ms}$ には $4.2 \times 10^{13} \times 1.9 \times 10^{-12} \simeq 80$ 個の分子しか 5_{23} に遷移しない。その間にエネルギー準位 5_{23} にあった分子は、 $t = 4 \text{ ms}$ で $4 \times 4.2 \times 10^{16} \simeq 1.7 \times 10^{17}$ 個の分子が 4_{14} に遷移していることとなる。つまり、エネルギー準位 5_{23} にある分子の減少数に対し、エネルギー準位 6_{16} の分子の増加数の方が大きい。

さらにエネルギー準位 6_{16} から 7_{07} への遷移も含めて考えると、 $t = 4 \text{ ms}$ にエネルギー準位 6_{16} にあった 4.2×10^{10} 個の分子がエネルギー準位 7_{07} に遷移する。エネルギー遷移 $7_{07} \rightarrow 6_{16}$ の A 係数は $A_{7_{07} \rightarrow 6_{16}} = 1.19 \text{ s}^{-1}$ なので、自然放射により $t = 5 \text{ ms}$ には $4.2 \times 10^7 \times 1.19 \times 10^{-3} \simeq 5.0 \times 10^4$ 個の分子がエネルギー準位 6_{16} に遷移する。前述のように $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ の遷移確率は $1.9 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ と非常に低いため、 $t = 6 \text{ ms}$ には、このうち $5.0 \times 10^4 \times 1.9 \times 10^{-12} = 9.5 \times 10^{-8}$ 個の分子しか 5_{23} に遷移しない。つまり、ほとんど遷移しない。その間にエネルギー準位 5_{23} にあった分子は、 $t = 6 \text{ ms}$ で $6 \times 4.2 \times 10^{16} \simeq 2.5 \times 10^{17}$ 個の分子が 4_{14} に遷移していることとなる。つまり前述の通り、この場合もエネルギー準位 5_{23} にある分子の減少数に対し、エネルギー準位 6_{16} の分子の増加数の方が大きい。この一連のサイクルを繰り返すことで、 5_{23} よりも 6_{16} の準位に H_2O 分子が多く分布することになる (de Jong 1973)。

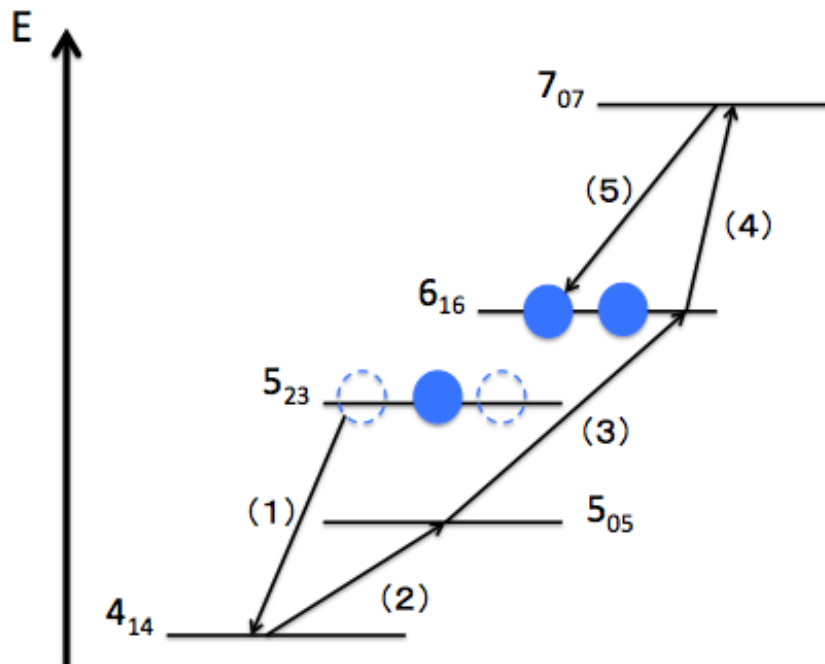


Figure 3: $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ の遷移間における反転分布の仕組みを表した模式図。de Jong (1973) を元に作成。

1.3 銀河系外縁部

太陽の銀河系中心距離は約 8 kpc であるが、8.5 kpc (Kerr & Lynden-Bell 1986) や (Honma et al. 2012)、8.34 kpc (Reid et al. 2014) 等、未だ文献による違いがある。太陽の公転円を太陽円と呼び、その内側である銀河系内縁部と外側の外縁部では、様々な物理状態が異なる。横軸を銀河中心距離、縦軸を銀河回転速度にとった現時点までの回転曲線 (Reid et al. 2014) に着目すると、銀河中心距離に対して回転速度が一定で角速度が減少する差動回転を示している。

また、Tan (2000) によると、周転円角速度 κ は以下のように表される。

$$\kappa = \sqrt{2} \frac{V_{\text{rot}}}{R} \left(1 + \frac{R}{V_{\text{rot}}} \frac{dV_{\text{rot}}}{dR} \right)^{1/2} \quad (6)$$

銀河系外縁部では、どの R でも V_{rot} が一定のため、 dV_{rot}/dR の項がほとんど効かなくなる ($dV_{\text{rot}}/dR = 0$) ため、 $\kappa \propto R^{-1}$ となり、 R に対して常に κ は減少し続けることになる。よって、銀河系に分布する個々の天体は、周転円角速度が常に減少し続ける差動回転によって銀河系内を運動していることになる。また、個々の天体の動径方向の速度分散は $\langle v^2 \rangle = \kappa^2 \langle \Delta R^2 \rangle$ と表され (Sofue et al. 2007)、ここで ΔR は銀河中心距離と周転円が描く軌道半径との差である。この差が銀河中心距離に対して非常に小さい ($R \gg \Delta R$) 場合、速度分散は $\langle v^2 \rangle \propto \kappa^2 \propto R^{-2}$ となり、銀河系外縁部では銀河中心距離に従い、速度分散が減少する傾向にある。つまり、銀河系外縁部の天体は速度分散が小さいため、銀河系中心部に比べ、比較的遅い相対速度の分子雲衝突が起こっていると考えられる。

ただし、先程述べた回転曲線は、現時点までの観測結果に基づいたもので、銀河系中心や外縁部など、統一的な見解が得られていない領域もある。銀河系内縁部では視線速度の極大値である終端速度が存在するため、視線速度から推定される距離を決定することができる。その一方で、銀河系外縁部では終端速度が存在しないため、個々の天体の距離と速度を測定して決定する必要がある。そこで、年周視差測定と呼ばれる方法を用いて銀河系外縁部天体の距離と回転速度を求め、外縁部の回転曲線を決定する ORC (**O**uter **R**otation **C**urve) プロジェクト (1.7 節で説明) が位置天文学の研究で現在進められている。今後、銀河系外縁部における任意の銀河中心距離において、回転速度が太陽の回転速度と誤差の範囲内で一致する結果が得られていった場合、銀河系外縁部での回転曲線がフラットであるという仮定を実証することができる。

1.4 銀河系外縁部研究の意義

銀河系外縁部については、前章で述べたように、ORC プロジェクトをはじめとした位置天文学の研究が主に進められており、回転曲線の調査のためのサンプルとして銀河系外縁部天体が観測されているが、個々の天体の詳細については分かっていないことが多い。IRAS 01123+6430 にしても、WB886 にしても、CO 輝線観測といった先行研究は行われているものの、あくまでサンプルの一つとしてのみ扱われており、星形成の詳細はどうなっているのか等の個々の詳細な研究については行われていない。

また、内縁部では、天体の視線速度の極大値である終端速度が存在するため、運動学的距離を決めることができる (Sofue et al. 2007)。しかし、外縁部では終端速度が存在せず、運動学的距離の不定性が大きいいため、年周視差測定と呼ばれる方法を用いて高精度な距離を決定している (年周視差測定については 1.6 節にて説明)。これまでの分子雲衝突の研究では、内縁部におけるケースが多かったため、運動学的距離からサイズ・質量といった物理量を求めることができたが、外縁部では年周視差測定による距離から物理量を求める方が有効である。

これまで、Fukui et al. (2014) や Torii et al. (2015) といった、大質量星形成の研究が行われており、分子雲衝突によるものであると示唆されているが、それらの研究はいずれも銀河系内縁部に焦点を当てたものである。内縁部については、距離の不定性が小さく、分子ガス比 (全ガス密度に対する分子ガス密度の比) が約 25–85 % (Nakanishi & Sofue 2016) と高いため、星形成研究のためのあらゆる有効手段がそろっており、研究例も多い。しかし、外縁部については、距離の不定性が大きく、分子ガス比が約 10 % (Nakanishi & Sofue 2016) と低いため、星形成の研究は内縁部ほど多くない。また、シュミット則 (Kennicutt 1998) より、ガス密度の低い領域では星形成率も低いため、銀河系外縁部における大質量星形成については未解明な部分が多い。

銀河系の回転曲線は、ほぼフラットとなってる (Reid et al. 2014) ため、差動回転は、銀河系内縁部は大きく、銀河系外縁部は小さい。この点に着目して分子雲衝突について考えてみると、Fukui et al. (2014) や Torii et al. (2015) における分子雲の速度成分の解析では、 $10 \sim 20 \text{ km s}^{-1}$ の速度差から、内縁部では高速の衝突が起こっていると考えられる。それに対して、銀河系外縁部では差動回転が小さいため、差動回転の大きい内縁部に対して低速の衝突が起こっているのではないかと考えられる。

以上から、分子雲クランプの数密度 n と速度 v に着目し、分子雲の衝突頻度 $n\sigma v$ を考えると、クランプの断面積が内縁部と外縁部とでほぼ等しいと仮定すれば、外縁部の方が内縁部よりも分子雲衝突の頻度が低くなると考えられる。そのため、これまでの分子雲衝突による大質量星形成の研究は銀河系内縁部に偏っていた (Fukui et al. 2014, 2016; Torii et al. 2011, 2015, 2018)。しかし銀河系外縁部でも、本研究で扱う IRAS 01123+6430 や WB886 をはじめとした大質量星形成領域が発見され、Enokiya et al. (2019) をはじめとした銀河系外縁部における分子雲衝突の観測的研究も行われており、分子雲衝突の頻度は低いとしても、外縁部では遅い衝突の割合が多いため、Takahira et al. (2014) で示されたように大質量星形成には有利な環境である。

このように、銀河系内縁部と比べて、銀河系外縁部では性質が大きく異なっており、星形成の要因や過程も異なっていると考えられるため、銀河系外縁部における星形成の研究は、銀河系の進化と物理を理解する上で重要な意義を持つ。

1.5 本研究の目的

銀河系外縁部は、銀河系内縁部と比べて、ガス密度が低く、差動回転が小さい領域である。また、Reid et al. (2014) より、銀河系外縁部での回転曲線はフラットであるとされているが、まだサンプル数が少

ないため、より多くの銀河系外縁部天体の観測を行い、距離と回転速度を求めて、最終的な回転曲線の導出につなげていく必要がある。また、個々の銀河系外縁部天体の星形成の要因についても分かっていないため、個別の天体について調査を行っていく必要がある。

そこで、銀河系外縁部天体の距離と回転速度を調べて、銀河系上における運動の様子を明らかにし、個々の銀河系外縁部天体 IRAS 01123+6430 と WB886 についての星形成の要因を明らかにする。銀河系内での運動の様子については、VLBI 位置天文観測を通じて、銀河系外縁部天体の距離と回転速度を求め、フラットな回転曲線上に乗っているかどうかを調べる。VLBI 位置天文観測については、大質量星形成領域から放射される H_2O メーザーの観測を行い、年周視差と固有運動を調べる必要がある。また、星形成の調査については、分子雲が星形成の源となっているため、CO 輝線サーベイデータの調査から、銀河系外縁部天体に付随する分子雲の検出を行う。さらに、VLBI 観測による年周視差測定から得られた距離を用いて分子雲のスケールを求めることで、星形成のタイムスケールを算出し、推測される星形成のシナリオについても考えていきたい。また、使用する CO 輝線サーベイデータには、IRAS 01123+6430 と WB886 以外の H_2O メーザー源も多く含まれるため、その他の H_2O メーザー源についても分子雲が付随しているかどうかの検証を行っていく。

この論文における最終目的として、銀河系外縁部の H_2O メーザー源に付随する分子雲について調査し、大質量星形成の主な要因として考えられる分子雲衝突の痕跡が見られるかどうかの検証を行い、銀河系外縁部における大質量星形成領域と分子雲衝突の関連性を観測的に示したい。

1.6 VERA

銀河系外縁部大質量星形成領域 IRAS 01123+6430 と WB886 の観測にあたって用いた観測装置は、VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) である。これは、VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 超長基線電波干渉法) と呼ばれる手法を用いた電波干渉計およびその観測プロジェクトで、この干渉計は、水沢局 (岩手県奥州市水沢区)、小笠原局 (東京都小笠原島)、入来局 (鹿児島県薩摩川内市入来町)、石垣島局 (沖縄県石垣島) の各 4 ヶ所に配置されている口径 20m のパラボラアンテナ 4 台で構成されている。各アンテナ間の基線長はそれぞれ、入来局-石垣島局で 1000km、入来局-小笠原局で 1200km、入来局-水沢局および水沢局-小笠原局で 1300km、石垣島局-小笠原局で 1800km、そして石垣島局-水沢局で最大の 2300km となっており、この 4 局が連携することで口径 2300km の望遠鏡に相当する精度を実現することが可能となる。望遠鏡における精度は分解能 θ と呼ばれ、基線長 D が大きいほど、輝線波長 λ が短いほど小さくなり ($\theta = \lambda/D$)、VERA の最大基線長 2300 km、 H_2O メーザーの波長 13 mm を用いて計算すると、

$$\theta = \frac{13 \text{ mm}}{2300 \text{ km}} \simeq 1.2 \text{ mas} \quad (7)$$

となる。この分解能を $S/N \sim 14.2$ (IRAS01123+6430 の r13227c データにおける CH269 の dirty map より) で割ると、位置精度は $\sim 84.5 \mu\text{as}$ となり、この数十 μas の位置精度の値は月に置かれている 1 円玉を識別できる程の高精度な値である。

VLBI による高分解能の観測を通じて、天体の距離と速度が得られるが、これらの物理量は、「年周視差測定」と呼ばれる計測方法から得ることができる。「年周視差測定法」とは、土木関係で用いられる三角測量を拡張・応用したもので、地球が太陽の周囲を公転する際に伴い、観測天体に生じる視差角を計測する方法である。しかし、観測天体は銀河回転に伴って移動し、天体ごとに固有運動と呼ばれる速度成分を持つため、地球の公転による視差運動の成分が加わった、螺旋運動の軌跡として観測されるため、固有運動の成分を差引くことで視差角を計測することができる。そして、この視差角の逆数をとることにより、天体までの距離を計測することができる。

VERA の本計画としては、銀河系内に分布する全ての天体の位置・運動を導出し、銀河系の 3次元地図を完成させることである。これにより、銀河系の構造や、恒星・ガス分布を知ることができ、現在、VERA の各局における観測が行われ、計画が進行中である。また、VERA 計画と同じく、天体の位置・運動を求める計画で、銀河系外縁部に着目した ORC プロジェクトについて、次のセクションで説明する。

1.7 ORC

ORC (**O**uter **R**otation **C**urve) プロジェクトは、VERA を用いた観測計画の一つで、VERA による年周視差測定から複数の銀河系外縁部天体 (ORC 天体) の距離と回転速度を計測し、銀河系外縁部の回転曲線の導出を目的としている。回転曲線とは、横軸を銀河中心距離、縦軸を銀河回転速度にとった図のことで、これまで、Honma et al. (2012) が VERA を用いて、Reid et al. (2014) が VLBA を用いて銀河系の天体の VLBI 観測を行い、プロット点から推測される回転曲線が導出されている。Honma et al. (2012) の回転曲線では、やや右上がりに近いフラットな曲線、Reid et al. (2014) の回転曲線ではやや右下がりに近いフラットな曲線となっており、いずれにしても、差動回転が小さいという結果となっている。しかし、現段階では、まだサンプル数が十分ではなく、より精度よく回転曲線を決定するためには、継続して銀河系外縁部天体の観測を行い、サンプル数を増やす必要がある。

このプロジェクトのもう一つの目的として、銀河系の質量分布の算出がある。ここで、銀河系の質量分布の理論モデルについて考える (Sofue et al. 2007)。質量 m の太陽系が球対称な質量分布の銀河系 (半径 r 以内の質量を M_r とする) 内を速度 v で円運動していると仮定すると、万有引力が向心力となり、銀河系の質量は

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{M_r m}{r^2} \rightarrow M_r = \frac{rv^2}{G} \quad (8)$$

と表される。この式について、 $r = 3.1 \times 10^{19} (R/\text{kpc}) [\text{m}]$ 、 $v = 1.0 \times 10^3 (V_{\text{rot}}/[\text{km s}^{-1}]) [\text{m s}^{-1}]$ 、万有引力定数 $G = 6.67 \times 10^{-11} [\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}]$ を使って換算すると、

$$M_r \sim 2.3 \times 10^5 \left(\frac{R}{\text{kpc}}\right) \left(\frac{V_{\text{rot}}}{\text{km s}^{-1}}\right)^2 M_{\odot} \quad (9)$$

となる。ここで、ORC プロジェクトの一環で VERA による年周視差測定から、銀河中心からの距離 R と回転速度 V_{rot} が分かるので、この2つの値を代入することで銀河系の質量を求めることができる。そして、この値と銀河系内の R までの範囲内に分布する星・ガスの総質量との差分からダークマターの存在を追求することができる。この謎の追求のためにも、より多くの銀河系外縁部天体の距離と速度を決定し、より正確な回転曲線の導出を目指すというのが、ORC プロジェクトの最終目的である。

ただし、本論文では、そのような大局的構造には着目せず、ORC プロジェクトの一環として、個々の銀河系外縁部天体について焦点を当て、銀河系外縁部での星形成の要因と過程について述べることにする。まずは、ORC プロジェクトの一環で、IRAS 01123+6430 についての VLBI 観測の内容について次のセクションで述べる。

2 IRAS 01123+6430 の年周視差計測

ここでは、銀河系外縁部天体 IRAS01123+6430 について、VERA による位置天文の観点から行った研究の結果について話を進めていく。

2.1 IRAS01123+6430

IRAS01123+6430 は、銀河系第 2 象限（銀河座標： $l = 125.51^\circ$, $b = +2.03^\circ$ ）に位置する、 H_2O メーザーを放射する銀河系外縁部大質量星形成領域で (Comoretto et al. 1990; Palagi et al. 1993)、赤外天文衛星 IRAS (**I**nfra**R**ed **A**stronomical **S**atellite) により赤道座標 (α, δ) = ($1^{\text{h}}15^{\text{m}}40.8^{\text{s}}$, $+64^\circ46'40.8''$) (J2000) の位置に観測されている (figure 4)。過去にはサンプル天体の一つとして、Effelsberg-100m 望遠鏡によって視線速度 $V_{\text{LSR}} = -50.7 \text{ km s}^{-1}$ に、KOSMA-3m ミリ波望遠鏡による ^{12}CO 輝線観測で視線速度 $V_{\text{LSR}} = -54.7 \text{ km s}^{-1}$ に観測されており (Wouterloot et al. 1993)、運動学的距離が 5.4 kpc と求められている。また、Onsala 20m 電波望遠鏡によって $\text{CS}(J = 2 - 1)$ 輝線が観測され、運動学的距離 4.8 kpc、線幅 2.51 km s^{-1} 、ビリアル質量 $1105 M_\odot$ の分子コアであると検出された (Zinchenko et al. 1998)。

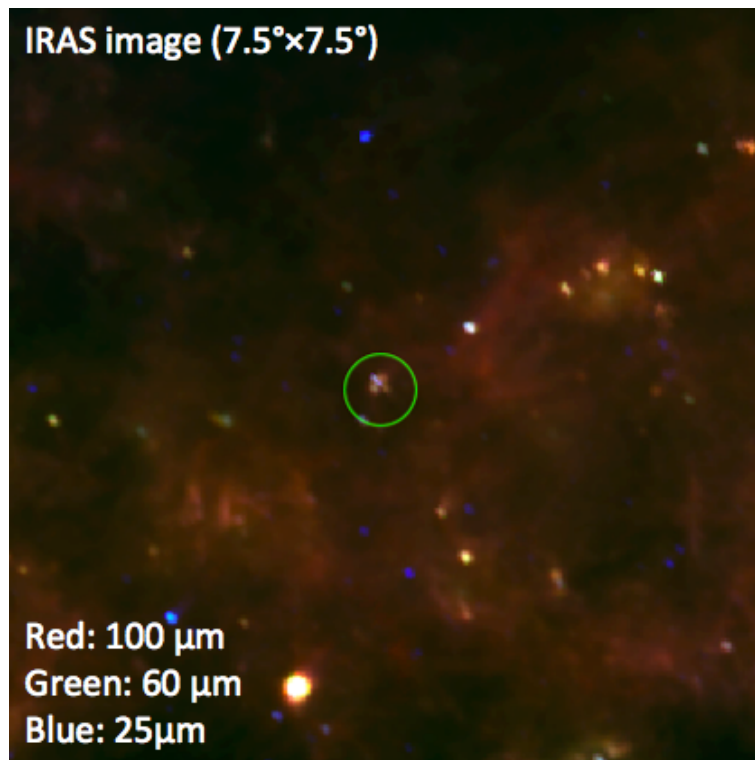


Figure 4: IRAS 01123+6430 の三色合成図。SkyView (<https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/cgi/titlepage.pl>) よりダウンロードした IRAS による $100\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ の赤外線 FITS データを ds9 により三色合成したものの。

2.2 観測

第2章で扱う、IRAS 01123+6430の観測内容について述べる。IRAS01123+6430の観測データは、2012年1月20日–2014年11月10日の期間、VERAによるVLBI観測がされたものを使用した (table 1)。この観測では、 $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ 遷移の H_2O メーザー (周波数: 22.23 GHz)を受信し、VERAアンテナに搭載されている2-beam受信機を用いて、目的天体であるIRAS 01123+6430をA-beamで、目的天体から離角 2.18° 離れた参照電波源はJ0128+63 (figure 5)をB-beamで同時観測している。参照電波源はキューサー等の明るい天体を指しており、これを同時観測することにより、目的天体を観測する際に生じる大気のゆらぎを除去することができる。また、80分ごとに観測されたclock calibratorのDA55 (r12087a, r12234b, r13025a, r13227c, r14082a, r14144b)、3C84 (r12135c, r13069a, r14245b, r14314a)、3C454.3 (r13292b, r14082a)、OJ287 (r13292b) (table 2)がバンドパス補正に使用された。

しかし、まだこの現時点での状態の観測データでは解析に使用することができないため、幾つかの処理が施される必要がある。観測データは、観測終了時に磁気テープに記録されるようになっており、2014年9月以前のデータはDIR2000のレコーダーにより、1024Mbpsのビットレートで記録され、それ以降に観測されたデータは、OCTADISK (Oyama et al. 2012)によって1024Gbpsのビットレートで記録された。そして、磁気テープに記録されたデータは、最終的に国立天文台 (岩手県奥州市水沢区)にある相関器によって相関処理され、天文台のサーバー上にFITSファイルとしてアップロードされるようになっている。このFITSファイルが、本研究において解析に使用した観測データである。

結果、合計13epochのデータが得られたが、内、r12020aのepochのデータについては解析に使用せず、r13355aについては観測データが削除され現存していなかったため、厳密には、11epochの観測データのみしか使用できなかった。r12020aについては、この観測データのみ、観測座標が $(\alpha, \delta) = (1^{\text{h}}15^{\text{m}}43.3^{\text{s}}, +64^\circ46'38.1'')$ (J2000)となっており、座標が不一致であったため、解析から外すこととした。また、r13355aについては、観測当時、水沢局と石垣局にてエラーが発生したため観測データが記録されず、相関データが取れるものが小笠原局と入来局のみであったため、データは削除されたため使用することができなかった。

以上より、解析に使用することになった観測データは11epoch (table 3)で、それらの解析の手順については次のセクションで説明する。

Table 1: IRAS01123+6430 の観測プロフィール

観測期間	2012.1.20–2014.11.10
epoch 数	11/13
受信波 (観測周波数)	H ₂ O メーザー (22.23 GHz, K-band)
赤道座標 (RA, Dec)	(1 ^h 15 ^m 40.8 ^s , +64°46′40.8″)
銀河座標 (l, b)	(125.51°, +2.03°)
参照電波源	J0128+63
参照電波源座標 (RA, Dec)	(1 ^h 28 ^m 30.6 ^s , +63°6′29.9″)
参照電波源との離角	2.18°

Table 2: IRAS01123+6430 の各 epoch の clock calibrator

Source	Date	(R.A., Decl.)	Timerange
DA55	2012/03/27	(1 ^h 36 ^m 58.6 ^s , +47°51′29.1″)	0/00:35:00 – 0/00:43:01
			0/01:55:01 – 0/02:03:01
			0/03:15:01 – 0/03:23:01
			0/04:35:01 – 0/04:43:01
			0/05:55:01 – 0/06:03:01
			0/07:15:01 – 0/07:23:01
3C84	2012/05/14	(3 ^h 19 ^m 48.2 ^s , +41°30′42.1″)	0/21:20:01 – 0/21:28:00
			0/22:40:01 – 0/22:48:01
			1/00:00:01 – 1/00:08:00
			1/01:20:01 – 1/01:28:01
			1/02:40:01 – 1/02:48:01
			1/04:00:01 – 1/04:08:01
3C454.3	2013/10/19	(22 ^h 53 ^m 57.7 ^s , +16°08′53.6″)	0/11:40:00 – 0/11:45:03
			0/13:00:01 – 0/13:05:03
			0/14:20:01 – 0/14:25:03
			0/15:37:04 – 0/15:37:04
			0/15:40:01 – 0/15:45:03
OJ287	2013/10/19	(8 ^h 54 ^m 48.9 ^s , +20°06′30.6″)	0/17:00:01 – 0/17:05:03
			0/18:20:01 – 0/18:25:03

Table 3: IRAS 01123+6430 の全 epoch 観測のまとめ。DOY (Day-Of-Year) は 2012 年以降の日数、 T_{sys} は VERA のデータベース DIVA (Data Interface for VERA Association) (<http://diva.miz.nao.ac.jp/veradb/>) 上の雑音温度の値、合成ビームのサイズと PA (Position Angle)、 N_{spot} は 1epoch におけるメーザースポット数を示す。

Epoch*	Date	DOY [days]	T_{sys} [K]				Synthesized beam [mas × mas]	PA [deg]	N_{spot}
			MIZ	IRK	OGA	ISG			
r14314a	2014 NOV 10	1044	149.9	234.5	899.6	275.7	1.26×0.73	-54	10
r14245b	2014 SEP 02	975	233.6	1709.2	748.2	863.1	1.17×0.77	-48	5
r14144b	2014 MAY 24	874	224.8	215.7	195.6	433.8	1.19×0.79	-48	11
r14082a	2014 MAR 23	812	129.2	149.3	179.8	231.8	1.19×0.78	-50	13
r13292b	2013 OCT 19	657	214.1	287.5	426.1	343.3	1.15×0.75	-47	12
r13227c	2013 AUG 15	592	291.3	598.4	546.3	1851.1	1.27×0.75	-59	14
r13069a	2013 MAR 10	434	119.1	216.6	176.5	231.6	1.19×0.78	-55	13
r13025a	2013 JAN 25	390	190.2	134.8	303.5	286.9	1.22×0.79	-50	14
r12234b	2012 AUG 21	234	462.9	428.1	544.9	1009.9	1.18×0.79	-40	22
r12135c	2012 MAY 14	135	954.7	811.6	325.1	511.3	1.18×0.77	-32	22
r12087a	2012 MAR 27	87	336.7	141.7	173.1	185	1.17×0.79	-37	25

* Epoch については、2000 年代の下 2 桁と 1 月初めからの日数で表した名義”r yy(2000 年代下 2 桁) ddd(1 月初めからの合計日数)”で記されている。

2.3 解析

IRAS 01123+6430 の VLBI 位置天文観測データの解析には、”AIPS (Astronomical Image Processing System)”と呼ばれる解析ツールを用いた。この解析ツールは、タスクと呼ばれる複数のモジュールがあり、対話型のコマンド操作を通じて、そのモジュールの中で解析するファイルの選択や、パラメータを変更して解析を実行していくという流れになっており、近年、天文学の研究において幅広く使用されている。AIPS では、例えば、天体の画像化を行ったり、画像を表示するウィンドウ内で調べたい領域のデータの抽出等を行うことが可能である。

今回、AIPS を用いて、以下の手順で観測データの解析を行った。1) 国立天文台のサーバよりダウンロードした、A-beam と B-beam の FITS データをタスク “FITLD” により読み込みを行う。2) 読み込みを終えた後、タスク “ACCOR” を用いて、各局のアンテナで取得したデータの自己相関を行い、ビジビリティの正規化を行う。この作業は、後に行う相互相関の補正に用いられる。3) タスク “APCAL” を用いて、SEFD (System Equivalent Flux Density) をビジビリティに適用する。この作業は、信号と雑音の比である S/N 比を算出し、信号の検出可否を行うためである。4) 次に、タスク “TBIN” を用いて、遅延追尾再計算データ (TXT ファイル) を読み込む。この TXT ファイルには、各局アンテナの局位置が示されており、年月日ごとにズレが生じるため、天文台のサーバ上で UVW 再計算を行

い、局位置の補正を行った上で取得し、読み込みを行わなければならない。読み込みを終えた後、タスク“SNEDT”を用いて、delay と rate の外れ値 (delay では 10 ns 以上、rate では 10 mHz 以上のデータ) のフラグを行う。5) 次に、周波数による感度のムラを補正 (バンドパス補正) するため、clock calibrator を用いて、タスク“BPASS”を実行する。6) 次に、タスク“FRING”を用いて、B-beam データにある参照電波源のフリッジサーチを行う。そして、結果を A-beam データに適用する。7) フリッジサーチが終わったら、参照電波源について自己較正を行う。自己較正が終了すると、10 個の参照電波源のデータが出力され、その中で最も S/N 比が高いデータ (figure 5) を A-beam データに適用することで、目的天体のデータの位相補償を行う。8) 次に、2-beam 位相較正データ (TBIN ファイル) を読み込み、A-beam データに適用する。

ここまで、B-beam (参照電波源) データを A-beam (目的天体) データに適用することで、目的天体の較正を行ってきた。続いて、目的天体のデータからメーザースポットの調査を行う。その前にまず、9) タスク“SETJY”を用いて、目的天体の LSR (Local Standard of Rest: 局所静止基準) を 256ch に設定し、タスク“CVEL”を用いて地球回転によるドップラーシフトを補正する (IRAS 01123+6430 の $V_{\text{LSR}} = -55.0 \text{ km s}^{-1}$ を 256ch に設定)。10) シフトの補正を行った後は、タスク“POSSM”によりクロスパワースペクトル (figure 6) を表示し、ピークのチャンネル値を指定する。11) この値をもとにタスク“FRING”でフリッジサーチを行い、フリッジレートと (u, v) を算出する。フリッジレートについては、メーザースポットの offset ($\Delta\alpha, \Delta\delta$) を用いて、 $(du/dt)\Delta\alpha + (dv/dt)\Delta\delta$ のように、 $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ の 2次元マップで表すことができ、フリッジレートと (u, v) が分かっていると、式変形で $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ の一次関数として直線を引くことができる (平成 22 年 3 月 東村卒業論文)。そして、フリッジレートと (u, v) のデータ数が多い程、異なる傾き・切片を持つ直線を引くことができ、この直線の交点がメーザースポットの位置として表される (figure 7)。そして、この交点の位置、つまり、トラッキングセンターからの offset 値をもとに、タスク“IMAGR”により、A-beam データのイメージングを行い、メーザースポットの調査を行う。

以上の作業から、メーザースポットが得られるが、スポットの位置を記録する前に、CLEAN と呼ばれる処理を施す場合もある。これは、検出されたメーザースポットのマップに合成ビームを畳み込み、ビジビリティの残差を計算することでスポットの周囲に広がるサイドローブを抑え検出精度を上げる処理方法だが、スポットの形状と位置は変わらないため、処理を施さないこともある。CLEAN を施したメーザーのマップ (figure 8) が得られた後は、最終的に、タスク“JMFIT”を用いて、スポットの座標・速度・強度・rms 等を算出し、スポットリスト (table 4) にまとめてから年周視差測定を行うこととなっている。スポットリストから年周視差測定を行う際、連続した速度値と、似たような天球面での運動の振る舞いから、スポットの分類を行い、この 1 グループを“feature”と呼んでいる。このように feature ごとに分類し、スポットが検出された星形成領域の中での運動を示す「内部運動」(2.5.2 節を参照) を導出する。得られたメーザースポットの分布図については、figure 9 に掲載している。

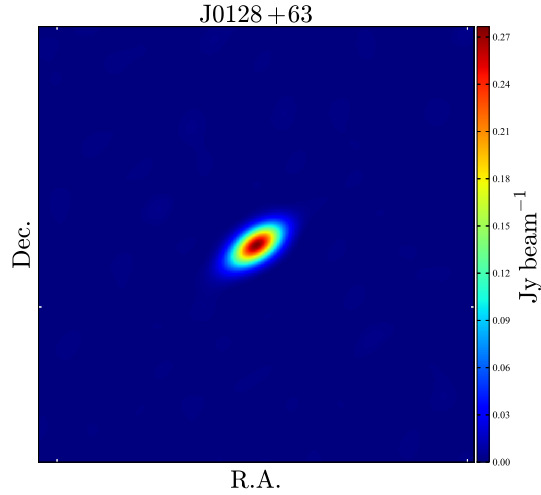


Figure 5: IRAS01123+6430 の参照電波源 J0128+63 で、最も S/N 比が高いイメージデータ。画像のサイズは $7.2\text{mas} \times 7.2\text{mas}$ 、S/N 比は 31.2 (Peak = $2.77 \times 10^{-1} \text{Jy beam}^{-1}$, r.m.s = $8.88 \times 10^{-3} \text{Jy beam}^{-1}$)。画像は python の aplpy で作成。

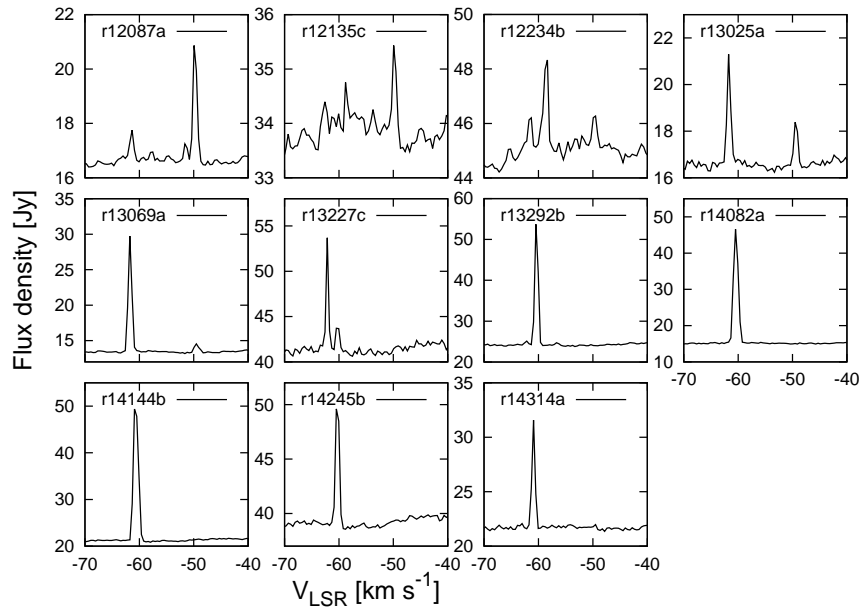


Figure 6: ドップラーシフト補正を行ったあとの IRAS01123+6430 の全 epoch のクロスパワースペクトル (水沢-入来局の相関)。r14314a では、270ch (-60.9km s^{-1}) にピークが検出されたので、fringe rate map 作成には 270ch を採用した。

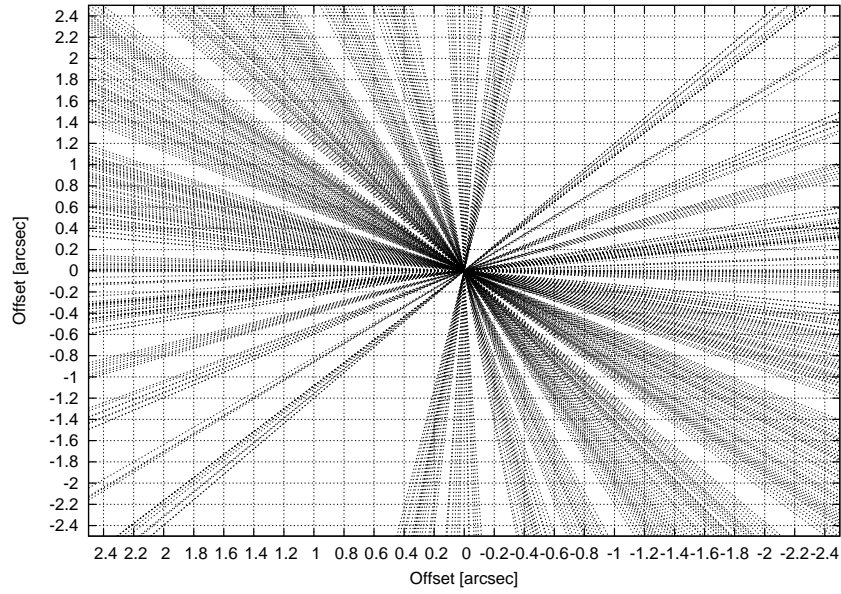


Figure 7: Fringe rate map (epoch: r14314a、チャンネル：270ch、LSR 速度： -60.9 km s^{-1})。この場合は、トラッキングセンターからの offset 値が (0, 0) なので、IMAGR タスクでイメージングを行う際に、RA shift と Dec shift にそれぞれ 0 を入力する。

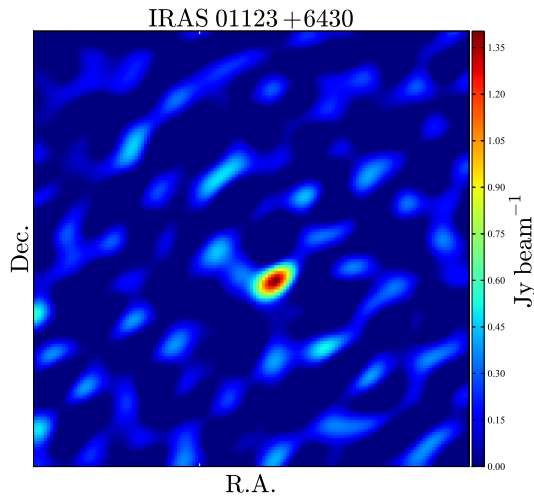


Figure 8: CLEAN を行った後の IRAS 01123+6430 のメーザースポットの図 (epoch: r14314a、画像のサイズ $7.2 \text{ mas} \times 7.2 \text{ mas}$)。

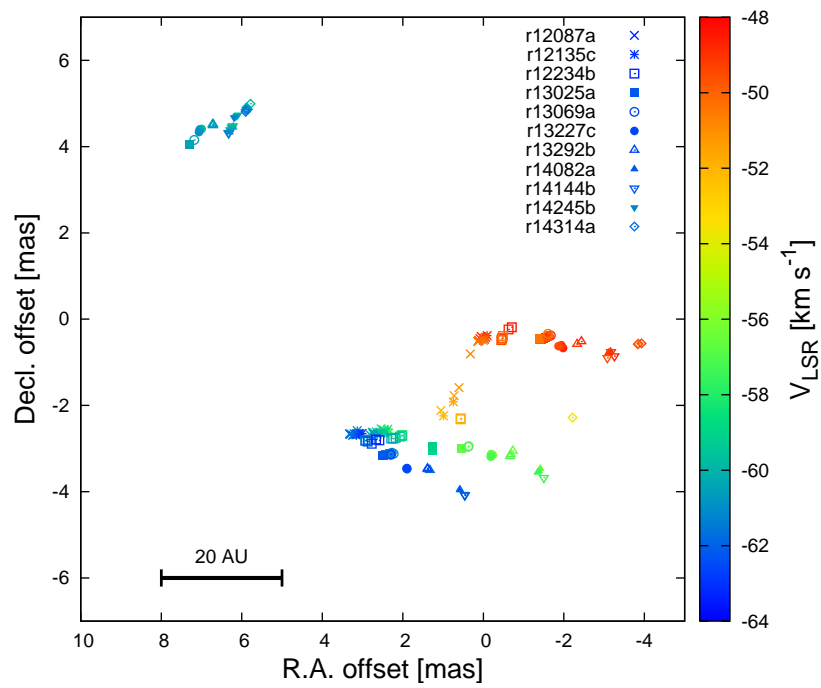


Figure 9: IRAS01123+6430 の全 epoch データの解析で検出されたメーザースポットの分布図。カラーバーは LSR 速度値を示し、20AU スケールを横棒で示す ($1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$)。

Table 4: IRAS 01123+6430 の H₂O メーザー スポット リスト

DOY	ID	Feat	Intensity	Offset		CH	V _{LSR}
				R.A.	Decl.		
			Jy beam ⁻¹	mas	mas	km s ⁻¹	
87	1	1	1.550	0.054	-0.401	241	-48.7
87	2	1	4.085	0.085	-0.449	242	-49.1
87	3	1	8.010	0.121	-0.498	243	-49.5
87	4	2	9.049	0.115	-0.492	244	-49.9
87	5	2	3.577	0.141	-0.520	245	-50.4
87	6		0.862	0.322	-0.805	246	-50.8
87	7		2.269	0.605	-1.588	247	-51.2
87	8		2.717	0.723	-1.774	248	-51.6
87	9		0.874	1.053	-2.117	249	-52.1
87	10		0.981	2.474	-2.583	261	-57.1
87	11		2.062	2.474	-2.567	262	-57.5
87	12		1.881	2.498	-2.582	263	-58.0
87	13		0.949	2.538	-2.544	264	-58.4
87	14		0.988	2.660	-2.611	265	-58.8
87	15		1.244	2.761	-2.624	266	-59.2
87	16		1.505	2.748	-2.623	267	-59.6
87	17		1.496	2.740	-2.659	268	-60.1
87	18		1.134	2.802	-2.688	269	-60.5
87	19	3	2.376	3.294	-2.657	270	-60.9
87	20	3	4.414	3.326	-2.656	271	-61.3
87	21	4	3.455	3.311	-2.672	272	-61.7
87	22	4	2.141	3.248	-2.693	273	-62.2
87	23		1.661	3.196	-2.668	274	-62.6
87	24		1.462	3.149	-2.663	275	-63.0
87	25		0.678	3.103	-2.655	276	-63.4
135	26	1	0.836	-0.093	-0.380	241	-48.7
135	27	1	2.783	-0.059	-0.419	242	-49.1
135	28	1	5.791	-0.020	-0.443	243	-49.5
135	29	2	6.929	-0.031	-0.468	244	-49.9
135	30	2	2.907	0.001	-0.490	245	-50.4
135	31		1.260	0.744	-1.916	248	-51.6
135	32		0.989	0.989	-2.243	249	-52.1
135	33		0.882	2.351	-2.639	261	-57.1
135	34		1.895	2.402	-2.609	262	-57.5
135	35		1.903	2.374	-2.551	263	-58.0
135	36		3.247	2.464	-2.637	264	-58.4
135	37		4.957	2.462	-2.603	265	-58.8
135	38		3.221	2.462	-2.626	266	-59.2
135	39		2.301	2.552	-2.637	267	-59.6
135	40		2.311	2.637	-2.669	268	-60.1

Table 4: Table 4 の続き

DOY	ID	Feat	Intensity	Offset		CH	V_{LSR}
				R.A.	Decl.		
			Jy beam^{-1}	mas	mas	km s^{-1}	
135	41		1.949	2.717	-2.638	269	-60.5
135	42	3	2.407	3.132	-2.585	270	-60.9
135	43	3	3.459	3.209	-2.653	271	-61.3
135	44	4	2.362	3.167	-2.681	272	-61.7
135	45	4	2.381	3.141	-2.668	273	-62.2
135	46		2.696	3.066	-2.653	274	-62.6
135	47		1.899	3.011	-2.650	275	-63.0
234	48		1.580	-0.706	-0.188	240	-48.3
234	49	1	2.163	-0.626	-0.239	241	-48.7
234	50	1	4.052	-0.462	-0.450	242	-49.1
234	51	1	6.033	-0.447	-0.485	243	-49.5
234	52	2	4.673	-0.468	-0.434	244	-49.9
234	53	2	1.397	-0.485	-0.390	245	-50.4
234	54		1.480	0.563	-2.299	248	-51.6
234	55		1.301	0.564	-2.321	249	-52.0
234	56		3.852	2.029	-2.692	263	-57.9
234	57		11.522	2.013	-2.697	264	-58.4
234	58		10.704	2.020	-2.700	265	-58.8
234	59		5.960	2.074	-2.724	266	-59.2
234	60		5.486	2.181	-2.753	267	-59.6
234	61		3.994	2.241	-2.772	268	-60.1
234	62		2.710	2.288	-2.766	269	-60.5
234	63	3	2.942	2.855	-2.794	270	-60.9
234	64	3	6.761	2.931	-2.810	271	-61.3
234	65	4	6.567	2.925	-2.822	272	-61.7
234	66	4	3.433	2.871	-2.838	273	-62.2
234	67		1.822	2.773	-2.889	274	-62.6
234	68		1.713	2.583	-2.809	275	-63.0
234	69		1.159	2.664	-2.789	276	-63.4
390	70	1	2.439	-1.546	-0.415	241	-48.7
390	71	1	5.461	-1.491	-0.441	242	-49.1
390	72	1	6.239	-1.445	-0.468	243	-49.5
390	73	2	3.633	-1.394	-0.478	244	-49.9
390	74	2	1.088	-1.404	-0.449	245	-50.4
390	75	5	0.886	0.556	-2.990	260	-56.7
390	76		1.289	1.272	-2.990	264	-58.4
390	77		1.528	1.271	-3.054	265	-58.8
390	78		0.995	1.262	-2.961	266	-59.2
390	79	6	0.935	7.312	4.045	269	-60.5
390	80	3	2.756	2.331	-3.121	270	-60.9

Table 4: Table 4 の続き

DOY	ID	Feat	Intensity	Offset		CH	V_{LSR}
				R.A.	Decl.		
			Jy beam^{-1}	mas	mas	km s^{-1}	
390	81	3	6.628	2.428	-3.141	271	-61.3
390	82	4	9.799	2.474	-3.158	272	-61.7
390	83	4	5.949	2.494	-3.167	273	-62.2
434	84	1	2.698	-1.678	-0.379	241	-48.7
434	85	1	3.835	-1.629	-0.397	242	-49.1
434	86	1	5.228	-1.599	-0.403	243	-49.5
434	87	2	4.401	-1.586	-0.390	244	-49.9
434	88	2	1.453	-1.605	-0.340	245	-50.4
434	89	5	1.487	0.361	-2.943	260	-56.7
434	90	5	1.349	0.380	-2.960	261	-57.1
434	91	6	2.194	7.183	4.153	269	-60.5
434	92	3	3.649	2.228	-3.119	270	-60.9
434	93	3	16.154	2.274	-3.096	271	-61.3
434	94	4	24.991	2.298	-3.121	272	-61.7
434	95	4	14.049	2.311	-3.136	273	-62.2
434	96		1.883	2.295	-3.140	274	-62.6
592	97	1	1.381	-1.982	-0.671	241	-48.7
592	98	1	1.714	-1.939	-0.604	242	-49.1
592	99	1	1.569	-1.866	-0.625	243	-49.5
592	100		4.516	-0.235	-3.149	259	-56.3
592	101	5	4.443	-0.190	-3.129	260	-56.7
592	102	5	2.558	-0.180	-3.189	261	-57.1
592	103	6	3.306	6.994	4.411	267	-59.6
592	104	6	11.142	7.042	4.402	268	-60.0
592	105	6	11.630	7.045	4.385	269	-60.5
592	106	6	3.146	7.063	4.339	270	-60.9
592	107	3	3.455	1.890	-3.466	271	-61.3
592	108	4	12.200	1.895	-3.481	272	-61.7
592	109	4	27.269	1.913	-3.462	273	-62.2
592	110		10.78	1.894	-3.451	274	-62.6
657	111	1	1.464	-2.436	-0.517	241	-48.7
657	112	1	1.278	-2.329	-0.582	242	-49.1
657	113		3.256	-0.733	-3.052	259	-56.3
657	114	5	4.008	-0.683	-3.137	260	-56.7
657	115	5	1.960	-0.662	-3.183	261	-57.1
657	116	6	4.105	6.713	4.514	267	-59.6
657	117	6	23.953	6.723	4.516	268	-60.1
657	118	6	32.060	6.717	4.517	269	-60.5
657	119	6	12.062	6.717	4.491	270	-60.9
657	120	4	2.050	1.327	-3.501	272	-61.7

Table 4: Table 4 の続き

DOY	ID	Feat	Intensity	Offset		CH	V_{LSR}
				R.A.	Decl.		
			Jy beam^{-1}	mas	mas	km s^{-1}	
657	121	4	5.135	1.384	-3.479	273	-62.2
657	122		3.055	1.386	-3.462	274	-62.6
812	123	1	1.648	-3.157	-0.749	241	-48.7
812	124	1	1.300	-3.104	-0.781	242	-49.1
812	125	5	0.741	-1.415	-3.468	260	-56.7
812	126	5	1.792	-1.380	-3.520	261	-57.1
812	127		0.8123	-1.347	-3.555	262	-57.5
812	128		1.712	6.215	4.447	266	-59.2
812	129	6	11.723	6.215	4.462	267	-59.6
812	130	6	25.803	6.242	4.446	268	-60.1
812	131	6	33.455	6.290	4.388	269	-60.5
812	132	6	22.786	6.311	4.353	270	-60.9
812	133		5.613	6.305	4.332	271	-61.3
812	134	4	2.209	0.584	-3.944	272	-61.7
812	135	4	1.358	0.580	-3.963	273	-62.2
874	136	1	1.245	-3.257	-0.857	241	-48.7
874	137	1	1.501	-3.171	-0.757	242	-49.1
874	138		1.188	-3.079	-0.896	243	-49.5
874	139		1.015	-1.503	-3.676	262	-57.5
874	140	6	5.747	6.225	4.478	267	-59.6
874	141	6	21.191	6.248	4.441	268	-60.1
874	142	6	32.106	6.283	4.383	269	-60.5
874	143	6	33.106	6.319	4.322	270	-60.9
874	144		1.537	6.331	4.314	271	-61.3
874	145	4	1.474	0.465	-4.070	272	-61.7
874	146	4	1.328	0.461	-4.085	273	-62.2
975	147	6	7.003	6.094	4.739	267	-59.6
975	148	6	23.630	6.108	4.732	268	-60.0
975	149	6	25.099	6.133	4.712	269	-60.5
975	150	6	8.576	6.175	4.681	270	-60.9
975	151		2.647	6.194	4.677	271	-61.3
1044	152		1.499	-3.928	-0.562	242	-49.1
1044	153		2.677	-3.850	-0.572	243	-49.5
1044	154		1.369	-3.832	-0.580	244	-49.9
1044	155		1.660	-2.216	-2.280	253	-53.7
1044	156	6	0.663	5.785	4.992	267	-59.6
1044	157	6	1.444	5.884	4.908	268	-60.1
1044	158	6	8.174	5.850	4.864	269	-60.5
1044	159	6	15.366	5.871	4.861	270	-60.9
1044	160		9.029	5.902	4.853	271	-61.3
1044	161		2.103	5.902	4.807	272	-61.7

Table 5: 各 feature のスポットのリスト

Feature	ID	α_0 [mas]	δ_0 [mas]	Intensity [Jy beam ⁻¹]	V_{LSR} [km s ⁻¹]	Detection (Epoch)
1	1a	0.35 ± 0.06	-0.17 ± 0.08	0.836–2.698	-48.7	123456789**
	1b	0.41 ± 0.05	-0.28 ± 0.08	1.278–5.461	-49.1	123456789**
	1c	0.48 ± 0.08	-0.33 ± 0.14	1.569–8.010	-49.5	123456*****
2	2a	0.54 ± 0.03	-0.44 ± 0.10	3.633–9.049	-49.9	12345*****
	2b	0.58 ± 0.03	-0.47 ± 0.09	1.088–3.577	-50.4	12345*****
3	3a	3.47 ± 0.08	-2.38 ± 0.11	2.376–3.649	-60.9	12345*****
	3b	3.58 ± 0.08	-2.35 ± 0.11	3.455–16.154	-61.3	123456*****
4	4a	4.42 ± 0.09	-2.29 ± 0.16	1.474–24.991	-61.7	***456789**
	4b	4.47 ± 0.09	-2.28 ± 0.14	1.328–27.269	-62.2	***456789**
5	5a	2.57 ± 0.05	-2.41 ± 0.18	0.741–4.443	-56.7	***45678***
	5b	2.51 ± 0.07	-2.31 ± 0.31	1.349–2.558	-57.1	****5678***
6	6a	8.20 ± 0.13	3.68 ± 0.17	0.662–11.723	-59.6	*****6789AB
	6b	8.18 ± 0.17	3.76 ± 0.13	1.444–25.803	-60.1	*****6789AB
	6c	8.20 ± 0.11	3.78 ± 0.14	11.630–33.455	-60.5	*****6789AB
	6d	8.18 ± 0.11	3.71 ± 0.18	3.146–33.106	-60.9	*****6789AB

IRAS 01123+6430 でのメーザースポットの同定の結果、feature 1 (-49.5 – -48.7 km s⁻¹), 2 (-50.4 – -49.9 km s⁻¹), 3 (-61.3 – -60.9 km s⁻¹), 4 (-62.2 – -61.7 km s⁻¹), 5 (-57.1 – -56.7 km s⁻¹), 6 (-60.9 – -59.6 km s⁻¹) の 6 つの feature が得られた。feature 1 は DOY 87–874、feature 2 は DOY 87–434、feature 3 は DOY 87–592、feature 4 は DOY 87–874、feature 5 は DOY 390–812、feature 6 は DOY 390–1044 で検出された。feature 3a と 6d は $V_{\text{LSR}} = -60.9$ km s⁻¹ の同じ視線速度の値を持っており、DOY 592 で、3a が消滅して 6d が以降現れ始めるという様子が見られた。より精度の良い年周視差フィッティングには全ての feature を使用する必要があるが、今回は feature 1, 4, 6 のみを combined フィッティング¹に使用し、feature 2, 3, 5 については、フィッティングに用いるスポットの epoch 数が 1 年分に達していなかったため、フィッティングから外す事とした。参照電波源 J0128+63 により位相補償した feature 1, 4, 6 のメーザースポットの図については figure 10 に掲載している。

年周視差フィッティングの結果については後々記述するが、feature 1 と feature 6 については 10 ~ 20% の小さい誤差で年周視差を求めることができたが、feature 4 では、6epoch 以上のプロット数を満足していたにもかかわらず、フィッティングを行った際に誤差が 80% と大きい値を示し、正確な年周視差を求めることができなかった。この原因について、CLEAN を行った後のメーザースポットについて調査を行った。

feature 4 については、解析当初は feature 3 とほぼ同位置で、視線速度も連続していたため、同じ feature であると考えられていた。まず、各 feature のスポットの deconvolution size について時系列毎の変化を見てみたところ、feature 6 が $2 \sim 6 \times 10^{-4}$ asec の間で安定していたのに対し、feature 1 と

¹複数の feature を同時にフィッティングし、年周視差を求めること。

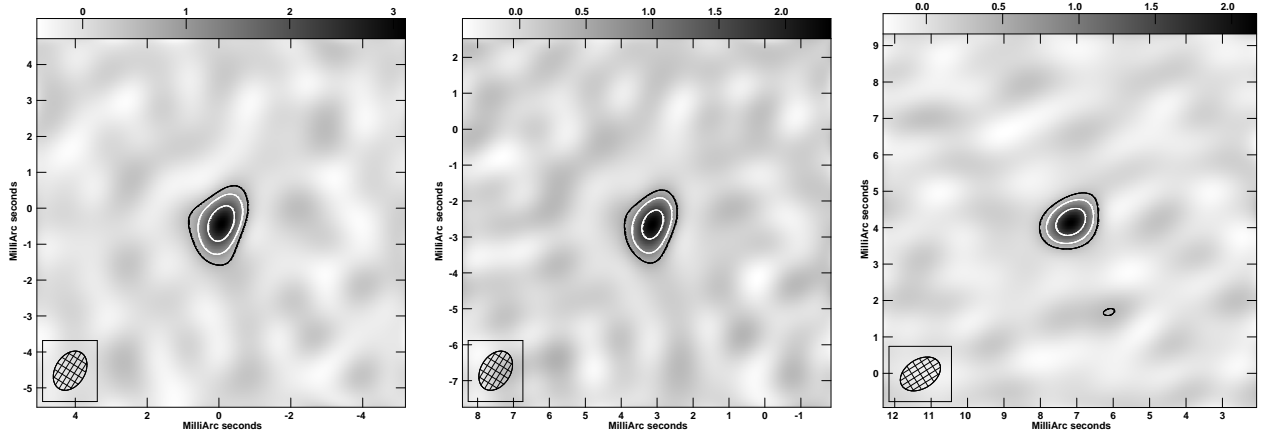


Figure 10: 位相補償を行った後の IRAS01123+6430 のメーザースポットの図（左から順に feature1, 4, 6）。 1σ のノイズレベルについては、左から順に 0.17 , 0.15 , $0.12 \text{ Jy beam}^{-1}$ となっており、 -3σ , 3σ , 6σ , 12σ , 24σ , 48σ のレベルで等高線を描画。（左）feature 1 のメーザースポット ($V_{\text{LSR}} = -49.5 - -48.7 \text{ km s}^{-1}$ の範囲で平均化、epoch: r12135c)、（中央）feature 4 のメーザースポット ($V_{\text{LSR}} = -62.2 - -61.7 \text{ km s}^{-1}$ の範囲で平均化、epoch: r12135c)（右）feature 6 のメーザースポット ($V_{\text{LSR}} = -60.5 \text{ km s}^{-1}$ 、epoch: r13069a)

4 は $2 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ asec}$ と大きい変動を示していた (figure 11)。また、スポットのピーク強度に着目してみると、feature 1 は $5 \sim 10 \text{ Jy beam}^{-1}$ の低い強度、feature 6 は $\sim 30 \text{ Jy beam}^{-1}$ の高い強度でほぼ安定していたが、feature 4 は $5 \sim 35 \text{ Jy beam}^{-1}$ の間で大きい変動を示していた (figure 12)。feature 4 のプロットに改めて注目してみると、DOY 390 ~ 434 あたりでスポットのピーク強度が 10 Jy beam^{-1} から $20 \sim 25 \text{ Jy beam}^{-1}$ に跳ね上がっていることが分かる。この点に着目して、改めて feature 4 について DOY 390 以降の epoch で年周視差フィッティングを行ったところ、20% の小さい誤差で年周視差を求めることができた。

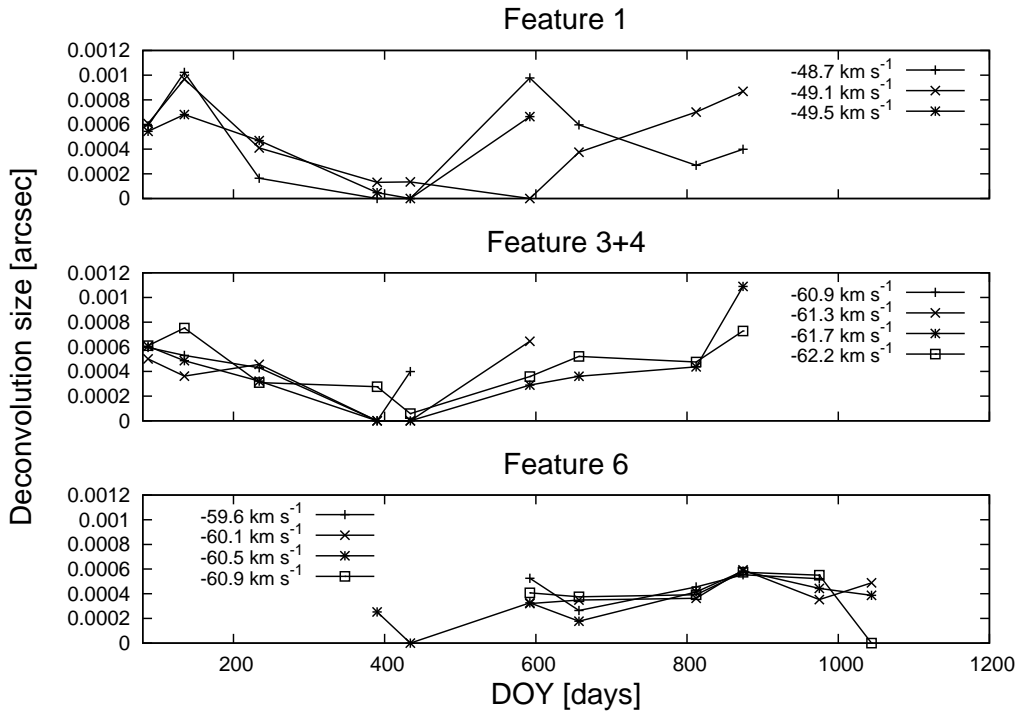


Figure 11: Feature 1, 3, 4, 6 の deconvolution size の時系列変化のプロット図。

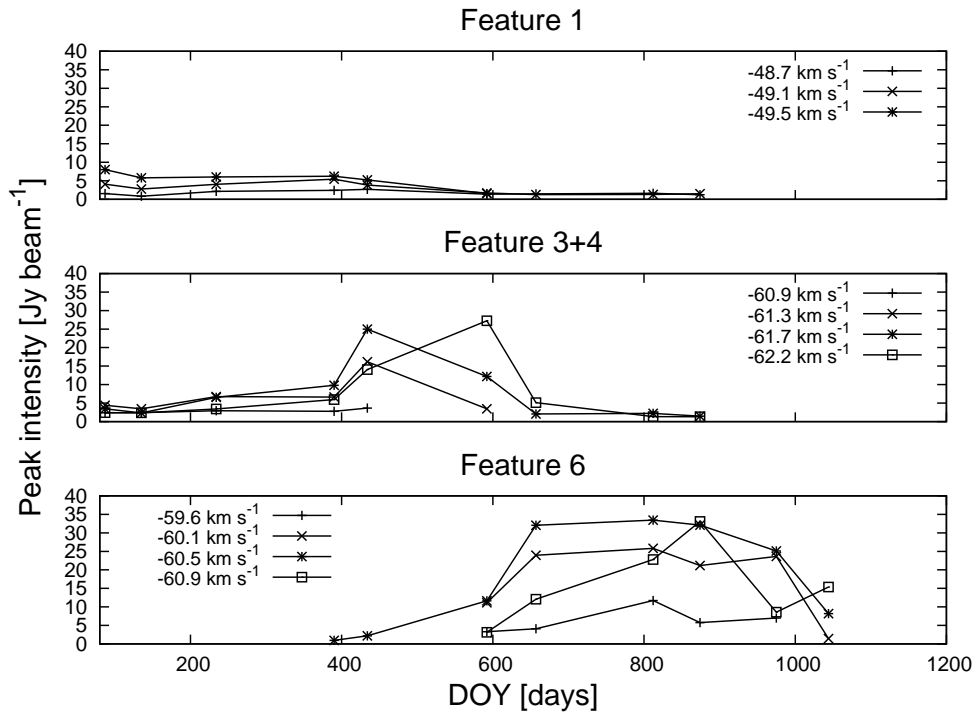


Figure 12: Feature 1, 3, 4, 6 のピーク強度の時系列変化のプロット図。

続いて、メーザスポットの速度方向の構造を調べるために、feature 4が見えている r12087a~r14144b の CLEAN 後のメーザスポットのスペクトルの出力を行った。CLEAN 後のスペクトルの調査につい

ては、AIPS の”ISPEC”というタスクを用いて行った。このタスクでは、イメージングを行った図内で指定した範囲を適用することで、その範囲内でのスペクトルを導出することが可能である。ISPEC のタスク内容は以下のようにになっている。

```
> task 'ispec';default;ind disknum;outd disknum;getn 50
> blc 200 202 0;trc 312 314 0 * イメージ内の範囲を指定
> optype 'FLUX' * フラックスを表示する場合は'FLUX'を選択
> outprint 'out:'!!obsname!!'_ispec_clean.txt' * TXT ファイルで出力
> doprint -1;dotv -1 * dotv 1 にすると、AIPS の TV 上でスペクトルを表示
> go;wait;imh
```

feature 4 の全 epoch の内、r12087a~r12234b は $\sim 6\text{--}7\text{ km s}^{-1}$ の広がった輝線を示し、r13025a 以降の epoch は $\sim 2\text{--}3\text{ km s}^{-1}$ の狭い輝線を示した (figure 13)。このことから、r12087a~r12234b では複数のスポットがブレンドしており、この事がフィッティングの誤差に影響を及ぼしていると考えられる。一方、r13025a 以降の epoch は複数スポットがブレンドしておらず、個別フィッティングの誤差も小さくなったため、r13025a 以降の epoch を feature 4 として combined フィッティングに使用した。

以上の処理を行った上で combined フィッティングを行った結果については、次のセクションで述べる。

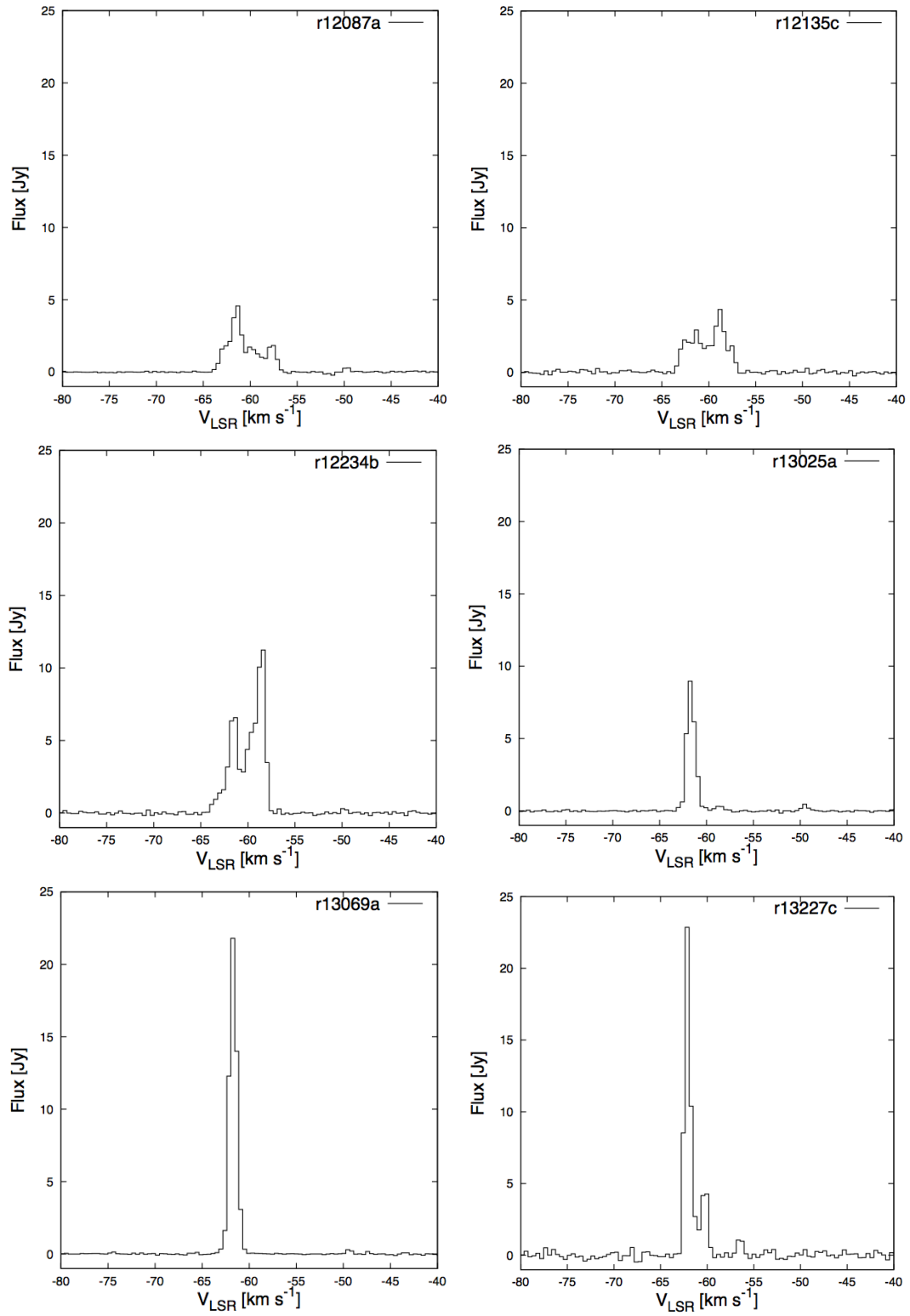


Figure 13: CLEANを行った後の feature 4のメーザースポットのスペクトル (epoch: r12087a~r13227c)

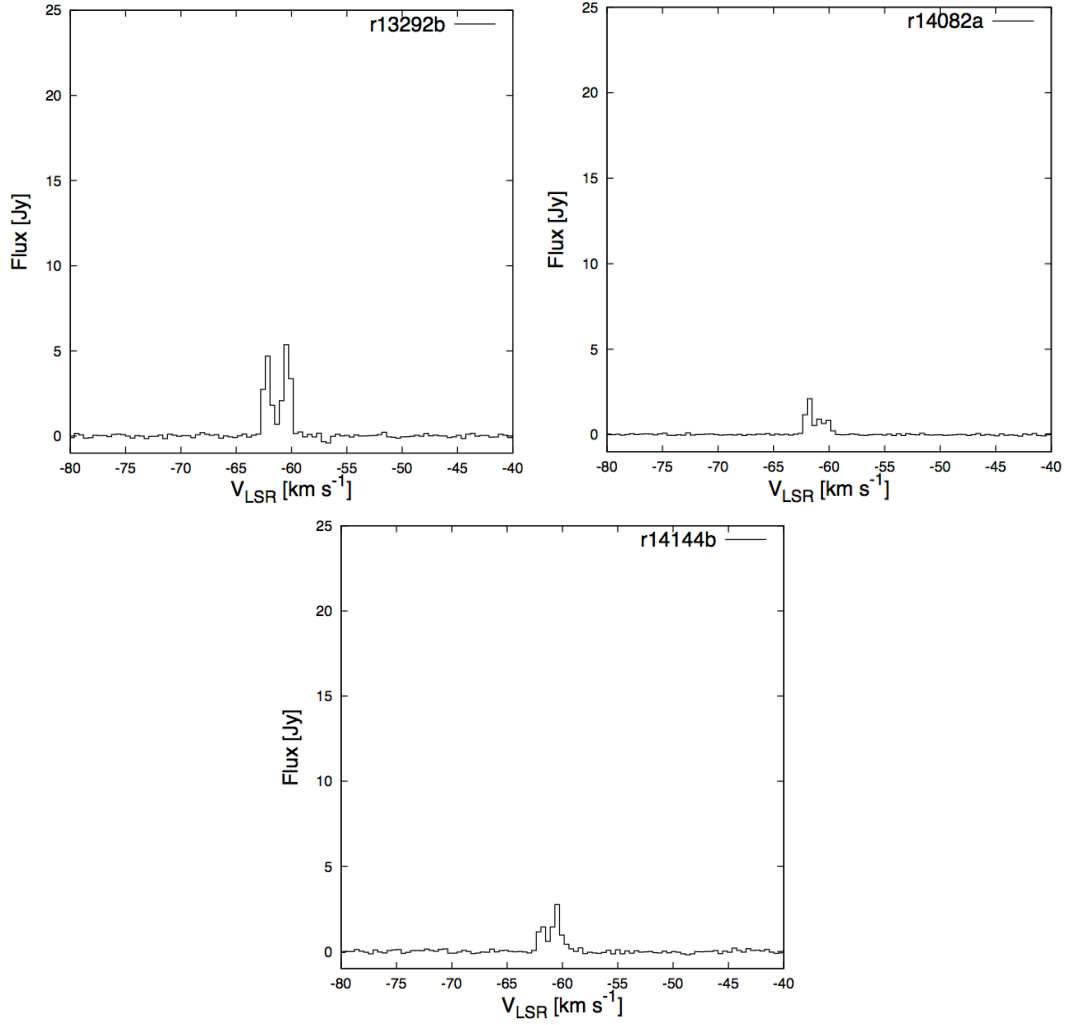


Figure 13: CLEANを行った後のfeature 4のメーザスポットのスペクトル (epoch: r13292b~r14144b)

2.4 結果

feature 1 (1a–1c), 4 (4a–4b), 6 (6a–6d) の combined フィッティングを行った結果、年周視差は 0.151 ± 0.042 mas となり、距離は $6.61^{+2.55}_{-1.44}$ kpc と求まった。フィッティングに使用したスポットおよび年周視差の一覧については、table 6 に示してある。また、feature 1, 4, 6 の固有運動の図および combined フィッティングの図については figure 14 に示してある。年周視差フィッティングに用いたツールとしては、国立天文台の廣田朋也氏が開発した”VERA.Parallax”を用いて $\chi^2 \simeq 1$ に近づくように R.A. と Decl. の誤差を考慮してフィッティングを行った (補遺 A. 1 を参照)。また、各スポットおよび各 feature の個別の年周視差フィッティングについては、combined フィッティングで算出された R.A. の誤差 0.073、Decl. の誤差 0.107 を用いた。また、各 feature ごとの combined フィッティング、および全スポット (全 feature) の combined フィッティングについては、複数のスポットを用いているため、スポット数の重みを考慮しなければならないため、誤差に $\sqrt{N_{\text{ID}}}$ をかけた。個別の feature における combined フィッティングについての結果は、feature 1 では 0.146 ± 0.044 mas ($N_{\text{ID}} = 3$)、feature 4 では 0.148 ± 0.041 mas ($N_{\text{ID}} = 2$)、

feature 6 では 0.159 ± 0.038 mas ($N_{ID} = 4$) となり、いずれも誤差の範囲内で全スポットの combined フィッティングの結果と一致した。

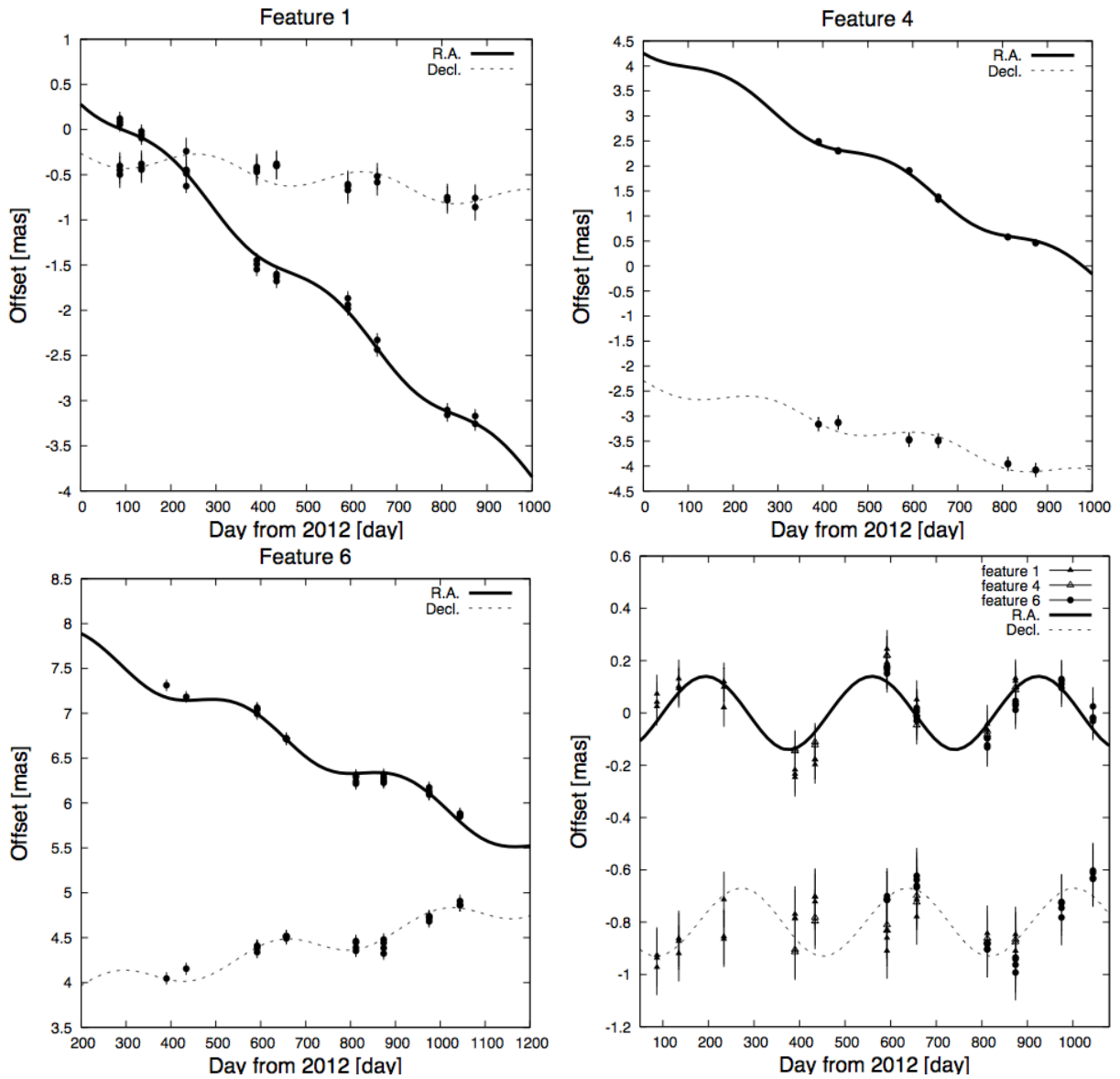


Figure 14: IRAS 01123+6430 の各 feature 1 (左上) , 4 (右上) , 6 (左下) の運動の時間変化。(右下) 固有運動の成分を差引いた年周視差のみの時間変化。実線は R.A. 方向、点線は Decl. 方向を示す。

Table 6: feature 1, 4, 6 の各年周視差の結果

DOY [days]	Spot	Parallax [mas]	χ^2	V_{LSR} [km s $^{-1}$]	Epochs
87–874	1a	0.146 ± 0.040	1.410	−48.7	123456789**
	1b	0.143 ± 0.039	1.379	−49.1	123456789**
	1c	0.152 ± 0.062	2.401	−49.5	123456*****
feature 1 combined		0.146 ± 0.044	1.517		
390–874	4a	0.142 ± 0.044	0.927	−61.7	***456789**
	4b	0.155 ± 0.041	0.823	−62.2	***456789**
feature 4 combined		0.148 ± 0.041	0.820		
592–1044	6a	0.150 ± 0.041	0.799	−59.6	*****6789AB
	6b	0.141 ± 0.045	0.954	−60.1	*****6789AB
	6c	0.164 ± 0.034	0.534	−60.5	*****6789AB
	6d	0.181 ± 0.036	0.612	−60.9	*****6789AB
feature 6 combined		0.159 ± 0.038	0.669		
All spots combined		0.151 ± 0.042	1.039		

Figure 14 における、feature 1, 4, 6 のオフセットの時間変化の図については、次のような方法で作成した。まず、RA 方向、Decl 方向それぞれについて、DOY の値、実際の観測値と全スポットの combined フィッティングの結果を用いて計算した年周視差との差の値のそれぞれを用いて最小 2 乗フィッティング (最小 2 乗法) を行った。そして、最小 2 乗法により算出した固有運動と DOY=0 のときの原点 (切片) をもとに導出した一次関数モデルに、それぞれの feature ごとの combined フィッティングの値を振幅とした三角関数モデルを合成した曲線を、実際の観測値のプロット点にフィットさせることで作成した。

Figure 14 に着目すると、feature 1 では、RA 方向の固有運動が $-1.57 \text{ mas yr}^{-1}$ 、切片が 0.41 mas 、Decl 方向の固有運動が $-0.20 \text{ mas yr}^{-1}$ 、切片が -0.25 mas となっており、RA 方向、Decl 方向いずれについてもスポットのオフセットが時間に従い減少している傾向を示した。feature 4 では、RA 方向の固有運動が $-1.70 \text{ mas yr}^{-1}$ 、切片が 4.45 mas 、Decl 方向の固有運動が $-0.72 \text{ mas yr}^{-1}$ 、切片が -2.28 mas となっており、feature 1 と同様、RA 方向、Decl 方向ともにオフセットが時間に従い減少している。また、feature 6 では、RA 方向の固有運動が $-0.82 \text{ mas yr}^{-1}$ 、切片が 8.19 mas 、Decl 方向の固有運動が 0.35 mas yr^{-1} 、切片が 3.73 mas となっており、RA 方向では時間に従いオフセットが減少する一方、Decl 方向では時間に従いオフセットが増加する傾向が見られた。

また、combined フィッティングで得られた年周視差を用いて、各スポットの運動の年周視差成分を差引き固有運動の計測を行った。固有運動の平均を取り、系の固有運動を計測したところ、 $(\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta) = (-1.44 \pm 0.15, -0.27 \pm 0.16) \text{ mas yr}^{-1}$ と求められた (table 7)。また、メーザースポットの分布図 (figure 9) に固有運動のベクトルを重ねたものを figure 15 に掲載している。

Table 7: 各 feature の検出 DOY、年周視差、固有運動、LSR 速度値

Feature	DOY [days]	$\mu_\alpha \cos \delta$ [mas yr ⁻¹]	μ_δ [mas yr ⁻¹]	V_{LSR} [km s ⁻¹]
1	87–874	-1.57 ± 0.03	-0.20 ± 0.04	-49.5 – -48.7
2	87–434	-1.74 ± 0.03	0.10 ± 0.08	-50.4 – -49.9
3	87–592	-1.03 ± 0.06	-0.66 ± 0.08	-61.3 – -60.9
4	390–874	-1.70 ± 0.03	-0.72 ± 0.05	-62.2 – -61.7
5	390–812	-1.76 ± 0.02	-0.48 ± 0.08	-57.1 – -56.7
6	592–1044	-0.82 ± 0.03	0.35 ± 0.03	-60.9 – -59.6
Average		-1.44 ± 0.15	-0.27 ± 0.16	-57.1

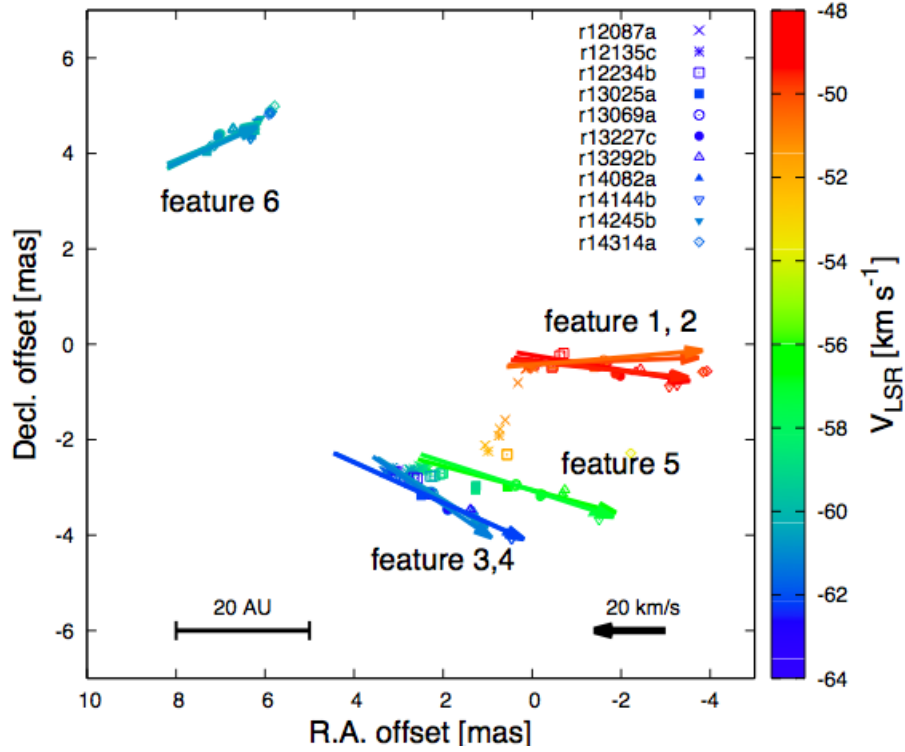


Figure 15: メーザースポットの分布図 (figure 9) に各 feature 1, 2, 3, 4, 5, 6 の固有運動ベクトルを加えた図 (年周視差から計測された距離 6.61 kpc に対する、20 AU スケール、速度 20 km s^{-1} を掲示)。

求めた系の固有運動について銀河座標系に変換すると、 $(\mu_l \cos b, \mu_b) = (-1.40 \pm 0.14, -0.40 \pm 0.17) \text{ mas yr}^{-1}$ 、 $[\text{km s}^{-1}]$ 単位に変換した結果、銀経成分は $v_l = D\mu_l \cos b = -44.0 \pm 17.5 \text{ km s}^{-1}$ 、銀緯成分は $v_b = D\mu_b = -12.6 \pm 7.3 \text{ km s}^{-1}$ となった。Honma et al. (2012) の銀河中心距離 $R_0 = 8.05 \pm 0.45 \text{ kpc}$ 、IRAS 01123+6430 の銀河座標 $(l, b) = (125.51^\circ, +2.03^\circ)$ 、年周視差測定から得られた距離 $D = 6.61^{+2.55}_{-1.44} \text{ kpc}$ を用いて、銀河中心距離は $R = 13.04 \pm 2.24 \text{ kpc}$ と計測された。また、視線速度 $V_{\text{LSR}} = -54.7 \text{ km s}^{-1}$ (Wouterloot & Brand 1989) を、太陽の 3 次元運動 $(U_\odot^{\text{Std}}, V_\odot^{\text{Std}}, W_\odot^{\text{Std}}) = (10.3, 15.3, 7.7) \text{ km s}^{-1}$ (Kerr & Lynden-Bell 1986) を用いて heliocentric velocity に変換して、 $V_{\text{Helio}} = -61.4 \text{ km s}^{-1}$ となる。この heliocentric velocity V_{Helio} と、銀河座標に変換した固有運動 (v_l, v_b) 、銀河定数 $(R_0, V_0) = (8.05 \pm 0.45 \text{ kpc}, 238 \pm 14 \text{ km s}^{-1})$ (Honma et al. 2012) を用いて、3 次元運動 $(U, V, W) = (81.2 \pm 14.2, 226 \pm 17, -7.5 \pm 7.3) \text{ km s}^{-1}$ と算出された。この 3 次元運動を円柱座標に変換し、 $(V_{R_{\text{in}}}, V_\theta, V_z) = (-19.1 \pm 5.8, 239 \pm 22, -7.5 \pm 7.3) \text{ km s}^{-1}$ と求めることができた。(3 次元運動の算出法については補遺 A. 2、および誤差の計算については補遺 A. 3 を参照。)

結果として、IRAS 01123+6430 の銀河中心距離 R および銀河回転速度 V_{rot} は、 $(R, V_{\text{rot}}) = (13.04 \pm 2.24 \text{ kpc}, 239 \pm 22 \text{ km s}^{-1})$ となった。また、その他の銀河定数 $(R_0, V_0) = (8.5 \text{ kpc}, 220 \text{ km s}^{-1})$ (Kerr & Lynden-Bell 1986)、 $(R_0, V_0) = (8.34 \pm 0.16 \text{ kpc}, 240 \pm 8 \text{ km s}^{-1})$ を用いて、銀河中心距離と 3 次元運動を算出した結果を table 8 に掲載してある。また、各回転運動と銀河定数の差 $V_{\text{rot}} - V_0$ をとったところ、誤差の範囲内で一致し、フラットな回転曲線とも一致する結果となった。また、銀河

系の log spiral モデル (Nakanishi & Sofue 2016) 上では、Norma-Cygnus arm と Perseus arm の間に位置するという結果になった (figure 16)。

ちなみに、1.7 節における質量分布の式 (9) に求まった $(R, V_{\text{rot}}) = (13.04 \text{ kpc}, 239 \text{ km s}^{-1})$ を代入すると、

$$M_r \sim 2.3 \times 10^5 \left(\frac{13.04}{\text{kpc}} \right) \left(\frac{239}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 M_{\odot} \sim 1.7 \times 10^{11} M_{\odot} \quad (10)$$

となり、IRAS01123+6430 の位置までの銀河系の質量分布は $1.7 \times 10^{11} M_{\odot}$ であることが分かる。

Table 8: Honma et al. (2012)、Kerr & Lynden-Bell (1986)、Reid et al. (2014) のそれぞれの銀河定数を用いて計算した銀河中心距離と 3 次元運動

R_0 [kpc]	V_0 [km s ⁻¹]	R [kpc]	$V_{R_{\text{in}}}$ [km s ⁻¹]	V_{θ} [km s ⁻¹]	V_z [km s ⁻¹]	Reference
8.05 ± 0.45	238 ± 14	13.04 ± 2.24	-19.1 ± 5.8	239 ± 22	-7.5 ± 7.3	Honma et al. (2012)
8.5	220	13.5 ± 2.2	-8.6 ± 9.0	223 ± 15	-7.5 ± 7.3	Kerr & Lynden-Bell (1986)
8.34 ± 0.16	240 ± 8	13.31 ± 2.20	-17.8 ± 7.8	241 ± 18	-7.5 ± 7.3	Reid et al. (2014)

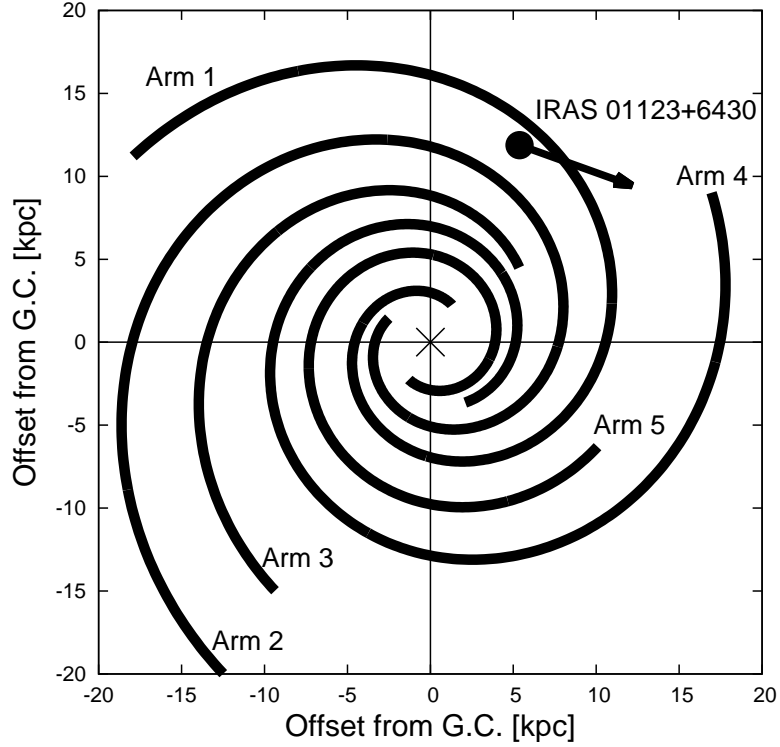


Figure 16: IRAS 01123+6430 の銀河系内における位置と特異運動 (R, U, V) = (13.04 kpc, 81.2 km s⁻¹, 226 km s⁻¹) を銀河系の log spiral モデル (Nakanishi & Sofue 2016) 上にプロットした図 (Arm 1: Norma-Cygnus arm、Arm 2: Perseus arm、Arm 3: Orion arm、Arm 4: Sagittarius-Carina arm、Arm 5: Scutum-Crux arm)。使用した log spiral のモデルの式については式 (11)、パラメータについては table 9 に示している。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 e^{\tan p(\theta - \theta_0)} \cos \theta \\ r_0 e^{\tan p(\theta - \theta_0)} \sin \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

Table 9: Nakanishi & Sofue (2016) の log spiral モデルの各パラメータ

	Beginning radius r_0 [kpc]	Beginning angle θ_0 [deg]/[rad]	Pitch angle p [deg]/[rad]
Arm 1	2.6	60 / 1.05	15 / 0.26
Arm 2	2.9	150 / 2.62	15 / 0.26
Arm 3	7.0	400 / 6.98	15 / 0.26
Arm 4	4.2	300 / 5.24	11 / 0.19
Arm 5	2.6	240 / 4.19	11 / 0.19

2.5 議論

2.5.1 YSO のスペクトル型

次に我々は、年周視差測定から得られた距離と赤外線フラックス密度から YSO (Young Stellar Object) の bolometric luminosity を見積もった。Helou & Walker (1988) によると、IRAS 01123+6430 の赤外線フラックス密度は $f_{12\mu\text{m}} = 8.34 \times 10^{-1}$ Jy、 $f_{25\mu\text{m}} = 1.49$ Jy、 $f_{60\mu\text{m}} = 18.8$ Jy、 $f_{100\mu\text{m}} = 65.0$ Jy となっている。これらのフラックス密度の値と年周視差から求めた距離 6.61 kpc を用いて、以下の式 (Wang et al. 2009) に基づいて YSO の bolometric luminosity の導出を行った。

$$L_{\text{Bol}} = 5.4D^2 (f_{12\mu\text{m}} / 0.79 + f_{25\mu\text{m}} / 2 + f_{60\mu\text{m}} / 3.9 + f_{100\mu\text{m}} / 9.9) L_{\odot} \quad (12)$$

結果として、IRAS 01123+6430 の bolometric luminosity は $L_{\text{Bol}} = (3.11 \pm 2.86) \times 10^3 L_{\odot}$ と求められた。

Panagia (1973) によると、導出された YSO の光度の対数を取り、対数の値から YSO のスペクトル型を決定している。IRAS 01123+6430 の bolometric luminosity の対数をとると、 $\log_{10} L_{\text{Bol}} = 3.49$ となり、スペクトル型は B1–B2 (Panagia 1973) であった。このスペクトル型の YSO は B3 よりも早期であるため、HII 領域を持つ大質量星形成領域であることが分かる。

2.5.2 内部運動

IRAS 01123+6430 の内部運動 (table 10) については、feature 1, 2, 3, 4, 5, 6 の各固有運動から系の固有運動を差引いて導出を行った。その結果、 $(\Delta\alpha, \Delta\delta) \sim (3, 0)$ mas の位置から四方八方に外側に運動する振る舞いを示し、LSR 速度については、視線速度 -54.7 km s^{-1} (Wouterloot & Brand 1989) に対して、feature 1 と 2 は red-shift、feature 3 と 4 は blue-shift を示していた (figure 17)。

Red-shift を示す成分 feature 1, 2 と blue-shift を示す成分 feature 3, 4 が対極的に位置している様子は、 H_2O メーザー観測における星形成のトレーサーとしてよく知られる bipolar outflow に良く似ている。しかし、典型的な bipolar outflow のサイズは 100 ~ 1000 AU 以上のスケール (Burns et al. 2016; Honma et al. 2005; Zapata et al. 2018; Zinchenko et al. 2018) である。

また、feature 5 の成分については、bipolar outflow と思われる feature 1, 2 と feature 3, 4 の射出源あたりに星周円盤があると仮定すると、星周円盤の回転方向を示唆しているのではないかと考えられる。しかし、星周円盤についても、100 ~ 200 AU スケールのものが多く (Bacciotti et al. 2018; Booth et al. 2018; Macías et al. 2018; Zapata et al. 2018)、これらと比較しても非常にコンパクトな星周円盤であると考えられる。

これまでの bipolar outflow と星周円盤に関する研究では、比較的スケールの大きいものが扱われていたが、Lee et al. (2018) では、outflow および星周円盤のスケールが ~ 30 AU というコンパクトなスケールを示していることが分かっている。IRAS 01123+6430 で見られた内部運動は、Lee et al. (2018) で見られるようなコンパクトな outflow と星周円盤を示唆しているのではないかと考えられる。

最後に残された feature 6 については、feature 5 とほぼ平行で反対方向を向いている成分で、feature 5 のような星周円盤の回転方向を示唆しているのかどうかは、現段階では断定できない。

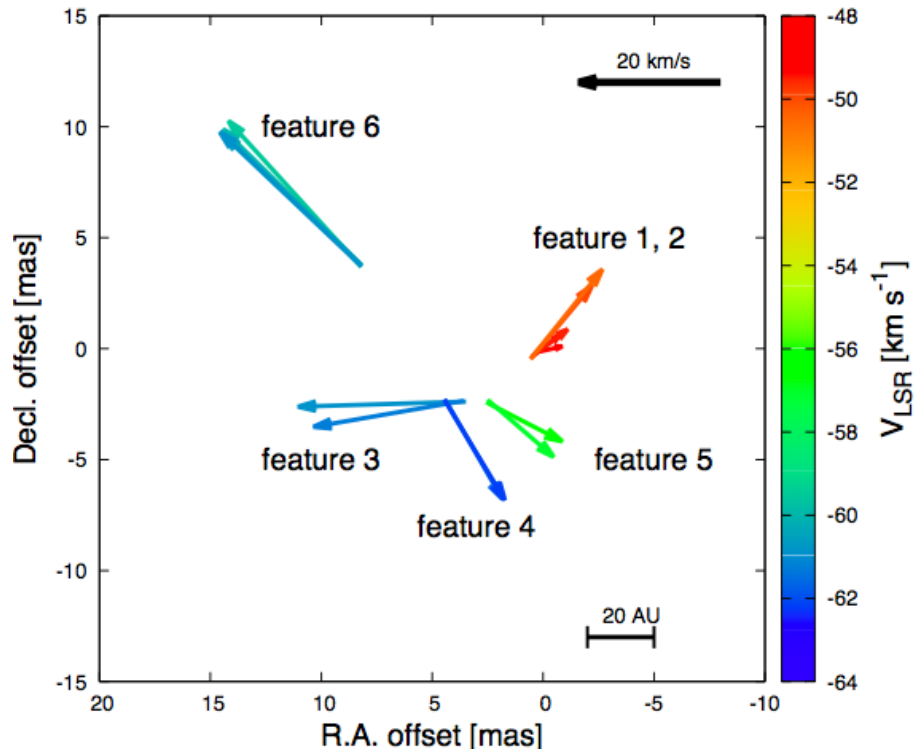


Figure 17: IRAS 01123+6430 の内部運動

Table 10: IRAS 01123+6430 の各 feature 1, 2, 3, 4, 5, 6 の内部運動。($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ) は、個々の feature の固有運動、($\langle \mu_\alpha \cos \delta \rangle$, $\langle \mu_\delta \rangle$) は系の固有運動を示す。

Feature	ID	R.A.		Decl.		V_{LSR} [km s ⁻¹]
		$\mu_\alpha \cos \delta - \langle \mu_\alpha \cos \delta \rangle$ [mas yr ⁻¹]	$v_\alpha - \langle v_\alpha \rangle$ [km s ⁻¹]	$\mu_\delta - \langle \mu_\delta \rangle$ [mas yr ⁻¹]	$v_\delta - \langle v_\delta \rangle$ [km s ⁻¹]	
1	1a	-0.12 ± 0.16	-3.8 ± 4.9	0.03 ± 0.17	0.9 ± 5.3	-48.7
	1b	-0.12 ± 0.16	-3.6 ± 4.9	0.09 ± 0.17	2.8 ± 5.3	-49.1
	1c	-0.16 ± 0.17	-5.0 ± 5.4	0.12 ± 0.21	3.8 ± 6.6	-49.5
2	2a	-0.28 ± 0.16	-8.6 ± 4.9	0.33 ± 0.21	10.3 ± 6.5	-49.9
	2b	-0.32 ± 0.16	-10.2 ± 4.9	0.40 ± 0.19	12.7 ± 6.1	-50.4
3	3a	0.76 ± 0.18	23.7 ± 5.7	-0.02 ± 0.21	-0.7 ± 6.6	-60.9
	3b	0.68 ± 0.17	21.2 ± 5.3	-0.12 ± 0.19	-3.7 ± 6.0	-61.3
4	4a	-0.26 ± 0.16	-8.1 ± 5.0	-0.45 ± 0.18	-14.1 ± 5.7	-61.7
	4b	-0.27 ± 0.16	-8.6 ± 5.0	-0.45 ± 0.18	-14.2 ± 5.5	-62.2
5	5a	-0.34 ± 0.16	-10.8 ± 4.9	-0.18 ± 0.19	-5.5 ± 6.0	-56.7
	5b	-0.30 ± 0.16	-9.3 ± 4.9	-0.26 ± 0.24	-8.1 ± 7.5	-57.1
6	6a	0.60 ± 0.16	18.7 ± 5.1	0.66 ± 0.18	20.6 ± 5.5	-59.6
	6b	0.63 ± 0.17	19.6 ± 5.3	0.61 ± 0.17	19.2 ± 5.3	-60.1
	6c	0.62 ± 0.16	19.4 ± 5.0	0.59 ± 0.17	18.4 ± 5.3	-60.5
	6d	0.64 ± 0.16	20.0 ± 5.0	0.61 ± 0.18	18.9 ± 5.6	-60.9

2.5.3 銀河系内における位置

今回、年周視差測定により IRAS 01123+6430 の距離計測を行ったが、距離の確率分布からどこに位置するのか、年周視差測定の結果と一致するのかを確認するために、Bayesian estimator (<http://bessel.vlbi-astrometry.org/bayesian>) (Reid et al. 2016) を用いて距離の確率分布を確認した。

銀河系上における天体の距離の確率分布は Reid et al. (2016) により確立され、以下に示す4つの確率分布の積から算出される。まず、1つ目の確率分布 $P_{SA}(D)$ は、渦状腕のセグメントの位置の確率分布を示しており、以下の式で表される。

$$P_{SA}(D) = \sum_{j=1}^J P(d|\text{arm}_j, l, b, v, I) \times P(\text{arm}_j|l, b, v, I) \quad (13)$$

ここで、 $P(\text{arm}_j|l, b, v, I) = e^{-\Delta l_j^2/2\sigma_{lj}^2} e^{-\Delta b_j^2/2\sigma_{bj}^2} e^{-\Delta v_j^2/2\sigma_{vj}^2}$ で、銀経・銀緯・速度の偏差の分布の形で表されており、個々のデータの確率分布の総和で表される。

2つ目の確率分布 $P_{PS}(D)$ は、年周視差が求まっている天体の分布を元に考慮された確率分布を示しており、以下の式で表される。

$$P_{PS}(D) = \sum_{k=1}^K P(d|PS_k, l, b, v, I) \times P(PS_k|l, b, v, I) \quad (14)$$

ここで、 $P(PS_k|l, b, v, I) \propto e^{-\Delta d_k^2/2\sigma_{GMC}^2} e^{-\Delta d_b^2/2\sigma_{GMC}^2} e^{-\Delta v^2/2\sigma_{\Delta v}^2}$ で、距離と速度の分布の形で表される。この確率分布についても P_{SA} と同じく個々のデータの確率分布の総和で表されている。

3つ目の P_{KD} は運動学的距離の分布を示しており、以下のような形で表される。

$$P_{KD}(D) \propto \frac{2}{r^2} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{2}}\right) \quad (15)$$

ここで、 $r = \Delta v/\sigma_v$ で、運動学的距離が視線速度から一概に決まるように、速度分散の分布で表される形となっている。

4つ目の P_{GL} は銀緯から分かる鉛直上の高さによる確率分布を示しており、以下の式で表される。

$$P_{GL}(D) \propto \frac{P(b|d, \sigma_z, I)P(d|\sigma_z, I)}{P(b|\sigma_z, I)} \quad (16)$$

この式における $P(b|\sigma_z, I)$ は、銀緯から決まる鉛直成分、つまりディスクからの高さの分布として表される。

そして、最終的な確率分布については、

$$P(D) \propto P_{SA}(D)P_{PS}(D)P_{KD}(D)P_{GL}(D) \quad (17)$$

のように、渦状腕、年周視差、運動学的距離、銀緯のそれぞれの確率分布の積で表される。この確率分布については、”<http://bessel.vlbi-astrometry.org/bayesian>” にアクセスし、求めたい天体の情報（銀経・銀緯・視線速度）を入力することで求めることができる。

今回の IRAS 01123+6430 の距離の確率分布については、座標 $(l, b) = (125.51^\circ, +2.03^\circ)$ 、視線速度 $V_{\text{LSR}} = -54.7 \text{ km s}^{-1}$ から、 $D = 4.51 \text{ kpc}$ となり、Perseus arm と Outer arm の間に当たる Inter arm に位置する結果となった (figure 18)。この距離について、年周視差測定から求めた距離 $6.61^{+2.55}_{-1.44} \text{ kpc}$ と比較すると、誤差の範囲を考慮しても一致しないことが分かった。

この、距離の確率分布密度と年周視差測定から得られた距離の違いについて考察してみたところ、3次元速度の動径成分 $V_{R_{\text{in}}}$ が関係していると考えられる (figure 19)。この動径成分は $V_{R_{\text{in}}} = -19.1 \pm 5.8 \text{ km s}^{-1}$ の値を示しており、銀河中心から遠ざかる方向の速度を持っているため、見かけの視線速度が小さくなっているのではないかと考えられる。

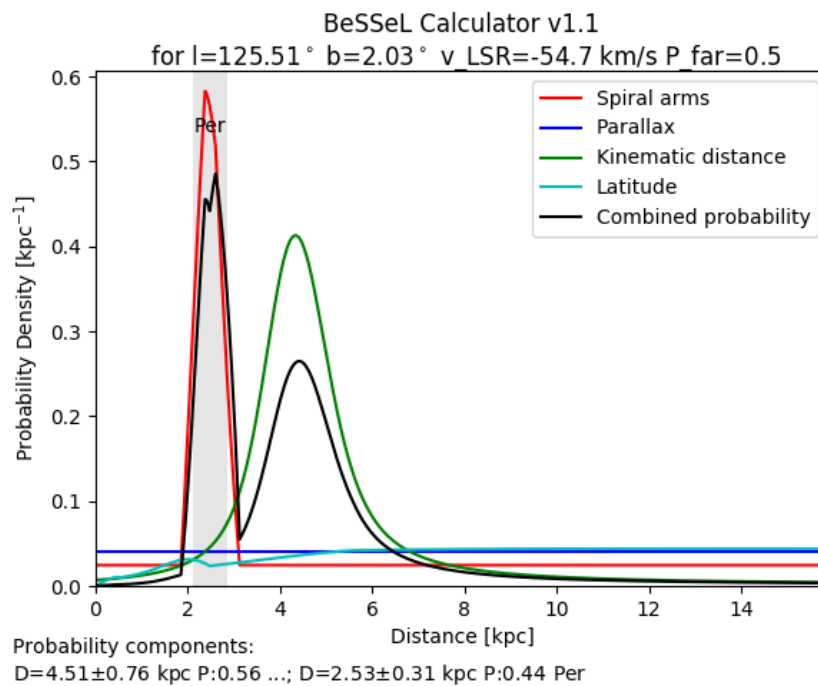


Figure 18: 座標 $(l, b) = (125.51^\circ, +2.03^\circ)$ 、視線速度 $V_{\text{LSR}} = -54.7 \text{ km s}^{-1}$ の場合の確率分布

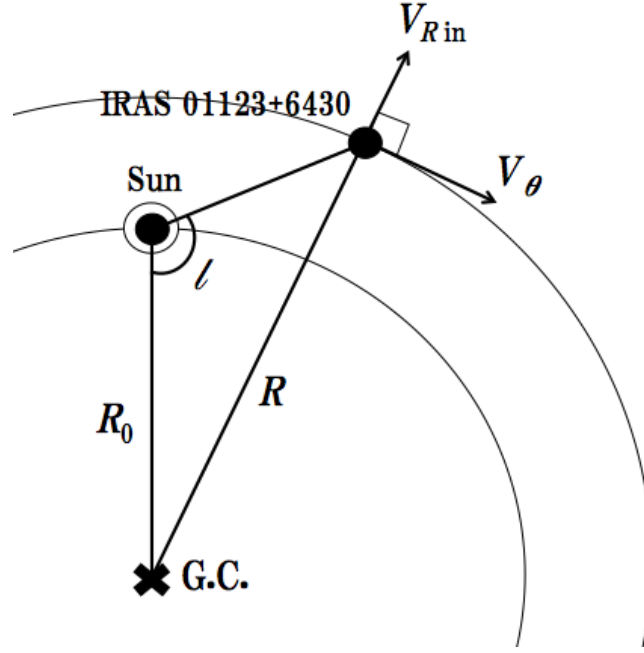


Figure 19: IRAS 01123+6430 の銀河面上の運動の模式図 ($l = 125.51^\circ$, $R = 13.04$ kpc, $V_{Rin} = -19.1$ km s $^{-1}$, $V_\theta = 239$ km s $^{-1}$)

そこで、非円運動の較正のために、銀河系内で円運動していると仮定して以下の式に従って視線速度の計算を行った。

$$V_{LSR} = \left(\frac{R_0}{R} V_\theta - V_0 \right) \sin l \cos b \quad (18)$$

式 (18) に、銀河定数 $(R_0, V_0) = (8.05$ kpc, 238 km s $^{-1})$ (Honma et al. 2012)、IRAS 01123+6430 の銀河中心距離 $R = 13.04$ kpc、回転速度 $V_\theta = 239$ km s $^{-1}$ を代入すると、視線速度は $V_{LSR} = -73.6$ km s $^{-1}$ と導出することができた。この視線速度を用いて、改めて Bayesian estimator (Reid et al. 2016) を用いて確率分布密度を計測したところ、距離は $D = 5.83$ kpc となり、はくちょう座腕 (Outer arm) に位置する結果となった (figure 20)。また、年周視差測定から得られた距離 $6.61^{+2.55}_{-1.44}$ kpc と比較しても、誤差の範囲内で一致することが分かった。

以上のことから IRAS 01123+6430 は、銀河系外 2 象限の Outer arm に位置する、外向きの動径成分の速度の大きい銀河系外縁部天体であることが判明した。

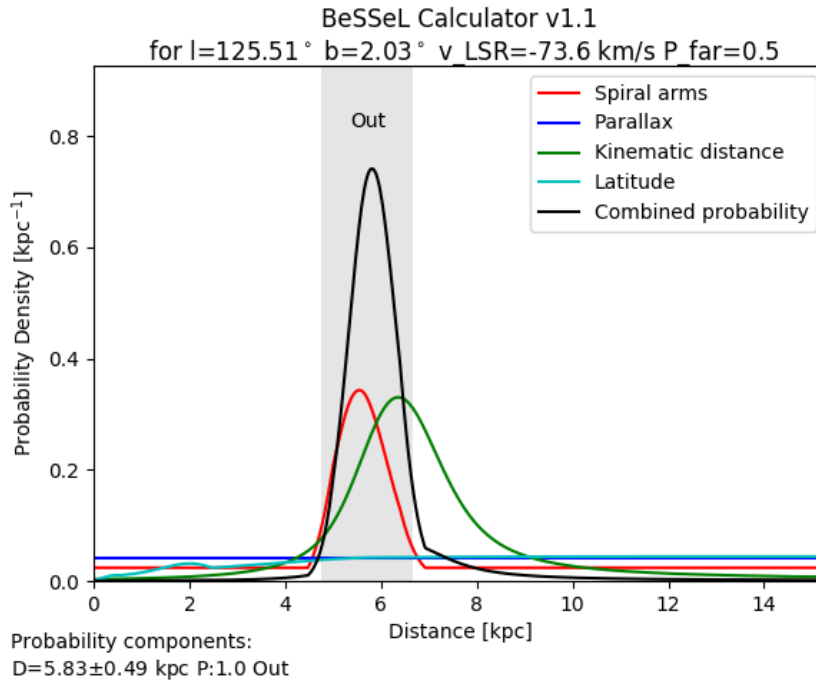


Figure 20: 座標 $(l, b) = (125.51^\circ, +2.03^\circ)$ 、視線速度 $V_{\text{LSR}} = -73.6 \text{ km s}^{-1}$ の場合の結果

2.6 2章まとめ

第2章では、銀河系外縁部天体 IRAS 01123+6430 について、VLBI 観測による位置天文の観点から調査・議論を行った。

VERA による VLBI 観測データの解析の結果、年周視差測定から求められた距離は 6.61 kpc となった。そして、この距離から、IRAS 01123+6430 が含有する YSO のスペクトル型は B1–B2 となり、B3 よりも早期型であることから、強い UV 放射を伴う大質量星形成領域であることが分かった。また、検出された H_2O メーザーについては、合計 6 の feature が得られ、bipolar outflow の構造に近いと思われたが、典型的な bipolar outflow よりも小規模であったため、コンパクトなアウトフローか、広がっていく星周円盤を示唆しているのではないかと考えられる。

また、銀河系内における位置については、銀河系第2象限のはくちょう座腕 (Outer arm) に位置していることが明らかになった。しかし、視線速度から求められる運動学的距離を調べたところ、年周視差測定から得られた距離と誤差の範囲で一致しなかった。このことについて、3次元運動の動径成分に着目して調べたところ、銀河中心方向と反対の方向を示していた。このため、見かけの視線速度が小さくなり、年周視差測定による距離と運動学的距離との大きな誤差が生じたのではないかと考えられた。

位置天文の観点から IRAS 01123+6430 について調べた結果、外向きの速度の大きい銀河系外縁部天体であることが分かった。

3 IRAS 01123+6430 の付随分子雲

IRAS01123+6430 についての先行研究を調べていく中で、CO 輝線サーベイのアーカイブデータを見つけることができた。ここでは、CO 観測から見える IRAS01123+6430 の性質と星形成について考察する。

3.1 FCRAO

IRAS 01123+6430 の CO 観測にあたって使用した観測データについては、FCRAO (**F**ive **C**ollege **R**adio **A**stronomical **O**bservatory) によるサーベイデータである。FCRAO とは、アメリカのマサチューセッツ州に設置されている、マサチューセッツ大学、アマースト・カレッジ、ハンプシャー・カレッジ、マウント・ホリオーク・カレッジ、スミス・カレッジの5つの大学により設立された、口径14mのミリ波望遠鏡で、望遠鏡本体はむき出しになっておらず、白いドームの中に搭載されている。この望遠鏡を用いた主な観測は、Heyer et al. (1998) に詳細が述べられている。

3.1.1 観測

FCRAO による CO 輝線サーベイ観測は、Heyer et al. (1998) により、1994年の春季から1997年の1月にかけて行われた (table 11)。望遠鏡の空間分解能は $45''$ 、アンテナ温度は $T_R^* \geq 0.5$ K、速度分解能は 0.98 km s^{-1} で、銀経 $102.5^\circ \leq l \leq 141.5^\circ$ 、銀緯 $-3.03^\circ \leq b \leq +5.43^\circ$ の $2340' \times 508'$ の範囲、速度 $-152.0 \text{ km s}^{-1} \leq v \leq +40.6 \text{ km s}^{-1}$ の範囲の $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線サーベイが行われ、本研究では、そのアーカイブデータを使用した。IRAS 01123+6430 も、このサーベイデータの範囲内に分布しており、5506番目の分子雲として検出されている (Heyer et al. 2001)。しかし、このサーベイデータについては、当初は銀緯 1 pixel ($\Delta b = 0.014^\circ$) ごとに分割されてアーカイブ保存されていたため、解析の際に、分割されたデータをつなぎ合わせてサーベイデータを復元させる必要があった (復元させたサーベイデータの積分マップについては figure 21 に掲載)。次のセクションにて、その解析の内容について述べる。

Table 11: FCRAO-14m による $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線サーベイのプロファイル

観測期間	1994 spring–1997 January
観測輝線 (観測周波数)	$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ (115 GHz)
観測領域 (銀経)	$102.5^\circ\text{--}141.5^\circ$
” (銀緯)	$-3.03^\circ\text{--}+5.43^\circ$
” (速度)	$-152.0\text{--}+40.6 \text{ km s}^{-1}$
空間分解能	$45''$
速度分解能	0.98 km s^{-1}

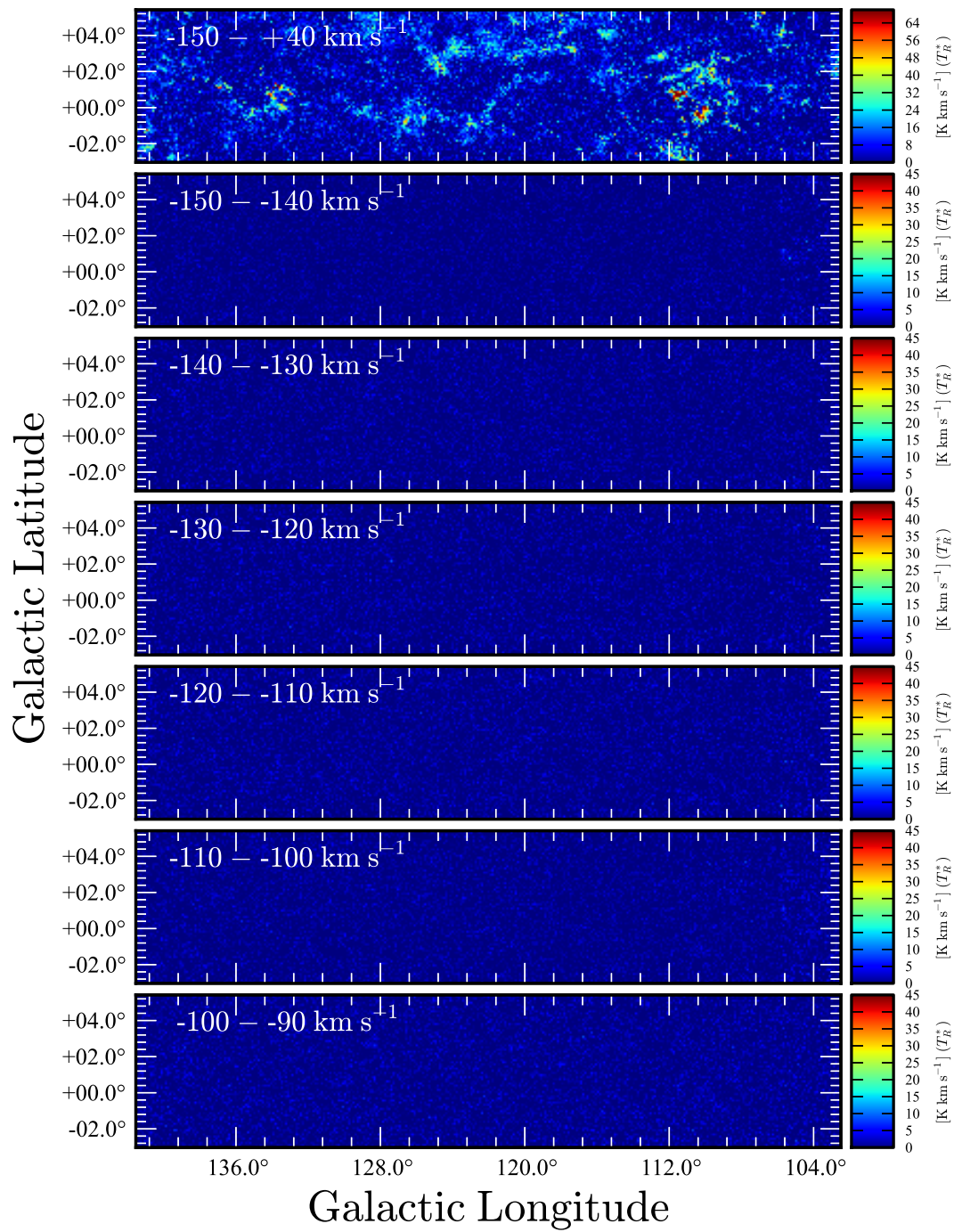


Figure 21: FCRAO-14m による $^{12}\text{CO}(J = 1-0)$ 輝線サーベイの積分強度図。速度範囲 -150 – $+40\text{ km s}^{-1}$ で積分した強度図と、 10 km s^{-1} の速度間隔で積分した強度図を掲載。

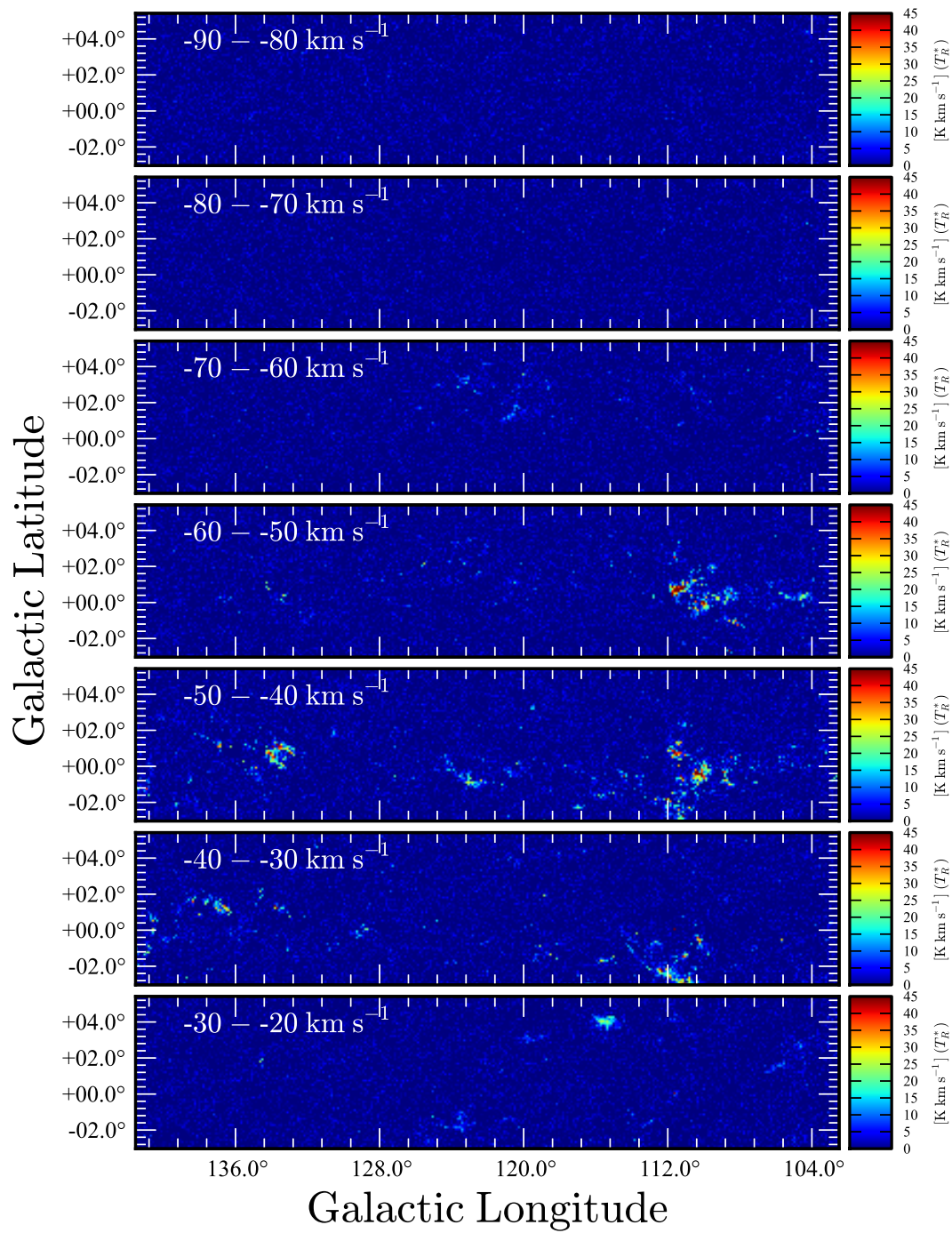


Figure 21: figure 21 の続き

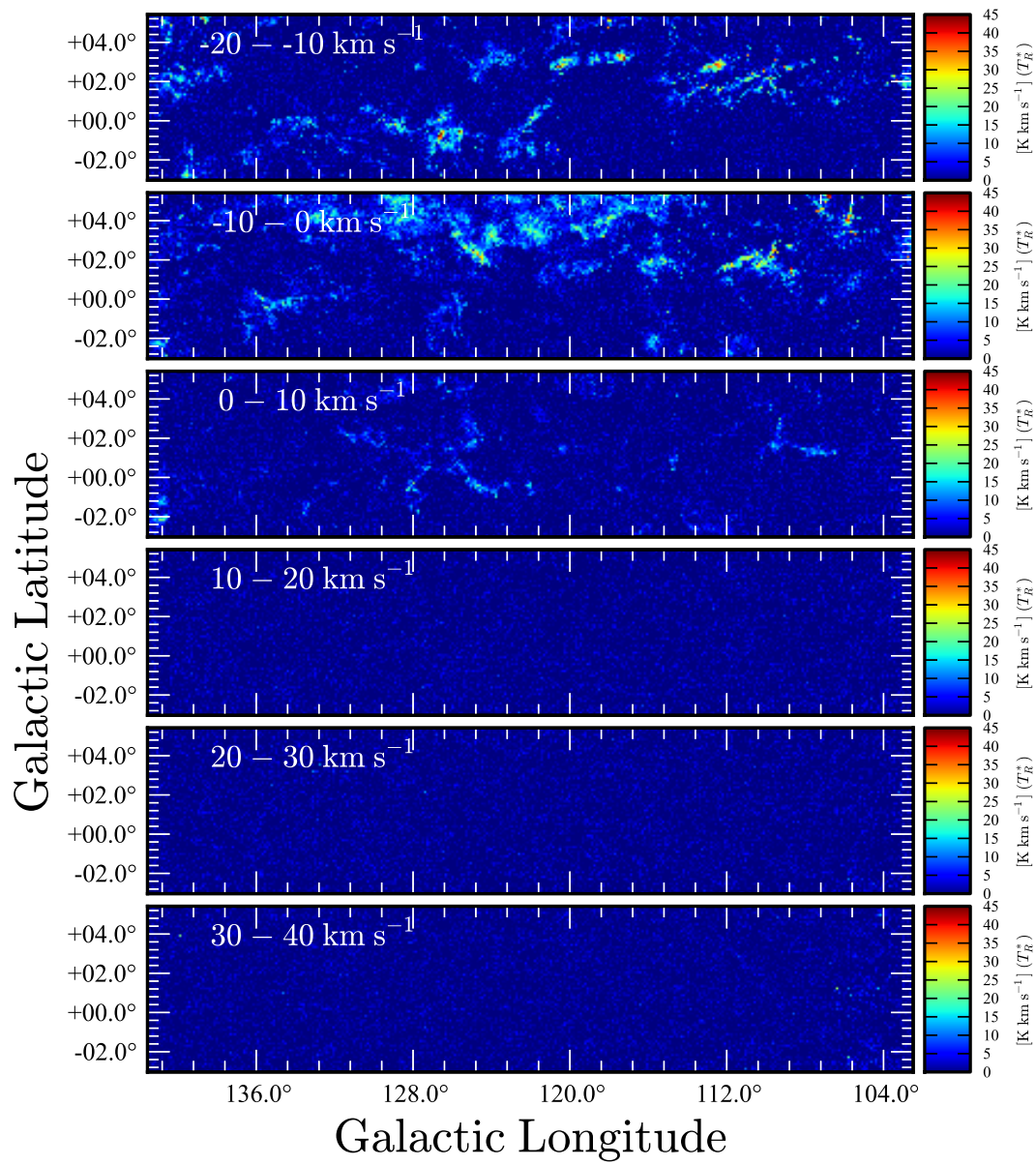


Figure 21: figure 21 の続き

3.1.2 解析

解析に使用する本 FITS データは、最初は銀緯方向 50'' 間隔で分割されている 606 個のデータであるため、VERA 観測データの解析でも使用した AIPS を使用して銀緯方向に結合して、銀経 × 銀緯 × 速度の 3次元キューブデータを作成する必要がある (FITS データの処理法については補遺 B.1 を参照)。この積分マップの FITS ファイルには、座標・グリッド間隔・各 pixel の積分強度値等の情報が格納されているため、それらの読み出し・計算を行うスクリプト (補遺 B.2 を参照) を作成して解析を行った。

スクリプトの内容としては、まず拡張子 ".FITS" を除いた積分強度図の FITS ファイル名と目的天体 (IRAS 01123+6430) の位置座標 $(l, b) = (125.51^\circ, +2.03^\circ)$ を入力する。すると、その位置座標を中心とした $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ の範囲内の積分強度 pixel が抽出され、 $3\sigma_1$ が計算され、その範囲内の画像が出力される。

続いて、出力された画像を確認し、分子雲が見える範囲 (銀経・銀緯) と年周視差から求めた距離を入力する。すると、その範囲内および $3\sigma_1$ 以下の pixel が抽出され、 $3\sigma_2$ の計算が行われる。そして、算出された $3\sigma_2$ 以上の pixel が抽出され、最終的にサイズ $A_{CO}[\text{pc}^2]$ ・光度 $L_{CO}[\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2]$ ・質量 $M_{CO}[M_\odot]$ が導出される。サイズと光度の算出式については以下を参照。

$$A_{CO} = \sum_i s_i = \sum_i (D\theta_i)^2 \quad (19)$$

$$L_{CO} = \left(\sum_i W_{CO,i} \right) \times s \quad (20)$$

($s = D\theta$ は 1 pixel あたりの面積で、 D : は年周視差から求めた距離 [pc]、 θ : は 1 pixel の視直径 [rad] を示す。 W_{CO} は 1 pixel あたりの積分強度を示す。)

使用するスクリプトは "fcrao_anlys_3.py" で、補遺 B.2 で手順とスクリプトを掲載しているので、参照頂きたい。

3.2 付随分子雲 HC5506

IRAS 01123+6430 は、FCRAO Outer Galaxy Survey (Heyer et al. 1998) の一環として、FCRAO 14m ミリ波望遠鏡により $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の観測が行われた。この分子輝線サーベイデータより、 $V_{\text{LSR}} = -57.3 \text{--} -50.0 \text{ km s}^{-1}$ の範囲で、円弧状の構造と直線状の構造を持った分子雲が付随していることが分かった (figure 22)。この分子雲について、サーベイ観測のリストの 5506 番目として掲載されていたことから、HC5506 (Heyer's Cloud 5506) と名付けた。

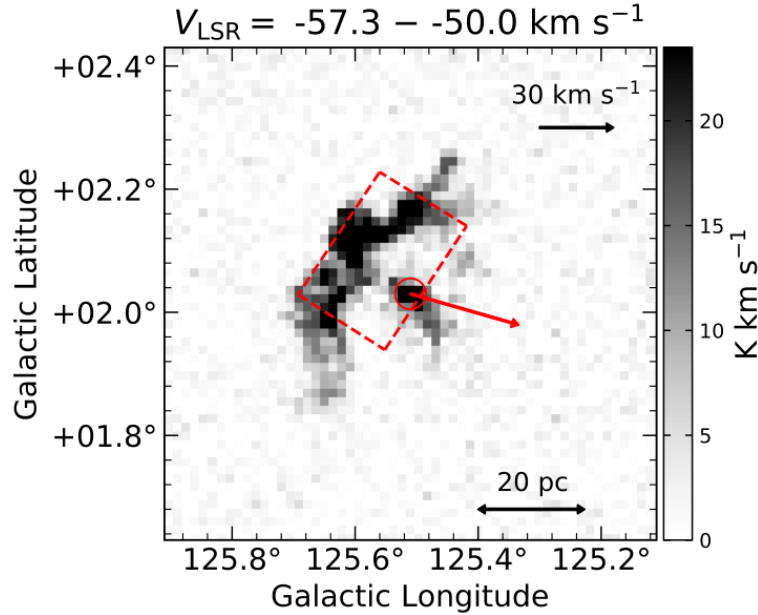


Figure 22: $V_{\text{LSR}} = -57.3 \text{--} -50.0 \text{ km s}^{-1}$ で積分を行った HC5506 の積分マップ。赤い円内に IRAS 01123+6430 が位置しており、赤矢印は IRAS 01123+6430 の固有運動ベクトルを示す。

3.2.1 HC5506 の物理量

HC5506 のサイズは、 $\Delta l \times \Delta b \sim 0.3^\circ \times 0.4^\circ$ で、年周視差測定から計測した IRAS 01123+6430 の距離 6.61 kpc を用いて、 $35 \text{ pc} \times 46 \text{ pc}$ となった。また、HC5506 の光度は $L_{\text{CO}} = 1.1 \times 10^4 \text{ K km s}^{-1} \text{ pc}^2$ となり、Heyer et al. (2001) による光度-質量変換式 $M_{\text{CO}} = 4.1(L_{\text{CO}}/[\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2])$ より、質量は $M_{\text{CO}} = 4.3 \times 10^4 M_\odot$ と算出された。

HC5506 は、円弧状の構造と直線状の構造の 2 つの構造を持った特異な形状をしており、 $V_{\text{LSR}} = -57.3 \text{--} -55.7 \text{ km s}^{-1}$ に直線状の構造が、 $V_{\text{LSR}} = -53.3 \text{--} -50.0 \text{ km s}^{-1}$ に円弧状の構造が見られている (figure 23)。また、IRAS 01123+6430 の位置は figure 22 の赤い円内、つまり直線状成分の北東端に位置している。

figure 22 の赤い長方形部分を切り取り、反時計周りに 35° 回転させ横軸オフセットについて積分して、位置-速度図 (P-V 図) にしたものが figure 24 の右図である。この P-V 図より、円弧状成分と直線状

成分との速度差は 2 km s^{-1} であることが分かり、HC5506 全体の線幅 7 km s^{-1} よりも小さいことが分かった。このことから、円弧状成分と直線状成分は物理的につながっていることが示唆される。

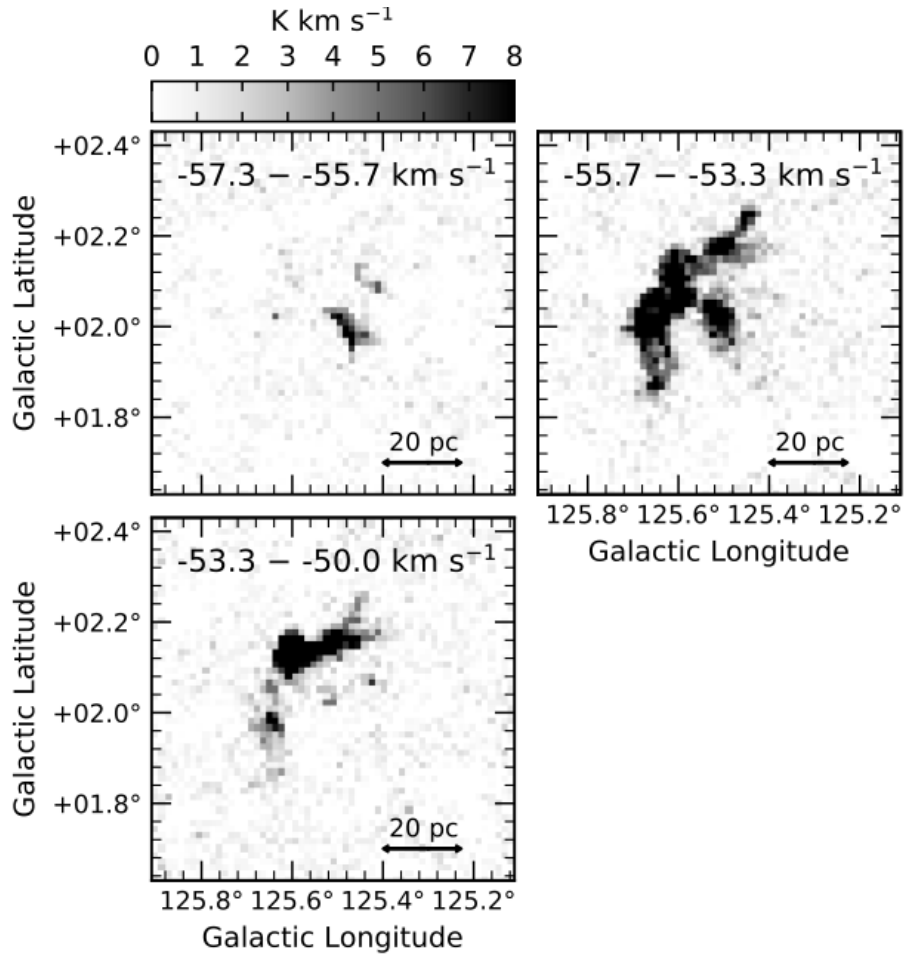


Figure 23: HC5506 のチャンネルマップ。 $V_{\text{LSR}} = -53.3\text{--}50.0 \text{ km s}^{-1}$ に円弧状の構造、 $V_{\text{LSR}} = -57.3\text{--}55.7 \text{ km s}^{-1}$ に直線状の構造、 $V_{\text{LSR}} = -55.7\text{--}53.3 \text{ km s}^{-1}$ に中間の構造が確認される。

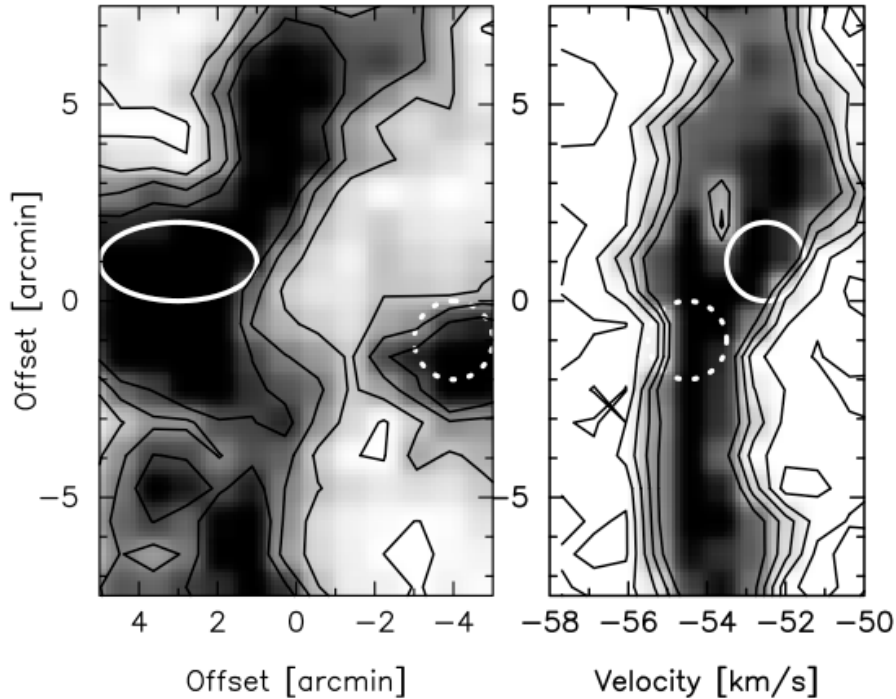


Figure 24: (左) figure 22 の左図の赤い長方形を切り取り 35° 反時計周りに回転した積分マップ。(右) 左図の横軸オフセットの範囲で積分して作成した P-V 図。(白い実線の円は円弧状成分の位置、白い点線の円は直線状成分の位置を示している)

3.2.2 分子雲衝突モデルとの比較

円弧状構造と直線状構造を持った分子雲 HC5506 は、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突の SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションの形状によく似ていることが分かった。分子雲衝突による分子ガスの急激な圧縮は、星を形成するのに、free-fall time よりも早い時間で崩壊を起こすことが知られているため、近年、観測的・理論的な観点から分子雲衝突による大質量星形成の研究がよく行われている (Habe & Ohta 1992; Takahira et al. 2014; Fukui et al. 2014; Haworth et al. 2015; Torii et al. 2015)。

本研究における分子雲の比較研究には、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のシミュレーションを用いた。このシミュレーションでは、静止させた半径 $r \sim 7.2$ pc、密度 $n \sim 25.3 \text{ cm}^{-3}$ の分子雲 Cloud 1 に、半径 $r \sim 3.5$ pc、密度 $n \sim 47.4 \text{ cm}^{-3}$ の分子雲 Cloud 2 (table 12) を右方向に衝突させ、衝突後の分子雲の形状や、生成されるコアの質量の時間変化等の疑似観測が行われている。今回は、北海道大学の羽部朝男教授より提供して頂いたシミュレーションのスナップショットを比較に用いた。また、IRAS 01123+6430 に付随している HC5506 では、左方向に小型分子雲を衝突させたと思われる形状をしているため、シミュレーションのスナップショットについては 180° 傾けて表示している (figure 25)。

IRAS 01123+6430 で検出された HC5506 の CO マップと、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突

Table 12: Takahira et al. (2014) による分子雲衝突シミュレーションで使用された小型分子雲 Cloud 1 と大型分子雲 Cloud 2 のプロフィール

	Cloud 1	Cloud 2
半径 r [pc]	3.5	7.2
質量 M [M_{\odot}]	417	1635
密度 n [cm^{-3}]	47.4	25.3
Free-fall time t_{ff} [Myr]	5.31	7.29

によるシミュレーションの図との比較を行った結果、円弧状の構造が見られたという、両者の類似性から、大質量星形成領域 IRAS 01123+6430 は分子雲衝突によって形成された可能性が高いことが示唆される。

Takahira et al. (2014) は、2つの異なる分子雲同士を 3, 5, 10 km s^{-1} の3つの異なる相対速度で衝突させるシミュレーションを行った (figure 25)。いずれの速度についても、円弧状の構造が見られるが、HC5506 で見られるような直線状の構造が確認できる相対速度は 3 km s^{-1} と 5 km s^{-1} であった (figure 26, 27)。この事から、HC5506 では、3–5 km s^{-1} の相対速度で衝突が起こったと考えられる。

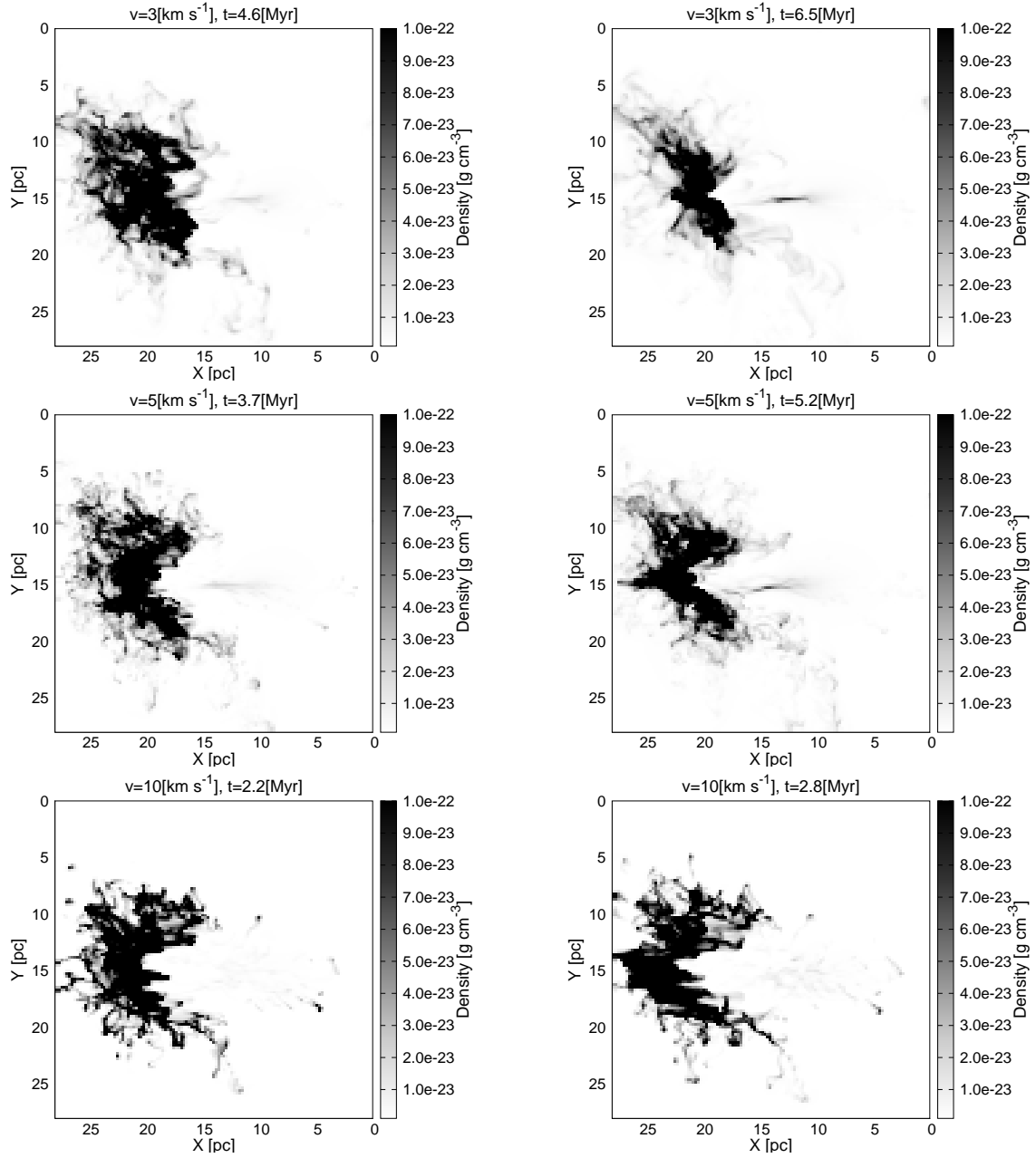


Figure 25: Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のシミュレーション。(1列目左) 経過時間 $t = 4.6$ Myr、相対速度 $v = 3 \text{ km s}^{-1}$ 、(1列目右) 経過時間 $t = 6.5$ Myr、相対速度 $v = 3 \text{ km s}^{-1}$ 、(2列目左) 経過時間 $t = 3.7$ Myr、相対速度 $v = 5 \text{ km s}^{-1}$ 、(2列目右) 経過時間 $t = 5.2$ Myr、相対速度 $v = 5 \text{ km s}^{-1}$ 、(3列目左) 経過時間 $t = 2.2$ Myr、相対速度 $v = 10 \text{ km s}^{-1}$ 、(3列目右) 経過時間 $t = 2.8$ Myr、相対速度 $v = 10 \text{ km s}^{-1}$

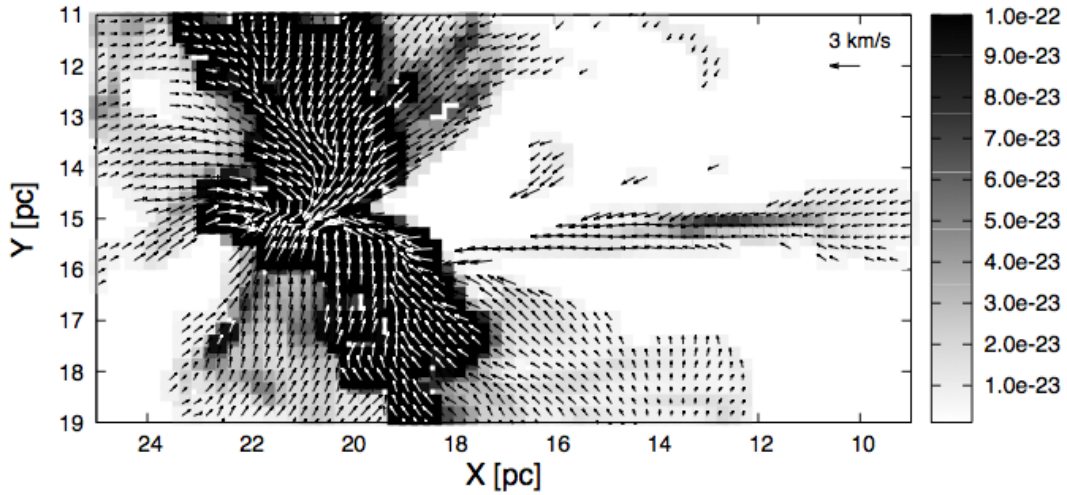


Figure 26: Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のシミュレーションの拡大図（経過時間 $t = 6.5 \text{ Myr}$ 、相対速度 $v = 3 \text{ km s}^{-1}$ ）。矢印は各ピクセルの速度場ベクトルを示す。

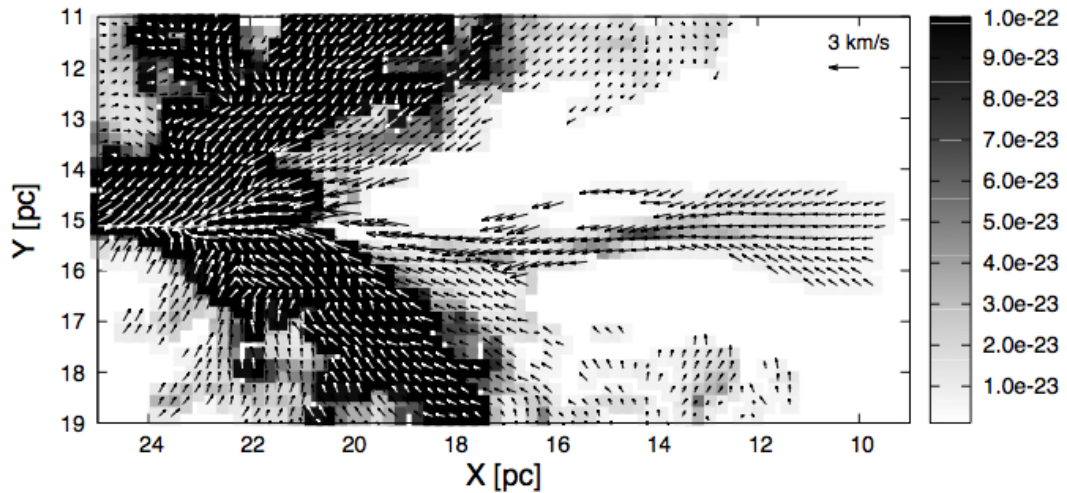


Figure 27: Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のシミュレーションの拡大図（経過時間 $t = 5.2 \text{ Myr}$ 、相対速度 $v = 5 \text{ km s}^{-1}$ ）。矢印は各ピクセルの速度場ベクトルを示す。

3.2.3 大質量星形成のシナリオ

IRAS 01123+6430 は figure 22 の左図の赤い円内、つまり、直線状成分の先端に位置している。この直線状成分は、小型の分子雲が通過した後に残った分子ガスが自己重力で圧縮・形成された痕跡であると考えられる。

HC5506 において、円弧状成分と直線状成分との間隔は $7'$ で、年周視差から計測した距離 6.61 kpc から計算すると、 13.5 pc となる。この2成分の間隔と、Takahira et al. (2014) の分子雲衝突モデルにおける相対速度 $3\text{--}5 \text{ km s}^{-1}$ から、2つの分子雲が $2.6\text{--}4.4 \text{ Myr}$ 前に衝突を起こしたと考えられる。この Myr 単位のタイムスケールは、大質量星形成のタイムスケールと一致する。

2.5.2 節の IRAS 01123+6430 の内部運動 (figure 17) から分かるように、feature 4 は南西方向を向き、視線速度 $V_{\text{LSR}} = -54.7 \text{ km s}^{-1}$ に対して blue-shift を示し、それに対して feature 1 は北西方向を向き、視線速度に対して red-shift を示している。また、feature 6 は HC5506 における直線状成分に沿った方向を示しており、直線状成分の方向の衝突軸に沿って2つの分子雲が衝突し、大質量 YSO が形成されたというシナリオと一致する。

以上の結果より、大質量星形成領域 IRAS 01123+6430 は、 $3\text{--}5 \text{ km s}^{-1}$ の遅い相対速度の分子雲衝突により形成された可能性が高く、 $3\text{--}5 \text{ km s}^{-1}$ の相対速度についても、分子雲のコア質量の増加を促す傾向にあることから、大質量星を形成するのに有利な速度であると提言されている (Takahira et al. 2014)。銀河系外縁部は内縁部と比較して差動回転が小さいため、分子雲の速度分散も小さく、遅い相対速度の分子雲衝突が起こっていると考えられる。IRAS 01123+6430 は銀河系外縁部に位置しており、我々の研究結果は、銀河系外縁部では遅い相対速度の分子雲衝突が大質量星形成に重要であることを裏付けている。

3.3 3章まとめ

第3章では、第2章で扱った IRAS 01123+6430 について、CO 輝線観測の観点から調査・議論を行った。

今回、FCRAO による $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線サーベイデータを用いて、IRAS 01123+6430 に付随する分子雲が検出されるかどうかを目的として調査を行った。その結果、円弧状の構造と直線状の構造を持った分子雲が付随していることが分かり、2章において年周視差測定から求めた距離 6.61 kpc から、サイズ $35 \text{ pc} \times 46 \text{ pc}$ 、質量 $4.3 \times 10^4 M_{\odot}$ の分子雲であることが分かった。さらに、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のモデルとの比較から、分子雲衝突の可能性が示唆された。

また、円弧状の構造と同時に確認された直線状の構造については、Takahira et al. (2014) のシミュレーションにおいて、遅い相対速度の衝突によって生じているということが分かった。さらに、Takahira et al. (2014) によると、 $3\text{--}5 \text{ km s}^{-1}$ の遅い相対速度の分子雲衝突が大質量星形成に有利であることがシミュレーションで示されており、今回、IRAS 01123+6430 では、遅い相対速度の分子雲衝突によって大質量星形成が起こったと考えられる。このことは、差動回転の小さい銀河系外縁部において遅い相対速度の分子雲衝突が起こっているという可能性と矛盾しない。

4 WB886 の年周視差計測

前章まで、IRAS01123+6430 に円弧状の構造を持った分子雲が検出され、分子雲衝突の兆候を示していることが分かった。このことに伴い、その他の銀河系外縁部天体でも似たような兆候を示しているのではないかと考え、大質量星形成領域 WB886 に着目した。まず、IRAS 01123+6430 と同様、VLBI 観測の観点から述べる。

4.1 WB886 (IRAS06446+0029)

WB886 (IRAS06446+0029) は、銀河系第 3 象限 (銀河座標: $l = 212.06^\circ$, $b = -0.74^\circ$) に位置する銀河系外縁部大質量星形成領域で、OH メーザー、 H_2O メーザー、 CH_3OH メーザーを放射する ultra-compact HII 領域である (Slysh et al. 1997; Brand et al. 1994; Migenes et al. 1999; Xu et al. 2008; Bronfman et al. 1996; Wouterloot et al. 1993) (figure 28)。赤外天文衛星 IRAS では赤道座標 (α, δ) = ($6^{\text{h}}47^{\text{m}}13.3^{\text{s}}$, $+0^\circ26'5.92''$) (J2000) の位置に観測されている。過去には、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線が視線速度 $V_{\text{LSR}} = 44.3 \text{ km s}^{-1}$ に検出され、運動学的距離は $d = 6.01 \text{ kpc}$ と求められている (Wouterloot & Brand 1989)。Nancay radio telescope による OH メーザーの偏波観測では、1667MHz では非検出だったが、1665MHz では $V_{\text{LSR}} = 48.65 \text{ km s}^{-1}$ の速度に 4.76 Jy の強度で検出された (Slysh et al. 1997)。また、Effersberg-100m telescope による CH_3OH メーザー観測では、速度 $V_{\text{LSR}} = 48.6 \text{ km s}^{-1}$ 、強度 1.6 Jy のピークを含め、速度幅 $\sim 7 \text{ km s}^{-1}$ にわたって 5 つの速度成分のピークが検出された (Xu et al. 2008)。また、AGB 星で観測される SiO メーザー (Harju et al. 1998) と回転温度の導出に必要な NH_3 輝線 (Sunada et al. 2007; Wu et al. 2006) については非検出であった。また、Nordic Optical Telescope によるこの天体に付随する shell-like feature の観測にて、 $\text{H}\alpha$ 線と $\text{H}\beta$ 線のピークが検出された (Negueruela et al. 2015)。

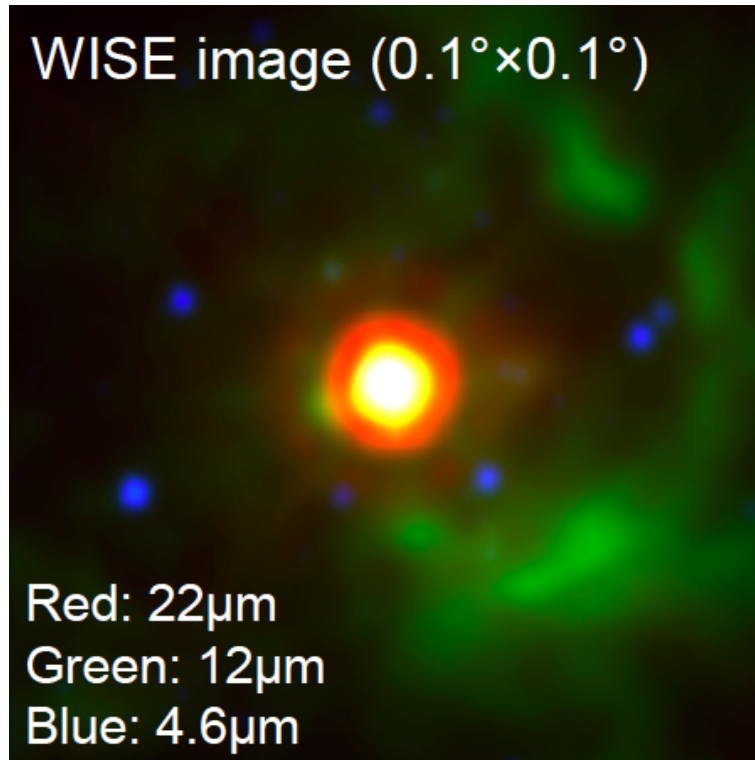


Figure 28: WB886 の三色合成図。SkyView (<https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/cgi/titlepage.pl>) よりダウンロードした WISE による 22μm、12μm、4.6μm の赤外線 FITS データを ds9 により三色合成をしたもの。

4.2 観測

IRAS 01123+6430 と同様、WB886 (IRAS06446+0029) についても、VERA による VLBI 観測データを使用した。WB886 の観測については、2015 年 9 月 11 日～2017 年 9 月 26 日の期間に行われ、2-beam 相対観測により、目的天体 WB886 が A-beam で、離角 0.59° 離れた参照電波源 J0649+00 (figure 29) が B-beam により同時観測された (table 13)。また、バンドパス補正に使用する clock calibrator については、3C84 (r16093a, 16133a, r16313b, r17004a)、DA55 (r17091a)、OJ287 (r17091a) (table 14) が観測された。

この観測から計 12epoch 得られたが、解析および年周視差測定に使用できたものは 5epoch のみだった (table 15)。解析に使用した 5epoch のクロスパワースペクトルについては figure 30 に示している。

解析に使用できなかった 7epoch については、内 6epoch は、位相補償が成功しなかったものや、クロスパワースペクトルでピークが非検出で、内 1epoch (r17068a) は、石垣局にて観測エラーが発生したため、データが削除されていた。その要因に関しては、次のページに掲載している。

Table 13: WB886 の観測プロフィール

観測期間	2015.9.11–2017.9.26
epoch 数	5/12
赤道座標 (RA, Dec)	(6 ^h 47 ^m 13.3 ^s , +0°26′5.92″)
銀河座標 (<i>l</i> , <i>b</i>)	(212.06°, −0.74°)
参照電波源	J0649+00
参照電波源座標 (RA, Dec)	(6 ^h 49 ^m 16.3 ^s , +0°8′56.1″)
参照電波源との離角	0.59°

- r15254a: 入来局が台風被害のため観測不参加。(AOC report of r15254a より)
 - 参照電波源のイメージングが出来ず、位相補償に失敗。
- r15343b: 16時56分59秒、水沢局にてエラー発生。また、当時石垣局では雨が降っており、風邪も強かった。(AOC report of r15343b より)
 - クロスパワースペクトル上でピークは見たものの、石垣局との相関は無く、スポット非検出。
- r16031a: クロスパワースペクトル上でピーク非検出。
- r16230b: 観測前に小笠原局にてエラーが頻発。また、23時37~39分に入来局にてエラーが発生し、0時0分、入来局のみ観測中断 (AOC report of r16230b より)
- r16253c: クロスパワースペクトル上でピーク非検出。
- r17068a: 8時25分、石垣局にてエラー発生、スキャン1~6まで観測できず。(AOC report of r17068a より)
 - A-beam、B-beam 共に FITS データ無し。
- r17144a: 6時00分、石垣局にてエラー発生、アンテナとスケジュールが停止。(AOC report of r17144a より)
 - クロスパワースペクトル上でも、ピーク非検出。

Table 14: WB886 の clock calibrator 一覧。

Source	Date	(R.A., Decl.)	Timerange
3C84	2016/04/02	$(3^{\text{h}}19^{\text{m}}48.2^{\text{s}}, +41^{\circ}30'42.1'')$	0/05:31:30 – 0/05:36:29
			0/06:47:30 – 0/06:52:29
			0/08:10:31 – 0/08:15:30
			0/09:33:31 – 0/09:38:30
			0/10:56:31 – 0/11:01:30
DA55	2017/04/01	$(1^{\text{h}}36^{\text{m}}58.6^{\text{s}}, +47^{\circ}51'29.1'')$	0/05:41:31 – 0/05:46:30
			0/06:57:31 – 0/07:02:29
OJ287	2017/04/01	$(8^{\text{h}}54^{\text{m}}48.9^{\text{s}}, +20^{\circ}06'30.6'')$	0/08:20:31 – 0/08:25:30
			0/09:43:31 – 0/09:48:30
			0/11:06:31 – 0/11:11:30

Table 15: WB886 の全 epoch 観測のまとめ。DOY は 2016 年以降の日数、 T_{sys} は VERA のデータベース DIVA (<http://diva.miz.nao.ac.jp/veradb/>) 上の雑音温度の値、合成ビームのサイズと PA、 N_{spot} は 1epoch におけるメーザースポット数を示す。

Epoch	Date	DOY [days]	T_{sys} [K]				Synthesized beam [mas × mas]	PA [deg]	N_{spot}
			MIZ	IRK	OGA	ISG			
r17091a	2017 APR 01	456	129.5	151.5	300.8	160.4	2.50×0.90	-47	6
r17004a	2017 JAN 04	369	116.2	140.1	147	244.1	1.45×0.87	-43	7
r16313b	2016 NOV 08	313	135.1	169.9	193.1	869.2	1.50×1.03	-66	4
r16133a	2016 MAY 12	133	173.8	166.1	238.9	321	1.84×0.89	-43	6
r16093a	2016 APR 02	93	167.6	186.3	166.7	217.8	1.51×0.82	-43	8

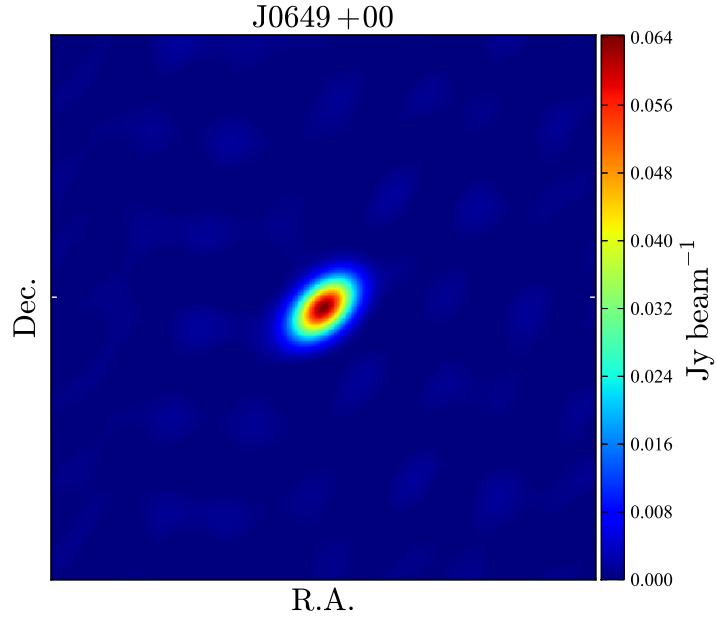


Figure 29: WB886 の参照電波源 J0649+00 の画像。Epoch は r16093a、画像サイズは 7.2 mas × 7.2 mas、S/N 比は 27.6 (Peak = 6.43×10^{-2} Jy beam⁻¹, r.m.s = 2.33×10^{-3} Jy beam⁻¹)。

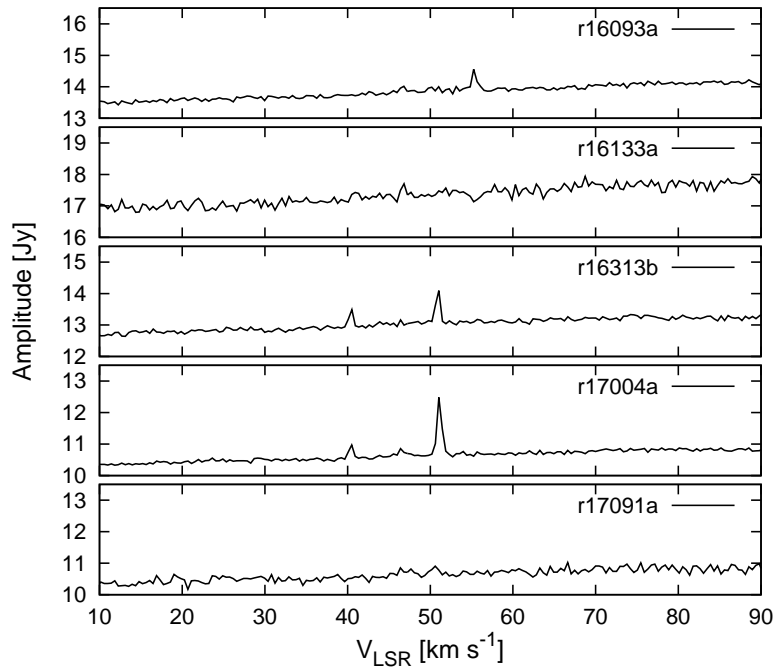


Figure 30: WB886 の 5epoch のクロスパワースペクトル

4.3 解析

WB886 の解析については、IRAS 01123+6430 と同様の手順で AIPS を用いて解析を行い、5epoch のデータ (figure 30) についてメーザースポットを得ることができた。しかし、この WB886 は、赤緯 0° 付近に位置する天体であったため、天体の位置・アンテナの位置の時間変化によって決まる (u, v) の軌跡が南北方向をカバーできず、検出されたメーザースポットは赤緯方向にサイドローブが広がるという結果になり (figure 31 左)、スポットの同定が困難となった。

そこで、国立天文台のサーバ上の、VLBI 観測データを半自動的に解析することのできるシステム “VEDA (VERA Data Analyzer)” を使用し、WB886 のスポットの同定を行った。そして、その結果に基づいて、AIPS 上の解析で得られたマップ上でスポットの同定を行い、CLEAN をかけてサイドローブの除去を行い (figure 31 右)、メーザースポットのリストを得ることができた。メーザースポットの全リストについては table 16 に掲載している。

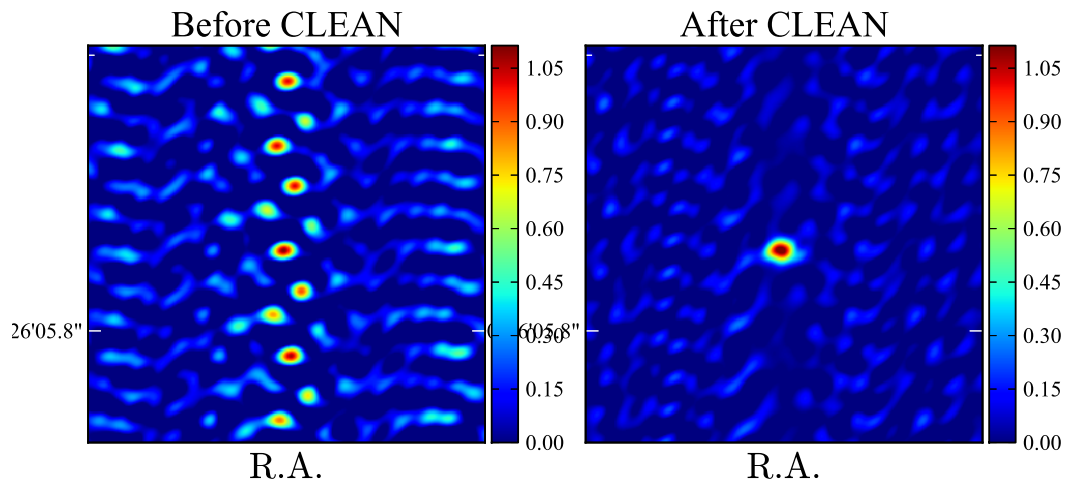


Figure 31: WB886 のメーザースポットの図 (epoch: r16093a、画像サイズ: $14.4 \text{ mas} \times 14.4 \text{ mas}$)。 (左) CLEAN 前 (右) CLEAN 後

Table 16: WB886 の H₂O メーザー スポット リスト

DOY	ID	Feat	Intensity	Offset		CH	V _{LSR}
				R.A.	Decl.		
			Jy beam ⁻¹	mas	mas	km s ⁻¹	
93	1	1	1.879	0.009	-124.491	229	55.7
93	2	1	3.424	0.014	-124.5	230	55.2
93	3		1.178	0.042	-124.609	231	54.8
93	4		0.555	0.064	-124.656	232	54.4
93	5	2	0.546	9.253	-123.856	240	51
93	6	2	0.546	9.17	-123.939	241	50.6
93	7	3	0.659	69.271	-122.175	250	46.8
93	8	3	1.220	69.166	-122.227	251	46.4
133	9	1	0.903	-0.076	-124.31	229	55.7
133	10	1	1.246	0.036	-124.384	230	55.2
133	11		0.485	11.116	-126.101	240	51
133	12		0.675	16.934	-123.444	241	50.6
133	13	3	0.683	69.158	-122.199	250	46.8
133	14	3	2.610	69.001	-122.067	251	46.4
313	15	2	4.276	9.63	-123.99	240	51
313	16	2	3.254	9.631	-123.975	241	50.6
313	17	3	0.630	69.64	-121.956	250	46.8
313	18	3	1.587	69.214	-122.265	251	46.4
369	19		0.589	9.527	-124.227	238	51.9
369	20	2	2.695	9.377	-124.006	239	51.5
369	21	2	3.934	9.401	-123.941	240	51
369	22	2	1.788	9.376	-123.877	241	50.6
369	23	3	0.509	9.838	-123.662	242	50.2
369	24	3	0.515	69.054	-122.032	250	46.8
369	25		0.835	68.904	-122.043	251	46.4
456	26	2	0.483	9.782	-124.097	239	51.5
456	27	2	1.370	10.069	-124.317	240	51
456	28	2	1.451	9.993	-124.126	241	50.6
456	29		1.144	9.301	-123.033	242	50.2
456	30	3	0.842	68.448	-121.815	250	46.8
456	31	3	2.120	68.565	-121.874	251	46.4

4.4 結果・議論

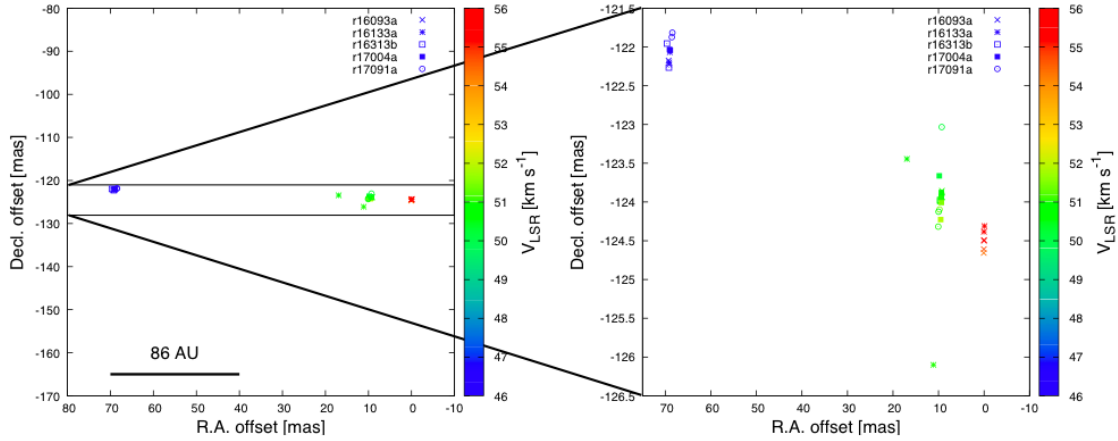


Figure 32: WB886 のメーザースポットの分布図

検出されたメーザースポットの分布については figure 32 のようになっており、 $V_{\text{LSR}} = 50.2\text{--}51.9 \text{ km s}^{-1}$ のスポット群 feature 2 に対して、red-shift の $V_{\text{LSR}} = 54.4\text{--}55.7 \text{ km s}^{-1}$ の feature 1 が南西に、blue-shift の $V_{\text{LSR}} = 46.4\text{--}46.8 \text{ km s}^{-1}$ の feature 3 が北東に分布する形となっていることが分かった。Slysh et al. (1999) では、 H_2O メーザーの red-shift 成分と blue-shift 成分の対極的分布が bipolar outflow を示唆するものであるという研究結果が得られており、WB886 についても、中間の速度成分に対して red-shift 成分と blue-shift 成分が対極的に分布したアウトフローの構造を示していたため、同様の構造ではないかと考えられる。

そのことを検証するために、メーザースポットの分布のサイズについて着目してみる。2章で議論した、IRAS 01123+6430 についてはスケールが $\sim 30 \text{ AU}$ と小規模なものだったが、それに対して WB886 で見られたスポット分布のスケールについては、 $\sim 170 \text{ AU}$ となっており、bipolar outflow の典型的なスケールである、 $> 100 \text{ AU}$ (Bacciotti et al. 2018; Booth et al. 2018; Burns et al. 2016; Honma et al. 2005; Macías et al. 2018; Zapata et al. 2018; Zinchenko et al. 2018) を満たしていることが分かった。

4.4.1 年周視差計測

WB886 のメーザースポットの feature については、全 3 features 検出されたが、少ない誤差でフィッティングできたものは feature 3 ($V_{\text{LSR}} = 46.4\text{--}46.8 \text{ km s}^{-1}$) の一つの feature のみで、この feature 3 のみの年周視差から距離を測定した (figure 34)。結果として、年周視差は $\varpi = 0.349 \pm 0.052 \text{ mas}$ 、年周視差の逆数を取り、太陽系からの距離は $D = 2.86^{+0.50}_{-0.37} \text{ kpc}$ となった。年周視差フィッティングについては、松尾光洋氏 (鹿児島大学) による年周視差フィッティングのスク립トを用いて導出を行った。また系の固有運動については、feature 3 から求めた年周視差を用いて、最小二乗法により他の feature 1, 2 について固有運動を求めた上で系の固有運動を求めた。これより系の固有運動については $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (-0.38 \pm 0.41, 0.29 \pm 0.21) \text{ mas yr}^{-1}$ となり、銀河座標での固有運動に変換すると、 $(\mu_l \cos b, \mu_b) = (-0.43 \pm 0.00, -0.21 \pm 0.46) \text{ mas yr}^{-1}$ 、 $[\text{km s}^{-1}]$ 単位に変換した結果、銀経成分は $v_l = D\mu_l \cos b = -5.8 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}$ 、銀緯成分は $v_b = D\mu_b = -2.8 \pm 6.3 \text{ km s}^{-1}$ となった。

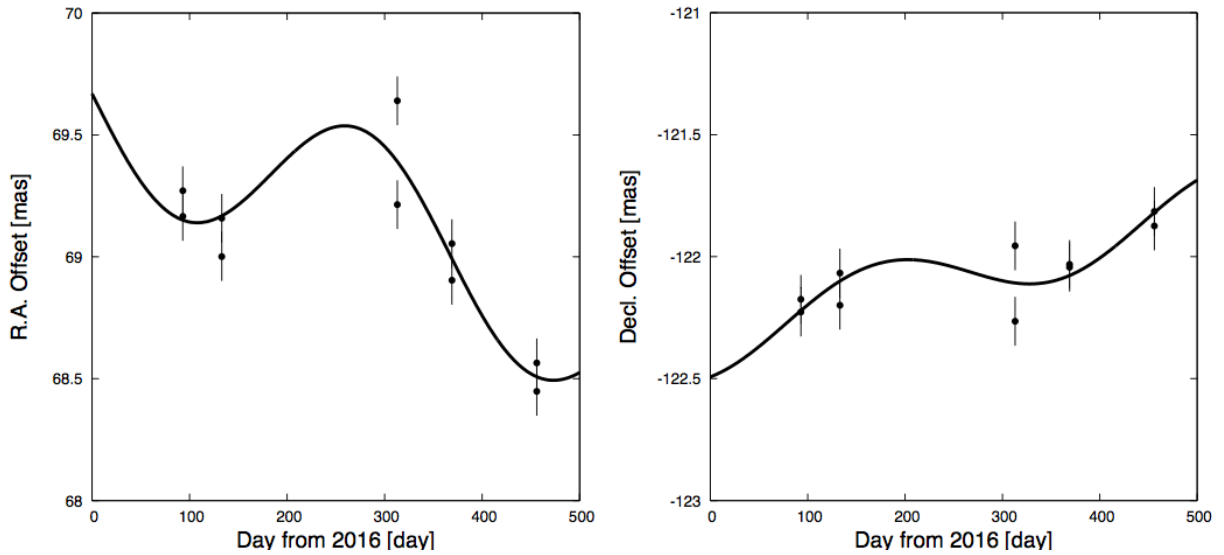


Figure 33: WB886 のメーザースポットの運動の RA 方向の時間変化 (左)、Decl 方向の時間変化 (右)

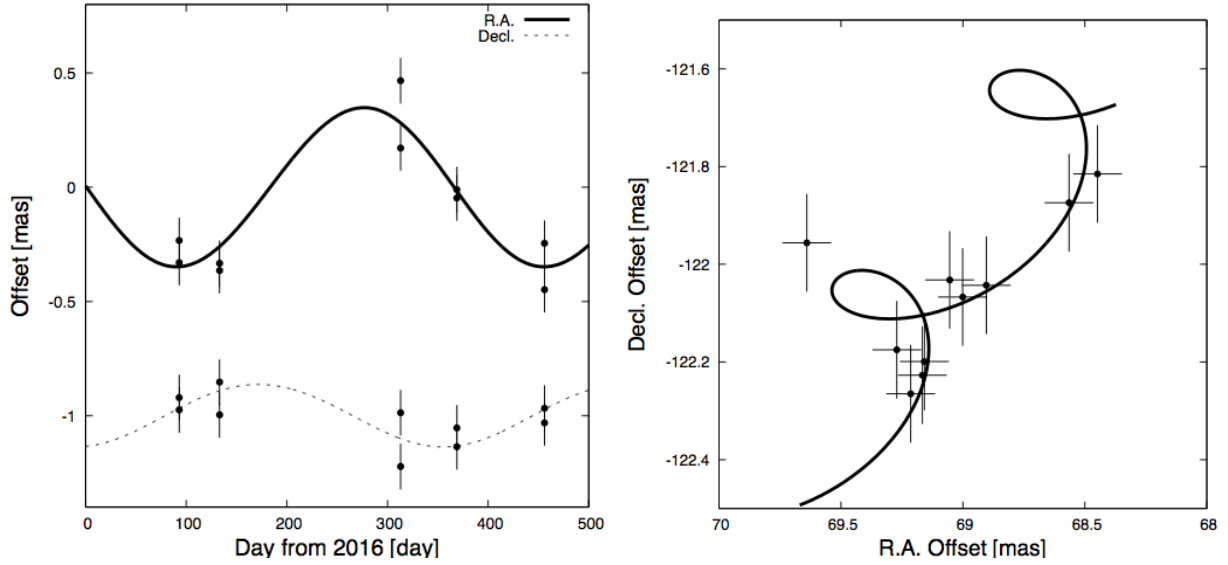


Figure 34: 固有運動の成分を差引いた年周視差のプロット (左)、天球面上の運動のプロット (右)

4.4.2 YSO のスペクトル型

次に、2章で扱った IRAS 01123+6430 と同様に、年周視差測定から得られた距離を用いて YSO のスペクトル型の導出を行った。Helou & Walker (1988) によると、WB886 の赤外線フラックス密度は $f_{12\mu\text{m}} = 4.24 \text{ Jy}$ 、 $f_{25\mu\text{m}} = 50.1 \text{ Jy}$ 、 $f_{60\mu\text{m}} = 2.36 \times 10^2 \text{ Jy}$ 、 $f_{100\mu\text{m}} = 2.82 \times 10^2 \text{ Jy}$ となっており、これらの値と年周視差測定から得られた距離 $D = 2.86^{+0.50}_{-0.37} \text{ kpc}$ を用いて、bolometric luminosity を $(5.28 \pm 2.01) \times 10^3 L_{\odot}$ と見積もることができた。そして、この YSO の光度からスペクトル型は B0.5–B1 となった (Panagia 1973)。このスペクトル型についても IRAS 01123+6430 と同じく、B3 より早期型の中心星であるため、強い UV 放射によって周囲のガスを電離し HII 領域を生成する大質量星であることが示唆される。

4.4.3 銀河系内における運動について

Honma et al. (2012) の銀河中心距離 $R_0 = 8.05 \pm 0.45 \text{ kpc}$ 、WB886 の銀河座標 $(l, b) = (212.06^{\circ}, -0.74^{\circ})$ 、年周視差測定から得られた距離 $D = 2.86^{+0.50}_{-0.37} \text{ kpc}$ を用いて、銀河中心距離は $R = 10.58 \pm 0.64 \text{ kpc}$ と計測された。また、視線速度 $V_{\text{LSR}} = 44.3 \text{ km s}^{-1}$ (Wouterloot & Brand 1989) を、太陽の 3次元運動 $(U_{\odot}^{\text{Std}}, V_{\odot}^{\text{Std}}, W_{\odot}^{\text{Std}}) = (10.3, 15.3, 7.7) \text{ km s}^{-1}$ (Kerr & Lynden-Bell 1986) を用いて heliocentric velocity に変換して、 $V_{\text{Helio}} = 61.2 \text{ km s}^{-1}$ となる。この heliocentric velocity V_{Helio} と、銀河座標に変換した固有運動 (v_l, v_b) 、銀河定数 $(R_0, V_0) = (8.05 \pm 0.45 \text{ kpc}, 238 \pm 14 \text{ km s}^{-1})$ (Honma et al. 2012) を用いて、3次元運動 $(U, V, W) = (-45.0 \pm 0.55, 222 \pm 14, 3.6 \pm 6.3) \text{ km s}^{-1}$ と算出された。この3次元運動を円柱座標に変換し、 $(V_{R_{\text{in}}}, V_{\theta}, V_z) = (-12.6 \pm 2.6, 227 \pm 14, 3.6 \pm 6.3) \text{ km s}^{-1}$ と求

めることができた。その他の銀河定数を用いて銀河中心距離と 3 次元運動を導出した結果については、table 17 に掲載している。

また、1.7 節における質量分布の式 (9) に、 $(R, V_{\text{rot}}) = (10.58 \text{ kpc}, 227 \text{ km s}^{-1})$ を代入すると、

$$M_r \sim 2.3 \times 10^5 \left(\frac{10.58}{\text{kpc}} \right) \left(\frac{227}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 M_{\odot} \sim 1.3 \times 10^{11} M_{\odot} \quad (21)$$

となり、WB886 の位置までの銀河系の質量分布が $1.3 \times 10^{11} M_{\odot}$ であることが分かる。

Table 17: Honma et al. (2012)、Kerr & Lynden-Bell (1986)、Reid et al. (2014) のそれぞれの銀河定数を用いて計算した銀河中心距離と 3 次元運動

R_0 [kpc]	V_0 [km s ⁻¹]	R [kpc]	$V_{R_{\text{in}}}$ [km s ⁻¹]	V_{θ} [km s ⁻¹]	V_z [km s ⁻¹]	Reference
8.05 ± 0.45	238 ± 14	10.58 ± 0.64	-12.6 ± 2.6	227 ± 14	3.6 ± 6.3	Honma et al. (2012)
8.5	220	11.0 ± 0.5	-16.4 ± 0.7	209 ± 1	3.6 ± 6.3	Kerr & Lynden-Bell (1986)
8.34 ± 0.16	240 ± 8	10.87 ± 0.48	-13.2 ± 1.7	229 ± 8	3.6 ± 6.3	Reid et al. (2014)

4.5 4章まとめ

第 4 章では、銀河系外縁部天体 WB886 について、VERA による観測データを用いた位置天文の観点から調査を行った。

今回、VERA による WB886 の VLBI 観測データの解析を行ったところ、メーザースポットは検出されたものの、赤緯が 0° 付近にある天体であったため、赤緯方向にメーザースポットのサイドローブが広がり、スポットの検出が困難であった。そこで、VEDA による自動解析の結果と比較を行い、スポットの位置の同定を行うことで、H₂O メーザの分布を導出することができた。このメーザの分布については、blue-shift 成分のスポット群と red-shift 成分のスポット群が対極的な位置関係にあり、bipolar outflow の典型的なスケールである、> 100 AU を満たしていることが分かり、改めて bipolar outflow を示唆していると考えられた。

また、年周視差測定については、feature 3 のみしかフィッティングすることができなかつたため、1 つの feature から求めた年周視差から距離を 2.86 kpc と算出した。そして、この距離を用いて、WB886 が含有する YSO のスペクトル型について調査を行ったところ、B0.5–B1 となり、IRAS 01123+6430 が含有する YSO と同じく、B3 より早期型の YSO であることが分かった。

5 WB886 の付随分子雲

WB886 の VLBI 観測データの結果から、年周視差測定により距離を得ることができた。4 章の前置きでも話したように、本章では、WB886 に付随する分子雲について調査を行い、4 章で得られた距離を用いて、分子雲の物理量を導出し、考察を行う。

5.1 FUGIN

WB886 に付随する分子雲の観測にあたって使用したものは、野辺山 45m 望遠鏡 (figure 35) によって観測・取得された、FUGIN (**F**OREST **U**nbiased **G**alactic plane **I**maging survey with **N**obeyama 45m telescope) による CO 輝線サーベイデータである。FUGIN とは、高感度・広帯域の受信機 FOREST (**F**Our-beam **R**Eceiver **S**ystem on the 45-m **T**elescope) (figure 36) を搭載した野辺山 45m 望遠鏡による、銀河面レガシーサーベイプロジェクトのことで、2014 年 3 月より計画が開始された。この CO 輝線サーベイの特徴として、望遠鏡に搭載されている FOREST による 16 もの複数の分光計 (table 36) により、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ (115 GHz), $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ (110.2 GHz), $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ (109.8 GHz) の 3 輝線同時観測を行うことが可能で、この多波長同時観測によって、銀河系内における様々な分子ガスの性質を調査することが可能である (Umemoto et al. 2017)。

Table 18: FOREST は 4 beam を搭載しており、1 beam につき ^{12}CO , ^{13}CO , $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 3 輝線 (^{13}CO , C^{18}O は同時観測) と 2 偏波 (H, V) を受信可能で、計 16 アレイで受信を行う。

1-beam	A01	^{12}CO , H	A02	^{13}CO , C^{18}O , H	A03	^{12}CO , V	A04	^{13}CO , C^{18}O , V
2-beam	A05	^{12}CO , H	A06	^{13}CO , C^{18}O , H	A07	^{12}CO , V	A08	^{13}CO , C^{18}O , V
3-beam	A09	^{12}CO , H	A10	^{13}CO , C^{18}O , H	A11	^{12}CO , V	A12	^{13}CO , C^{18}O , V
4-beam	A13	^{12}CO , H	A14	^{13}CO , C^{18}O , H	A15	^{12}CO , V	A16	^{13}CO , C^{18}O , V

FUGIN プロジェクトを通じて、原子ガスから分子ガスへの変遷、分子雲と高密度ガスの形成、星形成領域と星間ガスとの相互作用等の情報が得られることが期待されるため、このプロジェクトは、銀河系における星間ガスの進化過程を研究する上で非常に重要なプロジェクトである。また、 ^{12}CO , ^{13}CO , $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ の 3 輝線同時観測という多波長観測により、銀河面上における様々な分子ガスの物理的状態を可視化することが可能である。

しかし 2017 年 3 月に、アンテナの駆動部分が故障していることが発覚し、2017 年 4 月をもって FUGIN プロジェクトは終了することとなった。そのため、2017 年 4 月まで観測で取得できたデータのみを今回使用した。



Figure 35: 野辺山 45m 望遠鏡 (@長野県南佐久郡南牧村、2016 年 12 月 21 日筆者撮影)



Figure 36: 野辺山 45m 鏡に搭載されている受信機 FOREST (2016 年 5 月 20 日筆者撮影)

5.1.1 観測

FUGIN プロジェクトでは、ビームサイズ $14''$ 、空間分解能 $20''$ 、速度分解能 1.3 km s^{-1} で、Inner Galaxy (銀河系第 1 象限、 $0^\circ \leq l \leq 50^\circ$ 、 $|b| \leq \pm 1^\circ$ 、 80 deg^2) と Outer Galaxy (銀河系第 3 象限、 $198^\circ \leq l \leq 236^\circ$ 、 $|b| \leq \pm 1^\circ$ 、 76 deg^2) の OTF (On-The-Fly) 観測 (Sawada et al. 2008) が行われた。サーベイ観測については、各観測スケジュールに分けて、 $1^\circ \times 1^\circ$ の領域について X スキャン (水平方向のスキャン) と Y スキャン (垂直方向のスキャン) を行うことで観測を行った。そして、2017 年 4 月のプロジェクト終了まで得られた $1^\circ \times 1^\circ$ 領域をつなぎ合わせる形で、銀河面サーベイのアーカイブデータとして保存・公開され、本研究では、WB886 が含まれる第 3 象限の $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線サーベイデータを使用した。

Table 19: FUGIN $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線サーベイのプロファイル

観測期間	2014 March–2017 April
観測輝線 (観測周波数)	$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ (115 GHz)
観測領域 (銀経)	$198^\circ\text{--}236^\circ$
〃 (銀緯)	$-1^\circ\text{--}+1^\circ$
空間分解能	$20''$
速度分解能	1.3 km s^{-1}

また、筆者自身も FUGIN プロジェクトに 2016 年 5 月より新規加入し、2016 年 5 月 18~28 日、2016 年 12 月 17 日~2017 年 1 月 3 日、2017 年 3 月 16~19 日の 3 シーズンにわたって観測を行った。観測体制としては、2~3 人の人数で、観測機器の操作・観測データの記録・気象データの記録の各役割分担に分かれて観測を行い、観測結果の報告までを行うという流れとなっている。その時行った観測の流れについて、2016 年 5 月 22 日に行った観測ログについては補遺 C.1 を参照していただきたい。

5.1.2 解析

観測・NOSTAR (補遺 C.1 にて説明) によるリダクションを経て処理された FITS データについては、AIPS と python を用いて解析を行った。使用する CO 輝線サーベイデータについては、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の輝線サーベイデータを使用し、まず、AIPS により、タスク "SUBIM" を用いて、WB886 を含む、 $1^\circ \times 1^\circ$ のマップを切り出した。切り出されたマップは速度軸を持った 3 次元キューブデータとなっており、このデータについて、python でプログラムを作成し、物理量の導出を行った。その内容としては、FCRAO の解析とほぼ同じだが、今回は 3 次元キューブデータを扱うため、pixel ではなく voxel の抽出を行う。ここで行うこととしては、WB886 に付随していると考えられる分子雲の範囲を指定し、分子雲が検出されている voxel を抽出し、積分を行うことで光度を導出し、Heyer et al. (2001) による光度-質量変換式を用いて質量を導出した。

また、作成したスクリプトと使用方法については補遺 C.2 を参照していただきたい。

5.2 付随する分子雲について

WB886 に付随していた分子雲について、年周視差測定から求めた距離 2.86 kpc を用いて物理量の測定を行ったところ、サイズは $\Delta l \times \Delta b = 9.8 \text{ pc} \times 9.6 \text{ pc}$ 、光度は $L_{\text{CO}} = 2.58 \times 10^2 \text{ K km s}^{-1} \text{ pc}^2$ 、質量は $M_{\text{CO}} = 1.06 \times 10^3 M_{\odot}$ と求められた。分子雲の質量については、Heyer et al. (2001) の光度-質量変換式 $M_{\text{CO}} = 4.1 (L_{\text{CO}} / [\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2])$ を用いて導出した。

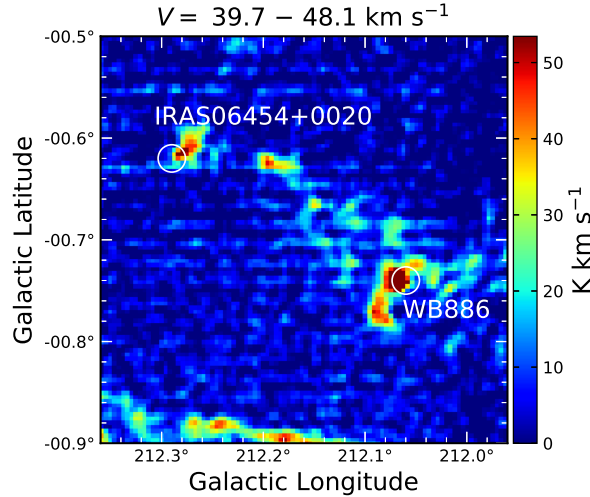


Figure 37: FUGIN¹²CO($J = 1 - 0$) 輝線サーベイデータより得られた、WB886 に付随する分子雲の積分強度図。積分範囲は $39.7 - 48.1 \text{ km s}^{-1}$ で、WB886 の位置 $(l, b) = (212.06^\circ, -0.74^\circ)$ の近傍 $(l, b) = (212.29^\circ, -0.62^\circ)$ に IRAS06454+0020 が見られる。

検出された分子雲の形状について、 $(l, b) = (212.06^\circ, -0.74^\circ)$ に円弧状の構造が、その近傍 $(l, b) = (212.1^\circ - 212.2^\circ, -0.7^\circ - -0.6^\circ)$ に三角形の構造が確認され、その頂点と思われる位置に WB886 とは別の IRAS 源である、IRAS06454+0020 が確認された (figure 37)。WB886 については円弧状の構造の方に位置しており、円弧状の構造が確認され、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のモデルと一致していることから、分子雲衝突による大質量星形成の可能性が考えられた。

また、改めて figure 37 を確認してみると、円弧状構造の近傍に三角形の構造が見られることが分かる。この構造の議論については、次のセクションで述べることとする。

5.2.1 三角形の構造とアウトフロー

円弧状の構造と共に検出された三角形の構造に着目してみると、figure 37 における、 $(l, b) = (212.29^\circ, -0.62^\circ)$ に位置する三角形の頂点 (IRAS06454+0020) からガスが二叉に分かれて放出しているような構造として確認できる。このことから、三角形の頂点で星形成が起こり、アウトフローを放出しており、その星形成領域が移動しているためアウトフローの軌跡が三角形を描いているのではないかと考えられ

る。そこで、アウトフローを伴い移動する星形成領域のトイモデルを考案してアウトフローの軌跡を調べてみたところ、三角形の構造と一致することが分かった (figure 38)。

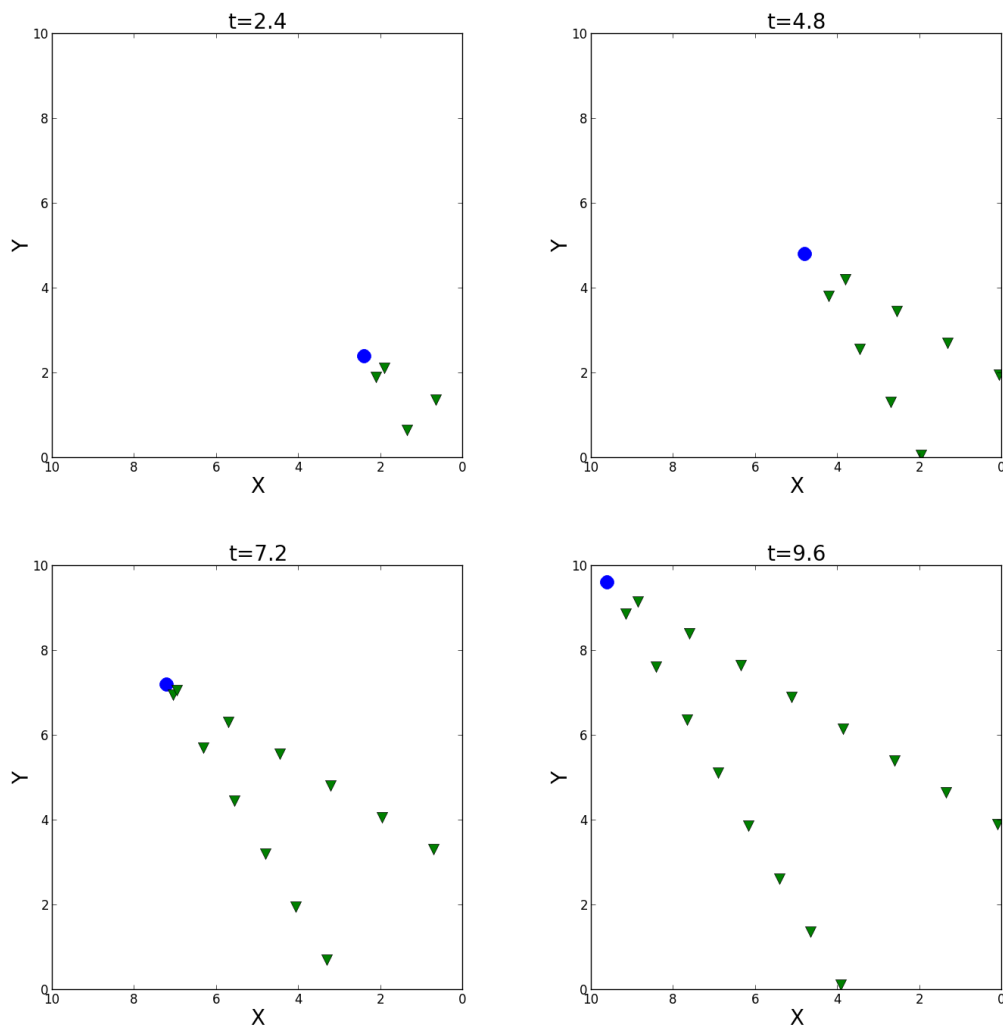


Figure 38: アウトフローを伴って移動する星形成領域のトイモデル

アウトフローのトイモデル (figure 38) については、 $\Delta t = 0.1$ の時間間隔で、星形成領域 (青円) を $y = x$ の直線、アウトフロー (三角形) を $y = -x + b$ ($b = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$) の直線に沿って分布させる形で実行した。また、アウトフローの間隔調整のパラメータは $n = 0.25$ を使用。

WB886 に付随していた円弧状の構造の分子雲と関連させて考察すると、2つの分子雲が衝突後、一方の分子雲は円弧状成分として残り、もう一方の分子雲は円弧状成分を突き抜けた後に星形成を起こして分子アウトフローを放出しながら移動しているというシナリオで説明できることが分かった。

VERA の年周視差測定から計測した距離 $D = 2.86 \text{ kpc}$ を用いて、円弧状分子雲と三角形の頂点までの距離は $\sim 12 \text{ pc}$ 、衝突から現在の形状に至るまでのアウトフローの放出距離は $\sim 2 \text{ pc}$ となった。衝突の相対速度を 5 km s^{-1} (Takahira et al. 2014) と仮定して、2つの距離の比 $(2/12) = (1/6)$ をかけて、アウトフローの速度を 0.83 km s^{-1} と見積もった。このアウトフロー速度とアウトフロー放出距離 $\sim 2 \text{ pc}$ より、衝突から現在の形状に至るまでのタイムスケールは $\sim 2.3 \text{ Myr}$ と求めることができた。数 Myr 単位というタイムスケールは、大質量星形成のタイムスケールと矛盾しない (Fukui et al. 2014, 2016; Torii et al. 2011, 2015, 2018)。

以上のことから総括すると、次のシナリオが考えられる (figure 39)。まず、大型の分子雲 cloud 1 に小型の分子雲 cloud 2 が衝突し、ガスの圧縮によって星形成が起こる。そして、2.3 Myr 後、cloud 1 で大質量星形成領域 WB886 が生成し、cloud 2 は cloud 1 を突き抜けた後、星形成を起こし、アウトフローを伴いながら移動し、結果、三角形の構造が生じたと考えられる。

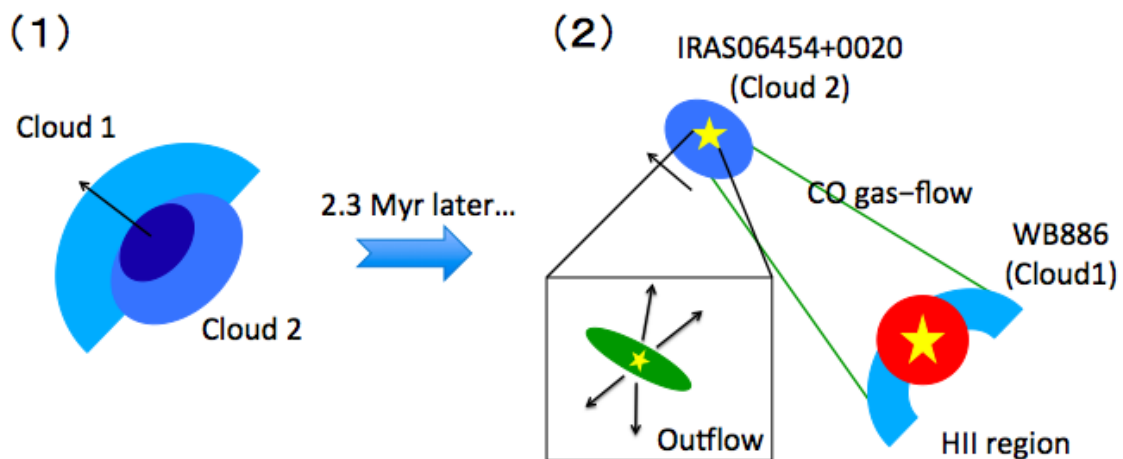


Figure 39: 三角形の構造が分子雲衝突によって生じるシナリオを示す模式図

5.3 5章まとめ

第5章では、第4章で扱った WB886 について、CO 輝線観測の観点から調査・議論を行った。

今回、WB886 についても、IRAS 01123+6430 (第2、3章)と同様に分子雲が付随しているかどうかを検証するために、野辺山 45m 望遠鏡による $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線サーベイデータの調査を行った。その結果、WB886 の位置に、IRAS 01123+6430 で見られたような、円弧状の構造の分子雲が付随していることが分かり、年周視差測定から計測した距離 2.86 kpc から、サイズ $9.8 \text{ pc} \times 9.6 \text{ pc}$ 、質量 $1.06 \times 10^3 M_{\odot}$ の分子雲であることが分かった。この分子雲についても、IRAS 01123+6430 で見られたような円弧状の構造を持っていることから、分子雲衝突によって大質量星形成が起こった可能性が考えられる。

また、補足として、円弧状の構造の分子雲の近傍に三角形の構造が検出されたため、この構造についての調査を行った。その結果、この構造が、アウトフローを伴い移動する星形成領域のトイモデルで説明できることが分かり、分子雲衝突と併せてシナリオを考慮すると、大型の分子雲に高密度の小型分子雲が衝突した後、双方で星形成が起こり、大型分子雲が WB886 となり、小型分子雲がアウトフローを伴い移動する星形成領域 (IRAS06454+0020) となった可能性が考えられた。また、この過程において、年周視差測定から計測したサイズおよび、衝突の相対速度 5 km s^{-1} を仮定してタイムスケールの計測をしたところ、衝突から観測時の構造に至るまで $\sim 2.3 \text{ Myr}$ であることが分かった。このタイムスケールの結果についても、大質量星のタイムスケールと一致していたことから、分子雲衝突による大質量星形成の可能性が考えられた。

6 銀河面 CO 観測と H₂O メーザー源に付随する分子雲

2, 3, 4, 5 章において、IRAS01123+6430 と WB886 の 2 つの銀河系外縁部天体に円弧状の構造の分子雲が付随しており、OB 型星が存在している点と大質量星のタイムスケールと一致していたという点から、分子雲衝突による大質量星形成が起こったと考えられた。このことから、銀河系外縁部における大質量星形成の主要因は分子雲衝突によるものだと考えられ、このことを作業仮説として、他の銀河系外縁部天体でも似たような構造が見られるのか検証を行ったのが本章である。上記の 2 天体は H₂O メーザーを放射しており、H₂O メーザーは大質量星形成領域のトレーサー (Reid & Moran 1981) であるため、銀河系外縁部の H₂O メーザー源に着目し、検証を行った。

6.1 Arcetri カタログ

今回、検証を行うにあたって対象とする H₂O メーザー源については、イタリアのボローニャに設置されている Medicina-32m 望遠鏡により観測された H₂O メーザー源のリストである、Arcetri カタログから選出した。このカタログについては、過去には、Comoretto et al. (1990) により、 $\delta > -30^\circ$ の範囲で 509 個の H₂O メーザー源が観測され、203 個の H₂O メーザー源が検出された。その後、Palagi et al. (1993) により、H₂O メーザー源の光度と IRAS 源の光度の間に相関があることが示された。そして、Valdettaro et al. (2001) によって、計 1013 個もの H₂O メーザー源が、Arcetri カタログとしてリスト化された。

Arcetri カタログは、IRAS point source カタログの天体を観測し、検出された H₂O メーザー源をリスト化したものである。本研究では、銀河系第 2 象限、第 3 象限に分布している H₂O メーザー源に焦点を当て、第 2 象限では FCRAO のサーベイデータ、第 3 象限では FUGIN のサーベイデータを使用し、それぞれの H₂O メーザー源に分子雲が付随しているか、また、IRAS01123+6430 や WB886 で見られたような円弧状の構造が検出されるかどうかを検証し、分子雲衝突による星形成と H₂O メーザー源の関連性について調査を行う。

6.2 H₂O メーザー源の距離計測について

IRAS 01123+6430 と WB886 については、VERA による VLBI 位置天文観測が行われ、bolometric luminosity を算出する際に、年周視差測定により測定した距離を用いることができたが、この章で扱う Arcetri カタログに掲載されている H₂O メーザー源のほとんどは VERA による VLBI 観測が行われていないため、年周視差測定による距離が分かっていない。そのため、本章では、H₂O メーザー源の視線速度から運動学的距離を求め、その距離から bolometric luminosity の算出を行う。

運動学的距離は、天体の LSR 速度、すなわち視線速度が分かっていると算出することができ、以下の式で表すことができる。

$$V_{\text{LSR}} = \left(\frac{V_{\text{rot}}}{R} - \frac{V_0}{R_0} \right) R_0 \sin l \quad (22)$$

ここで、 V_{rot} は任意の銀河中心距離 R における銀河回転速度で、銀河系外縁部における回転曲線が V_0 の回転速度でフラットであると仮定すると、

$$V_{\text{LSR}} = \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right) V_0 \sin l \quad (23)$$

と式変換でき、銀河中心距離 R のみが未知数となる。この式を R について式変形すると、

$$R = \frac{R_0 V_0 \sin l}{V_{\text{LSR}} + V_0 \sin l} \quad (24)$$

となる。太陽からの距離 D については、天体までの銀河中心距離 R と太陽までの銀河中心距離 R_0 と三角形を成すことができるため、余弦定理から計算することができる。また、銀河定数については、Sofue et al. (2009) による銀河定数 $(R_0, V_0) = (8 \text{ kpc}, 200 \text{ km s}^{-1})$ を使用した。

運動学的距離について、銀河系内縁部では、終端速度が存在するため一様に決めることができるが、外縁部では不定性が大きく一様に決めることができない。そのため、今後の H_2O メーザー源の距離決定に関しては、VERA による年周視差測定 of 継続が大きく期待される。

6.3 分子雲衝突の判断基準について

これまでの分子雲衝突に関する先行研究では、2つの速度成分間を橋渡しするブリッジ構造 (Enokiya et al. 2019; Fujita et al. 2019) や2つの速度成分の補完的構造 (Enokiya et al. 2019; Nishimura et al. 2018) が分子雲衝突の有力な観測的証拠として報告されてきた。また、それらには OB 型星も付随していたことから、分子雲衝突による降着率の上昇で大質量星が誕生したと矛盾しなかった。

しかし、今回我々が研究で扱った、IRAS01123+6430 (第2, 3章) と WB886 (第4, 5章) についても、O 型ではないが B 型のスペクトル型 (IRAS01123+6430 : B1-B2、WB886 : B0.5-B1) が検出された。また、観測結果から得られた分子雲の形状が Takahira et al. (2014) の分子雲衝突のシミュレーションと一致し、衝突のタイムスケールの計算から、典型的な大質量星のタイムスケール ($\sim 1 \text{ Myr}$) と一致していたため、円弧状構造の存在自体が、分子雲衝突の観測的証拠の一つになり得るのではないかと考えられた。

以上のことから、(1) Takahira et al. (2014) のシミュレーションで見られるような円弧状構造、(2) OB 型星の存在、の2つの判断基準をもとに、分子雲衝突の候補天体の選出を行った。

6.4 FCRAO&FUGIN サーベイに含まれる H₂O メーザー源

今回、Valdettaro et al. (2001) による Arcetri カタログに掲載されている H₂O メーザーのリスト (全 1013 個) から、FCRAO および FUGIN サーベイデータに含まれる H₂O メーザー源を選出し、付随する分子雲の調査を行った。

Valdettaro et al. (2001) による Arcetri カタログによると、FCRAO サーベイデータに含まれる H₂O メーザー源の数は 90 個であり、その内分子雲が鮮明に付随しているものは、14 個であった。また、FUGIN サーベイデータに含まれる H₂O メーザー源の数は 1013 個中 12 個であり、その内分子雲が付随しているものは、8 個であった。IRAS 01123+6430 を除いた H₂O メーザー源のリストについては table 20 に掲載している。また、Arcetri カタログから選出された 14 の H₂O メーザー源の多くは VERA による VLBI 観測が行われていないため、年周視差測定による距離が求まっていない。そのため、Sofue et al. (2009) による銀河定数 (R_0, V_0) = (8 kpc, 200 km s⁻¹) と H₂O メーザー源の視線速度から求められる運動学的距離を用いて bolometric luminosity を計算し、スペクトル型の判定を行った。スペクトル型の判定の際、使用した各 H₂O メーザー源の YSO の赤外線フラックス密度の一覧については table 21 に掲載している。

Table 20: FCRAO¹²CO($J = 1 - 0$) 輝線サーベイ (Q2) および FUGIN¹²CO($J = 1 - 0$) 輝線サーベイ (Q3) の H₂O メーザー源リスト

Q	Object Name	G. longitude	G. latitude	$V_{\text{H}_2\text{O}}$ [km s ⁻¹]	D_k [kpc]	Size [pc] ([^o])
2	IRAS 00117+6412	118.96 ^o	+1.89 ^o	-30	2.78	3 (0.06)
2	IRAS 00468+6527	122.78 ^o	+2.86 ^o	-51	4.98	17 (0.2)
2	IRAS 02044+6031	132.16 ^o	-0.73 ^o	-49	5.00	9 (0.1)
2	IRAS 02395+6244	135.28 ^o	+2.80 ^o	-67.1	8.54	6 (0.04)
2	IRAS 02541+6208	137.07 ^o	+3.00 ^o	-51	5.72	22 (0.22)
2	IRAS 03101+5821	140.64 ^o	+0.68 ^o	-39.1	4.21	29 (0.4)
2	IRAS 22134+5834	103.87 ^o	+1.86 ^o	-12	1.60	6 (0.2)
2	IRAS 22305+5803	105.51 ^o	+0.23 ^o	-53	5.76	40 (0.4)
2	IRAS 22365+5818	106.32 ^o	+0.06 ^o	-54	5.81	15 (0.15)
2	IRAS 22506+5944	108.59 ^o	+0.49 ^o	-48.3	5.05	18 (0.2)
2	IRAS 22539+5758	108.21 ^o	-1.29 ^o	-36	3.80	13 (0.2)
2	IRAS 22566+5830	108.77 ^o	-0.94 ^o	-46.6	4.86	42 (0.5)
2	IRAS 23004+5642	108.47 ^o	-2.82 ^o	-50.4	5.29	13 (0.14)
2	IRAS 23385+6053	114.53 ^o	-0.54 ^o	-54	5.42	38 (0.4)
3	IRAS 06567-0350	217.31 ^o	-0.05 ^o	12.5	1.12	4 (0.2)
3	IRAS 06571-0441	218.10 ^o	-0.37 ^o	16.5	1.51	5 (0.2)
3	IRAS 06579-0432	218.05 ^o	-0.12 ^o	30.9	3.17	8 (0.14)
3	IRAS 07006-0654	220.46 ^o	-0.60 ^o	21.6	1.99	3 (0.1)
3	IRAS 07077-1026	224.42 ^o	-0.70 ^o	14.3	1.22	- ^{a)}
3	IRAS 07111-1211	226.36 ^o	-0.77 ^o	15.7	1.34	- ^{a)}
3	IRAS 07277-1821	233.68 ^o	-0.19 ^o	36.0	3.30	3 (0.05)
3	IRAS 07299-1651	232.62 ^o	+1.00 ^o	18.0	1.55	- ^{b)}

^{a)}IRAS 07077-1026 と IRAS 07111-1211 については、広がった構造であったため、サイズの計測ができなかった。

^{b)}IRAS 07299-1651 については、FUGIN サーベイの銀緯の上限値 $b = +1.0^\circ$ にあるため、サイズについては計測不能。

Table 21: FCRAO¹²CO($J = 1 - 0$) 輝線サーベイ (Q2) および FUGIN¹²CO($J = 1 - 0$) 輝線サーベイ (Q3) の H₂O メーザー源の赤外線フラックス密度 (Helou & Walker 1988) (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=II/125/main>)

Q	Object Name	Flux density [Jy]				$L_{\text{Bol}} [L_{\odot}]$	Spectral type
		12 μm	25 μm	60 μm	100 μm		
2	IRAS 00117+6412	2.90	16.8	1.11×10^2	2.07×10^2	2.56×10^3	B2–B3
2	IRAS 00468+6527	5.72	44.6	3.03×10^2	3.23×10^2	1.87×10^4	B0–B0.5
2	IRAS 02044+6031	12.1	1.06×10^2	3.88×10^2	4.66×10^2	2.91×10^4	O9.5–B0
2	IRAS 02395+6244	10.9	91.9	2.55×10^2	2.26×10^2	5.83×10^4	O8–B8.5
2	IRAS 02541+6208	2.78×10^{-1}	3.97	74.9	1.28×10^2	6.09×10^3	B0.5–B1
2	IRAS 03101+5821	6.33×10^{-1}	3.46	18.3	53.1	1.20×10^3	B2–B3
2	IRAS 22134+5834	14.4	1.78×10^2	5.52×10^2	7.13×10^2	4.45×10^3	B1–B2
2	IRAS 22305+5803	2.10	23.9	1.55×10^2	2.04×10^2	1.34×10^4	B0–B0.5
2	IRAS 22365+5818	4.46×10^{-1}	1.09	8.13	17.6	9.07×10^2	B2–B3
2	IRAS 22506+5944	6.37	34.7	1.88×10^2	2.95×10^2	1.42×10^4	B0–B0.5
2	IRAS 22539+5758	6.79	61.1	3.19×10^2	4.01×10^2	1.26×10^4	B0–B0.5
2	IRAS 22566+5830	23.8	1.10×10^2	1.19×10^3	2.23×10^3	7.84×10^4	O7.5–O8
2	IRAS 23004+5642	2.15	12.7	77.1	1.72×10^2	6.98×10^3	B0.5–B1
2	IRAS 23385+6053	5.05	17.7	3.52×10^2	9.38×10^2	3.18×10^4	O9.5–B0
3	IRAS 06567-0350	4.74	14.5	56.5	7.80×10^2	7.26×10^2	B3–B5 *
3	IRAS 06571-0441	1.50	7.42	36.0	75.3	2.77×10^2	B5–B6 *
3	IRAS 06579-0432	6.36×10^{-1}	4.19	23.4	47.2	7.41×10^2	B3–B5 *
3	IRAS 07006-0654	2.95	11.0	32.8	64.8	5.15×10^2	B3–B5 *
3	IRAS 07077-1026	2.50×10^{-1}	1.26	18.7	42.5	8.07×10^1	B7–B8 *
3	IRAS 07111-1211	2.50×10^{-1}	3.50	29.9	62.6	1.55×10^2	B6–B7 *
3	IRAS 07277-1821	2.73	5.48	19.1	13.9	7.34×10^2	B3–B5 *
3	IRAS 07299-1651	5.15	2.40×10^2	1.21×10^3	1.27×10^3	7.28×10^3	B0.5–B1

*B3 より晩期型のスペクトル型については、Morton & Adams (1968) を参照。

分子雲衝突の候補天体

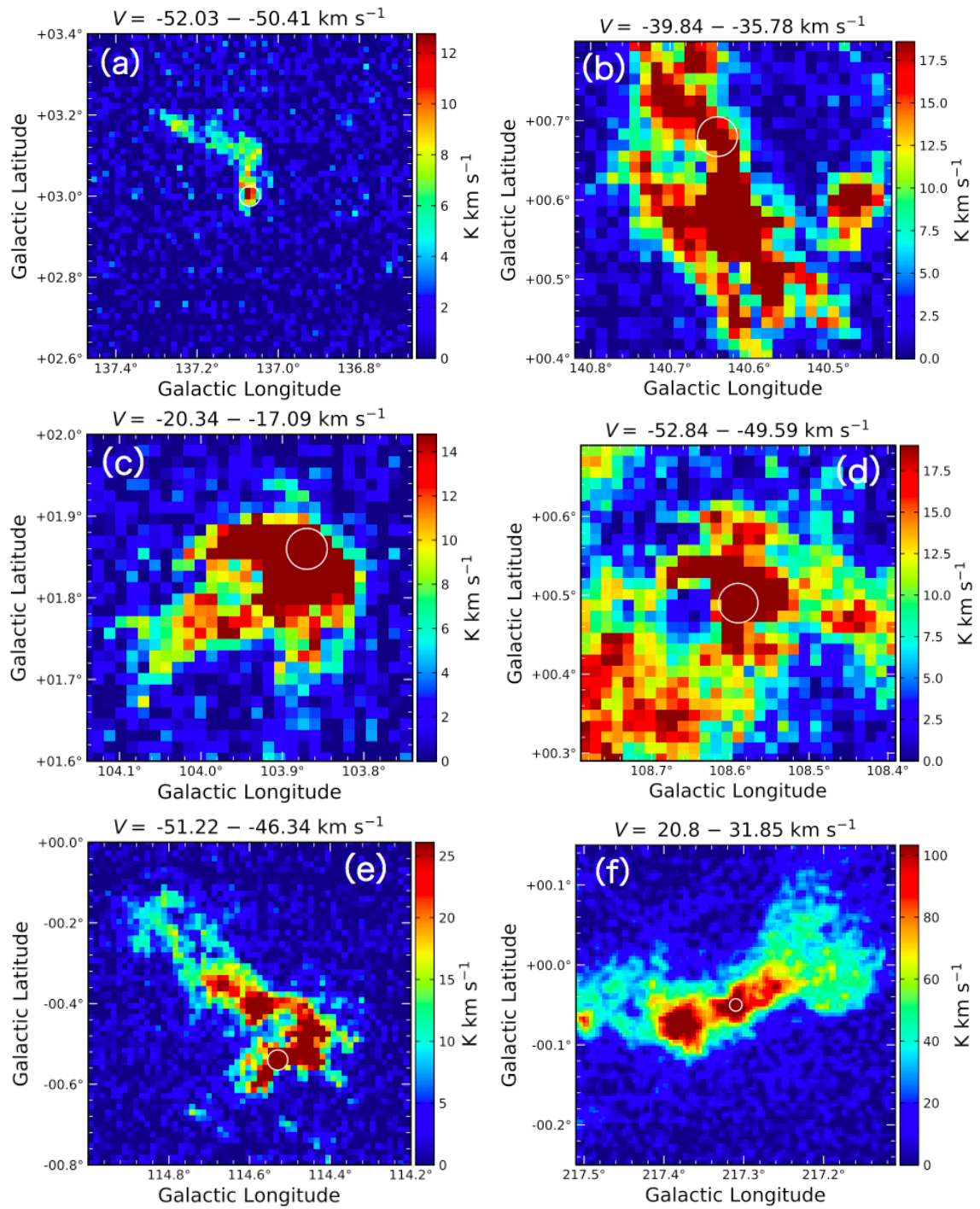


Figure 40: (a) IRAS02541+6208、(b) IRAS03101+5821、(c) IRAS22134+5834、(d) IRAS22506+5944、(e) IRAS23385+6053、(f) IRAS06567-0350

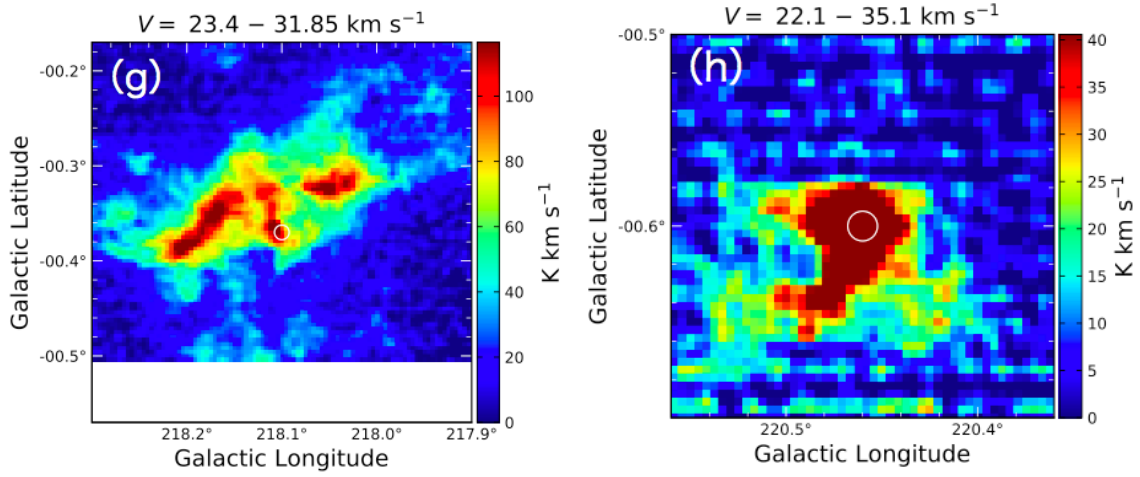


Figure 41: (g) IRAS06571-0441, (h) IRAS07006-0654

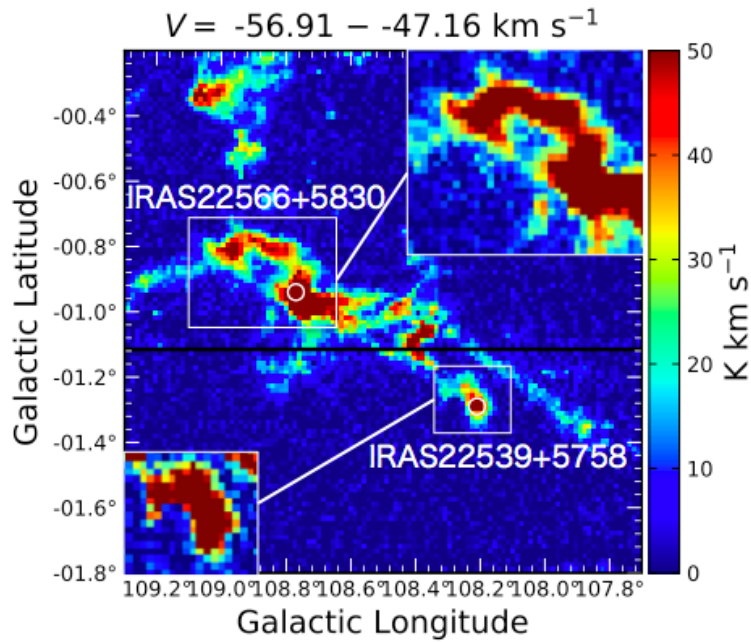


Figure 42: IRAS22566+5830 と IRAS22539+5758

判定不能な天体

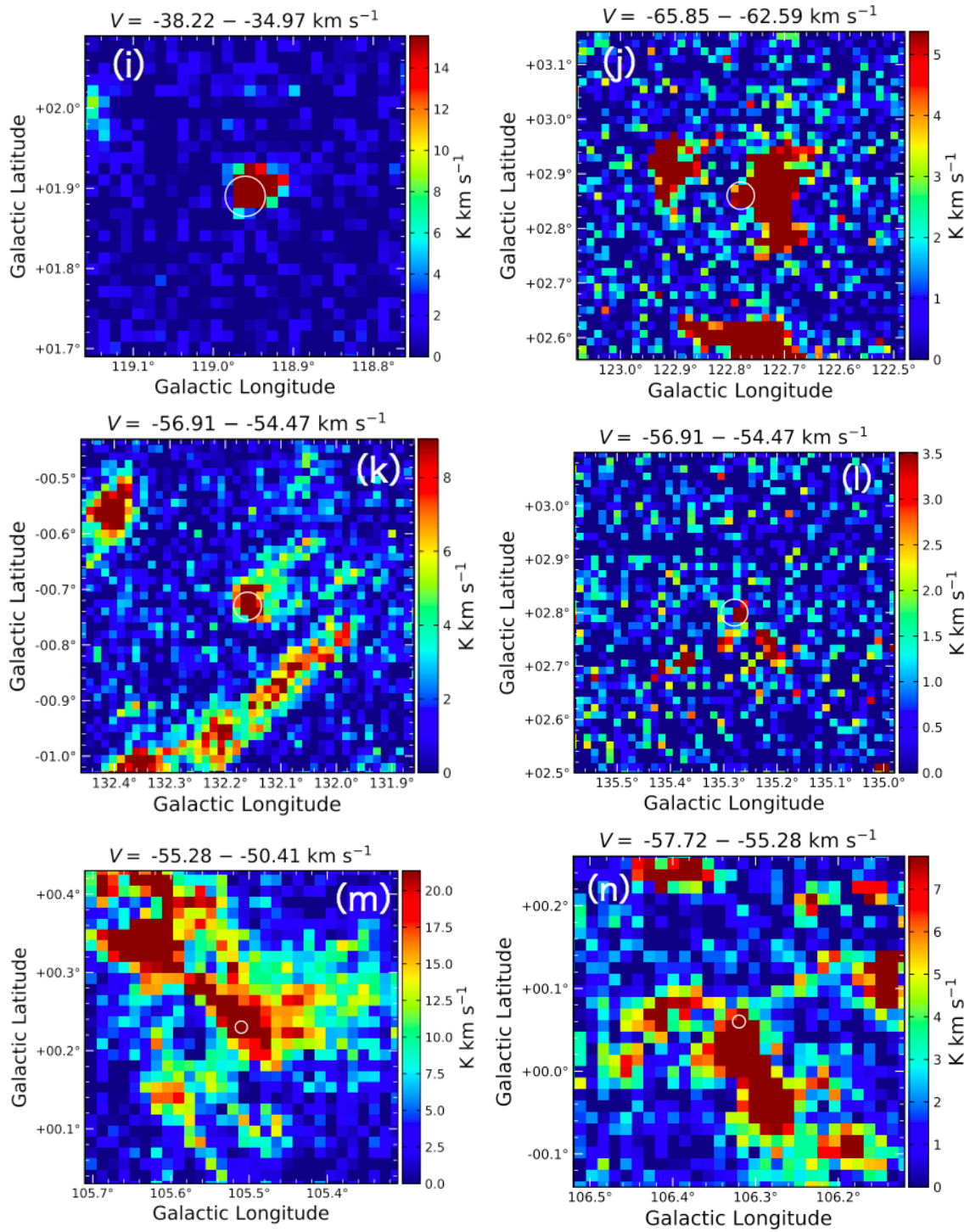


Figure 43: (i) IRAS00117+6412, (j) IRAS00468+6527, (k) IRAS02044+6031, (l) IRAS02395+6244, (m) IRAS22305+5803, (n) IRAS22365+5818

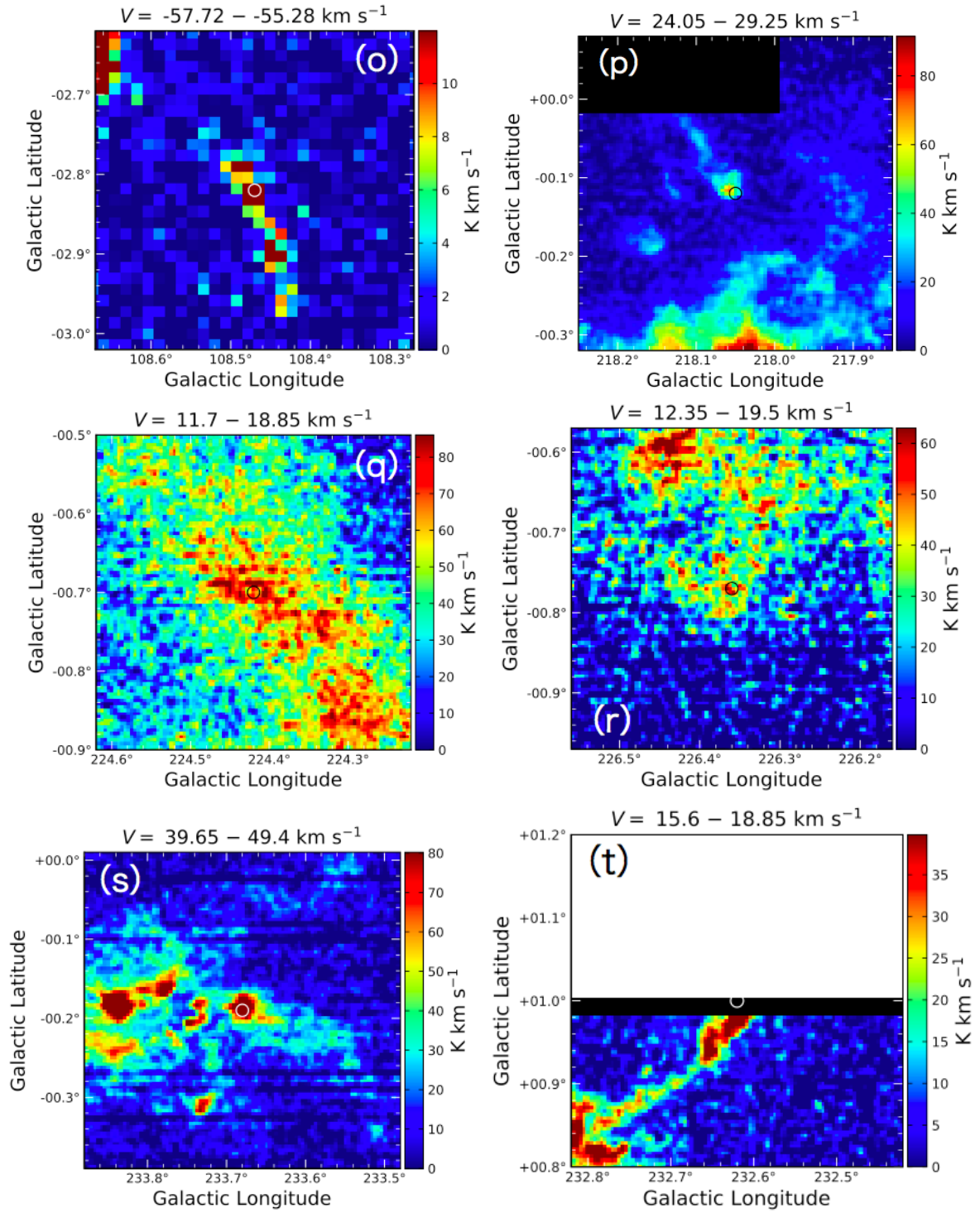


Figure 44: (o) IRAS23004+5642, (p) IRAS06579-0432, (q) IRAS07077-1026, (r) IRAS07111-1211, (s) IRAS07277-1821 (t) IRAS07299-1651

6.5 調査結果の考察

ここまで、Arcetri カタログの H₂O メーザー源について、FCRAO (銀河系第 2 象限) と FUGIN (銀河系第 3 象限) の 2 つの異なる領域のサーベイデータで付随分子雲の調査を行った。その結果、FCRAO では 14 個 (IRAS 01123+6430 を除く) の H₂O メーザー源が、FUGIN では 8 個 (WB886 を除く) の H₂O メーザー源に分子雲が付随していることが分かった。以下、YSO のスペクトル型に準じて、星形成と分子雲衝突の関連について考察していく。

IRAS 02541+6208 (137.07°, +3.00°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 5.72 kpc より、YSO のスペクトル型は B0.5–B1 となった。付随分子雲については、積分強度 6.0–9.0 K km s⁻¹ の単独の円弧状の構造のみが見られ、近傍には特徴的な円弧状構造の分子雲は見られなかった。

IRAS 03101+5821 (140.64°, +0.68°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 4.21 kpc より、YSO のスペクトル型は B2–B3 であった。付随分子雲については、空洞の構造が見られた。

IRAS 22134+5834 (103.87°, +1.86°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 1.60 kpc から、YSO のスペクトル型は B1–B2 となった。付随分子雲については、メーザー源の位置に厚みのある円弧状の構造が確認された。

IRAS 22506+5944 (108.59°, +0.49°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 5.05 kpc から、YSO のスペクトル型は B0–B0.5 となった。付随分子雲について、メーザー源の位置から南東方向にずれた位置に円弧状の構造が顕著に見られた。

IRAS 22539+5758 (108.21°, -1.29°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 3.80 kpc から、YSO のスペクトル型は B0–B0.5 となった。付随分子雲については、円弧状の構造をしており、IRAS22566+5830 と補完的な関係の分布であった。

IRAS 22566+5830 (108.77°, -0.94°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 4.86 kpc から、YSO のスペクトル型は O7.5–O8 となった。付随分子雲については、円弧状の構造が見られ、IRAS22539+5758 と補完的な関係の分布をしていた。

IRAS 23385+6053 (114.53°, -0.54°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 5.42 kpc から、YSO のスペクトル型は O9.5–B0 となった。付随分子雲については、IRAS 02541+6208 同様、単独の円弧状の構造が見られた。

IRAS 06567-0350 (217.31°, -0.05°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 1.12 kpc より、YSO のスペクトル型は B3–B5 となった。付随分子雲については、やや細長い緩やかな円弧状の構造を示していた。

IRAS 06571-0441 (218.10°, -0.37°) に位置する H₂O メーザー源で、距離 1.51 kpc から、YSO のスペクトル型は B5–B6 であった。付随分子雲については、円弧状の形状をしており、円弧状構造の

中心を直線状の分子雲が貫いているという、IRAS01123+6430 (第 2, 3 章) に近い構造が確認された。

IRAS 07006-0654 (220.46° , -0.60°) に位置する H_2O メーザー源で、距離 1.99 kpc から、YSO のスペクトル型は B3-B5 となった。付随分子雲については、FCRAO データにおける IRAS 22134+5834 のような、厚みのある円弧状の構造が検出された。

結果、合計 10 個の H_2O メーザー源の位置で円弧状の構造の分子雲が検出された。IRAS22566+5830 についても円弧状の形状をしていたが、Enokiya et al. (2019) で見られるような、IRAS22539+5758 と補完的な分布関係になっているものもあった。YSO のスペクトル型に着目してみると、いずれの H_2O メーザー源についても B3 より早期型であることから、HII 領域を生成する程の強度の UV を放射する中心星を持つ大質量星形成領域であることが示唆される。また、IRAS 06571-0441 では、直線状の構造が円弧状構造を貫いているという、FCRAO データで検出された IRAS 01123+6430 に近い、円弧状構造と直線状の構造を持っていることから、相対速度の遅い分子雲衝突が起こったのではないかと考えられる。

FCRAO データで調査を行った結果と FUGIN データでの結果とを比較してみると、全体的に FCRAO データにおける H_2O メーザー源の方が B3 より早期型の YSO が多いということが分かる。このことについて原因を調べてみたところ、table 20 における運動学的距離の比較から、FCRAO のデータ (銀河系第 2 象限) における H_2O メーザー源の方が遠距離の傾向にあることが分かった。また、table 21 での赤外線フラックス密度の比較から、第 2 象限における $100 \mu\text{m}$ のフラックス密度が $\sim 10^2 \text{ Jy}$ であるのに対し、第 3 象限における $100 \mu\text{m}$ のフラックス密度が数十 Jy と、第 2 象限における分子雲が含有する YSO の赤外線フラックスが全体的に高いことが分かる。

以上より、第 2 象限と第 3 象限のデータを併せると、22 天体中計 10 天体の H_2O メーザー源に付随する分子雲が円弧状の構造を持っており、その構造に IRAS 源が付随していたことから、半数程度の天体が分子雲衝突の傾向を示していると考えられた。また、補足結果として、第 2 象限は第 3 象限と比較して、高い赤外線フラックス密度を持つ YSO が多く分布していると考えられる。その一つの解釈として、第 2 象限の天体はペルセウス座腕に位置し、第 3 象限の天体は渦状腕の間に位置することが考えられる。つまり渦状腕に沿って星形成がより活発であることを反映しているのかもしれない。

また、分子雲衝突の候補天体に含めなかった 12 天体 (IRAS00117+6412, IRAS00468+6527, IRAS02044+6031, IRAS02395+6244, IRAS22305+5803, IRAS22365+5818, IRAS23004+5642, IRAS06579-0432, IRAS07077-1026, IRAS07111-1211, IRAS07277-1821, IRAS07299-1651) については、円弧状の構造が見られなかったため判定不能とした。しかし、IRAS 源が付随していたことは確認され、特に、FCRAO データで検出された IRAS02044+6031 と IRAS02395+6244 については、O 型のスペクトル型の大質量星が確認され、それら以外の天体についても B3 より早期型のスペクトル型が確認されたため、分子雲衝突による大質量星形成を否定するものではないと考える。しかし、FUGIN データで検出された IRAS07077-1026 と IRAS07111-1211 については、コンパクトではない、広がった構造の分子雲が付随しており、スペク

トル型についても、B6-B8 と、HII 領域を生成するほどではない晩期型の星であることが分かった。

6.6 6章まとめ

第6章では、IRAS 01123+6430 (第2、3章) や WB886 (第3、4章) で円弧状の構造の分子雲が検出されたように、その他の H₂O メーザー源についても同様の形状の分子雲が検出されるかどうかの検証を行った。

検証については、Arcetri カタログに掲載されている H₂O メーザー源のリストをもとに、FCRAO と FUGIN サーベイデータに含まれる H₂O メーザー源に付随する分子雲の検出を行った。FCRAO サーベイデータでの調査の結果、IRAS 01123+6430 を除いて計 14 個の H₂O メーザー源に分子雲が付随していることが分かり、内 7 個の分子雲が、分子雲衝突の痕跡を示唆する円弧状の形状をしていることが分かった。また、野辺山 45m 望遠鏡による FUGIN サーベイのデータを用いて、同様の調査を行ったところ、WB886 を除いて計 8 個の H₂O メーザー源に分子雲が付随していることが分かり、内 3 個の分子雲が、分子雲衝突の痕跡を示す円弧状の構造を持っていることが分かった。分子雲衝突の候補に含めなかった 12 天体については、円弧状の構造が確認されなかった判定不能のものであったが、B3 より早期型の大質量星が確認された天体も多かったことから、分子雲衝突による大質量星形成を否定するものではないと考えた。

今回の検証から、22 天体中計 10 個、約半数の H₂O メーザー源に付随する分子雲が、分子雲衝突による大質量星形成の可能性を示唆していると考えた。

7 まとめ

本論文では、銀河系外縁部における星形成領域について、VERAによる位置天文観測データと分子雲サーベイデータを用いて行った研究について述べてきた。

銀河系第2象限に属する外縁部の大質量星形成領域 IRAS 01123+6430 については、VERAによる位置天文観測データの解析から年周視差測定によって距離を測定し、FCRAOによる銀河面分子雲サーベイデータの解析から付随する分子雲を検出した。距離は $6.61^{+2.55}_{-1.44}$ kpc と求められ、赤外線フラックス密度との見積もりから、YSOのスペクトル型は B1-B2 となり、強い UV を放射して HII 領域を生成することが出来る B3 よりも早期であることが分かった。また、銀河系内では Outer arm に付随する天体であることが分かったが、銀河中心方向とは反対の動径成分の速度を持っていたため、視線速度が低く見積もられていたことにより、運動学的距離とは誤差の範囲を考慮しても大きく異なる結果となった。FCRAOによる分子雲サーベイデータの解析からは、IRAS 01123+6430 に、円弧状の構造と直線状の構造を持った分子雲が検出され、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のモデルの形状に一致していた。特に、 $3\text{--}5\text{ km s}^{-1}$ の遅い相対速度の分子雲衝突により大質量星形成が起こった場合のモデルの形状と一致していることが分かった。

銀河系第3象限に属する外縁部の大質量星形成領域 WB886 についても、IRAS 01123+6430 と同様、銀河系外縁部における分子雲衝突に伴う大質量星形成領域の第2候補として、VERAによる位置天文観測データと野辺山 45m 望遠鏡による銀河面分子雲サーベイデータを用いて調査を行った。スポットの検出・同定を行った結果、1年分を満たしているものが1つの feature のみであったが、1 feature のみで年周視差測定を行い、距離を $2.86^{+0.50}_{-0.37}$ kpc と求めることができた。さらに、赤外線フラックス密度との見積もりから、YSOのスペクトル型は B0.5-B1 となり、IRAS 01123+6430 と同様、B3 よりも早期な強い UV 放射を伴う HII 領域であることが示された。野辺山 45m 望遠鏡による銀河面分子雲サーベイデータの調査の結果、WB886 に円弧状の構造の分子雲が、近傍に三角形の構造の分子雲が付随していることが分かった。円弧状の構造については、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のモデルの形状に一致していたため、分子雲衝突の可能性が示唆された。一方、近傍に検出された三角形の構造については、分子雲衝突を起こした後にアウトフローを伴い移動する星形成領域のモデルとして説明できることが分かった。

これまで、IRAS01123+6430 と WB886 の2つの銀河系外縁部大質量星形成領域に付随する分子雲について、Takahira et al. (2014) による分子雲衝突のモデルの形状と一致し、大質量星が付随しており、衝突のタイムスケールが大質量星のタイムスケールと一致していたことから、銀河系外縁部における大質量星形成の主要因は分子雲衝突であるものと考えられた。この作業仮説を元に、Arcetri カタログにおける、銀河系外縁部天体に付随する分子雲について、分子雲衝突の候補天体の選出を行った。

Arcetri カタログ (Valdettaro et al. 2001) に掲載されている 1013 個の H_2O メーザー源については、FCRAO と FUGIN の両方の $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ サーベイデータを用いて、IRAS 01123+6430 や WB886 のような円弧状の構造が見られるかどうかの調査を行い、分子雲衝突による大質量星形成の候補天体

の選出を行った。結果として、まず分子雲が付随していた H₂O メーザー源の個数としては、FCRAO サーベイデータで 14 個、FUGIN サーベイデータで 8 個と、計 22 個と比較的少数だった。また、分子雲衝突の兆候が見られた天体については、第 2 象限 (FCRAO サーベイデータ) で IRAS 02541+6208、IRAS 03101+5821、IRAS 22134+5834、IRAS 22506+5944、IRAS 22539+5758、IRAS 22566+5830、IRAS 23385+6053、第 3 象限 (FUGIN サーベイデータ) で IRAS 06567-0350、IRAS 06571-0441、IRAS 07006-0654 と、計 10 個で、これらの H₂O メーザー源に付随する分子雲はいずれも円弧状の構造を持っていることが分かった。以上の結果から、本研究で調査を行った銀河系外縁部天体において、22 天体中計 10 天体の約半数の天体で分子雲衝突の兆候を示す円弧状の構造が検出された。分子雲衝突の頻度は低いとしても、外縁部では遅い衝突の割合が多いため、Takahira et al. (2014) で示されたように大質量星形成には有利な環境である。

今回の研究から、銀河系外縁部では分子雲衝突の頻度は低いとしても、遅い衝突の割合が多いため、Takahira et al. (2014) で示されたように、銀河系外縁部は分子雲衝突による大質量星形成に有利な環境である。実際、IRAS01123+6430 と WB886 をはじめ、銀河系外縁部において分子雲衝突の兆候を示す円弧状構造を持つ分子雲が複数見られることがわかった。これらの天体は銀河系外縁部における分子雲衝突天体の候補として、大質量星形成過程を解明する上で重要な天体であると考えられる。

Reference

- シリーズ現代の天文学 6 「星間物質と星形成」 著・福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, 水野亮 日本評論社 (Fukui et al. 2008)
- 干渉計サマースクール 著・亀野誠二, 川辺良平, 廣田朋也, 浅田圭一 (Kameno et al.2005)
- シリーズ現代の天文学 5 「銀河 II-銀河系」 著・祖父江義明, 有本信雄, 家正則 日本評論社 (Sofue et al. 2007)
- 「星形成論-銀河進化における役割から惑星系の誕生まで-」 著・ワード-トンプソン& ウィットワース 古屋玲 訳 (Ward-Thompson & Whitworth 2011)
- Arce, H. G., Shepherd, D., Gueth, F., et al. 2007, Protostars and Planets V, B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (eds.), 245
- Bacciotti, F., Girart, J. M., Padovani, M., et al. 2018, ApJL, 865, L12
- Bertoldi, F., 1989, ApJ, 346, 735
- Brand, J., Cesaroni, R., Caselli, P., et al. 1994, A&AS, 103, 541
- Bronfman, L., Nyman, L.-A., & May, J. 1996, A&AS, 115, 81
- Bolatto, A. D., Wolfire, M., & Leroy, A. K. 2013, ARA&A, 51, 207
- Booth, M., Matrà, L., Su, K. Y. L., et al. 2018, MNRAS,
- Burns, R. A., Handa, T., Nagayama, T., Sunada, K., & Omodaka, T. 2016, MNRAS, 460, 283
- Comoretto, G., Palagi, F., Cesaroni, R., et al. 1990, A&AS, 84, 179
- Dame, T. M., Hartmann, D., & Thaddeus, P. 2001, ApJ, 547, 792
- Dehnen, W., & Binney, J. 1998, MNRAS, 294, 429
- Dehnen, W., & Binney, J. J. 1998, MNRAS, 298, 387
- de Jong, T., 1973, A&A, 26, 297
- Du, X., Xu, Y., Yang, J., et al. 2016, ApJS, 224, 7
- Elitzur, M., 1992, ARA&A, 30, 75
- Elitzur, M., Hollenbach, D. J., & McKee, C. F. 1989, ApJ, 346, 983
- Elmegreen, B. G., & Lada, C. J. 1977, ApJ, 214, 725

Enokiya, R., Ohama, A., Yamada, R., et al. 2019, eprint arXiv:1912.11607

Fiebig, D. 1997, 327, 758

Fukui, Y., Ohama, A., Hanaoka, N., et al. 2014, ApJ, 780, 36

Fukui, Y., Torii, K., Ohama, A., et al. 2016, ApJ, 820, 26

Fujita, S., Torii, K., Tachihara, K., et al. 2019, ApJ, 872, 49

Green, S. 1980, ApJS, 42,103

Habe, A., & Ohta, K. 1992, PASJ, 44, 203

Harju, J., Lehtinen, K., Booth, R. S., & Zinchenko, I. 1998, A&AS, 132, 211

Haschick, A. D., & Ho, P. T. P. 1985, ApJ, 292, 200

Haworth, T. J., Tasker, E. J., Fukui, Y., et al. 2015, MNRAS, 450, 10

Haworth, T. J., Shima, K., Tasker, E. J., et al. 2015, MNRAS, 454, 1634

Helou, G., & Walker, D. W. 1988, NASA RP-1190, Vol. 7 (1988), 7,

Heyer, M. H., Brunt, C., Snell, R. L., et al. 1998, ApJS, 115, 241

Heyer, M. H., Carpenter, J. M., & Snell, R. L. 2001, ApJ, 551, 852

Higuchi, A. E., Chibueze, J. O., Habe, A., Takahira, K., & Takano, S. 2014, AJ, 147, 141

Honma, M., Bushimata, T., Choi, Y. K., et al. 2005, PASJ, 57, 595

Honma, M., Bushimata, T., Choi, Y. K., et al. 2007, PASJ, 59, 889

Honma, M., Nagayama, T., Ando, K., et al. 2012, PASJ, 64, 136

Hosokawa, T., & Omukai, K. 2009, ApJ, 691, 823

Inoue, T., & Fukui, Y. 2013, ApJL, 774, L31

Izumi, N., Kobayashi, N., Yasui, C., et al. 2014, ApJ, 795, 66

Johnson, D. R. H., & Soderblom, D. R. 1987, AJ, 93, 864

Kennicutt, R. C., Jr. 1998, ApJ, 498, 541

Kerr, F. J., & Lynden-Bell, D. 1986, MNRAS, 221, 1023

N.Kylafis& C. Norman, 1987, ApJ, 323, 346

- Krumholz, M. R., Klein, R. I., & McKee, C. F. 2007, *ApJ*, 656, 959
- Lee, C.-F., Li, Z.-Y., Hirano, N., et al. 2018, *ApJ*, 863, 94
- Macías, E., Espaillat, C. C., Ribas, Á., et al. 2018, *ApJ*, 865, 37
- Migenes, V., Horiuchi, S., Slysh, V. I., et al. 1999, *ApJS*, 123, 487
- Morton, D. C., & Adams, T. F. 1968, *ApJ*, 151, 611
- Motogi, K., Sorai, K., Honma, M., et al. 2011, *MNRAS*, 417, 238
- Motogi, K., Sorai, K., Niinuma, K., et al. 2013, *MNRAS*, 428, 349
- Motogi, K., Sorai, K., Honma, M., et al. 2016, *PASJ*, 68, 69
- Motoyama, K., Umemoto, T., & Shang, H. 2007, *A&A*, 467, 657
- Motte, F., Bontemps, S., Schneider, N., Schilke, P., Menten, & K. M. 2008, *ASPC*, 387, 22
- Motte, F., Bontemps, S., & Louvet, F. 2018, *ARA&A*, 56, 41
- Myers, P. C. 1978, *ApJ*, 225, 380
- Nakanishi, H., & Sofue, Y. 2006, *PASJ*, 58, 847
- Nakanishi, H., Sakai, N., Kurayama, T., et al. 2015, *PASJ*, 67, 68
- Nakanishi, H., & Sofue, Y. 2016, *PASJ*, 68, 5
- Negueruela, I., Simón-Díaz, S., Lorenzo, J., Castro, N., & Herrero, A. 2015, *A&A*, 584, A77
- Nishimura, A., Minamidani, T., Umemoto, T., et al. 2018, *PASJ*, 70, 42
- Oyama, T., Kono, Y., Suzuki, S., et al. 2012, Seventh General Meeting (GM2012) of the international VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), held in Madrid, Spain, March 4-9, 2012, Eds: D. Behrend and K.D. Baver, National Aeronautics and Space Administration, p. 91-95, 91
- Palagi, F., Cesaroni, R., Comoretto, G., Felli, M., & Natale, V. 1993, *A&AS*, 101, 153
- Panagia, N. 1973, *AJ*, 78, 929
- Reid, M. J., & Moran, J.M. 1981, *ARA&A*, 19, 231
- Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., et al. 2014, *ApJ*, 783, 130
- Reid, M. J., Dame, T. M., Menten, K. M., & Brunthaler, A. 2016, *ApJ*, 823, 77

- Sawada, T., Ikeda, N., Sunada, K., et al. 2008, PASJ, 60, 445
- Scalo, J. M. 1986, Luminous Stars and Associations in Galaxies, 116, 451
- Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. 1987, ARA&A, 25, 23
- Slysh, V. I., Dzura, A. M., Val'tts, I. E., & Gerard, E. 1997, A&AS, 124, 85
- Slysh, V. I., Val'tts, I. E., Migenes, V., et al. 1999, ApJ, 526, 236
- Snell, R. L., Loren, R. B., & Plambeck, R. L. 1980, ApJ, 239, L17
- Sunada, K., Nakazato, T., Ikeda, N., et al. 2007, PASJ, 59, 1185
- Sofue, Y., Honma, M., & Omodaka, T. 2009, PASJ, 61, 227
- Takahira, K., Tasker, E. J., & Habe, A. 2014, ApJ, 792, 63
- Tan, J. C. 2000, ApJ, 536, 173
- Tan, J. C., Beltrán, M. T., Caselli, P., et al. 2014, Protostars and Planets VI, 149
- Torii, K., Enokiya, R., Sano, H., et al. 2011, ApJ, 738, 46
- Torii, K., Hasegawa, K., Hattori, Y., et al. 2015, ApJ, 806, 7
- Torii, K., Hattori, Hasegawa, K., Y., et al. 2017, ApJ, 835, 142
- Torii, K., Fujita, S., Matsuo, M., et al. 2018, PASJ, 70, S51
- Umemoto, T., Minamidani, T., Kuno, N., et al. 2017, PASJ, 69, 78
- Valdettaro, R., Palla, F., Brand, J., et al. 2001, A&A, 368, 845
- Wang, K., Wu, Y. F., Ran, L., Yu, W. T., & Miller, M. 2009, A&A, 507, 369
- Whitworth, A. P., Bhattal, A. S., Chapman, S. J., Disney, M. J., & Turner, J. A. 1994, MNRAS, 268, 291
- Wouterloot, J. G. A., & Brand, J. 1989, A&AS, 80, 149
- Wouterloot, J. G. A., Brand, J., & Fiegle, K. 1993, A&AS, 98, 589
- Wu, Y., Zhang, Q., Yu, W., et al. 2006, A&A, 450, 607
- Xu, Y., Li, J. J., Hachisuka, K., et al. 2008, A&A, 485, 729
- Yasui, C., Kobayashi, N., Saito, M., & Izumi, N. 2016, AJ, 151, 115

Zapata, L. A., Fernández-López, M., Rodríguez, L. F., et al. 2018, *AJ*, 156, 239

Zinchenko, I., Pirogov, L., & Toriseva, M. 1998, *A&AS*, 133, 337

Zinchenko, I., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., & Wang, Y. 2018, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 18, 093

Zinnecker, H., & Yorke, H. W. 2007, *ARA&A*, 45, 481

A VERA データの解析と三次元運動について

A.1 年周視差測定

IRAS 01123+6430 の年周視差測定には、国立天文台の廣田朋也氏が開発したフィッティング用スクリプト”VERA_Parallax”を使用した。以下にその使用法を掲載する。フィッティングに必要なファイルは以下の通りである。

- VERA_Parallax # 実行スクリプト
- VERA_Parallax.0.prm # パラメータファイル
- parallax-mult-dble # これが無いと実行できない
- parallax.dat # スポットリストのファイル

1. ”parallax.dat”に、以下のようにスポットリストを記入する。

```
# 左から順に「DOY」、「R.A. offset [mas]」、「R.A. offsetの誤差」、「Decl. offset [mas]」、  
「Decl. offsetの誤差」、「スポットのID」、「チャンネル数」、「LSR速度 [km/s]」  
592 6.994 5.12E-06 4.411 2.69E-05 1 267 -59.6  
657 6.713 2.88E-06 4.514 1.79E-05 1 267 -59.6  
812 6.215 1.86E-06 4.462 1.19E-05 1 267 -59.6  
874 6.225 2.08E-06 4.478 1.50E-05 1 267 -59.6  
975 6.094 2.66E-06 4.739 1.84E-05 1 267 -59.6  
592 7.042 3.40E-06 4.402 1.66E-05 2 268 -60  
657 6.723 2.68E-06 4.516 1.67E-05 2 268 -60.1  
...
```

2. ”VERA_Parallax.0.prm”を以下のように編集する。

```
InputFile      parallax.dat # スポットリストのファイル名  
Use_RA-DEC?    0  
FIT_Parallax?  0.0  
RA      1 15 40.8027 # 赤経座標  
DEC     1 64 46 40.766 # 赤緯座標
```

3. スクリプト”VERA_Parallax”を用いて、以下のコマンドで実行。

```
> ./VERA_Parallax -param VERA_Parallax.0.prm
```

```

RUN Parallax fitting for multi-spot data
Parameter file = VERA_Parallax.0.prm
Input data file= parallax.dat
RA/DEC FLAG= 0: Fit BOTH RA and DEC
Parallax FLAG= 0.000000: Distance/parallax will be calculated.
RA= 01:15:40.8027000 = 18.920011250000
DEC=+64:46:40.7660000 = 64.777990555556
***** RESULTS *****
Parallax :a[1]= 0.1849625935 +- 0.0135313781 mas # 年周視差
Distance :1/a[1]= 5.4064985837 +- 0.3955252535 kpc # 距離
SPOT # 1
RA_origin :a[2]= 6.8307327624 +- 0.0480821983 mas
RA_proper :a[3]= -0.8778546908 +- 0.0691070187 mas/yr
DEC_origin :a[4]= 4.3626768995 +- 0.2876081626 mas
DEC_proper :a[5]= 0.2936664858 +- 0.4281664004 mas/yr
...
Chi-sq = 326114831.5302598476 #  $\chi^2$  乗値
st-dev = 0.1217042162 mas
st-dev(RA) = 0.0852434962 mas # R.A. 方向の年周視差の誤差
st-dev(DEC) = 0.1481019284 mas # Dec1. 方向の年周視差の誤差
DoF = 49- 14 = 35
DoF(N-M) = 69
MA=121, MFIT=29, NDATA=98, NLINE=49
*****
Output: parallax.dat.results
Output: parallax.dat.model
Output: parallax.dat.gnuplot

```

4. 出力された「st-dev(RA)」と「st-dev(DEC)」の値を”parallax.dat”の offset 誤差に以下のように代入し、「Chi-sq」の値が1に近づくまで実行を繰り返す。

```

# 3列目と5列目に offset 誤差を記入
592 6.994 0.0852434962 4.411 0.1481019284 1 267 -59.6
657 6.713 0.0852434962 4.514 0.1481019284 1 267 -59.6
. . .

```

A.2 3次元運動の導出

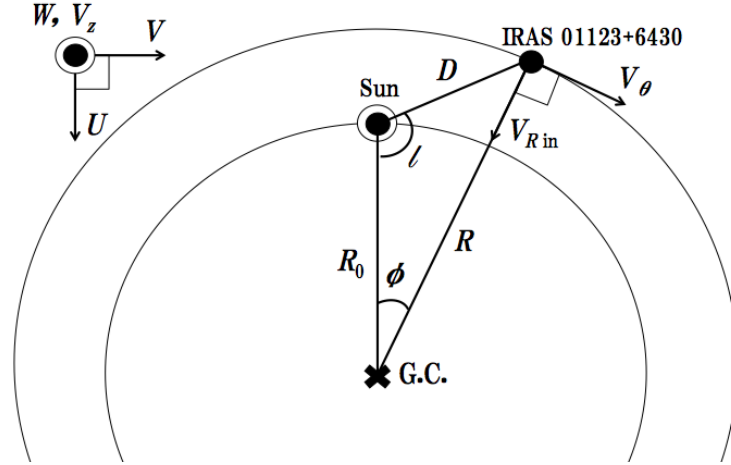


Figure 45: 銀河系内における太陽と IRAS 天体（例：IRAS 01123+6430）の位置関係と 3次元運動の様子を表した模式図。 W, V_z の方向は紙面手前方向を表す。

銀河中心距離 R は余弦定理 $R = \sqrt{R_0^2 + (D\cos b)^2 - 2R_0(D\cos b)\cos l}$ から求めることができる。銀河系内での天体の 3 次元的な運動は特異運動と呼ばれており、銀河中心方向の速度 U 、銀河回転方向の速度 V 、鉛直方向の速度 W の 3 成分で表される。これらを求めるためには、銀河座標系での固有運動 (v_l, v_b) 、視線速度 V_{Helio} 、太陽特異運動 $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (10.0, 12.0, 7.2) \text{ km s}^{-1}$ (Honma et al. 2012; Nakanishi et al. 2015) が必要となる。視線速度 V_{Helio} は、 V_{LSR} から太陽の標準運動 $(U_{\odot}^{\text{Std}}, V_{\odot}^{\text{Std}}, W_{\odot}^{\text{Std}}) = (10.3, 15.3, 7.7) \text{ km s}^{-1}$ (Kerr & Lynden-Bell 1986) を引いたもので、以下の式より、

$$V_{\text{Helio}} = V_{\text{LSR}} - (U_{\odot}^{\text{Std}}\cos l + V_{\odot}^{\text{Std}}\sin l)\cos b - W_{\odot}^{\text{Std}}\sin b. \quad (25)$$

そして以下の式から、

$$U - U_{\odot} = (V_{\text{Helio}}\cos b - v_b\sin b)\cos l - v_l\sin l \quad (26)$$

$$V - V_{\odot} = (V_{\text{Helio}}\cos b - v_b\sin b)\sin l + v_l\cos l + V_0 \quad (27)$$

$$W - W_{\odot} = V_{\text{Helio}}\sin b + v_b\cos b \quad (28)$$

もう一つの運動として、 $(V_{R_{\text{in}}}, V_{\theta}, V_z)$ がある。 (U, V, W) が銀河系内に固定されているのに対し、 $(V_{R_{\text{in}}}, V_{\theta}, V_z)$ は鉛直成分 $W = V_z$ を軸として回転角 ϕ だけ座標系を回転させる、円柱座標系の 3 次元運動である (figure 45)。ここで回転角 ϕ は、銀河中心-太陽間距離 R_0 と銀河中心-IRAS 天体間距離 R のなす角度を表す (ただし、 $\sin\phi = \frac{D\cos b}{R}\sin l$, $\cos\phi = \frac{R_0 - D\cos b\cos l}{R}$)。この 3 次元運動への変換は以下の回転行列を使用する。

$$\begin{bmatrix} V_{R_{\text{in}}} \\ V_{\theta} \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (29)$$

A.3 誤差伝播

ある関数 $f(x, y)$ の誤差を $\sigma_{f(x,y)}$ 、 x の誤差 σ_x 、 y の誤差 σ_y とすると、これらの誤差は以下の関係を持つ²。

$$\sigma_{f(x,y)}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 \quad (30)$$

複数の変数の関数 $f(x_1, x_2, \dots)$ を考えると、

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_i^2 \quad (31)$$

と一般的に表される。

$\mu_l \cos b$ や μ_b はあくまで座標系における固有運動で、実際の速度は、Object の距離 D で変わるため、 $v_l = D\mu_l \cos b$ 、 $v_b = D\mu_b$ で表される。これらの式の共通として、以下の関数を考える。

$$v = v(\mu, D) = D\mu \quad (32)$$

式 (30) に従って書き下して式変形すると、

$$\begin{aligned} \Delta v^2 &= \left(\frac{\partial v}{\partial \mu}\right)^2 \Delta \mu^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial D}\right)^2 \Delta D^2 \\ &= D^2 \Delta \mu^2 + \mu^2 \Delta D^2 \\ &= \frac{D^2 \Delta \mu^2}{(D\mu)^2} \cdot (D\mu)^2 + \frac{\mu^2 \Delta D^2}{(D\mu)^2} \cdot (D\mu)^2 \\ &= \left(\frac{\Delta \mu}{\mu}\right)^2 v^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 v^2 \end{aligned}$$

を得ることが出来る。 v は v_l 、 v_b に、 μ は $\mu_l \cos b$ 、 μ_b に相当するので、整理すると

$$\Delta v_l = v_l \sqrt{\left(\frac{\Delta \mu_l \cos b}{\mu_l \cos b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2}, \quad \Delta v_b = v_b \sqrt{\left(\frac{\Delta \mu_b}{\mu_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2} \quad (33)$$

のようになる。

余弦定理 $R = \sqrt{R_0^2 + (D \cos b)^2 - 2R_0 (D \cos b) \cos l}$ より、銀河中心距離 R は銀河定数 R_0 と太陽-天体間の距離 D の関数になっている ($R = R(R_0, D)$)。

式 (30) に従って、 R について書き下すと

$$\Delta R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial R_0}\right)^2 \Delta R_0^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial D}\right)^2 \Delta D^2 \quad (34)$$

と表される。ここで、

$$\frac{dR}{dR_0} = \frac{R_0 - D \cos b \cos l}{R}, \quad \frac{dR}{dD} = \frac{D \cos^2 b - R_0 \cos b \cos l}{R} \quad (35)$$

²Johnson & Soderblom (1987) を参照

である。

特異運動の式は以下のようにになっているから、

$$U - U_{\odot} = (V_{\text{Helio}} \cos b - v_b \sin b) \cos l - v_l \sin l \quad (36)$$

$$V - V_{\odot} = (V_{\text{Helio}} \cos b - v_b \sin b) \sin l + v_l \cos l + V_0 \quad (37)$$

$$W - W_{\odot} = V_{\text{Helio}} \sin b + v_b \cos b \quad (38)$$

U, V, W のいずれも、 $V_{\text{Helio}}, v_l, v_b$ の関数になっている。これより、 U, V, W の共通の特異運動を Π として、関数 $\Pi = \Pi(V_{\text{Helio}}, v_l, v_b)$ を導入する。

式 (30) を使って書き下すと、

$$\Delta \Pi^2 = \left(\frac{\partial \Pi}{\partial V_{\text{Helio}}} \right)^2 \Delta V_{\text{Helio}}^2 + \left(\frac{\partial \Pi}{\partial v_l} \right)^2 \Delta v_l^2 + \left(\frac{\partial \Pi}{\partial v_b} \right)^2 \Delta v_b^2 \quad (39)$$

この式を参考に、式 (36)~(38) を偏微分して行列でまとめると、

$$\begin{bmatrix} \Delta U^2 \\ \Delta V^2 \\ \Delta W^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 l \cos^2 b & \sin^2 l & \cos^2 l \sin^2 b \\ \sin^2 l \cos^2 b & \cos^2 l & \sin^2 l \sin^2 b \\ \sin^2 b & 0 & \cos^2 b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{\text{Helio}}^2 \\ \Delta v_l^2 \\ \Delta v_b^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

と表すことが出来る。ここで、銀河定数 V_0 の誤差 ΔV_0 を考慮すると、 $V' = V'(V, V_0) = V + V_0$ の関数から、

$$\Delta V'^2 = \left(\frac{\partial V'}{\partial V} \right)^2 \Delta V^2 + \left(\frac{\partial V'}{\partial V_0} \right)^2 \Delta V_0^2 = \Delta V^2 + \Delta V_0^2$$

と表せる。

特異運動 (U, V, W) を $W = V_z$ を軸とした回転座標系 (円柱座標) ($V_{R_{\text{in}}}, V_{\theta}, V_z$) に変換するのに必要な回転行列の因子として、 $\sin \phi, \cos \phi$ があって、それぞれ

$$\sin \phi = \frac{D \cos b}{R} \sin l, \quad \cos \phi = \frac{R_0 - D \cos b \cos l}{R} \quad (41)$$

と表される。

この回転行列を使って、以下のような座標変換を行い、

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{R_{\text{in}}} \\ \Delta V_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (42)$$

$\Delta V_r, \Delta V_{\theta}$ を求める。 ΔV_z については、 $\Delta W = \Delta V_z$ なので、不変である。

(U, V) \rightarrow ($V_{R_{\text{in}}}, V_{\theta}$) の変換の際、誤差の合成ベクトルのスカラーも保存されていなければならない。

$$(\sqrt{\Delta U^2 + \Delta V^2} = \sqrt{\Delta V_{R_{\text{in}}}^2 + \Delta V_{\theta}^2})$$

A.4 誤差計算スクリプト

使用するスクリプトは”orc_calc_ver1.2.pl”で、銀河中心距離 R 、3次元特異運動 (U, V, W) , $(V_{R_{in}}, V_{\theta}, V_z)$ の算出を行うと共に、それらの値の誤差伝搬の計算も行うことができる。使用方法としては、以下の通りである。

1. テキストファイル”orc_calc_inp.txt”に、”example.txt”を参考に、上から「銀経」「銀緯」「視線速度」「視線速度の誤差」「年周視差」「年周視差の誤差」「銀河座標の固有運動（銀経方向）」「固有運動の誤差（銀経方向）」「銀河座標の固有運動（銀緯方向）」「固有運動の誤差（銀緯方向）」の順に各値を入力する。
2. ターミナル上で”perl orc_calc_ver1.2.pl”と入力して実行。
3. 年周視差からの距離、銀経・銀緯方向の固有運動の値が単位変換されたもの ($[\text{mas yr}^{-1}] \rightarrow [\text{km s}^{-1}]$) が求められ、使用する銀河定数の選択画面に入る。
4. 選択画面に掲載されている銀河定数の中から使用するものを選んで1～4のいずれかの番号を入力する。
5. 銀河中心距離 R 、3次元特異運動 (U, V, W) , $(V_{R_{in}}, V_{\theta}, V_z)$ 等が誤差付きで計算され、テキストファイル”result_calc.txt”として出力される。

銀河定数の選択画面

```
Galactic Constants [  
1:Honma et al.(2012); # (R0, V0) = (8.05 ± 0.45[kpc], 238 ± 14[km/s])  
2:IAU; # (R0, V0) = (8.5[kpc], 220[km/s])  
3:Denhen_Binney(1998); # (R0, V0) = (8.0[kpc], 217[km/s])  
4:Reid et al.(2014);] # (R0, V0) = (8.34 ± 0.16[kpc], 240 ± 8[km/s])
```

”orc_calc_ver1.2.pl”

```
#!/usr/bin/perl

#####
# orc_calc.pl -- calculate values by using some Gal.Consts #
# usage: type "./orc_calc.pl"                               #
# On 2015/12/16 made by Perl                               #
# Nkoide @ kag                                             #
#####

$ver = 'ver.1.2 (2015/12/16)';
printf("\n");
printf("$ver\n");
printf("\n");

$pi = 3.141592654;
$onepc = 3.08568e13;

# 太陽特異運動 (Hipparcos data)
$Usol_hip = 10.; $Vsol_hip = 12.; $Wsol_hip = 7.2;

# 太陽特異運動 (IAU 推奨値)
$Usol_iau = 10.; $Vsol_iau = 15.4; $Wsol_iau = 7.8;

# Honma et al.(2012)
$R0_hon = 8.05; $V0_hon = 238.;

# IAU1985
$R0_iau = 8.5; $V0_iau = 220.;

# Dehnen & Binney(1998)
$R0_db = 8.; $V0_db = 217.;

# Reid et al.(2014)
$R0_rei = 8.34; $V0_rei = 240.;

printf("\n");

# "orc_calc_inp.txt"に銀経銀緯、年周視差、固有運動等の値を入力
open (DATA,"< orc_calc_inp.txt");

# 銀経、銀緯
chomp($l=<DATA>);
printf("Galactic longitude [deg]: $l\n");
chomp($b=<DATA>);
printf("Galactic latitude [deg]: $b\n");

# 視線速度と誤差
chomp($vlsr=<DATA>);
chomp($verr=<DATA>);
printf("V_LSR [km/s]: $vlsr +/- $verr\n");

# 年周視差と誤差
chomp($pala=<DATA>);
chomp($perr=<DATA>);
printf("Parallax [mas]: $pala +/- $perr\n");
```

```

# 固有運動 (銀河座標)
chomp($mu_l=<DATA>);
chomp($mulerr=<DATA>);
printf("Proper motion ( $\mu$  lcosb) [mas/yr]: $mu_l +/- $mulerr\n");
chomp($mu_b=<DATA>);
chomp($muberr=<DATA>);
printf("Proper motion ( $\mu$  b) [mas/yr]: $mu_b +/- $muberr\n");

# V_Helio と距離の計算
step1();

printf("\n");
printf("=====\n");
printf("Heliocentric velocity: %f +/- %f [km/s]\n", $vhelio, $verr);
printf("Trigonometric distance: %f +%f / -%f [kpc]\n", $d, $derr_plus, $derr_minus);
if ($derr_plus >= $derr_minus){
    $derr = $derr_plus;
} elsif ($derr_plus <= $derr_minus){
    $derr = $derr_minus;
}

printf("\n");

# vl, vl -> km/s 変換
step2();

printf("vl = %f +/- %f [km/s]\n", $vl, $vlerr);
printf("vb = %f +/- %f [km/s]\n", $vb, $vberr);
printf("=====\n");
printf("\n");

printf("\n");
printf("Galactic Constants [\n");
printf("1:Honma et al.(2012);\n");
printf("2:IAU;\n");
printf("3:Denhen_Binney(1998);\n");
printf("4:Reid et al.(2014);]\n");
printf("> ");
chomp($const=<STDIN>);
if ($const == 1){
    $RO = 8.05; $VO = 238.;
    $RO_err = 0.45; $VO_err = 14.;
    $etal = 'Honma et al.(2012)';
    $msg = 'Appears to be successfully.';
} elsif ($const == 2){
    $RO = 8.5; $VO = 220.;
    $RO_err = 0.; $VO_err = 0.;
    $etal = 'IAU';
    $msg = 'Appears to be successfully.';
} elsif ($const == 3){
    $RO = 8.; $VO = 217.;
    $RO_err = 0.; $VO_err = 0.;
    $etal = 'Denhen_Binney(1998)';
    $msg = 'Appears to be successfully.';
} elsif ($const == 4){

```

```

$R0 = 8.34; $V0 = 240.;
$R0_err = 0.16; $V0_err = 8.;
$etal = 'Reid et al.(2014)';
$msg = 'Appears to be successfully.';
} else {
printf("> not chose. failed.\n");
printf("> you must be choose 1 - 4!!\n\n");
$msg = 'Error.';
break;
}

# 銀河中心距離の算出・誤差計算
step3();

# 運動学的距離算出
kinematic();

# (U,V,W) 算出
UVW();

$U = $uusol + $Usol_hip;
$V = $vvsol + $Vsol_hip + $V0;
$W = $wvsol + $Wsol_hip;

# (U,V,W) -> (V_r,V_theta,V_z) 座標変換
sinp_cosp();

$Vr = $U*$cosp - $V*$sinp;
$Vt = $U*$sinp + $V*$cosp;
$Vz = $W;

vrvtvz();

# 結果をテキストファイルとして出力
open (FH, "> result_calc.txt");
print FH "\n";
print FH "R = $R +/- $R_err [kpc]\n";
print FH "\n";
print FH "Peculiar motion : \n";
print FH "U = $U +/- $U_err [km/s]\n";z
print FH "V = $V +/- $V_err [km/s]\n";
print FH "W = $W +/- $W_err [km/s]\n";
print FH "\n";
print FH "V_r = $Vr +/- $Vr_err [km/s]\n";
print FH "V_theta = $Vt +/- $Vt_err [km/s]\n";
print FH "V_z = $Vz +/- $Vz_err [km/s]\n";
print FH "\n";
print FH "Kinematic distance : \n";
print FH "R = $R_k [kpc], D = $D_k [kpc]\n";
print FH "\n";
close (FH);

```

```

printf("-----\n");
printf("Message: ~.txt was made.\n");
printf("Message: look directory '> orc_calc/'\n");
printf("Message: (U,V) -> (V_r,V_theta) rotation matrix:\n");
printf("Message: \t sin(phi) = %f +/- %f\n", $sinp, $sinp_err);
printf("Message: \t cos(phi) = %f +/- %f\n", $cosp, $cosp_err);
printf("Message: used const : $etal\n");
printf("Message: R_0 = $R0 +/- $R0_err [kpc], V_0 = $V0 +/- $V0_err [km/s]\n");
printf("Message: $msg\n");
printf("-----\n");

printf("\n");

# step1 ~ step3
sub step1{
    $vhelio = $vlsrc-(10.3*cos($l*$pi/180.))+15.3*sin($l*$pi/180.))*cos($b*$pi/180.)
    -7.7*sin($b*$pi/180.);
    $d = 1/$pala;
    $derr_plus = abs(1/$pala-1/($pala-$perr));
    $derr_minus = abs(1/$pala-1/($pala+$perr));
};

sub step2{
    $v1 = $d*1000.*$onepc*cos($b*$pi/180.)*($mu_l/1000./3600.*$pi/180.)/(365.24*24.
    *3600);
    $v1err = sqrt(($mulerr/$mu_l)**2+($derr/$d)**2)*abs($v1);
    $vb = $d*1000.*$onepc*cos($b*$pi/180.)*($mu_b/1000./3600.*$pi/180.)/(365.24*24.
    *3600);
    $vberr = sqrt(($muberr/$mu_b)**2+($derr/$d)**2)*abs($vb);
};

sub step3{
    $R = sqrt($R0**2+($d*cos($b*$pi/180.))**2-2*$R0*$d*cos($b*$pi/180.)*cos($l
    *$pi/180.));
    dR();
    $R_err = sqrt($dRdR0**2*$R0_err**2+$dRdD**2*$derr**2);
    sub dR{
        $dRdR0 = ($R0-$d*cos($b*$pi/180.)*cos($l*$pi/180.))/R;
        $dRdD = ($d*cos($b*$pi/180.))**2-$R0*cos($b*$pi/180.)*cos($l*$pi/180.))/R;
    };
};

# 運動学的距離
sub kinematic{
    $R_k = $R0*$V0*sin($l*$pi/180.)/($vlsrc+$V0*sin($l*$pi/180.));
    $D_k = ($R0*cos($l*$pi/180.))+sqrt($R_k**2-($R0*sin($l*$pi/180.))**2)/cos($b
    *$pi/180.);
};

```

```

# (U,V,W) の誤差計算
sub UVW{
  matrix();
  $uusol = $a[0]*$vhelio + $a[1]*$vl + $a[2]*$vb;
  $vvsol = $a[3]*$vhelio + $a[4]*$vl + $a[5]*$vb;
  $wvsol = $a[6]*$vhelio + $a[7]*$vl + $a[8]*$vb;
  $uusol_err = $a[0]**2*$vterr**2 + $a[1]**2*$vlerr**2 + $a[2]**2*$vberr**2;
  $vvsol_err = $a[3]**2*$vterr**2 + $a[4]**2*$vlerr**2 + $a[5]**2*$vberr**2;
  $wvsol_err = $a[6]**2*$vterr**2 + $a[7]**2*$vlerr**2 + $a[8]**2*$vberr**2;
  $U_err = sqrt($uusol_err);
  $V_err = sqrt($vvsol_err+$V0_err**2);
  $W_err = sqrt($wvsol_err);
};

# 座標変換行列因子 (sin(phi),cos(phi)) と誤差計算
sub sinp_cosp{
  $sinp = ($d/$R)*cos($b*$pi/180.)*sin($l*$pi/180.);
  $cosp = ($R0-$d*cos($b*$pi/180.)*cos($l*$pi/180.))/R;
  dsin_dcos();
  $sinp_err = sqrt($dsdD**2*$derr**2+$dsdR**2*$R_err**2);
  $cosp_err = sqrt($dcdD**2*$derr**2+$dcdR**2*$R_err**2+$dcdR0**2*$R0_err**2);
  sub dsin_dcos{
    $dsdD = cos($b*$pi/180.)*sin($l*$pi/180.)/R;
    $dsdR = -$d*cos($b*$pi/180.)*sin($l*$pi/180.)/($R**2);
    $dcdD = -cos($b*$pi/180.)*cos($l*$pi/180.)/R;
    $dcdR = -($R0-$d*cos($b*$pi/180.)*cos($l*$pi/180.))/($R**2);
    $dcdR0 = 1/$R;
  };
};

# (V_r,V_theta,V_z) 誤差計算
sub vrvtvz{
  $Vr_err = $U_err*$cosp - $V_err*$sinp;
  $Vt_err = $U_err*$sinp + $V_err*$cosp;
  $Vz_err = $W_err;
};

# 行列因子
sub matrix{
  $a[0]=cos($l*$pi/180.)*cos($b*$pi/180.); $a[1]=-sin($l*$pi/180.);
  $a[2]=-cos($l*$pi/180.)*sin($b*$pi/180.);
  $a[3]=sin($l*$pi/180.)*cos($b*$pi/180.); $a[4]=cos($l*$pi/180.);
  $a[5]=-sin($l*$pi/180.)*sin($b*$pi/180.);
  $a[6]=sin($b*$pi/180.); $a[7]=0; $a[8]=cos($b*$pi/180.);
};

```

B FCRAO データの解析について

B.1 FITS データの処理

まず最初に以下のタスクを実行して 606 個の分割データをロードする。

```
> task 'fitld'
> default;indisk 2;outdisk 2
> douvcomp 1;doconcat 1;outname 'fcrao'
> for i=1:9;datain 'IN:ogs_00'!!char(i)!!'.fit';go;wait;end
> for i=10:99;datain 'IN:ogs_0'!!char(i)!!'.fit';go;wait;end
> for i=100:606;datain 'IN:ogs_'!!char(i)!!'.fit';go;wait;end
> pcat
AIPS 1: Catalog on disk 2
AIPS 1:  Cat Usid Mapname      Class  Seq Pt      ...
AIPS 1:   1   35 FCRAO        .IMAP  .   1 MA ...
AIPS 1:   2   35 FCRAO        .IMAP  .   1 MA ...
...
AIPS 1:  606  35 FCRAO        .IMAP  .   1 MA ...
```

ロードが終了したら、以下のタスク (MCUBE) を実行して銀緯方向にデータを足し合わせる。すると、'getn 607' というキューブデータが作成される。ロードした getn 1~606 は不必要なので'zap'で消去する。

```
> task 'mcube'
> default;indisk 2;outdisk 2
> getn 1;inseq 1;in2seq 606;in3seq 1;outname 'fcrao';
> npoints 606;go;wait;end;pcat
...
AIPS 1:   607  35 FCRAO        .MCUBE  .   1 MA      ...

> for i=1:606;getn i;zap;end;recat;pcat
AIPS 1: Catalog on disk 2
AIPS 1:  Cat Usid Mapname      Class  Seq Pt      ...
AIPS 1:   1   35 FCRAO        .MCUBE  .   1 MA      ...
```

これで、解析に必要なキューブデータが準備できたため、後は AIPS 内の様々なタスクを使用してデータを扱うことができる。以下にデータを扱う様々なタスクと AIPS のログを紹介しておく。

- 'TRANS': キューブデータの軸の並べ替えを行う

```
> task 'trans'
> default;indisk 2;outdisk 2; getn 1
> transcod '312' ; go;wait;end *軸の順番入れ替え
```

- 'MOMNT', 'XSUM': 1 軸目の積分を行い、積分マップを作成

```
> task 'momnt'
> default;indisk 2;outdisk 2; getn 1
> outname '';icut 0;outclass '0'
* blc で積分範囲の開始を、trc で終わり設定する
> blc 9 0 0; trc 20 0 0 ; go;wait;end
```

```
> task 'xsum'
> default;indisk 2;outdisk 2; getn 1
> outclass 'xsum'
> blc 16 0 0 ; trc 27 0 0
> opcode 'sum' *'SUM' or 'AVER'; go;wait;end
```

- 'SUBIM': サーベイ画像内の詳細に調べたい箇所のみを切り取る

```
> task 'subim'
> default;indisk 2;outdisk 2; getn 1
> xinc 0;yinc 0;zinc 0
* 切取る範囲を設定
> blc 1130 117 53 0; trc 1165 127 94 0; go;wait;end
```

- 'KNTR': 天体画像をコントラスト (等高線) で表示

```
> task 'kntr'
> default;indisk 2;outdisk 2; getn 1
> dogrey -1;dovect -1;dotv 1
* 表示する範囲を設定
> blc 1078 291 0; trc 1220 434 0; go
```

- 'FITTP': キューブデータや積分マップを FITS ファイルとして出力

```
> task 'fittp'
> default;indisk 2;outdisk 2; getn 1
> dataout 'out:01123_vbl_flt.fits'; go;wait
```

AIPS 内で'XSUM'によって速度方向に積分したマップを'FITTP'で FITS ファイルとして出力する。

B.2 解析スクリプト

AIPS で処理を施した FITS データの解析手順としては以下のようにになっている。

1. "python fcrao_anlys_3.py"とターミナル上に入力し実行すると、天体名が聞かれるので、"FITS"のディレクトリ内の各ファイルをチェックし、使用したい FITS ファイル名（拡張子".FITS"を除く）を入力する。
2. 銀経・銀緯の値が聞かれるので、IRAS 源の位置（銀河座標）を入力する（銀経と銀緯の値の間に必ずスペースを入れる）。
3. ディレクトリ"data"とそこに天体名ディレクトリが作成され、天体画像・テキストデータ（pixel データ・ヘッダ）が出力され、積分強度の最大値・最小値・rms 等の計算が行われる。
4. 処理が終わると、銀経範囲・銀緯範囲・距離・距離の誤差が聞かれるので、作成された天体画像の EPS ファイルを見ながら銀経と銀緯の範囲を入力し、諸値を入力して実行。
5. 指定した銀経・銀緯の範囲内で処理が行われ、 $3\sigma_1$, $3\sigma_2$ の計算が行われ、 $3\sigma_1$ 以下の pixel のプロット図、 $3\sigma_2$ 以上の pixel のプロット図 が出力される。
6. 最終的に< Result >に、分子雲のサイズ・光度・質量・水素分子密度の最大値・最小値・その他の値が出力される。
7. GNUPLOT のファイル"plot.plt"が作成されているのが分かる。実行ログの最後に"cd data/01123/"と"gnuplot plot.plt"と書かれているので、そのままコピーして実行。すると、水素分子密度分布のカラーマップが作成され、IRAS 源の位置が×印でプロットされる。

”fcrao_anlys_3.py”

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-
from astropy.io import fits
from numpy import *
from pylab import *
import os
import aplpy
import matplotlib

name='# Koide_20160804'
print name

if os.path.exists('data') == False:
    os.mkdir('data')

print ''
print 'Look directory "/FITS/~", input name "~.FITS" !'

#天体名
obj_name=raw_input('Object Name: ')

if os.path.exists('data/'+str(obj_name)) == False:
    os.mkdir('data/'+str(obj_name))

print 'Galactic Longitude and Latitude [deg]'
l_b=map(float, raw_input().split())

#IRAS source position ファイル出力
position=open('data/'+str(obj_name)+'position.dat','w')
position.writelines(str(l_b[0])+'\t'+str(l_b[1])+'\n')
position.close()

print ''
print '...making map.....'

matplotlib.rcParams['font.family']='Times New Roman'
fig=matplotlib.pyplot.figure()

IMAGE=aplpy.FITSFigure('FITS/'+str(obj_name)+'.FITS',figure=fig)
IMAGE.show_colorscale(vmin=0)
IMAGE.tick_labels.set_font(size='small')
IMAGE.show_colorbar()
IMAGE.tick_labels.set_font(size=15)
IMAGE.tick_labels.set_xformat('dd.d')
IMAGE.tick_labels.set_yformat('dd.d')
IMAGE.axis_labels.set_xttext(r'${\rm Galactic\ Longitude}$')
IMAGE.axis_labels.set_ytext(r'${\rm Galactic\ Latitude}$')
IMAGE.colorbar.set_axis_label_text(r'${\rm Intensity}$ ${\rm [K\ km\ s^{-1}]}$')
IMAGE.axis_labels.set_font(size=25)
IMAGE.colorbar.set_axis_label_font(size=25)
IMAGE.recenter(l_b[0],l_b[1],1.0,1.0)
savefig('data/'+str(obj_name)+'cloud_'+str(obj_name)+'.eps')
clf()
```

```

f=fits.open('FITS/'+str(obj_name)+'.FITS')

fd=f[0].data
fh=f[0].header

print ''
print '...outputting.....'

#Data 出力
dat=open('data/'+str(obj_name)+'/cloud_img_data_'+str(obj_name)+'.txt','w')
#dat.writelines('G.Longitude [deg]\t G.Latitude [deg]\t CO Intensity [K*km/s]\n')

m=0
for m in range(fh['NAXIS1']):
    glon=fh['CRVAL1']
    glon+=fh['CDEL1']*m
    n=0
    for n in range(fh['NAXIS2']):
        glat=fh['CRVAL2']
        glat+=fh['CDEL2']*n
        if (l_b[0]-1.0)<glon<(l_b[0]+1.0):
            if (l_b[1]-1.0)<glat<(l_b[1]+1.0):
                dat.writelines(str(glon)+'\t'+str(glat)+'\t'+str(fd[n,m])+'\n')
dat.close()

#Header 出力
hed=open('data/'+str(obj_name)+'/header_'+str(obj_name)+'.txt','w')
hed.writelines(str(fh))
hed.close()

print ''

# 最大値、最小値、平均値、rms
s_lu_1=0.0
s_lu_2=0.0
ll=[]
bb=[]
h_lu=[]
for lu in open('data/'+str(obj_name)+'/cloud_img_data_'+str(obj_name)+'.txt'):
    itm_lu=lu.split('\t')
    lb_1=float(itm_lu[0])
    lb_2=float(itm_lu[1])
    s_lu_1+=float(itm_lu[2])
    s_lu_2+=float(itm_lu[2])**2
    ll.append(lb_1)
    bb.append(lb_2)
    h_lu.append(float(itm_lu[2]))

print '=====

print 'Galactic Longitude:\t %f - %f [deg]' %(min(ll),max(ll))
print 'Galactic Latitude:\t %f - %f [deg]' %(min(bb),max(bb))
print 'Max of Intensity:\t %f [K * km/s]' %(max(h_lu))
print 'Minimum of Intensity:\t %f [K * km/s]' %(min(h_lu))

av_lu=s_lu_1/len(h_lu)

```

```

print 'Average of Intensity:\t %f [K * km/s]' %(av_lu)

rms=sqrt(s_lu_2/len(h_lu))
print 'RMS of Intensity:\t %f [K * km/s]' %(rms)
print 'S/N ratio:\t\t %f' %(max(h_lu)/rms)

s_lu_3=0.0
for lu_1 in open('data/'+str(obj_name)+'cloud_img_data_'+str(obj_name)+'.txt'):
    itm_lu_1=lu_1.split('\t')
    s_lu_3+=(float(itm_lu_1[2])-av_lu)**2

sig_sq=s_lu_3/len(h_lu)
print 'Dispersion:\t\t %f' %(sig_sq)

thr_sigma=3.0*sqrt(sig_sq)

print '=====
print ''

#銀経範囲 [deg]
print 'Galactic Longitude "l_min" and "l_max" [deg]'
G_lon=map(float, raw_input().split())

#銀緯範囲 [deg]
print 'Galactic Latitude "b_min" and "b_max" [deg]'
G_lat=map(float, raw_input().split())

#距離 [kpc]
d=raw_input('Distance [kpc] -> ')

#距離の誤差
print 'Error of Distance "+***" and "-***"'
d_err=map(float, raw_input().split())

print ''
print '...calculating.....'

#範囲内のデータを抽出 (emission を除いたもの)
tx=open('data/'+str(obj_name)+'noise_data_'+str(obj_name)+'.txt','w')
i=0
for i in range(fh['NAXIS1']):
    l=fh['CRVAL1']
    l+=fh['CDEL1']*i
    j=0
    for j in range(fh['NAXIS2']):
        b=fh['CRVAL2']
        b+=fh['CDEL2']*j
        if G_lon[0]<l<G_lon[1]:
            if G_lat[0]<b<G_lat[1]:
                if fd[j,i]<=thr_sigma:
                    tx.writelines(str(l)+'\t'+str(b)+'\t'+str(fd[j,i])+'\n')
tx.close()

```

```

for xylum in open('data/'+str(obj_name)+'noise_data_'+str(obj_name)+'.txt','r'):
    item_xyl=xylum.split('\t')
    x_x=float(item_xyl[0])
    y_y=float(item_xyl[1])
    plot(x_x,y_y,'sb',markersize=15)

ax_1=gca()
ax_1.invert_xaxis()
title(r'CO Intensity'+r'$\leq$'+str(thr_sigma)+r'$\{\rm K\ km\ s^{-1}\}$', fontsize=25)
xlabel(r'Galactic Longitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=25)
ylabel(r'Galactic Latitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=25)
savefig('data/'+str(obj_name)+'plot_'+str(obj_name)+'_l_b_noise.eps')

clf()

#3  $\sigma$  計算
ss_lu=0.0
hh_lu=[]

for lum in open('data/'+str(obj_name)+'noise_data_'+str(obj_name)+'.txt'):
    itm_lum=lum.split('\t')
    ss_lu+=float(itm_lum[2])
    hh_lu.append(float(itm_lum[2]))

av_lum=ss_lu/len(hh_lu)

ss_lu_2=0.0
for llu in open('data/'+str(obj_name)+'noise_data_'+str(obj_name)+'.txt'):
    itm_llu=llu.split('\t')
    ss_lu_2+=(float(itm_llu[2])-av_lum)**2

sig_sq_2=ss_lu_2/len(hh_lu)
print 'Sigma = %f [K * km/s]' %(sqrt(sig_sq_2))

thr_sigma_2=3.0*sqrt(sig_sq_2)
print '3 sigma = %f [K * km/s]' %(thr_sigma_2)

#範囲内のデータを抽出 (3  $\sigma$  以上)
tx=open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'.txt','w')
p=0
for p in range(fh['NAXIS1']):
    l1l=fh['CRVAL1']
    l1l+=fh['CDELT1']*p
    q=0
    for q in range(fh['NAXIS2']):
        bbb=fh['CRVAL2']
        bbb+=fh['CDELT2']*q
        if G_lon[0]<l1l<G_lon[1]:
            if G_lat[0]<bbb<G_lat[1]:
                if fd[q,p]>thr_sigma_2:
                    nh_2=fd[q,p]*2.0*10**20
                    tx.writelines(str(l1l)+'\t'+str(bbb)+'\t'+str(fd[q,p])+'\t'+str(nh_2)+'\n')
tx.close()

s=0.0
for line in open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'.txt','r'):

```

```

    item=line.split('\t')
    s+=float(item[2])

subplot(211)

#銀経-光度平面
for line_1 in open('data/'+str(obj_name)+'/data_'+str(obj_name)+'.txt','r'):
    item_1=line_1.split('\t')
    x_1=float(item_1[0])
    y_1=float(item_1[2])
    bar(x_1,y_1,width=0.01,align='center')

ax=gca()
ax.invert_xaxis()
title(r'G.Latitude : '+str(G_lat[0])+r'$^{\circ}$'+r' - '+str(G_lat[1])+r'$^{\circ}$')
xlabel(r'Galactic Longitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=15)
ylabel(r'CO Intensity [ $\text{K km s}^{-1}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=15)

subplot(212)

#銀緯-光度平面
for line_2 in open('data/'+str(obj_name)+'/data_'+str(obj_name)+'.txt','r'):
    item_2=line_2.split('\t')
    x_2=float(item_2[1])
    y_2=float(item_2[2])
    bar(x_2,y_2,width=0.01,align='center')

title(r'G.Longitude : '+str(G_lon[0])+r'$^{\circ}$'+r' - '+str(G_lon[1])+r'$^{\circ}$')
xlabel(r'Galactic Latitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=15)
ylabel(r'CO Intensity [ $\text{K km s}^{-1}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=15)
savefig('data/'+str(obj_name)+'/plot_'+str(obj_name)+'_l_b_co.eps')

clf()

#銀経-銀緯平面
for line_3 in open('data/'+str(obj_name)+'/data_'+str(obj_name)+'.txt','r'):
    item_3=line_3.split('\t')
    x_3=float(item_3[0])
    y_3=float(item_3[1])
    plot(x_3,y_3,'sb',markersize=15)

ax_1=gca()
ax_1.invert_xaxis()
title(r'CO Intensity'+r'$\geq$'+str(thr_sigma_2)+r'$\text{K km s}^{-1}$', fontsize=25)
xlabel(r'Galactic Longitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=25)
ylabel(r'Galactic Latitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=25)
savefig('data/'+str(obj_name)+'/plot_'+str(obj_name)+'_l_b_emission.eps')

clf()

print 'Galactic Longitude -> min and max[deg]'
longi=map(float, raw_input().split())

print 'Galactic Latitude -> min and max[deg]'
latit=map(float, raw_input().split())

```

```

tx_2=open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'_2.txt','w')
for line_4 in open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'_2.txt','r'):
    item_4=line_4.split('\t')
    x_4=float(item_4[0])
    y_4=float(item_4[1])
    if longi[0]<x_4<longi[1]:
        if latit[0]<y_4<latit[1]:
            tx_2.writelines(str(x_4)+'\t'+str(y_4)+'\t'+str(item_4[2])+'\t'+str(item_4[3]))
tx_2.close()

for line_5 in open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'_2.txt','r'):
    item_5=line_5.split('\t')
    x_5=float(str(item_5[0]))
    y_5=float(str(item_5[1]))
    plot(x_5,y_5,'sb',markersize=15)

ax_1=gca()
ax_1.invert_xaxis()
title(r'CO Intensity'+r'$\geq$'+str(thr_sigma_2)+r'$\rm K\ km\ s^{-1}$', fontsize=25)
xlabel(r'Galactic Longitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=25)
ylabel(r'Galactic Latitude [ $^{\circ}$ ]', fontname='Times New Roman', fontsize=25)
savefig('data/'+str(obj_name)+'plot_'+str(obj_name)+'_1_b_emission_2.eps')
clf()

s_2=0.0
for line_6 in open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'_2.txt','r'):
    item_6=line_6.split('\t')
    s_2+=float(item_6[2])

#距離の誤差の比較
def derror():
    if d_err[0]>d_err[1]:
        return d_err[0]
    elif d_err[0]<d_err[1]:
        return d_err[1]

# 1pixel 分 -> pc2、面積計算
pc=radians(fh['CDEL1'])*float(d)*1000.0

pc_sq=pc**2
pix_num=len(open('data/'+str(obj_name)+'data_'+str(obj_name)+'_2.txt').readlines())
A_co=pc_sq*int(pix_num)

#分子雲サイズの誤差
def A_error():
    psq_1=(radians(fh['CDEL1'])*(float(d)+derror())*1000.0)**2
    psq_2=(radians(fh['CDEL1'])*(float(d)-derror())*1000.0)**2
    A_1=abs(A_co-psq_1*int(pix_num))
    A_2=abs(A_co-psq_2*int(pix_num))
    if A_1>A_2:
        return A_1
    elif A_1<A_2:
        return A_2

# 単位変換 [K*km/s*pixel] -> [K*km/s*pc2]
L_co=s_2*pc_sq

```



```

# 光度 -> 質量 (Heyer et al. 2001)
M_co=L_co*4.1

# 密度計算
m_sol=1.9884*(10**30)*(10**3)
one_pc=3.085677581*(10**16)*(10**2)
one_pc_sq=one_pc**2
Den_co=(M_co*m_sol)/(A_co*one_pc_sq)

print ''
print '<Result>'
print 'Size:\t %d [pixel]' %(pix_num)
print '1 pixel Area:\t %f [pc^2 / pixel]' %(pc_sq)
print 'CO Square Area:\t %f +/- %f [pc^2]' %(A_co,A_error())
print 'CO Luminosity:\t %f [K * km/s * pixel]' %(s_2)
print 'CO Luminosity:\t %f [K * km/s * pc^2]' %(L_co)
print 'CO Mass:\t %f [M_solar]' %(M_co)
print 'CO Density:\t %f [g / cm^2]' %(Den_co)
print '-----'

h_nh=[]
for nh in open('data/'+str(obj_name)+'/data_'+str(obj_name)+'_2.txt'):
    item_nh=nh.split('\t')
    h_nh.append(float(item_nh[3]))

print 'Max of N(H2):\t %e [cm^-2]' %(max(h_nh))
print 'Minimum of N(H2):\t %e [cm^-2]' %(min(h_nh))
print ''

#gnuplot script 出力
gnuplot=open('data/'+str(obj_name)+'/plot.plt','w')
gnuplot.writelines('reset'+'\n')
gnuplot.writelines('clear'+'\n')
gnuplot.writelines('set term post eps enhanced color'+'\n')
gnuplot.writelines('set out "N_H2_'+str(obj_name)+'.eps"'+'\n')
gnuplot.writelines('set cblabel "{/=20 N(H_2) [cm^{-2}]}"'+'\n')
gnuplot.writelines('set title "{/=20 H_2 Column Density}"'+'\n')
gnuplot.writelines('set xlabel "{/=20 Galactic Longitude [deg]}"'+'\n')
gnuplot.writelines('set ylabel "{/=20 Galactic Latitude [deg]}"'+'\n')
gnuplot.writelines('set format cb "%1.1e"'+'\n')
gnuplot.writelines('set palette define (0 "red",1 "orange",2 "yellow")'+'\n')
gnuplot.writelines('set size square'+'\n')
gnuplot.writelines('set xrange['+str(G_lon[1])+':'+str(G_lon[0])+']'+'\n')
gnuplot.writelines('set yrange['+str(G_lat[0])+':'+str(G_lat[1])+']'+'\n')
gnuplot.writelines('plot "data_'+str(obj_name)+'.txt" u 1:2:4 notitle w p palette pt 5 ps 2,"position.dat" u 1:2
notitle w p pt 2 ps 2 lc rgb "black"'+'\n')
gnuplot.close()

print '"plot.plt" was created.'
#os.system('cd data/'+str(obj_name)+'/')
#os.system('gnuplot plot.plt')
#os.system('cd -')
print '> cd data/%s/' %(str(obj_name))
print '> gnuplot plot.plt'

```

C FUGIN プロジェクト観測の手順とデータの解析

C.1 観測ログ (2016/05/22)

1. まず始めに、FOREST のセットアップを行うために、FOREST コンソール (figure 46) 上のターミナルで、スクリプト”forest_initialize.py”を実行して初期化を行う。

初期化が終わったら、メインコンソール (figure 47) 上の”Work Station COSMOS User-Interface”というウィンドウ上で Group 名 (2016 年 5 月 22 日当時:”bp812tu”) と Project 名 (2016 年 5 月 22 日当時:”proj2”) を観測指示書に従って変更し、”Change Observer”をクリックする。次に、ターミナル上でスクリプト”Forest_MPC.py”を実行して FOREST 受信機へのミラーリングを行う。

ミラーリングが終わったら、アンテナコンソール (figure 48) 上の”MAIN REFLECTOR CONTROL”で【INDIV】に、”UTILITIES”で【TUNING】に切り替え、メインコンソール上で【TUNING】をクリックする。アンテナが動き始めたのを確認したら【STOP/HALT】をクリックする。次に、FOREST コンソール上のターミナルでスクリプト”forest_SIS_tune.py”を、チューニングパラメータファイル”~.cnf”を用いて以下のように実行してチューニングを行う。当時の観測では、LO 周波数を 105GHz に、2015 年 12 月 6 日にパラメータを決定した”lo105G-U_step3_20151206a.conf”というファイルを用いた。

```
> forest_SIS_tune.py tuning/lo105G-U_step3_20151206a.conf
```

チューニングを終えた後は、IRR (**I**mage **R**ejection **R**atio: サイドバンド分離比) のチェックを行うために、スクリプト”exp_irr_with_IF_freq_sweep.py”を以下のように実行する。当時の観測では、LO 周波数を 105 GHz (lo_freq 105)、測定開始時の IF 周波数を 4 GHz (start 4)、測定終了時の IF 周波数を 12 GHz (stop 12)、IRR を測定する間隔 1 GHz に設定した。

```
> exp_irr_with_IF_freq_sweep.py --start 4 --stop 12 --step 1 --lo_freq 105
```

実行が終わったら、FOREST モニター中の IRR のグラフ (figure 49) をチェックする。

チェックが終了したら、FOREST コンソールにおけるターミナルでスクリプト”forest_start_observation.py”を実行して観測開始の準備を整える。

2. アンテナコンソール上で【TUNING】から【ALL PROG】に、【INDIV】から【SLAVE】に切り替え、メインコンソール上で File name にシステムチェック用の観測テーブル名 (2016 年 5 月 22 日観測当時:”sW51_m9”) を入力し、【START OBSERVATION】をクリックしてシステムチェックを行う。

```
- JST 22:59 System check # 2016 年 5 月 22 日 22 時 59 分 システムチェック観測  
-- sW51_m9.start # システムチェック用の観測テーブル
```

```

# 左から順に、アンテナの (Az,E1) (アンテナコンソールで確認)、(Az,E1) 補正の合計値、外気温、
湿度、露点、風速・風向 (気象モニターで確認)、FORESTの各アレイ (A01, A02, A03, A04, A05, A06,
A07, A08, A09, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16) の Tsys (QLOOK モニターで確認)
|          | (Az,E1) | (dAz, dE1) | Temp(degC) | Humid(%) | Dew Point(degC) |
Water Vapor(hPa) | Wind | Tsys(K) | Notes |
| Start | (94.6, 30.9) | (+5.7, +11.8) | +11.8 | 67.1 | +5.9 | 9.3 | 0 m/s, SE |
522, 285, 550, 271, 687, 275, 645, 0, 650, 269, 580, 302, 564, 311, 828, 334 | |
| End | ( ) | ( ) | | | | | | |

```

3. システムチェック終了後、ポインティング観測を行う前に”H40_MPC.py”を実行して H40 受信機へのミラーリングを行う。その後、メインコンソールにおける File name にポインティング用の観測テーブル名 (2016年5月22日観測当時:”pOH39”)を入力し、ポインティング観測を行う。風によってポインティングの位置がずれる事があるため、ポインティング観測が開始された時に表示されるウィンドウに、ポインティングのズレの値を入力して補正を行う。

```

- JST 23:03 Pointing # 2016年5月22日23時03分 ポインティング観測
-- pOH39.start
|          | (Az,E1) | (dAz, dE1) | Temp(degC) | Humid(%) | Dew Point(degC) |
Water Vapor(hPa) | Wind | Tsys(K) | Notes |
| Start | (106.6, 32.3) | (+5.7, +11.8) | +11.5 | 70.8 | +6.0 | 9.0 | 0-1 m/s, NNE |
206.8, 206.5 | | # H40 はアレイが2つなので、Tsys の値も2つのみ
| End | (107.3, 33.0) | (+5.7, +9.8) | | | | | | |
-- (ddAz, ddE1) = (-0.0, -2.0)
-- A01 : Az -0.6/37.6 E1 -1.8/39.2
-- A03 : Az -1.3/38.3 E1 -1.8/39.4

```

4. ポインティング観測終了後、キャリブレーション用の観測テーブル名 (2016年5月22日観測当時:”cW51_m9”)を File name に入力し、キャリブレーションを行う。

```

- JST 23:09 Calibration # 2016年5月22日23時09分 キャリブレーション観測
-- cW51_m9.start
|          | (Az,E1) | (dAz, dE1) | Temp(degC) | Humid(%) | Dew Point(degC) |
Water Vapor(hPa) | Wind | Tsys(K) | Notes |
| Start | (96.1, 32.8) | (+5.7, +9.8) | +11.0 | 68.0 | +5.4 | 9.0 | 0-1 m/s, NE |
515, 273, 518, 261, 643, 264, 605, 0, 612, 260, 575, 292, 533, 301, 777, 312 | |
| End | (100.1, 37.5) | (+5.7, +9.8) | +11.4 | 67.5 | +5.6 | 9.1 | 1 m/s, S |
483, 261, 491, 251, 611, 253, 572, 0, 581, 250, 545, 283, 511, 292, 736, 300 | |

```

5. キャリブレーション終了後、もう一度ポインティング観測を行い (2016年5月22日観測当時:”pI00363”)、その後本観測 (2016年5月22日観測当時:”O30m1xz”)に入る。以降、観測指示書に従い、ポインティングと本観測を繰り返す。

```
- JST 23:35 Pointing # 2016年5月22日23時35分 ポインティング観測
-- pI00363.start
|          | (Az,El) | (dAz, dEl) | Temp(degC) | Humid(%) | Dew Point(degC) |
Water Vapor(hPa) | Wind | Tsys(K) | Notes |
| Start | (126.2, 33.6) | (+5.7, +9.8) | +11.5 | 64.7 | +5.5 | 9.1 | 0-1 m/s, S |
204.2, 206.7 | |
| End | (127.2, 34.3) | (+1.7, +12.8) | | | | | | |
-- (ddAz, ddEl) = (-4.0, +3.0)
-- A01 : Az -3.7/38.5 El +3.1/38.6
-- A03 : Az -4.0/40.4 El +3.4/37.0

- JST 23:42 GPS # 2016年5月22日23時42分 本観測
-- O30m1xz.start # 銀経30°、銀緯-1°方向の1°×1°の範囲をx方向(水平方向)スキャンで観測
|          | (Az,El) | (dAz, dEl) | Temp(degC) | Humid(%) | Dew Point(degC) |
Water Vapor(hPa) | Wind | Tsys(K) | Notes |
| Start | (122.3, 34.2) | (+1.7, +12.8) | +11.5 | 67.1 | +5.6 | 9.1 | 0-1 m/s, SSW |
511, 241, 501, 254, 632, 232, 596, 0, 596, 256, 526, 286, 525, 297, 764, 315 | |
| End | (127.4, 37.8) | (+1.7, +12.8) | +10.8 | 70.8 | +5.7 | 9.2 | 0 m/s, N |
474, 231, 462, 244, 586, 223, 551, 0, 552, 245, 486, 275, 484, 285, 705, 301 | |
```

6. 観測終了後、FOREST コンソール内のターミナルで”forest_end_observation.py”、”forest_finalize.py”の順にスクリプトを実行して、45m 鏡内の FOREST の蓋を閉める。

観測における注意点としては、各観測の前に、メインコンソール上のターミナルで必ずミラーリング (チューニング, システムチェック, キャリブレーション, 本観測→”Forest_MPC.py”を実行、ポインティング→”H40_MPC.py”を実行) を行わなければならない。これを行わないと、観測テーブルが反映されず、エラーが発生してしまう。また、一つの観測テーブル実行毎に、気象モニター (figure 50) 上の気温・湿度・露点・気圧・風向と、望遠鏡の AZ/EL、各アレイ (A01–A16) の Tsys、ポインティングのズレの値をログに必ず記録する。また、観測時の各アレイにおけるスペクトルについては QLOOK モニター (figure 51) に表示される。

また、観測で取得した生データについては、NOSTAR (**N**obeyama **O**TF **S**oftware **T**ools for **A**nalysis and **R**eduction) によりリダクションが行われた。リダクションの内容としては、取得した生データをア

レイごとに切り分け、ベースラインを -100 – -50 , $+150$ – $+200$ km s^{-1} の範囲で引き、アレイ間の変動を除去するために標準の観測天体に基づいて強度を計測するというもので、このリダクションを経て、FITS のキューブデータとして保存される (Umemoto et al. 2017)。

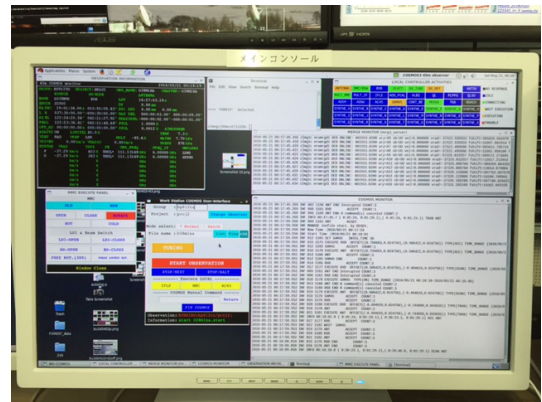
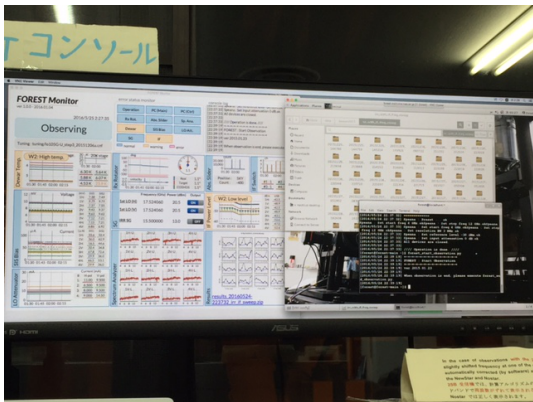


Figure 46: FOREST コンソール (2016年5月25日筆者撮影)

Figure 47: メインコンソール (2016年5月21日筆者撮影)

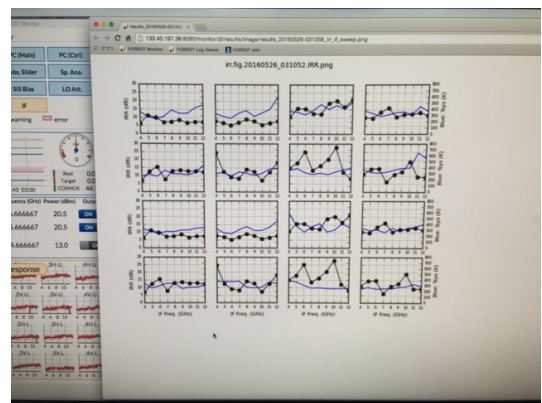
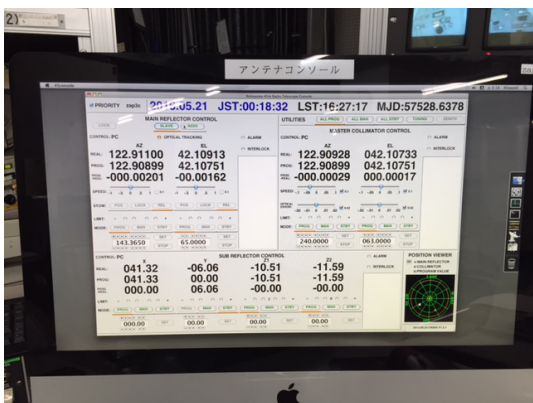


Figure 48: アンテナコンソール (2016年5月21日筆者撮影)

Figure 49: IRR のチェック (2016年5月26日筆者撮影)

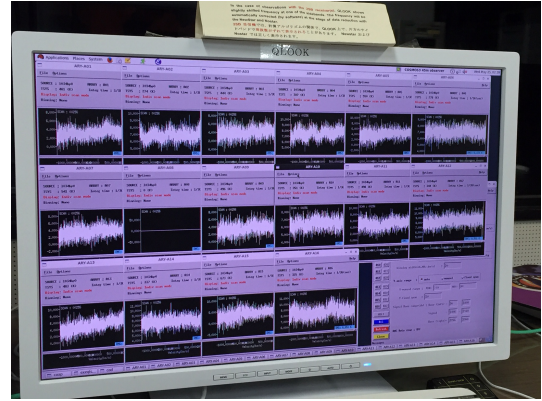
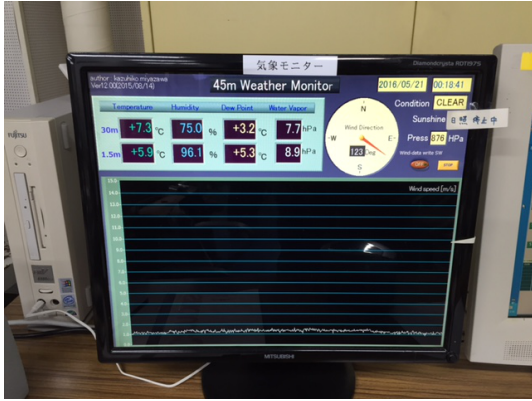


Figure 50: 気象モニター (2016年5月21日筆者撮影) Figure 51: QLOOKモニター (2016年5月25日筆者撮影)

C.2 解析スクリプト

1. "python fugin_ogs.py"で実行すると、最初に天体名・銀経・銀緯・視線速度・距離・距離の誤差の入力画面がターミナル上に出るため、それぞれの値を入力する。
2. 入力後、プログラムが実行され、銀経 $-0.1^\circ \leq l \leq 0.1^\circ$ 、銀緯 $-0.1^\circ \leq b \leq 0.1^\circ$ 、速度 $-5.0 \text{ km s}^{-1} \leq V_{\text{LSR}} \leq 5.0 \text{ km s}^{-1}$ の範囲で FITS データ内の voxel が抽出される。抽出された voxel のデータが TXT ファイル ("data_12co.txt") として保存され、その TXT データ内で CO 温度の最大値・最小値・RMS 等が算出され、FCRAO の解析 (補遺 B.2 を参照) と同様、そのデータ内での $3\sigma_1$ が計算される。
3. $3\sigma_1$ が計算された後、 $3\sigma_1$ 以下の voxel が抽出され、"noise_12co.txt" として TXT ファイルが出力される。そして、その TXT データ内で今度は $3\sigma_2$ が計算される。そして、"data_12co.txt" の読み込みが行われ、 $3\sigma_2$ 以上の voxel データが抽出され、"emission_12co.txt" として保存される。このデータが最終的に抽出された分子雲の voxel データとなる。
4. この voxel データに基づいて、まず、Reid et al. (2014) の銀河定数を用いた、銀河系外縁部の回転曲線がフラットであると仮定した場合の運動学的距離から求まる、分子雲のサイズ・光度・質量が算出される。その後、年周視差測定から求まった距離による、分子雲のサイズ・光度・質量が算出される。

”fugin_ogs.py”

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-
from astropy.io import fits
from astropy.wcs import WCS
from numpy import *
import os
import aplpy
import matplotlib.pyplot as plt

if os.path.exists('data') == False:
    os.mkdir('data')

obj_name=raw_input('Obj Name: ') # 天体名を入力

print 'Galactic Longitude and Latitude [deg]'
l_b=map(float, raw_input().split()) # 銀経・銀緯を入力
print 'VLSR [km/s]'
vlsr=raw_input('->') # 視線速度を入力
print 'Parallax distance [kpc]'
d_p=raw_input('->') # 年周視差測定による距離を入力
print 'Error of Parallax distance'
d_p_err=raw_input('->') # 距離の誤差を入力

if os.path.exists('data/'+str(obj_name)) == False:
    os.mkdir('data/'+str(obj_name))

if os.path.exists('data/'+str(obj_name)+'/'12CO') == False:
    os.mkdir('data/'+str(obj_name)+'/'12CO')

f=fits.open('L212.5_211.5_12CO_HC.FITS')
fd=f[0].data
fh=f[0].header
w=WCS('L212.5_211.5_12CO_HC.FITS')

def makeheader_12co():
    header=open('data/'+str(obj_name)+'/'12CO/header_12co.txt','w')

    header.writelines(str(fh))
    header.close()

def pixel_coordinates_12co():
    ll,bb,vv=[],[],[]
    i=0
    for i in range(fh['NAXIS1']):
        l,b,v=w.all_pix2world(i,0,0)
        ll.append(l)
        j=0
        for j in range(fh['NAXIS2']):
            l,b,v=w.all_pix2world(0,j,0)
            bb.append(b)
            k=0
            for k in range(fh['NAXIS3']):
                l,b,v=w.all_pix2world(0,0,k,0)
                vv.append(v)
```

```

def makemap_12co():
    mom=nansum(fd,axis=0)
    fig=aplpy.FITSFigure(mom,figure=plt.figure())
    fig.show_colorscale(vmin=0)
    fig.add_colorbar()
    fig.axis_labels.set_xtext('GLON')
    fig.axis_labels.set_ytext('GLAT')
    plt.savefig('data/'+str(obj_name)+'12CO/int_map_12co.eps')
    plt.clf()

def outdata_12co(): # 解析に使用する voxel データを抽出
    dat=open('data/'+str(obj_name)+'12CO/data_12co.txt','w')
    i=0
    for i in range(fh['NAXIS1']):
        gl=360-fh['CDEL1']*fh['CRPIX1']
        gl+=fh['CDEL1']*i

        j=0
        for j in range(fh['NAXIS2']):
            gb=fh['CRVAL2']-fh['CDEL2']*fh['CRPIX2']
            gb+=fh['CDEL2']*j
            k=0
            for k in range(fh['NAXIS3']):
                vel=(fh['CRVAL3']-fh['CDEL3']*fh['CRPIX3'])/1000.
                vel+=(fh['CDEL3']/1000.)*k
                if (l_b[0]-0.1)<gl<(l_b[0]+0.1): # 銀経範囲-0.1° ~ 0.1°
                    if (l_b[1]-0.1)<gb<(l_b[1]+0.1): # 銀緯範囲-0.1° ~ 0.1°
                        if (float(vlsr)-5.0)<vel<(float(vlsr)+5.0): # 速度範囲-5.0~5.0km/s
                            dat.writelines(str(gl)+'\t'+str(gb)+'\t'+str(vel)+'\t'+str(fd[k][j][i])+'\n')
    dat.close()

makeheader_12co()
pixel_coordinates_12co()
makemap_12co()
outdata_12co()

def spectr_12co():
    for line in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/data_12co.txt','r'):
        item=line.split('\t')
        x=float(item[2])
        y=float(item[3])
        plt.plot(x,y,'.b')

        plt.xlabel(r'$V_{\rm LSR}$ [km s-1]', fontsize=15)
        plt.ylabel(r'$T_{\rm MB}$ [K]', fontsize=15)
        plt.savefig('data/'+str(obj_name)+'12CO/spectrum_12co.eps')
        plt.clf()

spectr_12co()

def calc_result_12co():
    v,h=[],[]
    av=0.0
    sq=0.0

    for t in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/data_12co.txt'):
        item=t.split('\t')

```



```

v.append(float(item[2]))
h.append(float(item[3]))
av+=float(item[3])
sq+=float(item[3])**2

avrg=av/len(h)
rms=sqrt(sq/len(h))

sig=0.0
for tt in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/data_12co.txt'):
    item=tt.split('\t')
    sig+=(float(item[3])-avrg)**2

    th_sig_1=3.0*sqrt(sig/len(h))    # 3σ1の算出

print ''
print '-----'
print 'Result of 12CO'
print ''
print 'VLSR:\t\t %.2f - %.2f km/s' %(min(v),max(v))
print 'Max:\t\t %.2f K' %(max(h))
print 'Minimum:\t %.3f K' %(min(h))
print 'RMS:\t\t %.3f K' %(rms)
print 'SN ratio:\t %.2f' %(max(h)/rms)
print '-----'
print ''
print '3σ1 = %.3f K' %(th_sig_1)
print 'Extracting < 3σ1 ...'
print ''

noise=open('data/'+str(obj_name)+'12CO/noise_12co.txt','w')
for no in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/data_12co.txt'):
    item=no.split('\t')
    if float(item[3])<th_sig_1:    # 3σ1以下を抽出
        noise.writelines(item[0]+'\\t'+item[1]+'\\t'+item[2]+'\\t'+str(item[3]))
noise.close()

hh=[]
av_2=0.0
for noi in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/noise_12co.txt'):
    item=noi.split('\t')
    av_2+=float(item[3])
    hh.append(float(item[3]))

avrg_2=av_2/len(hh)

sig_2=0.0
for nn in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/noise_12co.txt'):
    item=nn.split('\t')
    sig_2+=(float(item[3])-avrg_2)**2

th_sig_2=3.0*sqrt(sig_2/len(hh))    # 3σ2を算出

print '3σ2 = %.3f K' %(th_sig_2)
print 'Extracting > 3σ2 ...'
print ''

```

```

emission=open('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.txt','w')
for em in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/data_12co.txt'):
    item=em.split('\t')
    if float(item[3])>th_sig_2: # 3 σ 2 以上を抽出
        emission.writelines(item[0]+'\\t'+item[1]+'\\t'+item[2]+'\\t'+str(item[3]))
emission.close()

for line in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.txt','r'):
    item=line.split('\t')
    x=float(item[0])
    y=float(item[1])
    plt.plot(x,y,'sb',markersize=10)

ax=plt.gca()
ax.invert_xaxis()
plt.title(r'3 sigma >'+str(th_sig_2)+' [K]',fontsize=15)
plt.xlabel(r'Galactic Longitude [^\circ$]', fontsize=15)
plt.ylabel(r'Galactic Latitude [^\circ$]', fontsize=15)

plt.savefig('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.eps')
plt.clf()

calc_result_12co()

def calc_result_12co_2(): # Reid et al. (2014) の銀河定数から運動学的距離を算出
    R_0=8.34
    V_0=240.
    R=R_0*(V_0*sin(pi/180.*l_b[0]))/(float(vlsr)+V_0*sin(pi/180.*l_b[0]))
    d_k=(R_0*cos(pi/180.*l_b[0])+sqrt((cos(pi/180.*l_b[0])**2-1)*R_0**2+R**2))/cos(pi/180.*l_b[1])
    one_voxel=(radians(abs(fh['CDELTA1']))*float(d_k)*(1.e+3))**2*(fh['CDELTA3']/1000.)
    voxel_num=len(open('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.txt').readlines())
    Vol_co=one_voxel*int(voxel_num)

    ll,bb=[],[]
    ss=0.0
    for s in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.txt'):
        item=s.split('\t')
        ss+=float(item[3])
        ll.append(float(item[0]))
        bb.append(float(item[1]))

    siz_l=float(d_k)*1000*radians(max(ll)-min(ll))
    siz_b=float(d_k)*1000*radians(max(bb)-min(bb))
    L_co=ss*one_voxel
    M_co=L_co*4.1
    Den_co=M_co/(siz_l*siz_b)

    print '-----' # 運動学的距離から物理量を算出
    print 'Kinematic Distance:\t %.3f kpc' %(d_k)
    print 'Galactocentric D:\t %.3f kpc' %(R)
    print '1 voxel:\t\t %.3f pc^2 km/s / voxel' %(one_voxel)
    print 'CO Volume:\t\t %.2f pc^2 km/s' %(Vol_co)
    print 'Cloud Size (lxb):\t %.2f deg x %.2f deg' %(max(ll)-min(ll),max(bb)-min(bb))

    print 'Cloud Size (lxb):\t %.2f pc x %.2f pc' %(siz_l,siz_b) # サイズ
    print 'CO Luminosity:\t\t %.2f K pc^2 km/s' %(L_co) # 光度
    print 'CO Mass:\t\t %.2f M_solar' %(M_co) # 質量

```

```

print 'Density:\t\t %.3f M_solar / pc^2' %(Den_co)
print '-----'

calc_result_12co_2()

def calc_result_12co_2_parlx():
    one_voxel=(radians(abs(fh['CDEL1']))*float(d_p)*(1.e+3))**2*(fh['CDEL3']/1000.)
    def onvox_error():
        onvox_1=(radians(abs(fh['CDEL1']))*(float(d_p)+float(d_p_err))*(1.e+3))**2*(fh['CDEL3']/1000.)
        onvox_2=(radians(abs(fh['CDEL1']))*(float(d_p)-float(d_p_err))*(1.e+3))**2*(fh['CDEL3']/1000.)
        onvox_1_err=abs(one_voxel-onvox_1)
        onvox_2_err=abs(one_voxel-onvox_2)
        if onvox_1_err>onvox_2_err:
            return onvox_1_err
        elif onvox_1_err<=onvox_2_err:
            return onvox_2_err

    voxel_num=len(open('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.txt').readlines())
    Vol_co=one_voxel*int(voxel_num)

    ll,bb=[],[]
    ss=0.0
    for s in open('data/'+str(obj_name)+'12CO/emission_12co.txt'):
        item=s.split('\t')
        ss+=float(item[3])
        ll.append(float(item[0]))
        bb.append(float(item[1]))

    siz_l=float(d_p)*1000*radians(max(ll)-min(ll))
    def size_l_error():
        siz_l_1=(float(d_p)+float(d_p_err))*1000*radians(max(ll)-min(ll))
        siz_l_2=(float(d_p)-float(d_p_err))*1000*radians(max(ll)-min(ll))
        siz_l_1_err=abs(siz_l-siz_l_1)
        siz_l_2_err=abs(siz_l-siz_l_2)
        if siz_l_1_err>siz_l_2_err:
            return siz_l_1_err
        elif siz_l_1_err<=siz_l_2_err:
            return siz_l_2_err
    siz_b=float(d_p)*1000*radians(max(bb)-min(bb))
    def size_b_error():
        siz_b_1=(float(d_p)+float(d_p_err))*1000*radians(max(bb)-min(bb))
        siz_b_2=(float(d_p)-float(d_p_err))*1000*radians(max(bb)-min(bb))
        siz_b_1_err=abs(siz_b-siz_b_1)
        siz_b_2_err=abs(siz_b-siz_b_2)
        if siz_b_1_err>siz_b_2_err:
            return siz_b_1_err
        elif siz_b_1_err<=siz_b_2_err:
            return siz_b_2_err

    L_co=ss*one_voxel
    def L_co_error():
        L_co_err_1=abs(L_co-ss*(one_voxel+onvox_error()))
        L_co_err_2=abs(L_co-ss*(one_voxel-onvox_error()))
        if L_co_err_1>L_co_err_2:
            return L_co_err_1
        elif L_co_err_1<=L_co_err_2:

```

```

        return L_co_err_2

M_co=L_co*4.1
def M_co_error():
    M_co_err_1=abs(M_co-(L_co+L_co_error()*4.1)
    M_co_err_2=abs(M_co-(L_co-L_co_error()*4.1)
    if M_co_err_1>M_co_err_2:
        return M_co_err_1
    elif M_co_err_1<=M_co_err_2:
        return M_co_err_2

Den_co=M_co/(siz_l*siz_b)

print '-----' # 年周視差測定による距離から算出
print 'Parallactic Distance:\t %.2f +/- %.2f kpc' %(float(d_p),float(d_p_err))
print '1 voxel:\t\t %.3f +/- %.3f pc^2 km/s / voxel' %(one_voxel,onvox_error())
print 'CO Volume:\t\t %.2f pc^2 km/s' %(Vol_co)
print 'Cloud Size (lxb):\t (%.2f +/- %.2f) pc x (%.2f +/- %.2f) pc' %(siz_l,size_l_error(),siz_b,size_b_error()) # サ
イズ
print 'CO Luminosity:\t\t %.2f +/- %.2f K pc^2 km/s' %(L_co,L_co_error()) # 光度
print 'CO Mass:\t\t %.2f +/- %.2f M_solar' %(M_co,M_co_error()) # 質量
print 'Density:\t\t %.3f M_solar / pc^2' %(Den_co)
print '-----'

calc_result_12co_2_parlx()

def showallfiles_12co():
    files=os.listdir('data/'+str(obj_name)+'12CO/')
    print ''
    for file in files:
        print 'makefile: data/'+str(obj_name)+'12CO/%s' %(file)

showallfiles_12co()

```

謝辞

本論文は、私が学部4年の頃から行ってきた研究に加え、博士後期過程で新しく取り組んだ研究についてまとめたものです。これまで研究指導をしてくださった、指導教員の中西裕之准教授に心より感謝申し上げます。また、年周視差測定用のプログラムの開発および提供してくださった、国立天文台の廣田朋也さんと本大学修了生の松尾光洋さん、博士後期より催される専攻ゼミナールにて多くのコメントをくださった副指導教員の今井裕先生と高桑繁久先生に改めて深く感謝致します。そして、博士前期2年より参加し11ヶ月間という短い期間でしたが、野辺山での観測指導をしてくださった梅本智文さん、鳥居和史さん、南谷哲宏さん、FUGINメンバーの皆様にも改めて深く感謝申し上げます。

また、今年、博士前期1年から執筆を行ってきた学術論文”Outer rotation curve of the Galaxy with VERA IV: Astrometry of IRAS 01123+6430 and the possibility of cloud-cloud collision”を無事、PASJに投稿することができました。この学術論文の投稿に至るまで、多くのコメントおよび研究にご協力頂いた指導教員の中西裕之先生、坂井伸行さん、ORC関係の皆様、分子雲衝突のシミュレーションの提供および議論に加わって頂いた北大の羽部朝男先生と島和宏さん、また、英語のチェックをしてくださった本大学修了生のRoss A. Burnsさんに深く感謝申し上げます。

私の6年間にわたる研究活動については、私自身の力のみではなく、これまでの研究室メンバーの皆様の心の支えがあったからこそ、頑張っただと改めて感じております。現在の研究室メンバーである、藏原昂平君、山崎利明君、亀岡駿成君、伊藤夏海さん、元メンバーの、小澤武揚さん、松尾光洋さん、安楽健太さん、中原聡美さん、松永唯弘さん、江藤翔太郎君、齊田智恵さん、手塚大介君、上野紗英子さん、田口莉都さん、野村絵里さん、江副聡一君、松本地平君、中原瑳衣子さん、皆様に改めて心より深く感謝申し上げます。

最後に、影で支えてくれた、高等教育研究開発センターの先生および特任助手の皆様、そして、何より私を温かく見守り応援してくれた家族に、大変感謝しています。本当にありがとうございました。