

修士論文

ALMA TP アレイを用いた
銀河系外縁部にある Sh2-283 に付随する
分子雲に対する CO 輝線観測

2024 年 2 月

茨城大学大学院 理工学研究科

博士前期課程 理学専攻

22NM152X

草野 敦哉

指導教員 百瀬 宗武

副指導教員 米倉 覚則

概要

星形成の過程で金属量の違いがどのように関係するのか調べるために、天の川銀河外縁部にある H II 領域 Sh2-283 に付随する分子雲を観測した。観測には ALMA の TP アレイを用いており、29.6'' (FWHM) のビームサイズで $^{12}\text{CO} \cdot ^{13}\text{CO} \cdot \text{C}^{18}\text{O}$ の $J=2-1$ の輝線を捉えた。低金属量環境としては大マゼラン雲などが有名であるが、Sh2-283 はこれよりも距離が近く、およそ $7.9^{+1.3}_{-1.0}$ kpc であると考えられるため、分子雲の細かい構造に着目した研究を行いやすい。

観測の結果、Sh2-283 に付随する分子雲は ^{12}CO の観測から視線速度が $v_{\text{LSR}} = 50$ km/s 程度だと分かった。この視線速度は Sh2-283 の位置での銀河回転の速度と近いので、Sh2-283 は銀河の回転に乗って運動していると考えられる。Sh2-283 と同じ方向には $v_{\text{LSR}} = 10$ km/s 程度の視線速度をもった希薄な分子雲があるが、今回の研究では Sh2-283 との相互作用などの、両者の関連を示唆する兆候は見られなかった。

Sh2-283 の分子雲はフィラメント形状をしており、これまで放射が確認されていなかった場所でも輝線が検出された。フィラメントは全長 25 pc 以上、太さ 1.2 pc 程度の大きさで、総質量は局所熱力学平衡を仮定した LTE 法方法より $5.5 \times 10^3 M_{\odot}$ と求められた。フィラメントは複雑に折れ曲がっており、ハブフィラメント構造のような構造も見られた。先行研究で得られた恒星や YSOs は、フィラメントに沿うように位置していることが分かった。

デンドログラム解析を行うことで、26 個のクランプ候補を同定した。クランプ候補の質量は最大で $293 M_{\odot}$ であったが、ビリアル質量を求めた結果全てのクランプ候補がビリアル質量の 0.1 倍–10 倍の範囲に収まっており、比較的整合的である。クランプ候補のうち、6 つはビリアル質量との差が 20% 以内であり、ビリアル平衡状態にあると考えられる。残りの候補のうち 3 つがビリアル質量より大きく、そのほかは全てビリアル質量よりも小さいことがわかった。

クランプ候補の質量を合計すると $9.05 \times 10^2 M_{\odot}$ となるため、これらの中にはより小さなスケールの分子雲コアが 10 個以上含まれているかもしれない。今後、高分解能の観測でフィラメントの密度分布やコアの質量を見積もることができれば、この分子雲のなかで星形成の進化について考えることができるはずである。一方で、今回同定されたクランプ候補のうち半数は、 C^{18}O の放射の範囲に ^{13}CO の放射のピークを持たない。分子雲の密度が濃い場所では通常 C^{18}O の放射が見られるので、これらの候補はコアを含まない可能性もあり、他の天体も合わせて研究する必要があるかもしれない。

Abstract

The molecular clouds associated with the H_{II} region Sh2-283 in the outer Milky Way Galaxy were observed. The observations were made with ALMA Total Power array (TP array), which covered $J = 2 - 1$ emission lines of ^{12}CO , ^{13}CO , and C^{18}O with a beam width of 29.6" (FWHM).

The molecular clouds associated with Sh2-283 are filamentary in shape and stars and Young Stellar Objects (YSOs) detected by previous studies are located along them. They are over 25 kpcpc long and about 1.2 pc width, and its total mass was determinedestimated to be $5.5 \times 10^3 [M_{\odot}]_{\odot}$ under the assumption of local thermodynamic equilibrium (LTE). In the same direction as Sh2-283, a rarefied molecular cloud with a different line-of-sight velocity from that of Sh2-283 was also observed.

Dendrogram analysis identified 26 clump candidates. Six of these candidates are within 20% of the virial mass and are considered to be in virial equilibrium. Three of the remaining candidates were found to have a LTE mass higher than the virial mass, and all the remaining have a LTE mass lower than the virial mass.

The total mass of the clump candidates is $9.05 \times 10^2 M_{\odot}$, which may contain more than 10 molecular cloud cores. If future high-resolution observations can estimate the density distribution of filaments and the mass of the cores, we should be able to consider the evolution of star formation in these regions.

目次

I	導入	5
I-1	研究の背景.....	5
II	Sh2-283 について	6
II-1	Sh2-283 の特徴	6
II-2	Sh2-283 の先行研究	6
III	観測諸元	13
III-1	はじめに	13
III-2	観測した放射の種類.....	13
III-3	分解能とノイズの RMS	15
III-4	Contamination Plots.....	19
III-5	合成マップの作成.....	21
IV	結果	26
IV-1	観測されたスペクトル.....	26
IV-2	フィラメントの分布.....	30
IV-3	Sh2-283 のモーメントマップ	35
	Moment 0 map	35
	Moment 1 map	40
	Moment 2 map	42
	Moment 8 map	45
IV-4	分子雲の総質量と温度.....	47
IV-5	クランプ候補の同定及びそれらの質量.....	50
IV-6	Sh2-283 における低金属量環境の研究の展望	70
	結論	72
付録I	Weblog の確認方法.....	75
	はじめに	75
	Weblog をローカルホストで確認する方法.....	75
付録II	Channel Map の一覧.....	79

I 導入

I - 1 研究の背景

星形成の過程では、放射によるガスの冷却が大きな役割を果たしている。自己重力により十分に圧縮した分子雲内の高密度領域は、断熱的な特性を示すようになる。この状態に入ると、収縮によりガスの温度が上昇し、その影響で増加する内部の圧力が収縮を妨げ星の芯が形成される。従って、何らかの方法でガスを冷却することが、星形成の必要条件である高密度領域の自由落下過程の進行に不可欠である。

冷却の過程では、電磁波の放射によるエネルギーの輸送が主要な役割を担う。この放射は、分子雲の温度が低温である場合には、分子の回転・振動の遷移による輻射や、ダストによる連続波の放射が効果的である。これらの放射の冷却効率は、放射を行う分子の種類や存在度に依りて変化し、金属量（水素・ヘリウムよりも重い原子の存在量）が多い領域ではより効果的になる。つまり金属量が多い領域では冷却が効率的に行われると考えられ、逆に金属量が少ない場所は冷却が起こりにくい場所だと言える。

冷却の効率が悪いとガスの温度が下がりにくいので、高温の状態を保ちやすくなる。すると音速 c_s が高まることにより、Jeans 質量 $\pi c_s^3 / 6G^{3/2} \rho^{1/2}$ が大きくなると考えられる。以上のように、金属量が低い領域を研究すると、冷却率の違いから地球近傍の星形成とは異なる知見を得ることができると考えられる。

一般的に低金属量の領域は地球から遠い場所にあるため、観測が困難である。例えば、近傍の矮小銀河であり、金属量が太陽近傍に比べ 1/2 倍, 1/5 倍であることが知られている大マゼラン雲や小マゼラン雲はそれぞれ約 50 kpc, 60 kpc 程離れており^[10]、星形成の現場を十分に空間分解して観測することが難しい。天の川銀河のハロー部は、これに比べて地球の近くに位置しているが、主に高齢の星で構成されており、星形成研究の場としては適さない。

そこで、低金属量環境下の星形成の研究の場として、天の川銀河外縁部が有力な候補となる。その中でも私は、Sh2-283 という天体に着目し、星形成の研究を行うことにした。

II Sh2-283 について

II - 1 Sh2-283 の特徴

Sh2-283 は天の川銀河の第 3 象限に存在する H_{II} 領域である。Sharpless カタログによって認知されるようになった。この中に付随すると見られる恒星 ALS 18674 の地球からの距離は $7.9^{+1.3}_{-1.0}$ kpc と推定されており、他の星形成が活発な低金属量の領域よりも近い位置にある^[11]。7.9 kpc 先では 1'' は 0.038 pc に対応する。従って、この距離であれば、ALMA で観測することにより、星の直接の母体である分子雲コアまで分解して観測することができる。先行研究により、H_{II} 領域に付随する分子雲からの CO ($J = 1 - 0$) 放射が確かめられており、この放射は(RA, Dec (J2000)) = (06:38:23, +00:42:59)、又は (l, b) = (210.790, -2.5694) を中心に、半径約 6' の範囲に存在することが分かっていた^[9]。赤緯が 0 度付近であるため、この天体は地球上の様々な望遠鏡を用いて観測することが可能であり、ALMA の電波領域の観測にとどまらず、Subaru による赤外線の観測を行うこともできるため、多波長観測による詳細な研究が可能である。SIMBAD Astronomical Database の Sh2-283 のページには ALS 18674 — 18677 の 4 つの星が紐付けられており^[13]、先行研究によりその他の恒星や YSO も数多く見つかった^{[12][3]}。分子雲内で星の年齢が揃っているのも、1 つの分子雲から星形成が行われたと考えられ、コアが観測できる距離に位置していることもあり、IMF (Initial Mass Function) と CMF (Core Mass Function) の関連を調べることに適していると言える。

金属量は H_{II} 領域の電子温度の観測及び物理モデルの仮定により $12 + \log (O/H) \approx 8.20$ と見積もられている^[6]。また、ALS 18674 の分光観測により金属量を求めた場合、8.30 dex となる^[8]。これは地球近傍での値の 1/3 程度である。

銀河系外縁部に存在するため、視線方向に重なり合う分子雲が少ないと考えられる。また、周囲にも星や分子雲が少ないため、星形成の議論を行う上での障害が少ない点も利点である。実際に、CO ($J = 1 - 0$) 放射のスペクトルでは、Sh2-283 の方向に異なる視線速度の成分は見つかっていなかった^[9]。

以上の理由から、Sh2-283 で星形成活動の研究を行うことにした。

II - 2 Sh2-283 の先行研究

Sh2-283 は、この天体のみに着目した研究が行われたことがない天体である。その影響

もあり、この天体に関する知見は、まとまった形で提供されていない。

ここでは Sh2-283 の研究をする上で重要と認められる研究を簡潔にまとめる。

・ Bica& Dutra (2003)

2MASS のデータを再利用して多数の星団を発見した論文である。星団の探査には J (1.25 μm) $\cdot$ H (1.6 μm) $\cdot$ K_s (2.17 μm) の 3 つのバンドを用いて、各星雲の中心から 5' $\times$ 5' の領域を抽出し探査している。K_s バンドで光学的に深い領域の探査を行っており、J $\cdot$ H バンドは明るい星の混入による画像のにじみを検出するのに用いている。当論文の 84 番の星団が Sh2-283 に属する星団であり、ここから Richards et al. (2012) (後述) ではこの星団に BD84 という識別子を付け、赤外線のマップと比較をしている。これに倣い本論文でもこの星団を BD84 と呼称する。

この論文では表 II - 1 のように K_s バンドによって位置や広がりが決定された。表の中で天体のクラスは、赤外線星団 (IRC) 、恒星群 (IRGr) 、星団候補 (IRCC) 、散開星団 (IROC) に分けられている。BD84 は表の通り IRGr に分類されており、IRGr は IRC より密度が低く星の数が少ないとされている。

本論文には、検出された星団のサイズが報告されている。これによると、ほとんどの星団の直径は 2 pc 以下であり、4 pc を超えるものは稀であることが示されている。

表 II - 1 BD84 の特徴

Object	l	b	J2000RA	J2000Dec	D (arcmin)	d (arcmin)	Type
84	210.79	-2.55	6:38:28	0:44:41	1.5	1.1	IRGr

・ Russeil et al. (2007)

星形成複合体のカatalogを充実し、銀河系の回転・分布を調査する目的で、銀河系第 2 象限と第 3 象限において多波長観測による H_{II} 領域の励起星を探索している。Russeil (2003) のカatalogの中で、距離決定が不確かな、あるいは距離決定がなされていない銀河系第 2 象限と第 3 象限の星形成複合体を選び、恒星距離を (再) 確立している。個々の H_{II} 領域の恒星距離は、UBV バンドでの測光と励起星のスペクトル型を組み合わせで計算した。

観測は 2005 年 9 月 1 日から 5 日にかけて、フランスのオート・プロヴァンス天文台 (OHP) の 1.20m 望遠鏡で行い、U, B, V の画像が得られた。ピクセルサイズは 0.69 秒角、標準星の測定の平均差は 0.11 等で、これは距離の不確かさが 2.2%であることを意味する。

Sh2-283 の距離は、この分子雲と関連があると見られる星のうち、以下の表 II - 2 に示す No. 2 と No. 5 の 2 つの星を観測した結果を用いて、 8.06 ± 0.30 kpc であると求めた。

この結果は後述の Gaia DR 2^[12]の結果と整合的である。しかし、No. 2 の星が Sh2-283 の分子雲と関係があるのかは現時点では確証が持てない。そのため、本論文では Sh2-283 の距離は Gaia DR 2 の結果から、 $7.9^{+1.3}_{-1.0}$ kpc を採用する。

No.5 の星は天体の位置とスペクトル型が ALS 18674 と類似しているため、SIMBAD のデータ上では対応が無いが同一の天体である可能性がある。

表 II - 2 Russeil et al. (2007)で信頼性の高い天体

No.	RA (J2000)	Dec (J2000)	Spectral type	Distance [kpc]
1	06:38:12.4	+00:44:00.9	B3V	—
2	06:38:13.6	+00:44:09.9	O7V	8.11 ± 0.31
5	06:38:27.3	+ 00:44:38.1	B1V	7.39 ± 1.21

・ Richards et al (2012)

6 つの星団候補を VLA とスピッツァー宇宙望遠鏡で観測した。6 つの星団候補は NRAO VLA Sky Survey (VLA-NVSS; Condon et al. 1998)で明るい電波放射を持つことが同定されたため、この論文の調査対象に選定された。この研究対象の中に、Bica & Dutra (2003) のリストに載っている、Sh2-283 内の星団候補 BD84 が含まれている。

VLA の電波観測では 4 つのアレイを用いて 4.9 GHz と 8.5 GHz の電波放射を分解能 5 – 20 秒角で観測している。この結果から Sh2-283 の電離ガスの質量を $70 M_{\odot}$ と導出している。

スピッツァー宇宙望遠鏡の赤外線データは 3.6、4.5、5.8、8.0 μm のバンドで $5' \times 5'$ の範囲を観測し、ピクセルサイズは $1''$ であった。3.6、5.8、8.0 μm の IRAC バンドは多環芳香族炭化水素 (PHA) の輝線が得られるので、光電離領域 (PDR) を特定できる。この論文では、3.6 μm と 8.0 μm の観測の結果がカラーマップで公開されており、この 2 種類の赤外線の放射は (RA, Dec (J2000)) = (6:38:28, 0:44:38) を中心に、およそ $60'' \times 50''$ の範囲でシェル状に分布していることがわかった。また、赤外線では、恒星のみならず YSOs (Young stellar objects) や、その候補 (cYSOs) の集団の分布も得られた。大質量星に付随することが多い Extended green objects (EGO) の兆候は見られなかったものの、星形成活動が活発な領域であることがうかがえる。

この論文の図 17 に恒星と YSOs の分布が示されている。図から読み取った天体の位置を、表 II - 3 に示す。

表 II - 3 Richards et al (2012) で示された恒星と YSOs の位置

No. ^{※1}	Group ^{※2}	RA (J2000)	Dec (J2000)
1	II	06:38:33.1	+00:42:46.6
2		06:38:31.4	+00:45:00.0
3		06:38:30.8	+00:41:52.9
4		06:38:30.0	+00:43:39.1
5		06:38:29.4	+00:43:52.9
6		06:38:29.1	+00:44:46.6
7		06:38:28.6	+00:44:26.8
8		06:38:28.1	+00:44:29.2
9		06:38:21.4	+00:44:00.0
10		06:38:16.8	+00:44:41.8
11	III	06:38:34.5	+00:41:45.0
12		06:38:35.7	+00:46:23.7
13		06:38:31.3	+00:45:10.3
14		06:38:24.3	+00:42:26.1
15		06:38:23.1	+00:45:03.2
16		06:38:22.7	+00:45:04.7
17		06:38:22.1	+00:45:15.0
18		06:38:34.5	+00:43:11.8
19		06:38:19.8	+00:45:30.8
20		06:38:19.6	+00:46:22.1
21		06:38:18.9	+00:45:30.0
22		06:38:17.6	+00:45:34.7
23		06:38:16.3	+00:45:36.3

※1 番号は筆者が便宜を図り付けたものである。

※2 Group II は 5.8 μm での赤外線超過が起こっている天体で YSOs と考えられている。
Group III は星間減光による赤化の影響を受けた恒星が赤外線で見測されたものだと考えられている。

・ Fernández et al. (2017)

天の川銀河の動径方向に沿った金属量勾配の研究分野において、銀河系外縁部の研究を補充している。この論文では、後述の Bragança et al. (2019) とは異なり、電子温度の見測と物理モデルの仮定によって金属量の推定を行っており、Sh2-283 の金属量を $12 + \log(\text{H}/\text{O}) = 8.20$ 、 $12 + \log(\text{N}/\text{O}) = -1.19$ と結論付けている。

なおこの研究では Sh2-283 の見測はされておらず、Sh2-283 の見測データは他の論文から引用している。運動距離は Fich & Silkey (1991)、B3V/O7V/B1V の測光見測は Russeil et al. (2007)、B0V は Moffat et al. (1979)から引用している。

・ Gaia Data Release 2 (2018)

欧州宇宙機関 (European Space Agency : ESA) が、Astrometry 専用の宇宙望遠鏡 Gaia を用いて行っているプロジェクトが Gaia 計画である。天体を見測した際の年周視差から、天体の3次元的位置を求めることを目的としている。

このプロジェクトの中で、Sh2-283 の励起星であると考えられている ALS 18674 の観測が行われている。この結果を表 II - 4 に示す。この表の Distance の値は、筆者が年周視差から計算した値である。なお、アーカイブを公開しているページで、Photometry から求めた MCMC (Markov Chain Monte Carlo samples) の結果も見ることができる。このうち天体を連星だと仮定したモデルでは距離が 1 kpc 以内という結果になってしまうため、ALS18674 が連星である可能性は否定されると考えられる。一方で、天体が連星ではないと仮定したモデルでは、距離が 4.8 kpc 程度と求まり、年周視差からの求めた距離と測光観測からの求めた距離のズレを表している。

本論文では Gaia の観測で得られた年周視差から求めた距離を ALS 18674 及び Sh2-283 の距離として採用する。

表 II - 4 ガイア計画による ALS 18674 の観測結果

Description	Value
Gaia DR2 ID	3119827723711464576
RA, Dec [deg]	99.6135788840, 0.7445672868
Glon, Glat [deg]	210.7875000109, -2.5483636333
Parallax [mas]	0.1269 ± 0.0184
Distance [kpc]	$7.880^{+1.336}_{-0.998}$

• Bobotsis & Fich (2019)

H_{II} 領域とそれに付随する星間物質との関係を調べるために、サブミリ波でダストの放射の観測を行っている。H_{II} 領域の性質は、1.46 GHz と 4.89 GHz の VLA アーカイブデータ (Fich 1986, 1993) を用いて調査された。H_{II} 領域の位置と大きさは、連続波の 10% のフラックスの等高線を、円でフィッティングして求めている。質量は、Rudolph et al. (2006) の研究で解析された全ての H_{II} 領域の平均電子温度に等しい 8×10^3 K を仮定し、存在比の仮定、H_{II} 領域の構造に関する仮定に基づき、決定されている。調査に用いた全 38 天体のうち、31 天体 (82%) が H_{II} 領域の近傍に 1 つ以上のダストのクランプが確認された。一方で、Sh2-283 におけるこれらのデータは示されていない。しかし、Richards et al (2012) の結果から、ALS 18674 の位置を取り囲むようにダストの放射がシェル状に分布していることがわかっている。

Sh2-283 の星形成率は 29.7^{+3}_{-8} % と求められたことが報告されている。

• Bragança et al. (2019)

この論文では若い星の観測結果から、天の川銀河内における金属量の勾配を求める研究を行っている。Sh2-283 の金属量は ALS 18674 の観測結果から求めており、前述の Fernández et al. (2017) とは異なる方法で見積もっていることがわかる。

この論文によれば、ALS 18674 は表 II - 5 のような特性を持つ。ALS 18674 の O と H の比は 8.30 ± 0.04 dex と求められており、Fernández et al. (2017) の結果と合わせて考えると、

8.20 – 8.30 dex 程度の値になると考えられる。

一方で、ALS 18674 の距離は表 II – 6 に示すように先に紹介した研究とは大幅に異なる値が示されている。この論文では、この表にある値は用いず、Gaia の観測で判明した視差から求めた距離 $7.880^{+1.336}_{-0.998}$ pc を ALS 18674 及び Sh2-283 の距離として採用する。

表 II – 5 Bragança et al. (2019)による ALS 18674 の特徴

T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	v_r (km / s)	ξ_t (km / s)	$v \sin i$ (km / s)	ζ (km / s)	A(O) (dex)	A(Si) (dex)
29800	4.30	68	6	8	9	8.30 ± 0.04	6.92 ± 0.03

表 II – 6 Bragança et al. (2019)による ALS 18674 の位置

$l(^{\circ})$	$b(^{\circ})$	Heliocentric distance (kpc)			Galactocentric distance (kpc)
		Garmany et al. (2015)	Bailer-Jones et al. (2018)	Bragança et al. (2019)	
210.8	-2.5	13.3 ± 1.0	6.45 ± 1.16	-	14.25 ± 1.16

• Li et al. (2020)

Milky Way Imaging Scroll Painting (MWISP) の一環として、銀経 $207.7^{\circ} - 211.7^{\circ}$ の H_{II} 領域に付随する分子雲の観測を行っている。観測には中国の紫金山天文台にある 13.7 m のミリ波望遠鏡が用いられ、2012 年の 1 月から 2016 年の 6 月まで、 $^{12}\text{CO} \cdot ^{13}\text{CO} \cdot \text{C}^{18}\text{O}$ の $J = 1 - 0$ の放射が同時観測された。マップは $30'' \times 30''$ のピクセルで描画され、ビームサイズは $52 - 55''$ 、速度分解能は 0.16 km/s である。観測されたデータと SHASSA (Southern H-Alpha Sky Survey Atlas) (Gaustad et al. 2001) のサーベイで得られた $H\alpha$ 線のデータ、ダストの連続波のデータなどを比較しており、観測された分子雲やその内部の星 ALS 18674 が重なった位置に存在することを報告しており、これらが Sh2-283 を構成する要素である強い可能性を示している。

この論文では CO 同位体の観測結果から、X-factor 法 (Conversion factor 法) を用いて分子雲の質量を見積もっている。X-factor 法は観測されたメインビームの輝度温度の値が分子雲の質量に比例すると考えて質量を見積もる方法で、主に分解能が低く構造を十分に分解できない場合に用いられる。計算方法が簡素であるので、簡単に質量を推定したい場合にも有効である。Sh2-283 の総質量は、天体までの距離を 6.5 kpc と仮定した結果、 $2.9 \times 10^3 M_{\odot}$ と推定された。本論文で採用した距離 (7.9 kpc) に修正すると $3.5 \times 10^3 M_{\odot}$ となる。この推定では Sh2-283 が低金属量環境下にあることを考慮せず、地球近傍で用いられるファクターを用いて計算しているため、実際には、より多くの水素分子が存在している可能性がある。

・ SIMBAD

ALS 18674 – 18677 の位置がまとめてある。これらの星の位置を表 II – 7 に示す。

表 II – 7 ALS 18674 – 18677 の位置

Name	RA (J2000)	Dec (J2000)	Spectral Type
ALS 18674	06:38:27.0	00:44:36	B0V
ALS 18675	06:38:14.7	00:44:17	—
ALS 18676 (TYC 147-1026-1)	06:38:13.7	00:44:11.9	—
ALS 18677	06:38:13.4	00:44:00	—

Ⅲ 観測諸元

Ⅲ－１ はじめに

本研究では当初 ALMA の Atacama Compact Array (ACA) の 7m アレイも用いて 6.0'' の角分解能が得られる予定であった。この分解能で観測すると、Sh2-283 までの距離を $7.9^{+1.3}_{-1.0}$ kpc としたとき^[12]、 $0.23^{+0.038}_{-0.029}$ pc の構造を見分けることができ、分子雲内のコアを同定することができたかもしれない。しかし、今回は運用上の都合により Total Power (TP) アレイを用いた Single Dish の観測しか行われなかった。そのため、以下に示す諸元は TP アレイで観測した際のものである。

観測諸元を確認するには、実際のデータのヘッダーを確認する方法だけでなく、観測データに付属されている Weblog を確認する方法もある。これらを合わせて確認することで、得られる情報の量を増やすことができる。Weblog の確認には少し注意すべき点があるので、付録にて説明をする。

以下ではヘッダーと Weblog の両方を確認した結果を報告する。

Ⅲ－２ 観測した放射の種類

まず、今回は以下の帯域に分けて観測が行われた。

表Ⅲ－１ 観測に用いた帯域

Transition	Central Frequency [sky, GHz]	Bandwidth [GHz]	Channelwidth [kHz]	N of channels	Note
Continuum - L	217.945	2.000	15624.9	128	Not used ^{※1}
¹³ CO (J = 2 - 1)	220.349	0.125	122.069	1024	
C ¹⁸ O (J = 2 - 1)	219.511	0.125	122.069	1024	
H30 α	231.849	0.125	122.069	1024	Not used ^{※2}
¹² CO (J = 2 - 1)	230.486	0.125	122.069	1024	
Continuum - U	232.945	2.000	15624.9	128	Not used ^{※1}

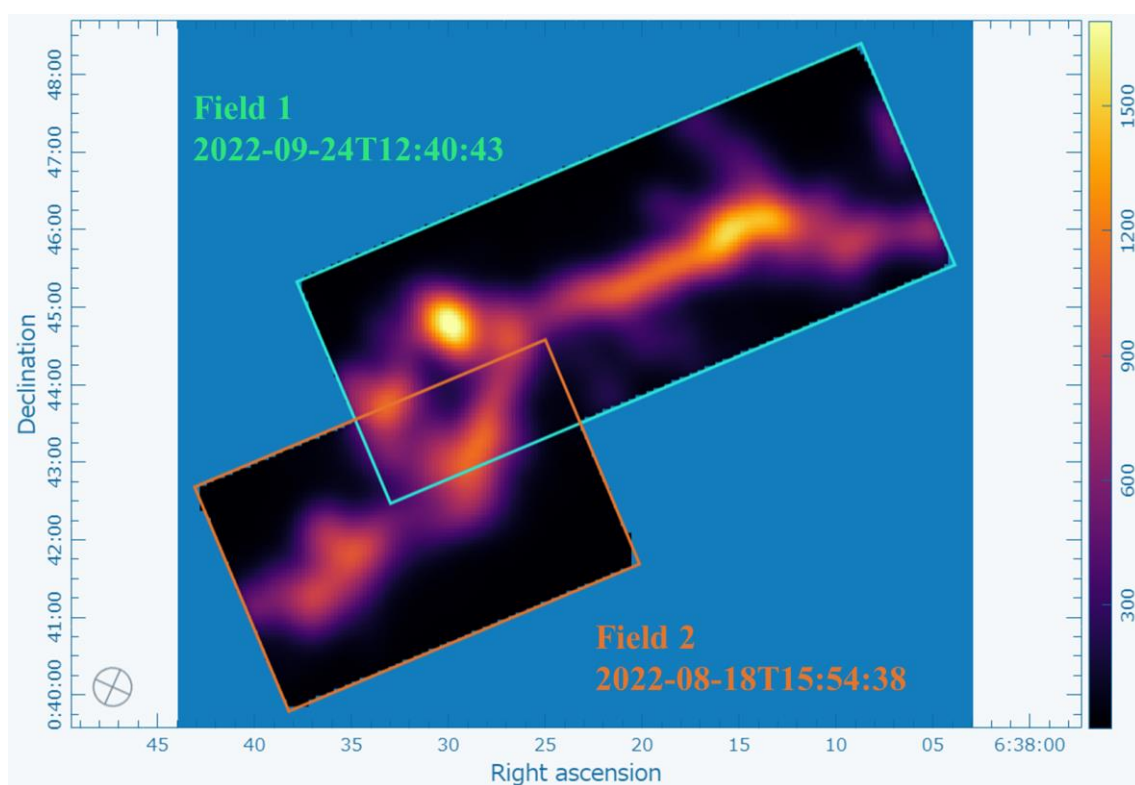
※1 7m アレイで観測予定だったもの。TP アレイでは有意なデータが得られなかった。

※2 今回は受信できなかった。

表の右側、「Note」の列には、今回使用しなかったデータが示してある。表Ⅲ－1に示す通り、今回は3つのCO同位体 (^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O) の観測結果を用いて解析を行う。

観測は Sh2-283 を 2つのフィールドに分けて、オンザフライマッピングによりそれぞれ異なる日に行われた。この様子を図Ⅲ－1に示す。図Ⅲ－1では2つのフィールドに分けて観測された結果を、1つの画像に合成し、その画像上に2つのフィールドの位置を示している。フィールドの範囲は、Li et al. (2020) で得られた ^{12}CO ($J=1-0$) のマップで放射が観測されている範囲を参考にして決定された。図Ⅲ－1のカラーマップは ^{12}CO の Moment 0 map を示している。Moment map についてはIV章にて説明を行うが、Moment 0 とは速度方向に積分した輝度分布のことである。

Field 1 のリファレンスポイントは (RA, Dec (J2000)) = (6:38:20.9, 0:45:28.0)、Field 2 のリファレンスポイントは (RA, Dec (J2000)) = (6:38:31.6, 0:42:11.3) である。



図Ⅲ－1 今回の観測した2つのフィールド

III－3 分解能とノイズの RMS

今回の観測の分解能とノイズの RMS を表III－2 に示す。今回の観測は 2 つのフィールドで観測日が異なるので、同じ輝線の観測であっても観測条件や中心周波数の差異により分解能やノイズが異なる。なお、表III－1 より、速度分解能は 0.1587 km/s である。

表III－2 観測の分解能とノイズ

		Beam size ^{※1}	Observed RMS ^{※2}
		[arcsec]	[Jy/beam]
Field 1	¹² CO	28.219	1.77
	¹³ CO	29.487	1.67
	C ¹⁸ O	29.599	1.24
Field2	¹² CO	28.227	0.459
	¹³ CO	29.495	0.426
	C ¹⁸ O	29.604	0.332

※1 中心周波数でのビームサイズ

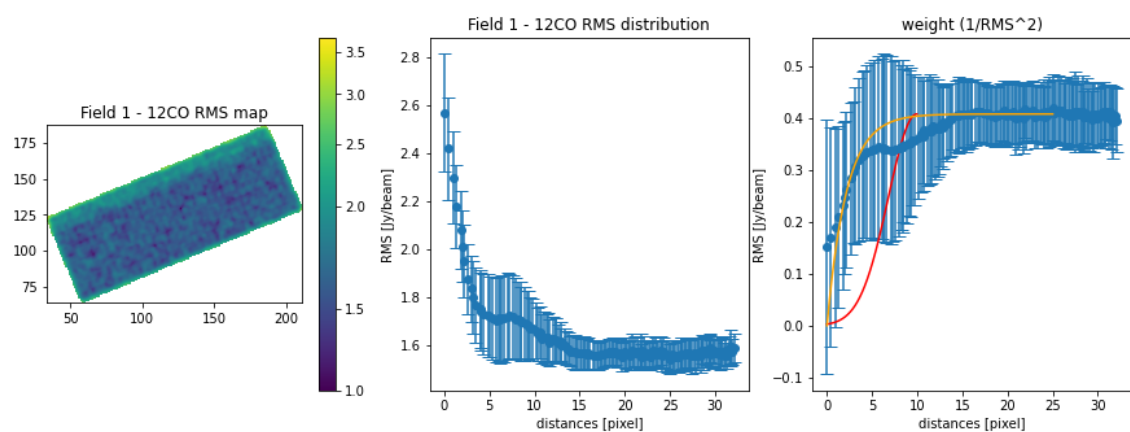
※2 実際のデータの RMS の平均値

ノイズの RMS の様子を以下の図III－2 から図III－7 に示す。左から、RMS Map, RMS の分布（領域の端からの距離と RMS の対応）、 $1/\text{RMS}^2$ の重みの分布である。

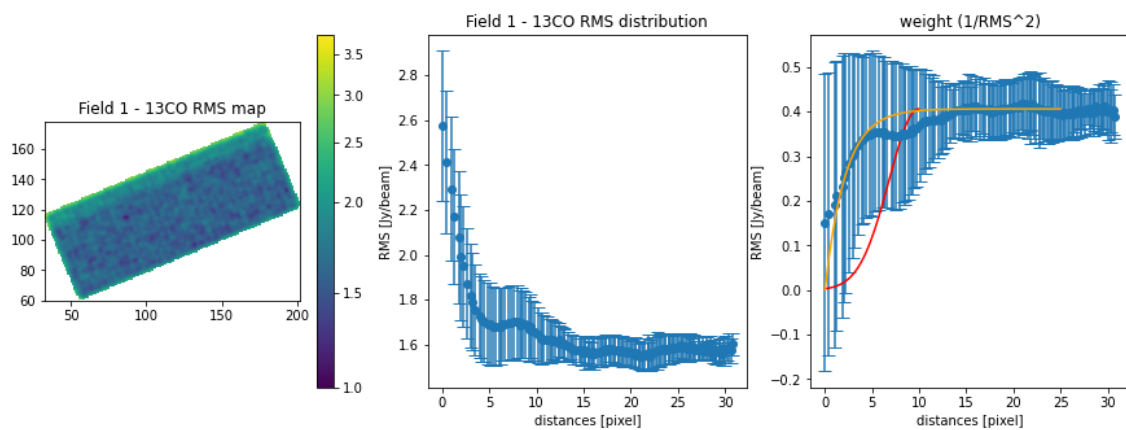
RMS Map は天体からの放射がないチャンネルで計算したものであり、今回は 0－440 ch の範囲でデータを集計しピクセルごとに RMS を計算した。

RMS の分布については、図III－8 及び図III－9 のように領域の端からの距離を測り、これと RMS Map の対応を取ることで図示している。プロットはある距離での RMS の平均値であり、バーは RMS の標準偏差を表している。

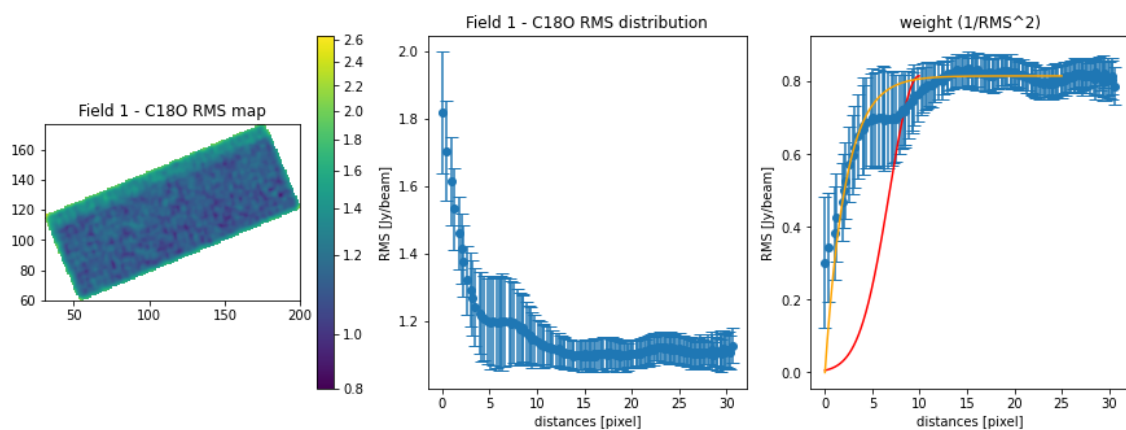
重みの分布については 2 つの Field 画像を合成する際に用いるもので、詳細は III－5 で説明する。



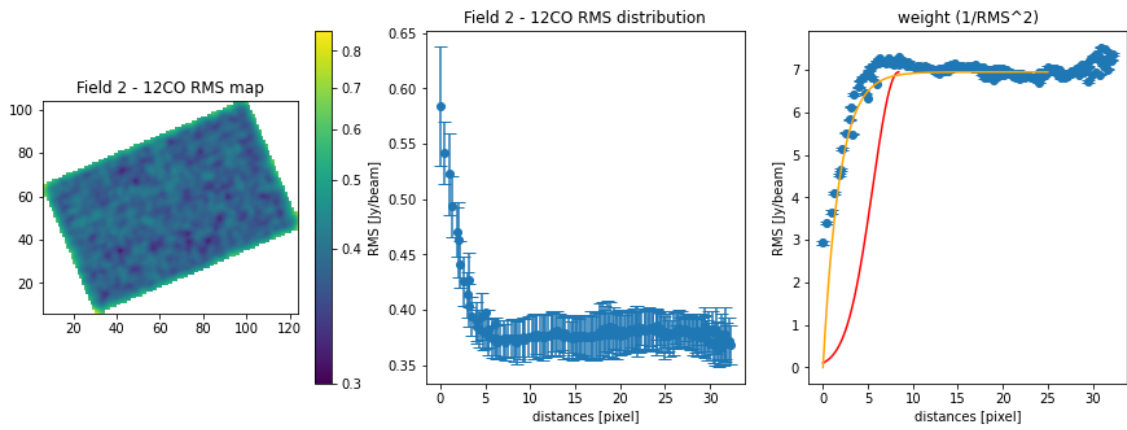
図III－2 RMS Map (Field 1 ^{12}CO , 橙線と赤線はIII－5で説明するフィッティング)



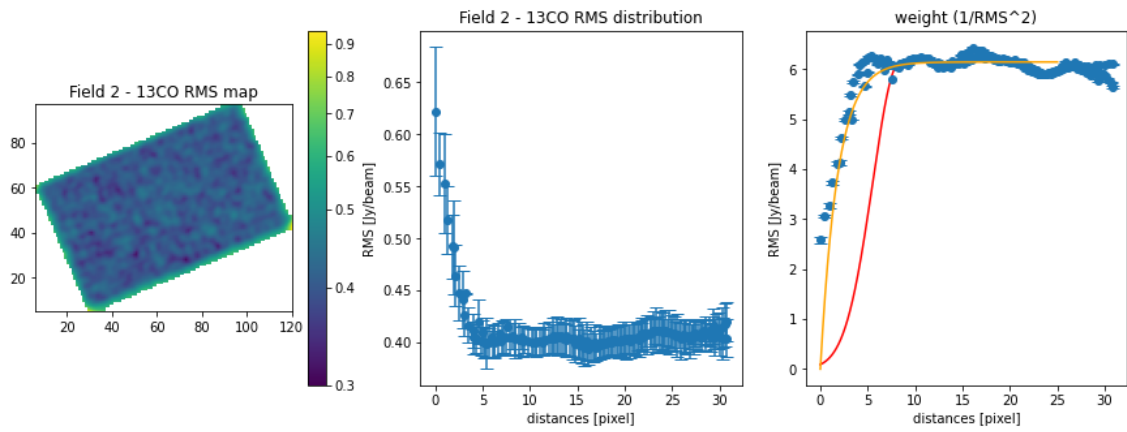
図III－3 RMS Map (Field 1 ^{13}CO , 橙線と赤線はIII－5で説明するフィッティング)



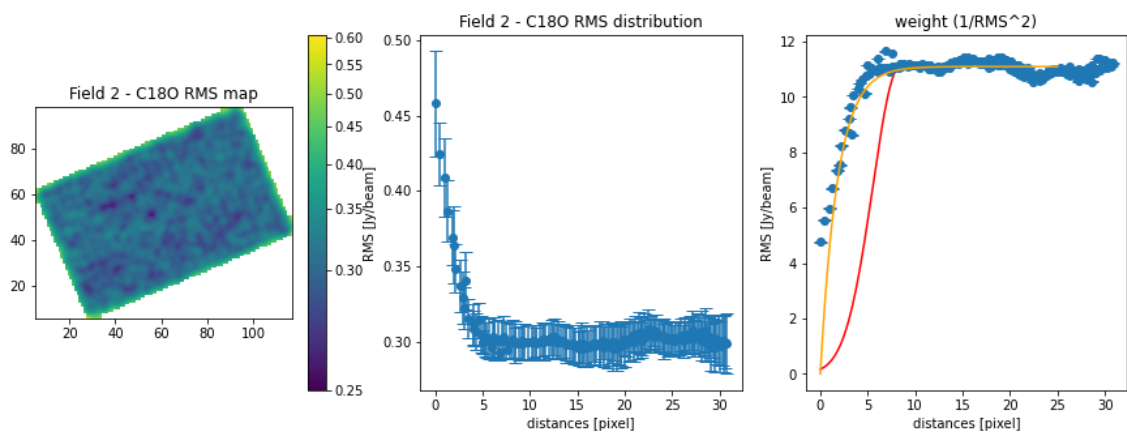
図III－4 RMS Map (Field 1 C^{18}O , 橙線と赤線はIII－5で説明するフィッティング)



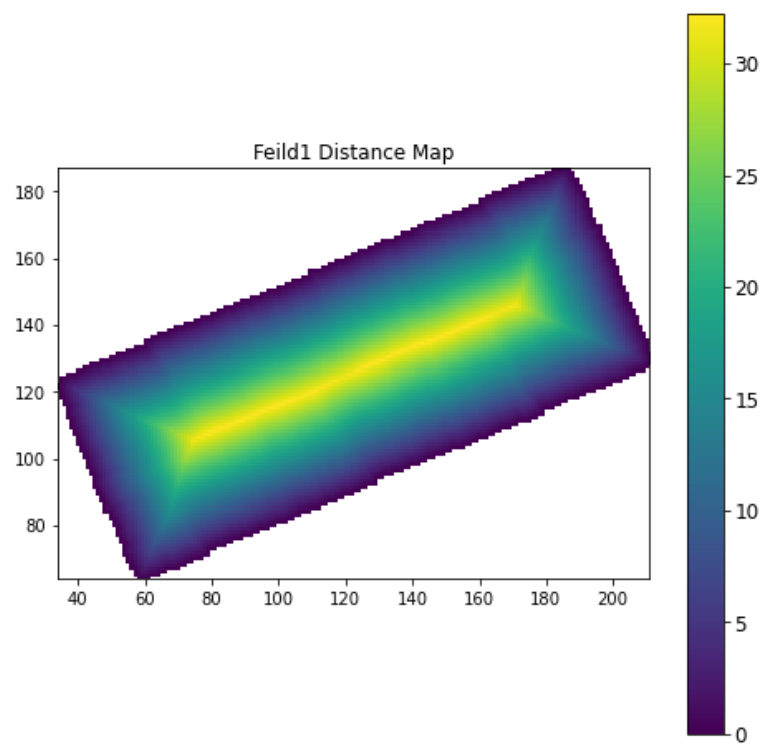
図III－5 RMS Map (Field 2 ^{12}CO , 橙線と赤線はIII－5で説明するフィッティング)



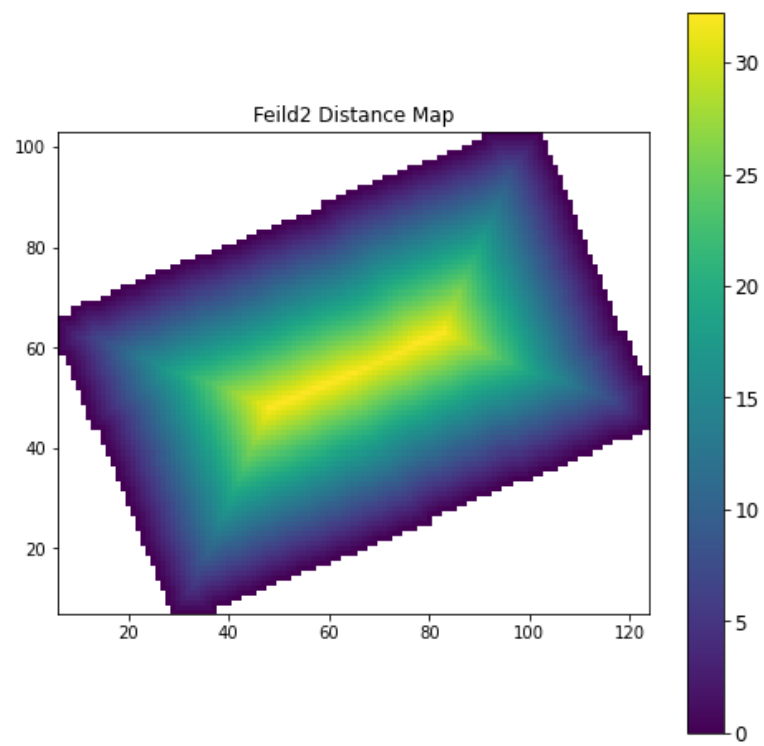
図III－6 RMS Map (Field 2 ^{13}CO , 橙線と赤線はIII－5で説明するフィッティング)



図III－7 RMS Map (Field 2 C^{18}O , 橙線と赤線はIII－5で説明するフィッティング)



図Ⅲ－８ 端からの距離 (Field 1)



図Ⅲ－９ 端からの距離 (Field 2)

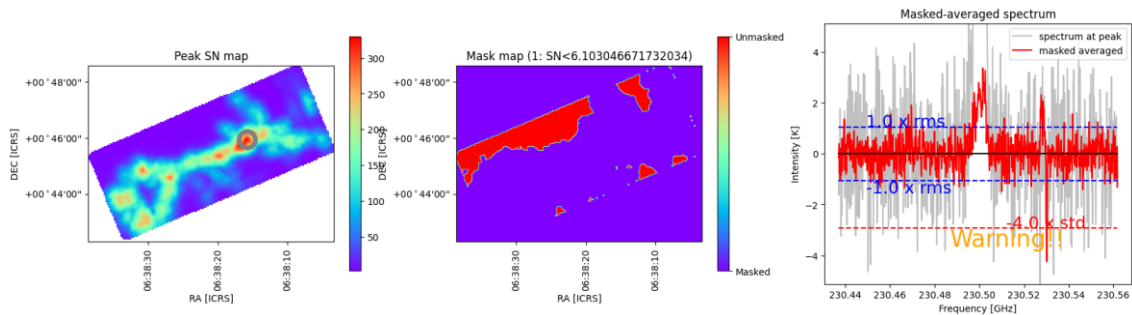
全体を通して、Field の端の部分は RMS が高くなる傾向にある。また、図Ⅲ－2 から図Ⅲ－4 を見ると、Field1 の上部には RMS の高い帯状の領域があり、RMS の分布に影響を与えていることがわかる。

Ⅲ－4 Contamination Plots

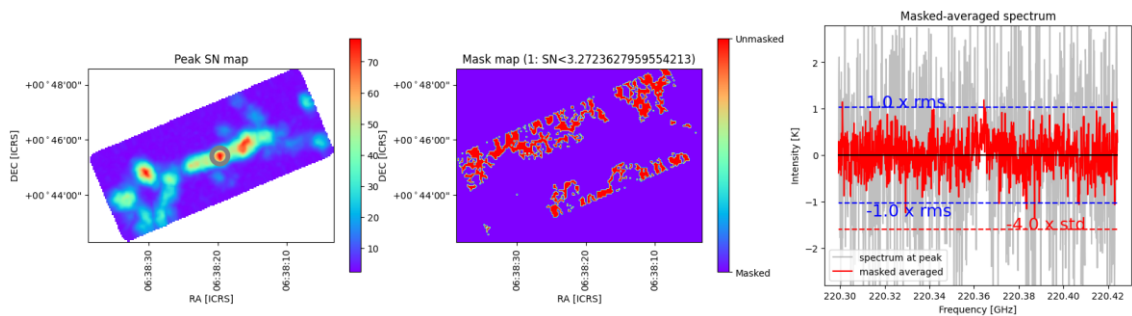
次は Contamination Plots を確認する。このプロットは ALMA データの画像において、天体の周辺に他の信号がどの程度混入しているかを視覚化したものである。観測対象の信号が周囲のノイズや他の天体によってどの程度汚染されているかを示しており、off 点観測の正確性や大気の吸収線の存在を調べることができる。よって、コンタミネーションが少ないほど、データの品質が高い。

この Plot では、ノイズの RMS のレベルとベースラインノイズの平均値からの標準偏差の 4 倍のレベルが示されている。後者の閾値を超えた信号は顕著な特徴であると判断され、コンタミネーションを疑う必要がある。

図Ⅲ－10 から図Ⅲ－15 に今回得られた Contamination Plots を示す。



図Ⅲ－10 Contamination Plots (Field1 ^{12}CO)



図Ⅲ－11 Contamination Plots (Field1 ^{13}CO)

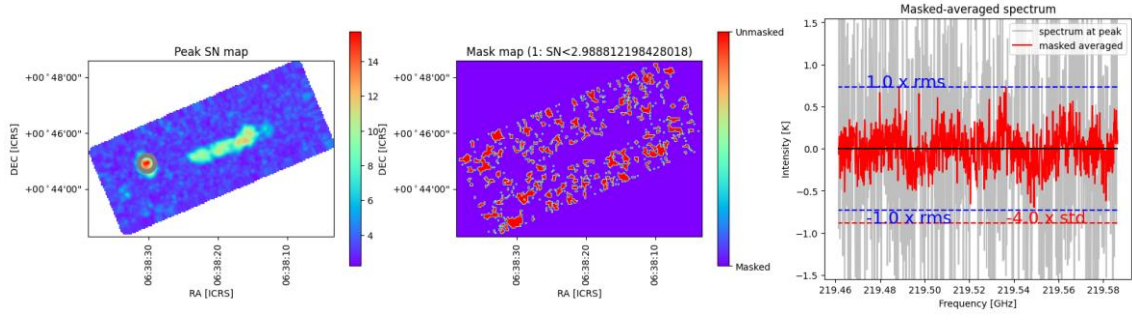


图 III - 1 2 Contamination Plots (Field1 C¹⁸O)

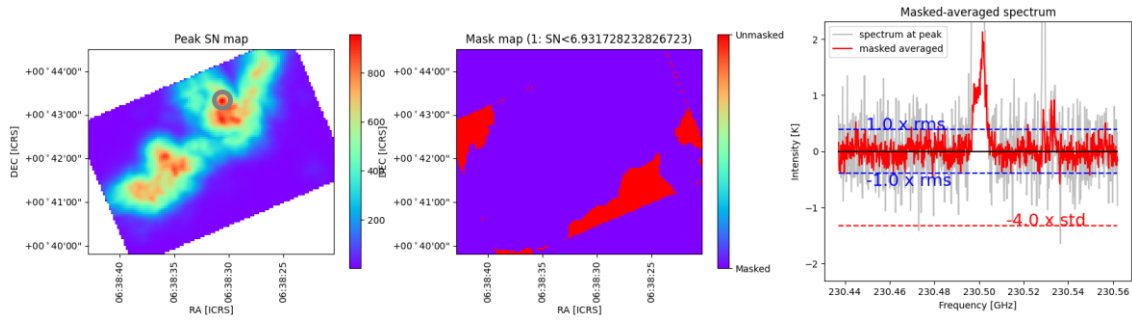


图 III - 1 3 Contamination Plots (Field2 ¹²CO)

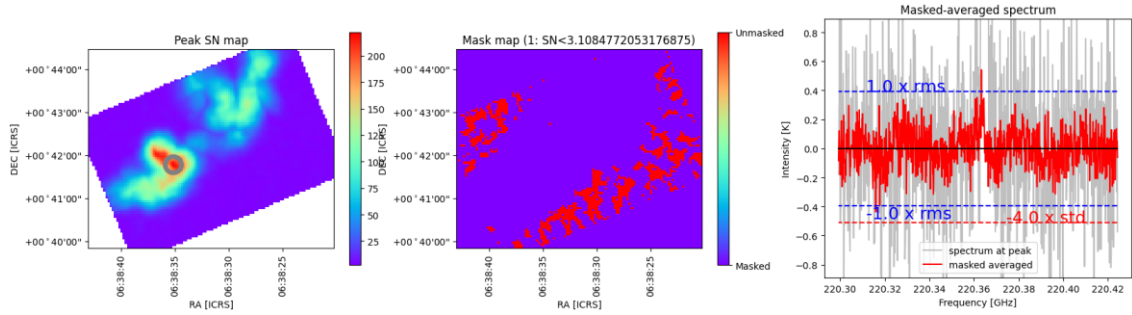


图 III - 1 4 Contamination Plots (Field2 ¹³CO)

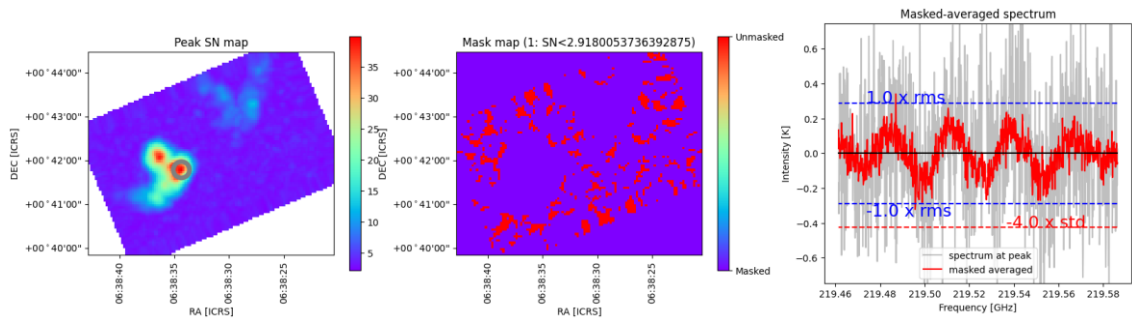


图 III - 1 5 Contamination Plots (Field2 C¹⁸O)

Plotの結果をみると、ほとんどの画像ではコンタミネーションは検出されなかったことがわかる。一方で、Field 1 の ^{12}CO のマップには、230.53 GHz の付近にコンタミネーションと思われる吸収線が含まれていることが分かる。この周波数付近には地球大気による吸収線が現れることがあり、今回見られた吸収線もこの影響によるものだと考えられる。しかし、この周波数は Sh2-283 の CO ($J=2-1$) の放射とは関わりのないものである。

従って、今回の研究でコンタミネーションに特別の配慮を行う必要はないと判断した。

III – 5 合成マップの作成

今回は観測を 2 つのマップに分けて行ったため、全体の構造を把握するには 2 つのマップを合成したマップを確認すると効率が良い。そのため、結果の説明の前に合成マップの作成方法について説明する。

マップを合成する際に、それぞれのマップで重なる部分があるときは、同じ位置のデータが複数あることになるので、この部分のデータ処理について考える必要がある。最も簡単な処理は、該当のピクセルの値を対応するピクセル同士での平均値に置き換える方法である。今回はそれぞれのマップのノイズの RMS を考慮した加重平均（重み付け平均）を行うことで、重なり合う領域が正しい値となるように努めた。この処理については、この節の最後に改めて説明する。

マップを合成する作業は自作の Python スクリプトで行った。この際、合成するマップ同士が天球面上の同じ範囲を同じグリッド幅・グリッド位置で表すデータであれば処理が簡単になる。なぜなら、このようなマップを Python で配列として読み取れば、同じ形状の配列になるからである。配列同士が同じ形状をもつ場合、配列の同じ位置の要素を比較するだけで簡単に求めることができる。従って、それぞれのマップの余白の大きさやグリッドの間隔を調整し、それぞれのマップが覆う天球面上での範囲とグリッドの位置を揃えることが大変重要である。

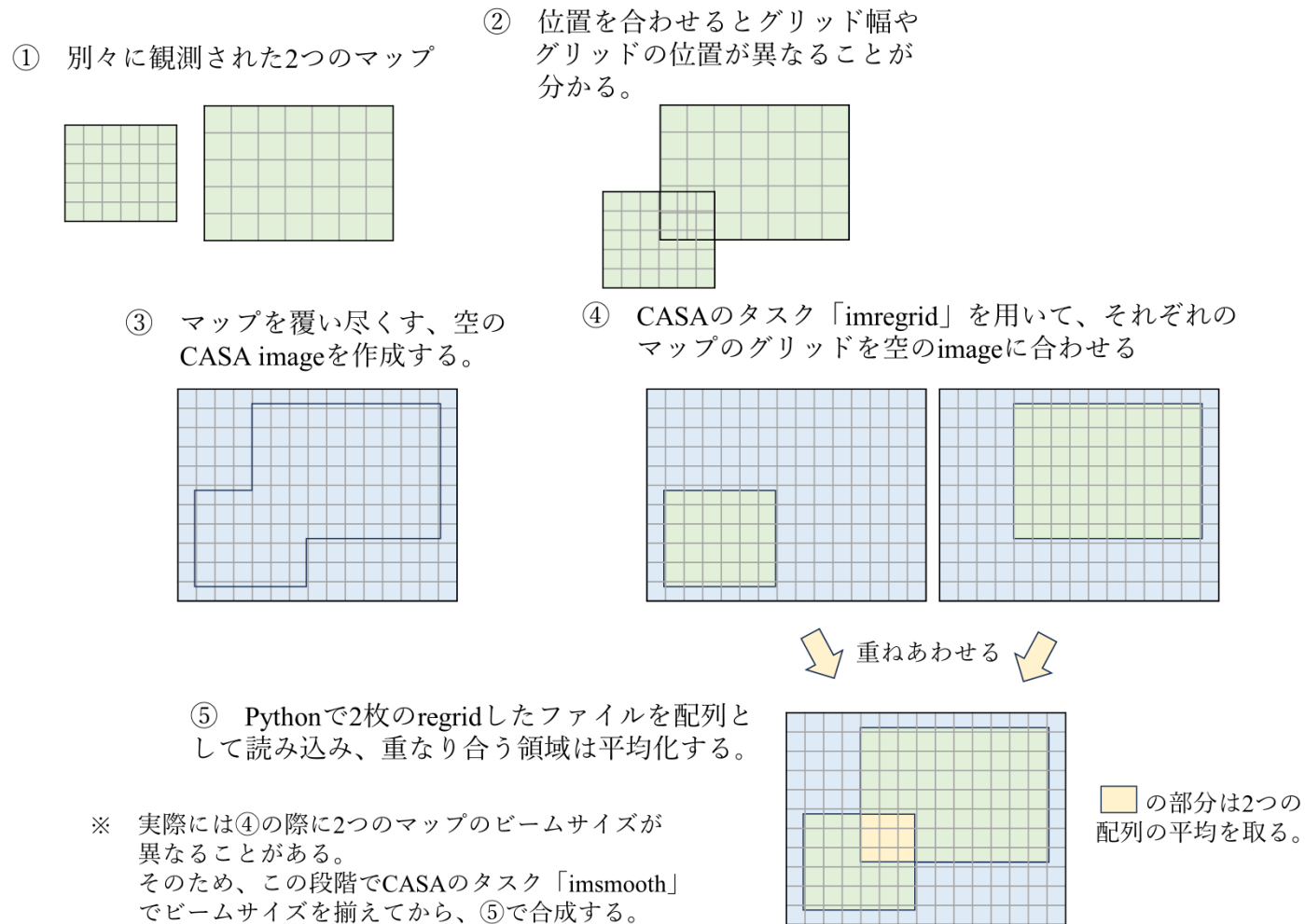
マップの範囲とグリッドの位置を揃えるためには CASA のタスクを用いると良い。「imregrid」というタスクを用いると、マップ A（テンプレートと呼ばれる）の範囲内でマップ B を表示することができ、そのときのグリッドはマップ A のグリッドに揃えられる。つまりマップ B とマップ C の範囲とグリッド位置を揃えたい場合には、マップ B と C の範囲より広いマップ A を用意し、マップ B と C をそれぞれマップ A の形状に regurid することで、その目的を達成することができる。

また、複数の輝線で同じ天体を観測した場合、それぞれの輝線でビームサイズが揃っていないことがある。このような場合はビームサイズを揃えないとデータの比較ができないので、CASA の「imsmooth」というタスクでビームサイズを揃えてから、画像処理を行う

ことになる。

合成マップの作成方法をまとめると、以下のような流れになる。流れを図解した図Ⅲ－16も参照されたい。

1. 合成する2つのマップのビームサイズを揃える
2. 合成マップのテンプレートを作成する
3. 合成する2つのマップのグリッドを揃える
4. 2つのマップのノイズのRMSを確認する
5. 2つのマップのRMSを反映した加重平均により合成マップを作成する



図Ⅲ－16 合成マップの作成方法

最後に、マップの重なり合う部分の処理について触れる。

前述のとおり、マップの重なり合う領域は加重平均を行った。Field 1 の重みを w とし、Field 2 の重みは Field 1 の重みとの和が 1 になるように $1 - w$ とする。ある地点 x の Field 1 における輝度を I_1 、Field 2 におけるデータを I_2 とすると、重み付け平均された輝度 I_{Avg} は式 III-1 のようになる。

$$I_{Avg} = w I_1 + (1 - w) I_2 \quad (\text{III}-1)$$

w の値は重み付け平均をした結果の分散が最も小さくなるように選択する。 I_1 に σ_1^2 の分散が、 I_2 に σ_2^2 の分散があるとすると、 I_{Avg} の分散 S^2 は以下のように表せる。

$$S^2 = w^2 \sigma_1^2 + (1 - w)^2 \sigma_2^2 \quad (\text{III}-2)$$

この S^2 の最小値を与える w は

$$\frac{\partial S^2}{\partial w} = 2w\sigma_1^2 - 2(1 - w)\sigma_2^2 = 0 \quad (\text{III}-3)$$

$$w(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) = \sigma_2^2 \quad (\text{III}-4)$$

$$w = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad , \quad 1 - w = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (\text{III}-5)$$

あるいは

$$w : (1 - w) = \frac{1}{\sigma_1^2} : \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (\text{III}-6)$$

この方法は σ_1 と σ_2 に相関がなく、独立な量であるときに使える方法である。今回用いているデータは観測日がおよそ 1 ヶ月離れているものであるため、このような方法が使える。

今回は各ピクセルの RMS を求めることができるので、これを用いた重み付けを行いたい。RMS は式 III-7 のようになる。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (\text{III}-7)$$

RMS は標準偏差 σ_x において期待値が 0 の場合の値だと言えるし、逆に期待値が $\langle x \rangle$ のときの偏差 $x - \langle x \rangle$ の RMS は標準偏差 σ_x に等しいと言える。したがって、RMS から適切な重みを導出する場合は、Field 1 と Field 2 の RMS をそれぞれ RMS_1 、 RMS_2 とすれば、以下のようになる。

$$w : (1 - w) = \frac{1}{\text{RMS}_1^2} : \frac{1}{\text{RMS}_2^2} \quad (\text{III} - 8)$$

以上の式のようにして求めた $1/\text{RMS}^2$ の重みの領域の端からの距離に応じた分布を示しているのが、図 III - 2 から III - 7 である。図の中のオレンジの線はこの重みを式 III - 9 のように指数関数を用いてフィッティングしたものである。

$$w = a[1 - \exp(-x)] \quad (\text{III} - 9)$$

ここで、 a は $1/\text{RMS}^2$ の重みの最大値を決める係数、 x は領域の端からの距離である。

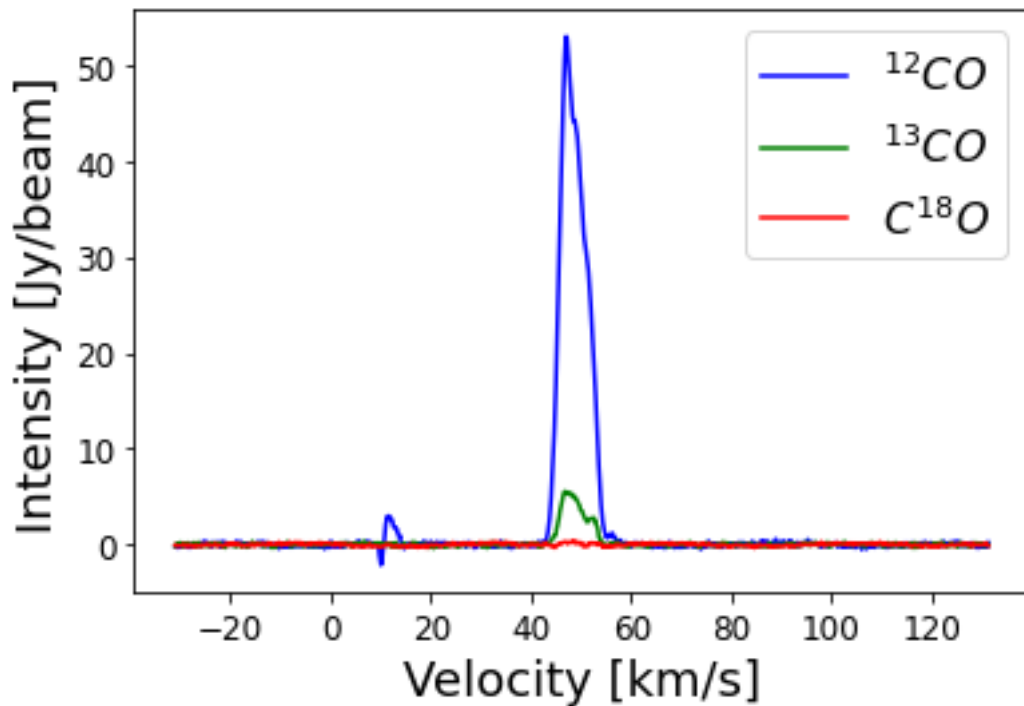
今回は以上に加えて、観測領域の端の重みをさらに落とす処理を行った。領域の端は今まで問題にしてきた偶然誤差だけでなく、系統誤差が生じる可能性があるためである。そのため、領域の端は図 III - 2 から III - 7 の中の赤い線のように式 III - 10 の様なガウス関数を使うことで重みを下げる。このガウス関数は式 III - 9 が a の 99% の値をとる距離 $x_{99\%}$ でピークとなるようにしており、 σ はビームサイズ（単位は pixel）から、 $\sigma = \text{FWHM}_{\text{Beam}}/2\sigma\sqrt{2\ln 2}$ として求めた。

$$w = a \exp\left[-\frac{(x-x_{99\%})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{III} - 10)$$

IV 結果

IV-1 観測されたスペクトル

今回観測されたスペクトルを図IV-1に示す。このスペクトルは観測領域全ての輝度温度を平均した値である。



図IV-1 観測領域全体を平均したスペクトル

^{12}CO と ^{13}CO は平均化されたスペクトルでも輝線の位置や線幅が十分に確認できる。先行研究の CO ($J = 1 - 0$) の放射では、 ^{12}CO 以外の放射が有意に観測されなかったので、大きな進歩である。Sh2-283 の視線速度は、 $v_{\text{LSR}} \approx 50 \text{ km/s}$ だと読み取ることができ、例えば ^{12}CO の放射での輝度温度のピークは 47.061 km/s である。

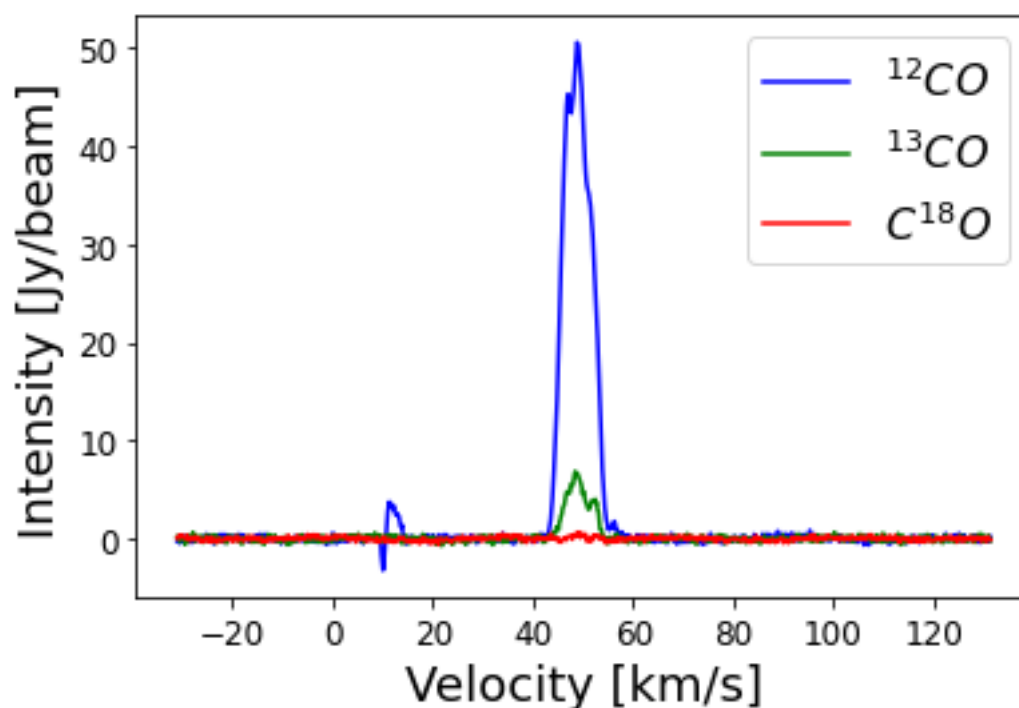
この他、 ^{12}CO の放射では $v_{\text{LSR}} \approx 10 \text{ km/s}$ の位置に ^{12}CO でのみ観測される微弱な放射が観測されており、Sh2-283 との関連について考察を行う必要がある。

この微弱な放射は視線速度が異なるため、地球大気の影響を疑わなくてはならない。しかし、図IV-2 及び図IV-3 に示すように、1 ヶ月程異なる日時に観測された Field 1 と Field 2 の両方のスペクトルにその特徴が現れることから、この特徴は地球大気の影響

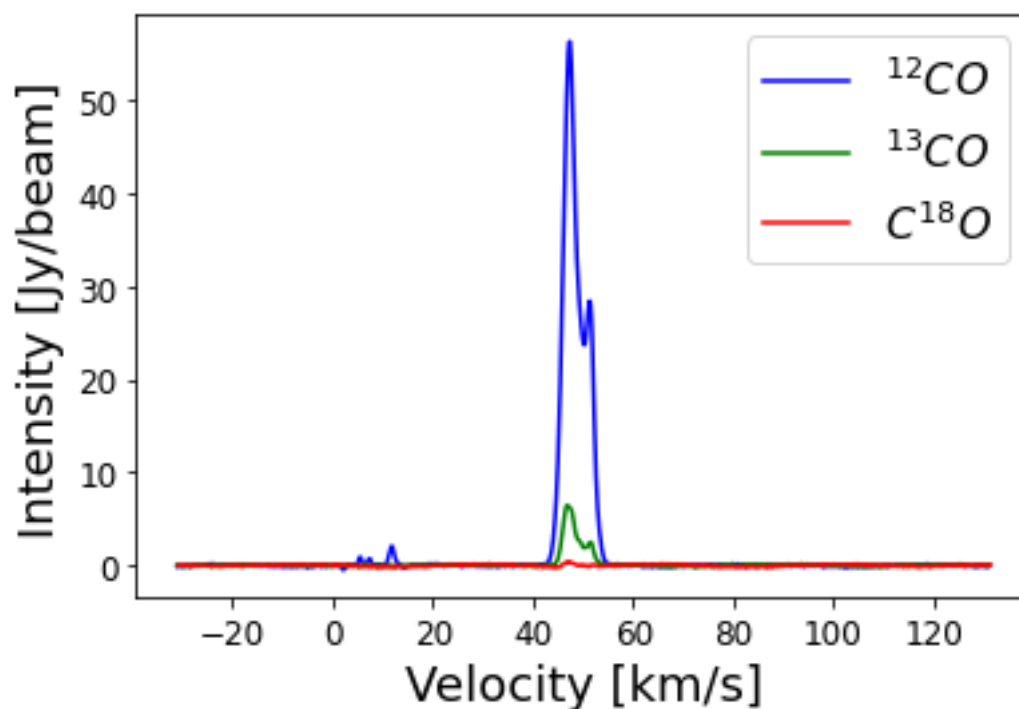
により一時的に混入したものではないことが分かる。また、Li et al. (2020) で報告されたスペクトルにも、10 km/s の付近に値が大きいノイズが確認されている。合成マップを作成する際にも、2 つの観測領域で分子雲を同じ形状で観測できていたことも、付け加えておく。

この放射は ^{13}CO と C^{18}O で観測できていないため、この分子雲は密度が低い希薄な雲であると考えられる。 ^{13}CO と C^{18}O は ^{12}CO と比べて光学的に厚くなりにくく、分子雲の密度が高い領域でしか観測できないからである。

10 km/s 付近の分子雲の放射と、Sh2-283 の放射の主成分である 50 km/s の雲の間の速度に放射は見られない。もし、この 2 つの分子雲が衝突などの相互作用を起こしていると考えられる場合、2 つの視線速度の間に放射が見られていないことは不自然である。従って、2 つの分子雲には関連は無いものだと思われる。



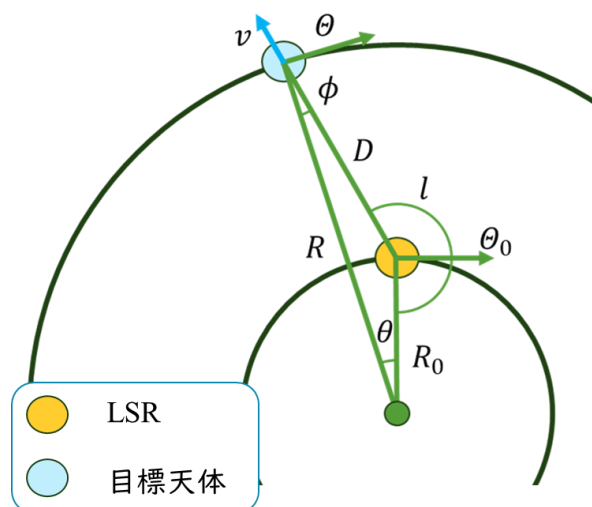
図IV-2 Field 1 全体を平均したスペクトル



図IV－3 Field 2 全体を平均したスペクトル

同じ方向に見える別の雲だとする場合、視線速度の差は銀河の回転運動の影響で生じていると考えられる。そこで、この 2 つの分子雲について運動学的距離を求め、解が存在することを確かめる。

図IV－4 に運動学的距離の幾何学的な関係を示す。運動学的距離とは天の川銀河（銀河系）の回転運動を利用して、天の川銀河の円盤に属する天体までの距離を視線速度に基づいて求めたものである^[10]。



図IV－4 運動学的距離の幾何学的な関係

図IV-4に従って、運動学的距離の導出を行う。まず、銀河の差動回転は以下式IV-1のようになる。

$$v = \left(\frac{\theta}{R} - \frac{\theta_0}{R_0} \right) R_0 \sin l \quad (\text{IV-1})$$

ここで、 R と θ は目標天体の銀河中心からの距離と回転速度、 R_0 と θ_0 は局所静止基準の銀河中心からの距離と回転速度、 l は銀経を表す。

次に、余弦定理を目標天体の地球からの距離 D について解くと、以下のようになる。

$$D = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l} \quad (\text{IV-2})$$

以上を連立し、視線速度 v と D の関係は以下のようになる。

$$D = R_0 \cos l \pm \sqrt{\frac{\theta^2 R_0^2 \sin^2 l}{(\theta_0 \sin l + v)^2} - R_0^2 \sin^2 l} \quad (\text{IV-3})$$

以上の式は、 $\theta = \theta_0$ を仮定するなら、式IV-4の形でも表せる。銀河の外縁部では、回転速度が一定 (flat rotation) になるので、このような近似が成り立つ。今回は $\theta = \theta_0$ を仮定して計算を行った。

$$D = R_0 \left(\cos l \pm \frac{\sin l \sqrt{\theta^2 \cos^2 l - 2\theta v \sin l - v^2}}{\theta \sin l + v} \right) \quad (\text{IV-4})$$

計算で用いた値を表IV-1に示す。

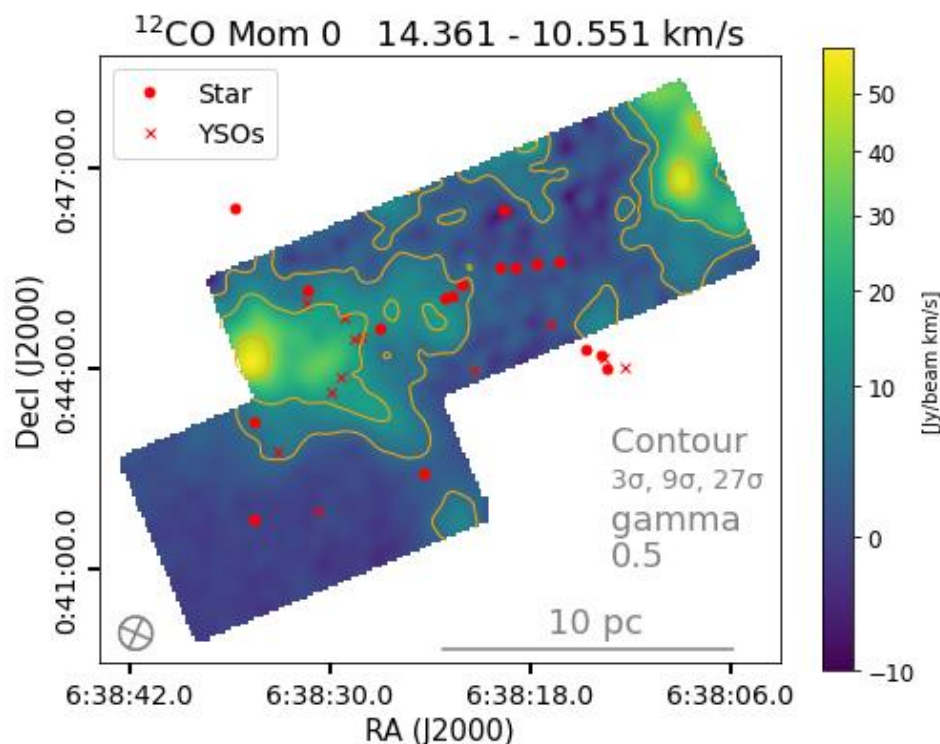
表IV-1 運動学的距離の計算に用いたパラメータ

θ [km/s]	R_0 [kpc]	l [deg]
220	8.5	210

計算の結果、 $v = 10$ km/s のとき、運動学的距離は 0.97 kpc と求められた。つまり、10 km/s という視線速度は銀河の回転運動で説明がつく速度である。念のため Sh2-283 の視線速度を $v = 50$ km/s として運動学的距離を求めると、7.63 kpc となる。ALS 18674 から求められた Sh2-283 の距離が $7.9^{+1.3}_{-1.0}$ kpc であったので、Sh2-283 は銀河の回転運動に乗って移動していると考えられる。

最後に、10 km/s 付近の分子雲の Moment 0 map を図IV-5に示す。前述の通り、この分

子雲は ^{12}CO でのみ観測されている。コンターはそれぞれの輝線の 3σ 、 9σ 、 27σ のレベルである。暗い放射が映るようにカラーバーのスケーリングを $y = x^{1/2}$ に変更しているので注意されたい。

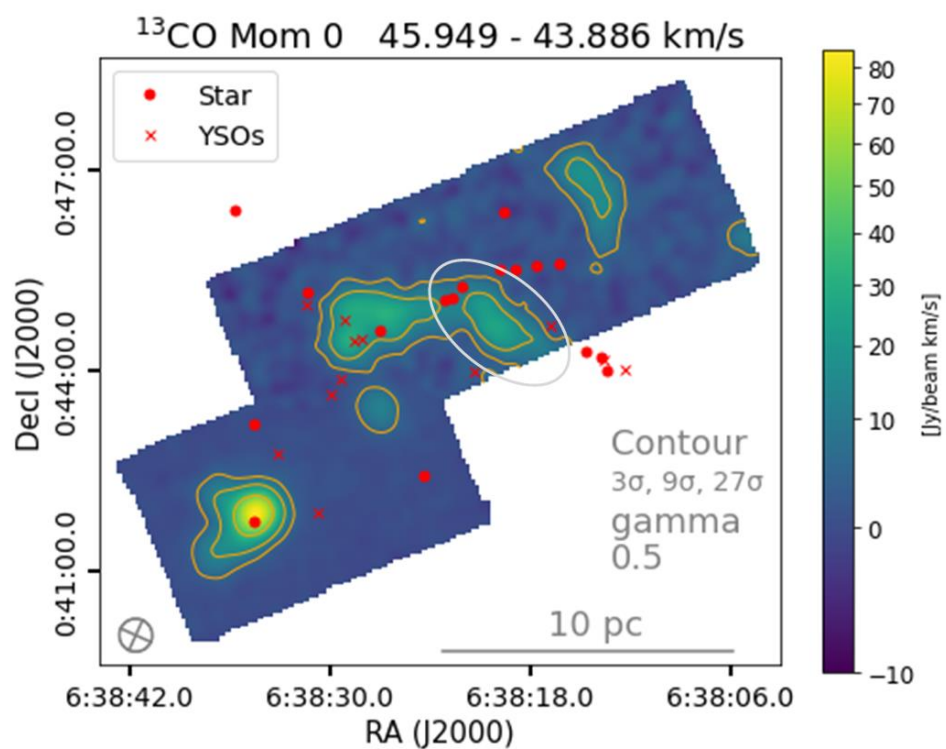


図IV－5 10 km/s 付近の分子雲の Moment 0 map
(^{12}CO , contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)

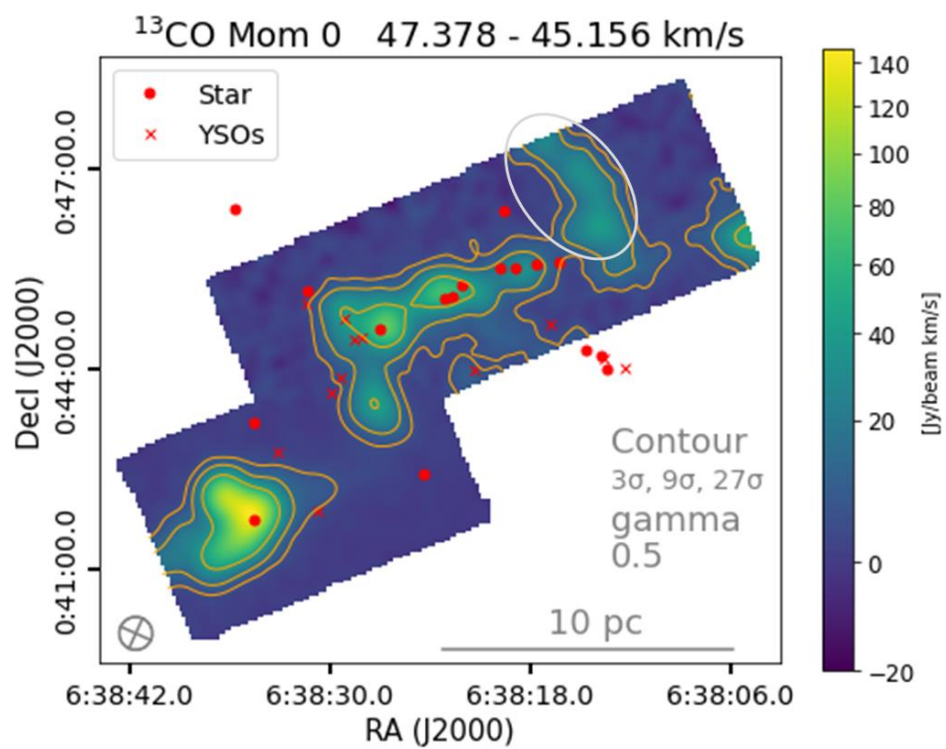
IV－2 フィラメントの分布

図IV－6 から図IV－12 に、 ^{13}CO のチャンネルマップを確認して発見したフィラメントの様子を示す。ここでは、先行研究の CO の観測^[9]では確認できなかった構造をピックアップして紹介する。

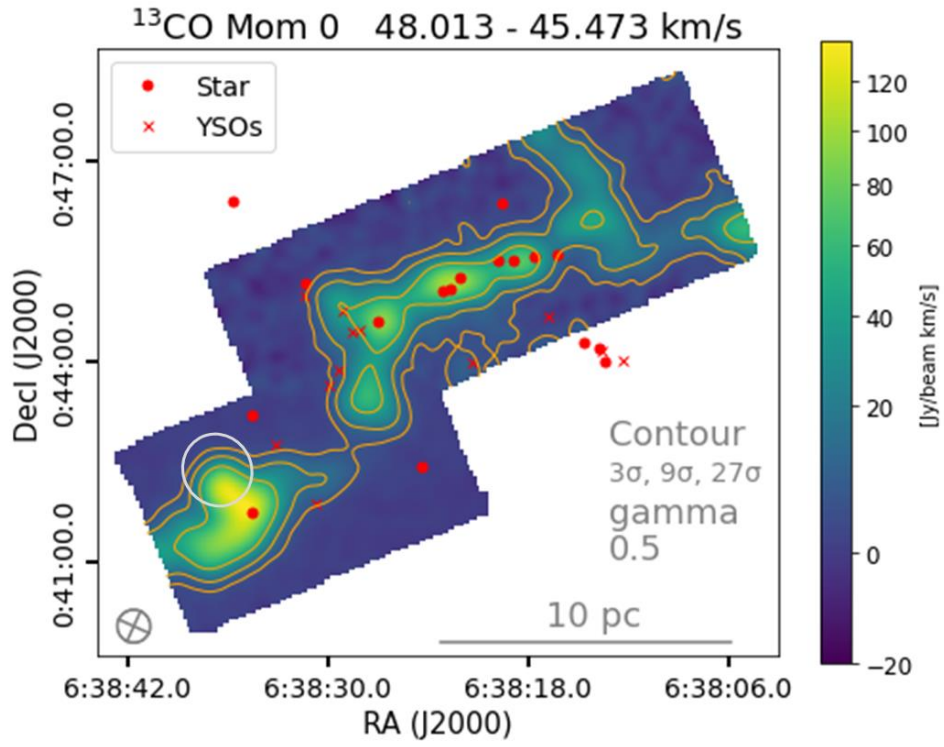
図はフィラメントの Moment 0 map であり、 ^{13}CO の 3σ 以上の放射が得られた視線速度の範囲で積分している。以下の図では積分した範囲に対応するフィラメントの位置をグレーの円で囲んでいる。また、輝度の低い成分がよく見えるようにカラーバーのスケーリング $y = x^\gamma$ において $\gamma = 0.5$ としている。



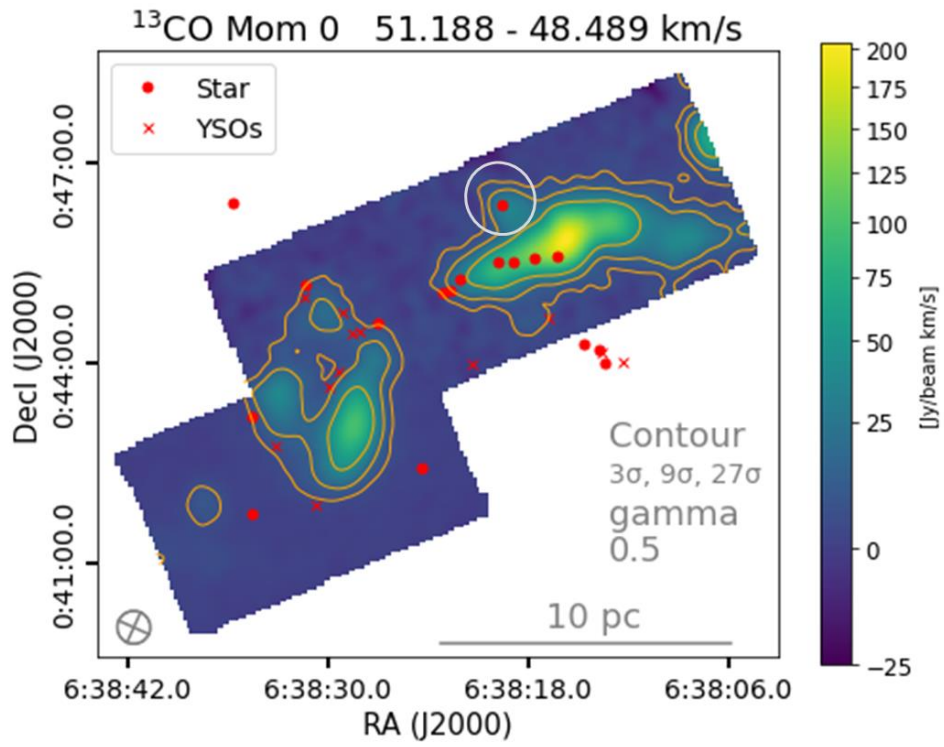
図IV-6 フィラメント1



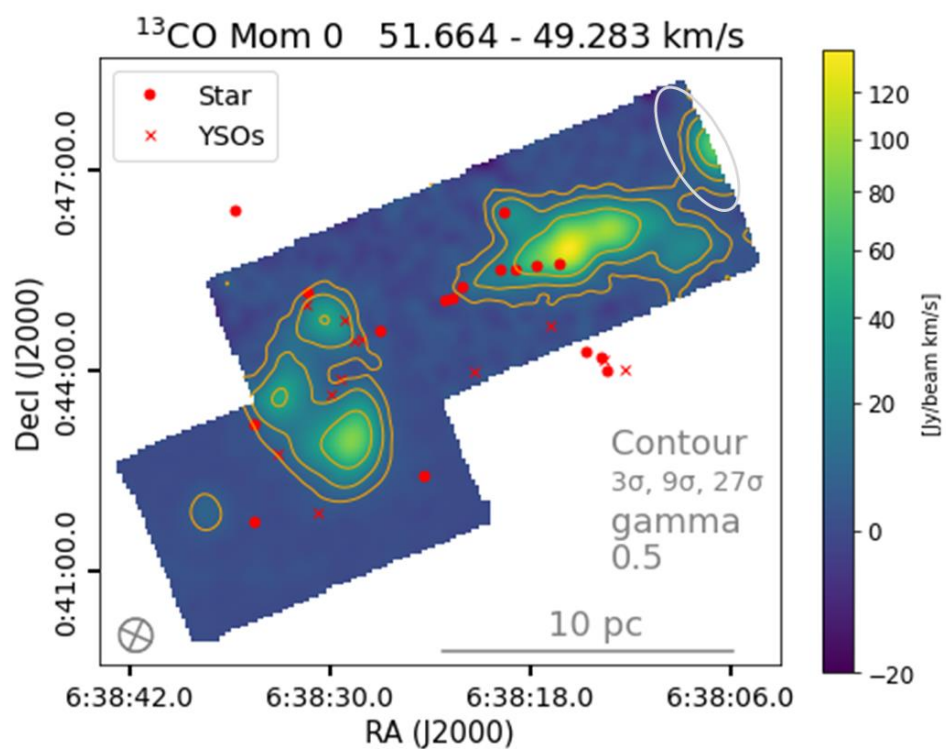
図IV-7 フィラメント2



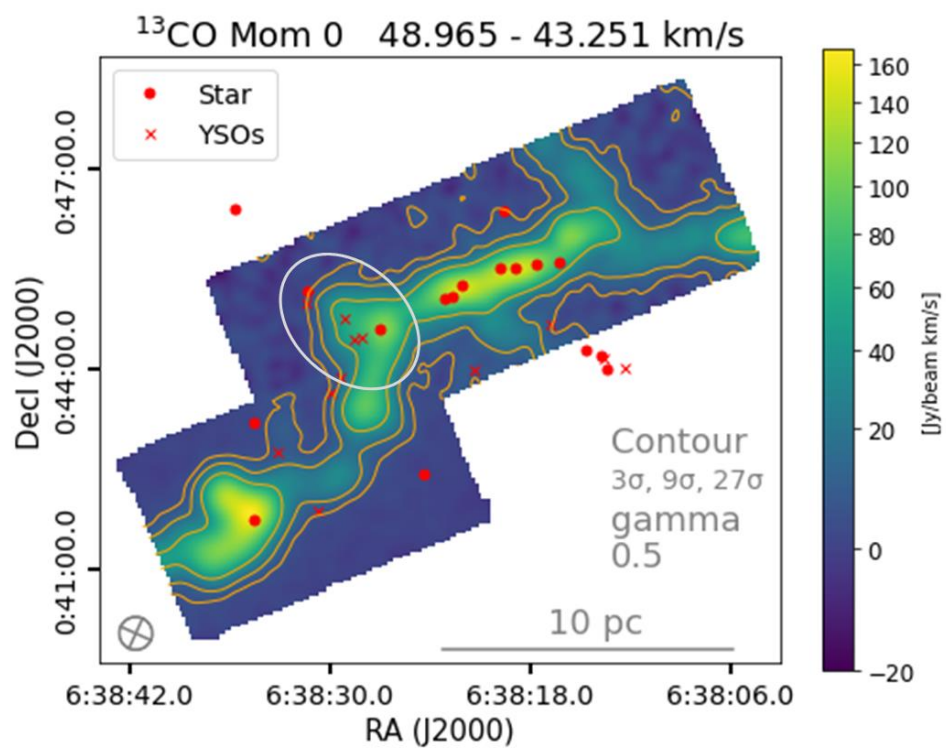
図IV-8 フィラメント 3 (contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)



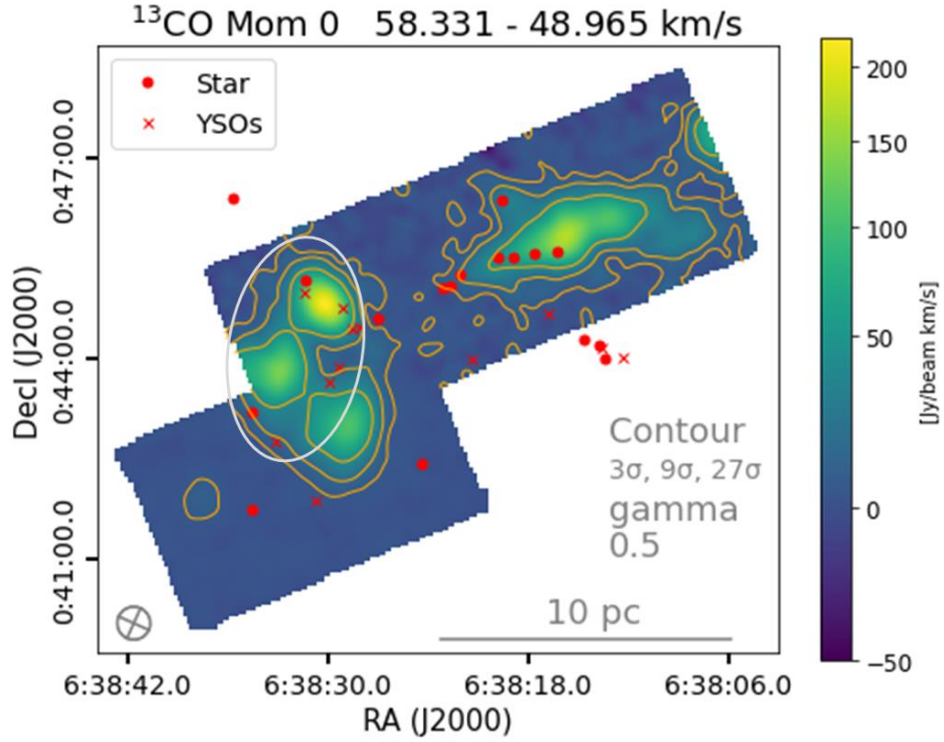
図IV-9 フィラメント 4 (contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)



図IV-10 フィラメント 5 (contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)



図IV-11 フィラメント 6 (contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)



図IV－1 2 フィラメント 7 (contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)

図IV－1 3に $v_{LSR} = 48.013 \text{ km/s}$ のチャンネルマップを示す。このマップでは、フィラメントが長く伸びている様子が確認できる。

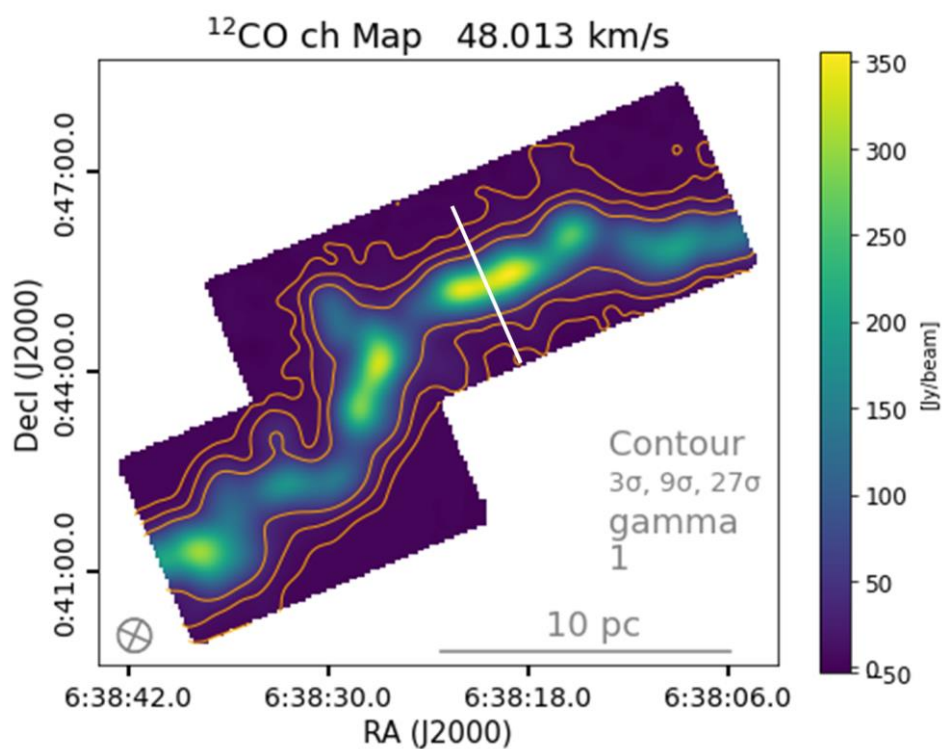
このチャンネルマップから、フィラメントの全長は約 25 pc であることが分かる。観測視野外にも放射が広がっているように見えることから、実際にはこれ以上の長さを持つことが予想される。

更に、フィラメントを横切るように引いた白い直線の部分でスライスを取り、フィラメントの太さを求めた。スライスの様子を図IV－1 4に示す。今回はフィラメントの太さをフィラメントの半値幅として求める。フィラメントは式IV－5のように、ビームサイズ W_{Beam} の影響によりマップ上で真の構造よりも太く見えているため、この式を用いて真の太さ W_{True} を求める。

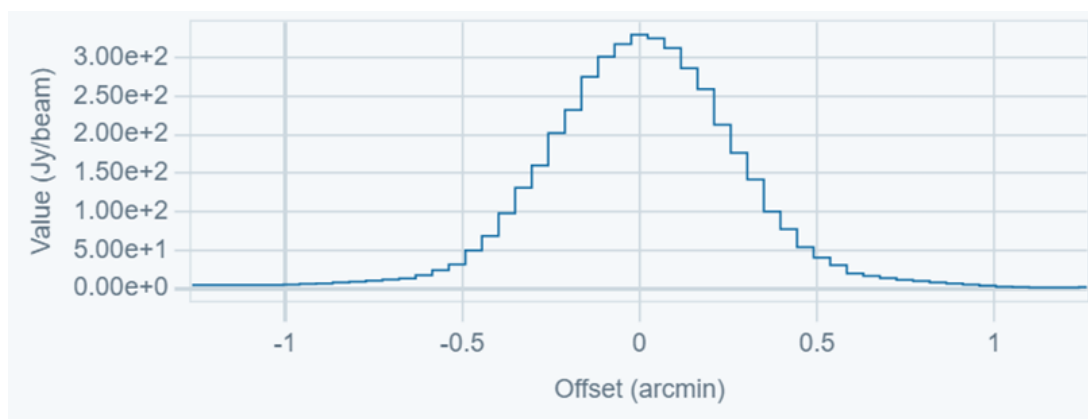
$$W_{\text{True}} = \sqrt{W_{\text{Map}}^2 - W_{\text{Beam}}^2} \quad (\text{IV} - 5)$$

ただし、 W_{Map} はマップ上での太さ、 W_{Beam} はビームの半値幅であり、 W_{Map} はガウシアン半値幅として求める必要がある。

以上より求めたフィラメントの幅は 1.2 pc となった。



図IV－13 $v_{LSR} = 48.013 \text{ km/s}$ のチャンネルマップ (^{12}CO , contour = $3\sigma, 9\sigma, 27\sigma$)



図IV－14 フィラメントの太さを求めるためのスライス

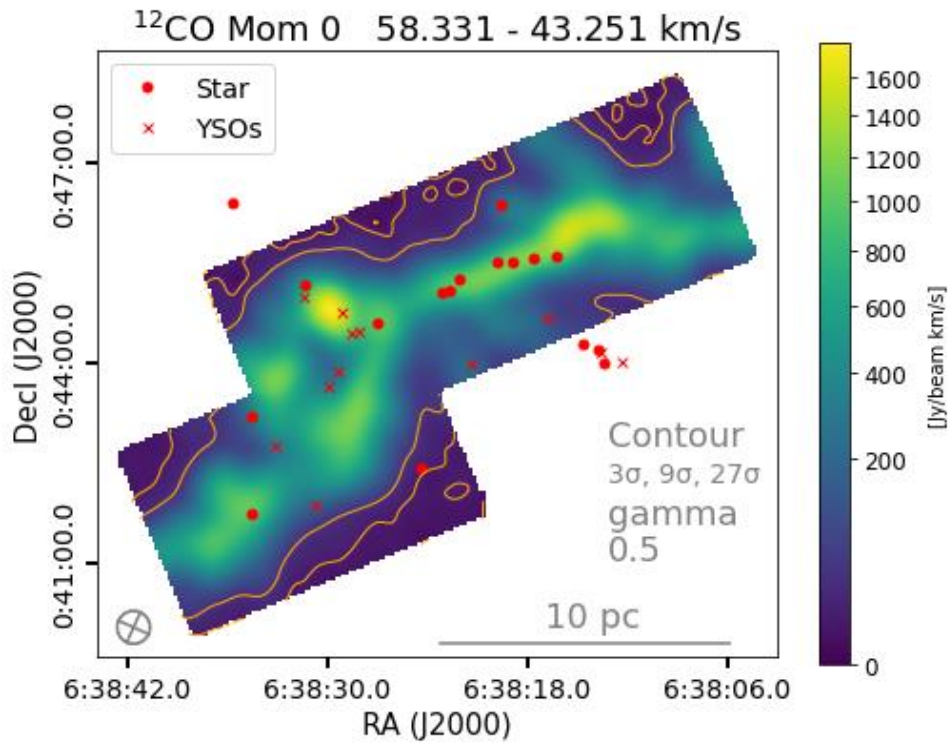
IV－3 Sh2-283 のモーメントマップ

Moment 0 map

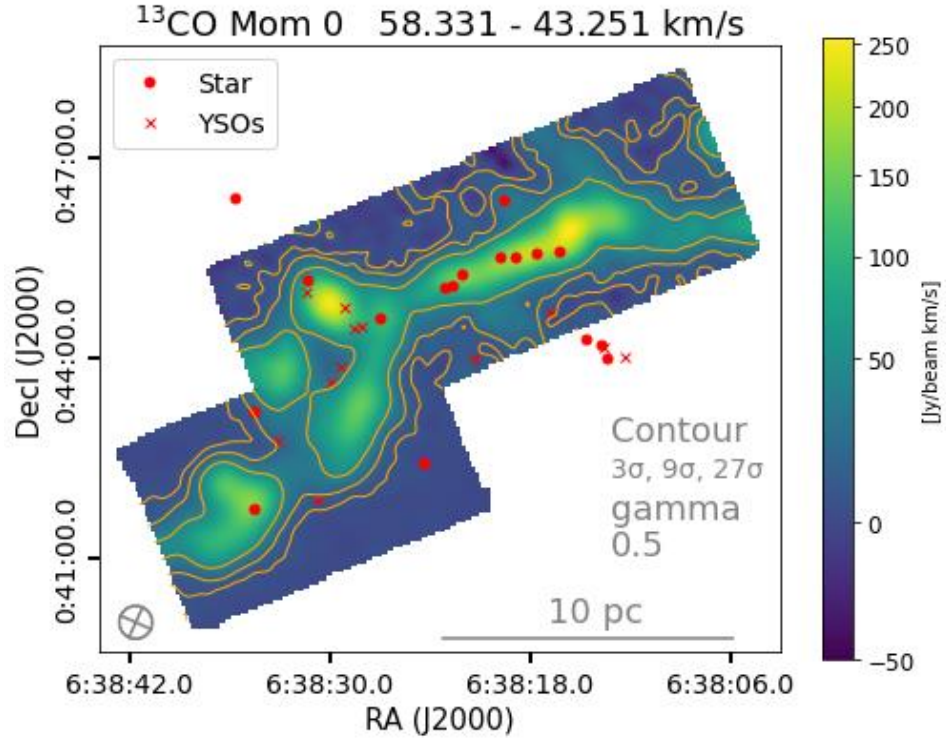
最初に Moment 0 Map を示す。これは放射を視線速度方向に積分した図であり、積分強度図と呼ばれることもある。具体的には式IV－6に従って処理を行ったマップである。

$$\text{Moment } 0 = \int I_\nu d\nu \quad (\text{IV} - 6)$$

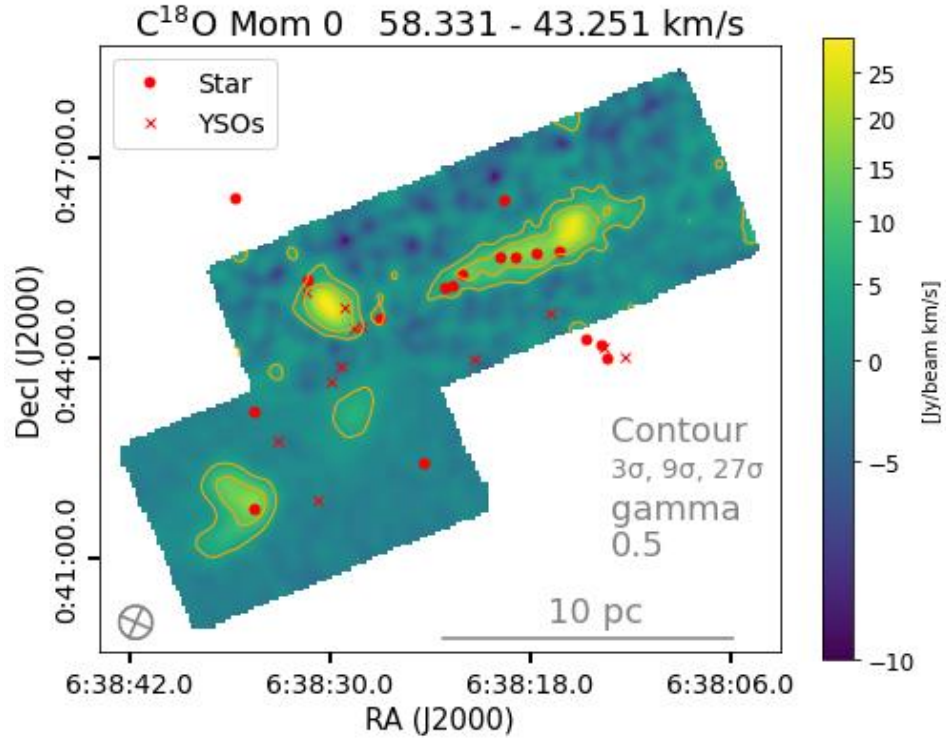
まずは、速度の放射を積分して作成した ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O の Moment 0 Map を図IV－15 から図IV－17 に示す。等高線は、ノイズの RMS を 1σ とし、 3σ 、 9σ 、 27σ のレベルを示している。プロットは先行研究で得られた恒星と YSOs を全てプロットしたものであり、丸形のプロットが恒星を、×型のプロットが YSOs を表している。輝度の低い成分もカラーマップに映るように、カラーバーのスケージング $y = x^\gamma$ において $\gamma = 1/2$ に変更しているので注意が必要である。



図IV－15 Moment 0 Map (^{12}CO , contour = 3σ , 9σ , 27σ , $\gamma = 1/2$)



图IV-16 Moment 0 Map (^{13}CO , contour = $3\sigma, 9\sigma, 27\sigma$, $\gamma = 1/2$)



图IV-17 Moment 0 Map (C^{18}O , contour = $3\sigma, 9\sigma, 27\sigma$, $\gamma = 1/2$)

^{12}CO や ^{13}CO の観測結果から、分子雲は全体的にフィラメント状の構造を持つことが分かる。

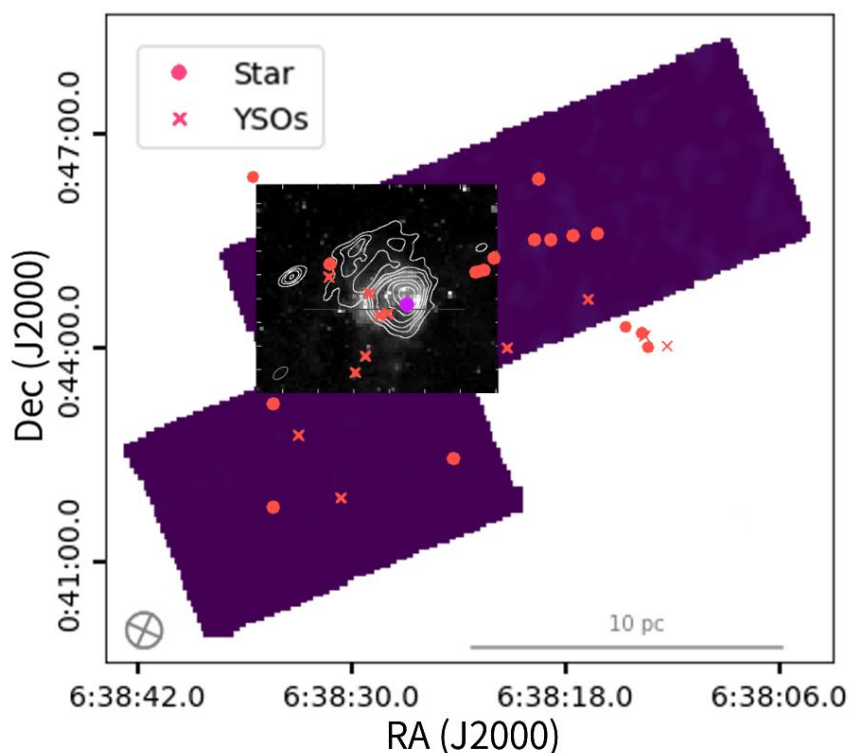
フィラメントは折れ曲がったり枝分かれたりしており、このようなフィラメントの向きが変わるポイントで、輝度が高くなる様子が見える。

C^{18}O は ^{12}CO や ^{13}CO よりも存在量が少ないため光学的に厚くなりにくく、分子雲の密度が特に高い部分をトレースすると考えられている。今回 C^{18}O の放射の強度が高い部分は、 ^{12}CO や ^{13}CO で観測されたフィラメントの向きが変わるポイントに対応する。また、 C^{18}O の放射は見られないものの、SH2-283 の励起星である ALS 18674 の周囲では星形成クラスターが存在する。

フィラメントが 1 点から放射状に伸びてゆく構造をハブフィラメント構造と呼び、このような場所では分子雲の密度が高まり、星形成が起こると考えられている。 C^{18}O の (RA, Dec (J2000)) = (6:38:15.5, 0:45:54) 付近の放射や、ALS 18674 の周囲の星形成クラスターはフィラメントの枝分かれの中心部に位置しており、ハブフィラメント構造に似た構造であると言える。

星の並びはフィラメントの位置をよく追従している。しかし、 C^{18}O でトレースされる高密度の領域の外にも星は存在しており、このような場所では分子雲が星の材料として使われた後の状態を示している可能性がある。先行研究で得られた星のリストは、およそ (RA, Dec (J2000)) = (6:38:14.5–6:38:44.5, 0:41:24:–0:48:48) の範囲に限られているため、現在星のプロットが全くない場所にも、星が存在するかもしれない。

^{13}CO の Moment 0 map と Richards et al. (2012) で得られた赤外線波長 $3.6\ \mu\text{m}$ のダスト放射のマップを重ね合わせた結果を図IV-18に示す。 ^{13}CO の Moment 0 map は緑色の等高線で表しており、それぞれ 3σ 、 9σ 、 27σ のレベルである。星のプロットは色を青に変更したが、プロットの種類は変更していない。図の右下には $10\ \text{pc}$ を示すスケールバーを描画した。



図IV－18 3.6 μ m の赤外線観測結果との比較 (contour = 3σ , 9σ , 27σ (^{13}CO))

赤外線の放射は (RA, Dec (J2000)) = (6:38:28, +0:44:38) を中心に、およそ $60'' \times 50''$ の範囲でシェル状に存在している。ダストの中心付近 (RA, Dec (J2000)) = (06 38 27.0 +00 44 36) にある黄緑色でプロットされている恒星は ALS 18674 であり、ダストの分布の中心と非常に近い場所にあることがわかる。Li et al. (2020) では、 $\text{H}\alpha$ 線の観測結果が図示してあり、これによると Sh2-283 では ALS 18674 を中心に $\text{H}\alpha$ 線の放射が分布している。また、論文として未発表であるが、安井によればすばる望遠鏡による観測の結果、(RA, Dec (J2000)) = (6:38:28, +0:44:37) を中心に、半径約 40 arcsec の範囲で星形成クラスターの存在が確認されている。

以上より、ALS 18674 は Sh2-283 の励起星であると裏付けられた。この星や星形成クラスターの活動の結果シェル状のダスト分布や $\text{H}\alpha$ 線の放射が得られていると考えられる。

C^{18}O の Moment 0 map の結果 (図IV－17) も合わせて確認すると、ALS 18674 の付近は放射が強く得られていないことから、分子雲の密度は高くはないと考えられる。励起星の放つ星風で、分子雲がシェル状に広げられた可能性を疑ったが、ALS 18674 の位置で ^{12}CO や ^{13}CO の PV 図を作成しても、励起星によって分子雲がシェル状に広げられた様子は見られない。分子雲が星の形成に使われて減っているのかもしれない。

Moment 1 map

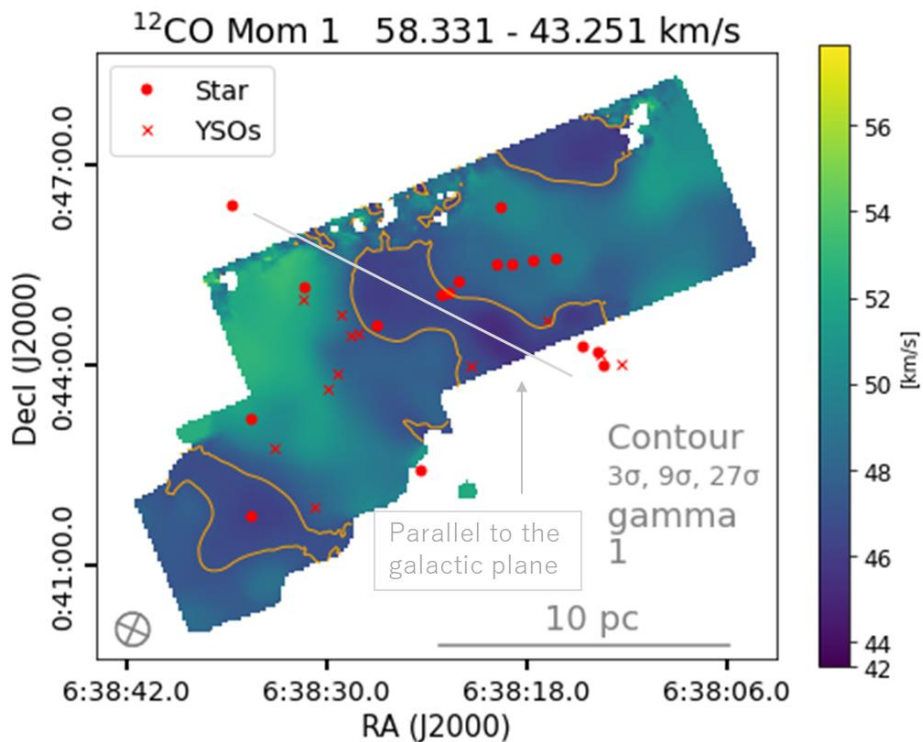
次に、Moment 1 map を示す。これは輝度で重み付けした視線速度図であり、具体的には式IV－7で計算される量を示している。

$$\text{Moment 1} = \langle v \rangle = \frac{\int I_v v dv}{\int I_v dv} \quad (\text{IV} - 7)$$

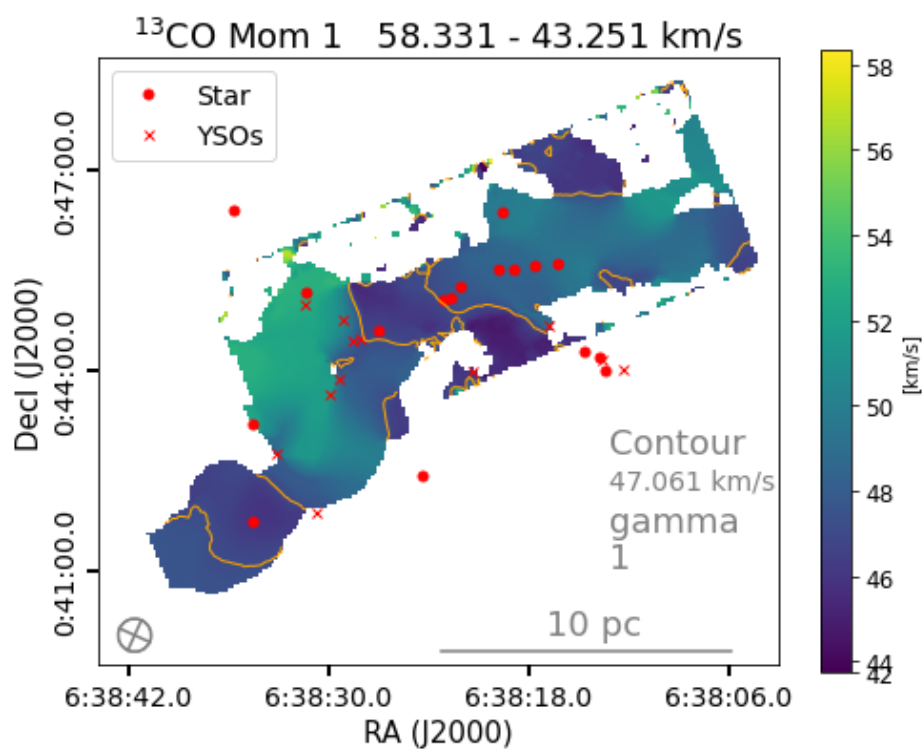
等高線は ^{12}CO のスペクトルのピークの視線速度である $v_{\text{LSR}} = 47.061 \text{ km/s}$ である。これより速度が高い成分は相対的に遠ざかっており、低い成分は相対的に近づいている。

積分の範囲は $v_{\text{LSR}} = 56.419 - 43.224 \text{ km/s}$ である。 3σ 以下の放射は除外してから計算をしている。

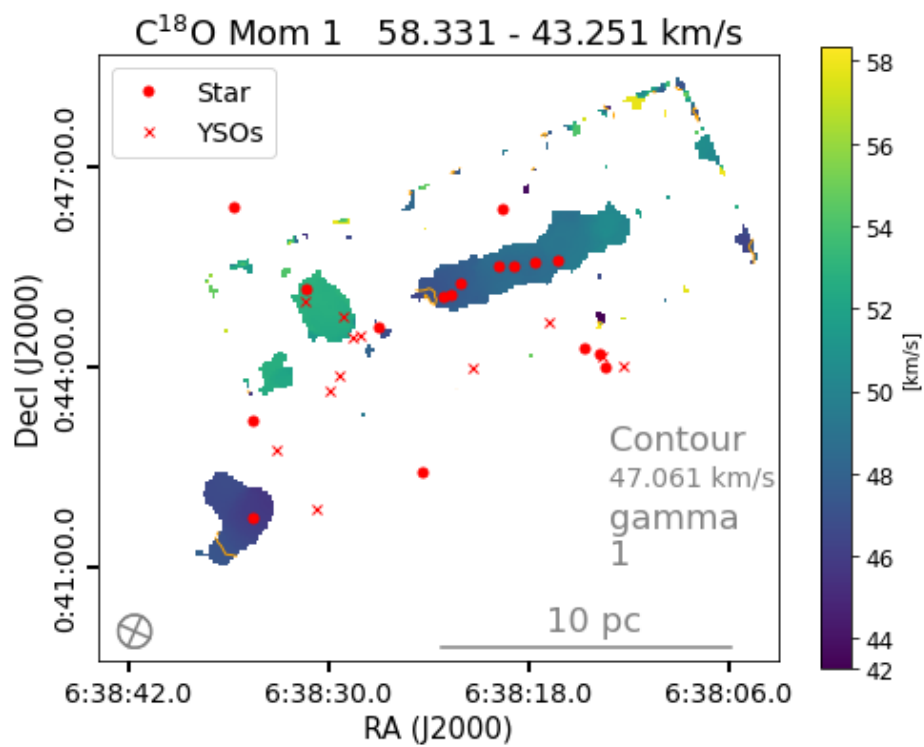
Moment 1 map を確認すると、フィラメントの中にも速度の違いがあることが分かる。図IV－19にはグレーの直線で銀画面と平行な向きを示しており、この図より Moment 1 の値が同じ領域は銀河面と同じ向きに沿って分布する傾向があることが分かる。これは銀河の回転運動による何らかの影響を示している可能性があるが、詳細は判明していない。



図IV－19 ^{12}CO の Moment 1 map (contour = 47.061 km/s, 3σ 以下除外)



図IV-20 ^{13}CO の Moment 1 map (contour = 47.061 km/s, 3σ 以下除外)



図IV-21 C^{18}O の Moment 1 map (contour = 47.061 km/s, 3σ 以下除外)

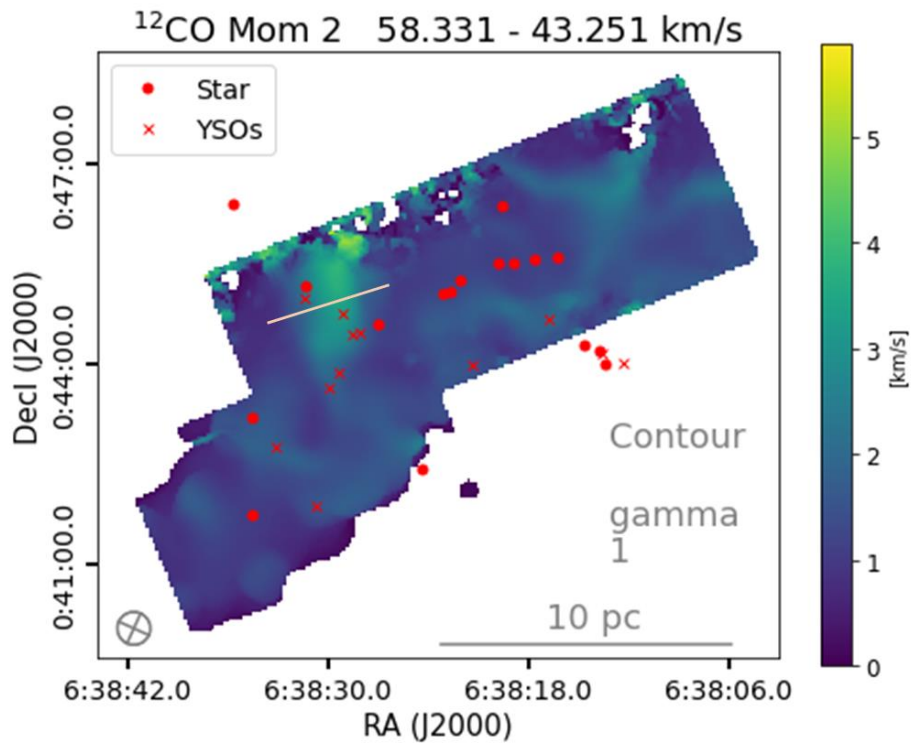
Moment 2 map

次に、Moment 2 map を示す。これは輝度で重み付けした視線速度の分散図であり、具体的には次のような式IV－8で計算される量を示している。

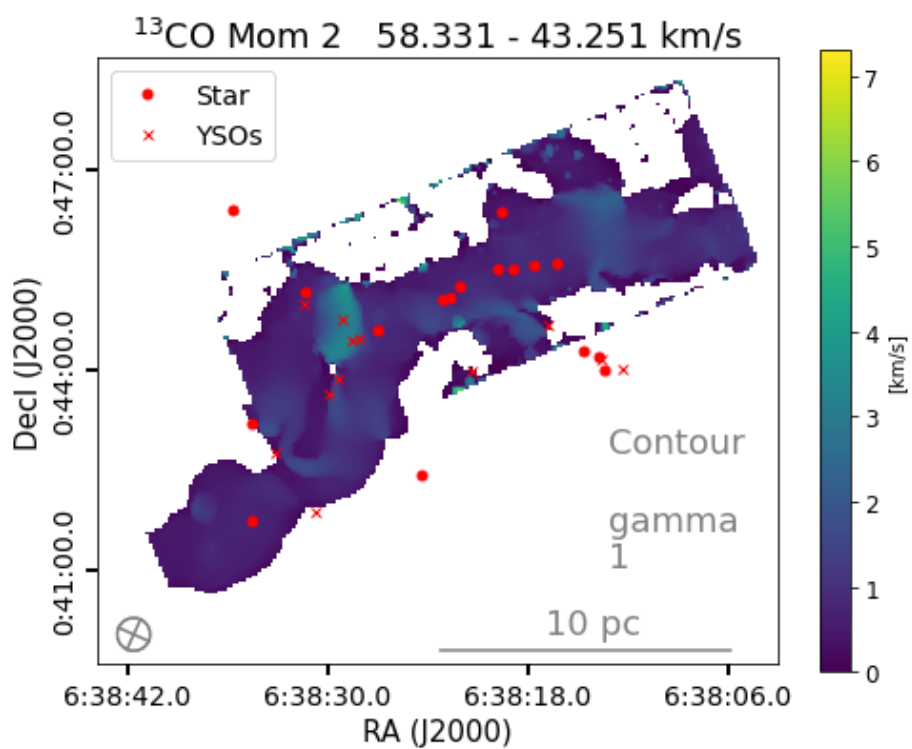
$$\text{Moment 2} = \langle v^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{\frac{\int I_\nu (v_\nu - \langle v \rangle)^2 dv}{\int I_\nu dv}} \quad (\text{IV} - 8)$$

ノイズの成分が速度分散に影響を及ぼすことを考慮し、図の作成の際には 3σ 以下の放射を除外した。作成した Moment 2 map を次の図IV－2 2 から図IV－2 4 に示す。

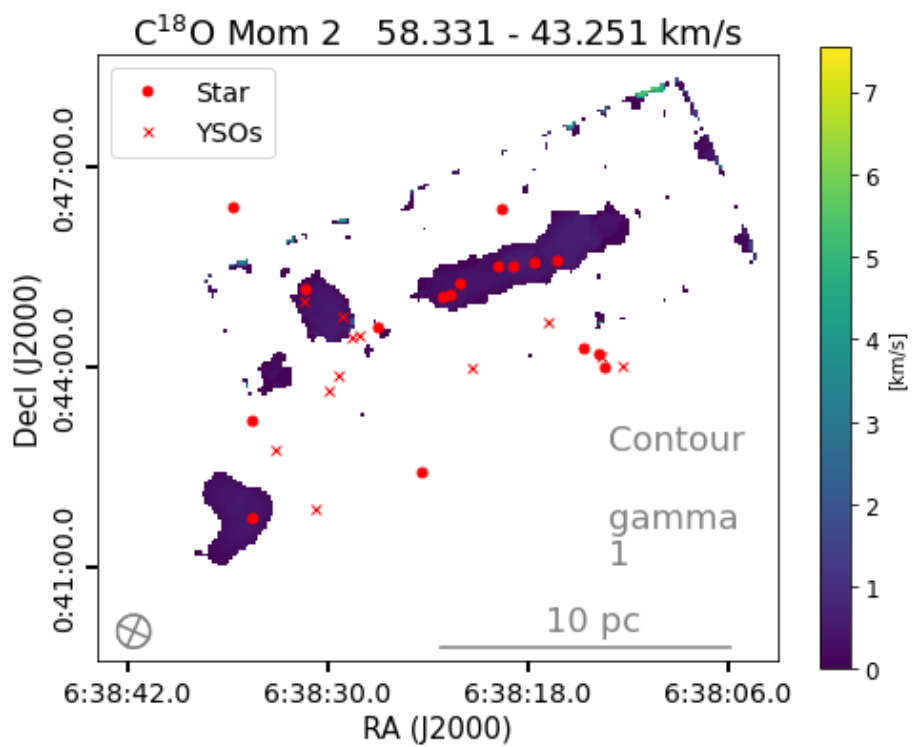
また、Moment 2 map で最も分散が高い結果になった (RA, Dec (J2000)) = (6:38:30, 0:44:55) のあたりを横切る、図IV－2 2 上のオレンジの線に沿って作成した ^{12}CO の PV 図を、以下の図IV－2 5 に示す。



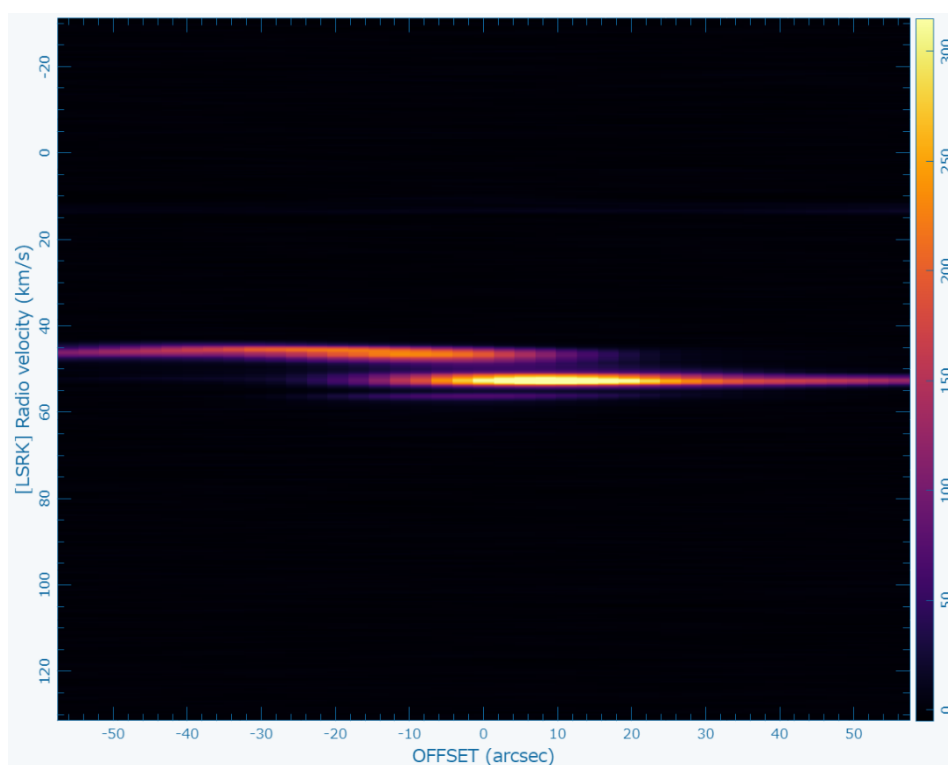
図IV－2 2 ^{12}CO の Moment 2 map (3σ 以下除外)



図IV-23 ^{13}CO の Moment 2 map (3σ 以下除外)



図IV-24 C^{18}O の Moment 2 map (3σ 以下除外)



図IV－25 線の位置の PV 図 (^{12}CO)

PV 図を見ると、2 本の輝度の高い異なる速度成分が重なり合った姿が確認でき、速度分散が高くなった原因になっている。これらの分子雲は $2'$ (距離が 7.9 kpc の場合 4.6 pc, ビームのコンボリューションを加味すると 4.5 pc) 以上の広い範囲に渡って、同一の視線速度で分布している。

異なる視線速度の成分を生み出す原因には星風が挙げられる。しかし、星風によってガスを吹き飛ばし、ガスの存在量が低い領域が形成されたときは、輝度が明るい領域はシェル状に見えるはずである。従って今回の PV 図は星風では説明がつかない。今回の例のように、ラインが PV 図上で平行に長く伸びている場合には、異なる速度を持つ 2 本のフィラメント状の構造が関係していると見るべきである。

図IV－1 1 及び図IV－1 2 に、 $v_{\text{LSR}} = 58.331 - 48.965$ km/s、 $v_{\text{LSR}} = 48.965 - 43.251$ km/s の範囲で作成した Moment 0 map を示した。2 枚の画像にはそれぞれ別の方向から PV 図の中心位置へ向かうフィラメントが写っており、これを白い丸で囲っている。この 2 枚の図から、PV 図の中心点での高い速度分散は 2 本のフィラメントによって生まれたものであることが分かる。PV 図でこれら 2 本のフィラメントの放射の間には繋がった部分がなく、相互作用の兆候は見られないため、この 2 本のフィラメントは同じ方向に重なって見えている別のフィラメントであると考えられる。

以上の考え方によれば星形成クラスターが確認されている (RA, Dec (J2000)) = (6:38:28, +0:44:37) の付近ではシェル状の構造が見られるはずであるが、ここでもシェル状の構造は

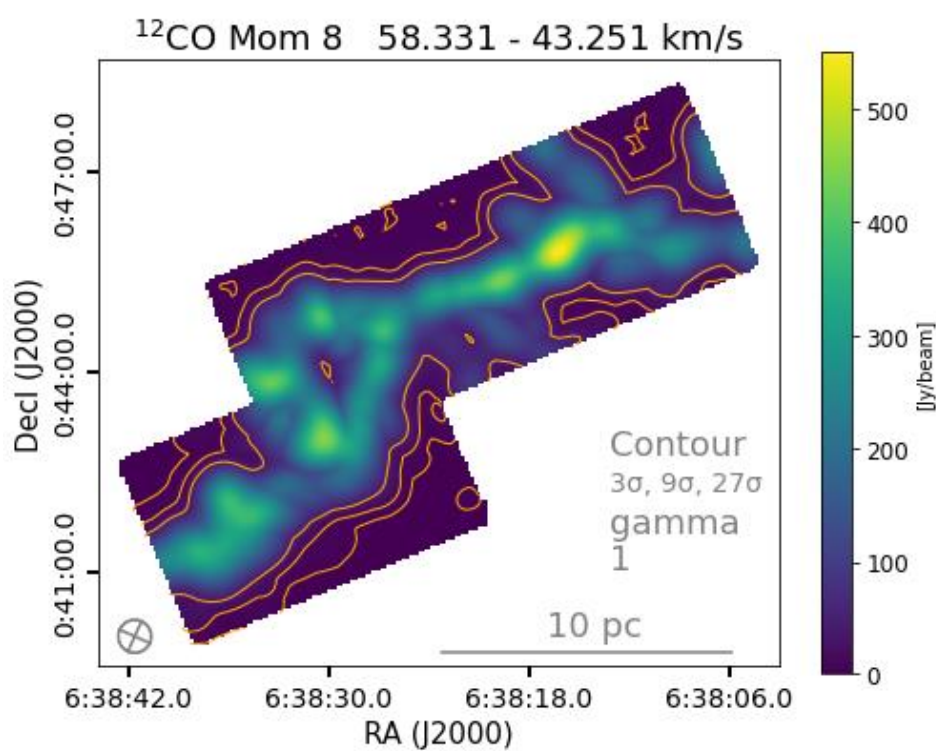
確認されなかった。

Moment 8 map

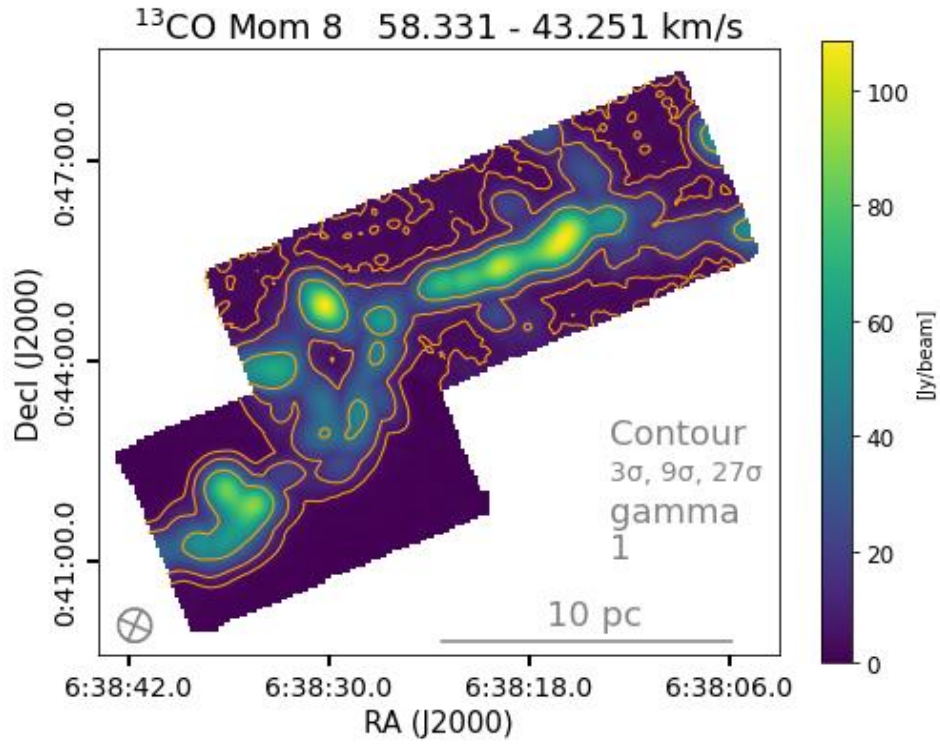
最後に、Moment 8 map を作成する。これはマップのある地点において、全ての周波数の中で最大の輝度となる値を表したものである。数式の上では **Moment** とは関係ないが、慣習的にこの様に呼ばれている。

$$\text{Moment 8} = I_{\max} \quad (\text{IV} - 9)$$

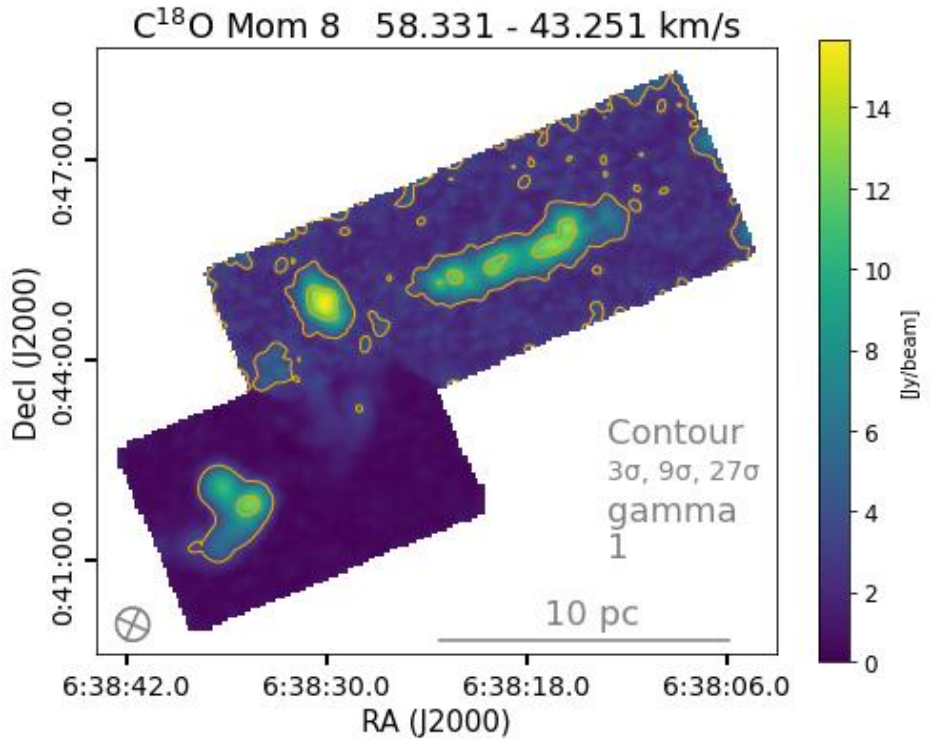
Moment 8 map を図IV－2 6 から図IV－2 8 に示す。



図IV－2 6 Moment 8 map (^{12}CO)



图IV-27 Moment 8 map (^{13}CO)



图IV-28 Moment 8 map (C^{18}O)

IV－4 分子雲の総質量と温度

今回は局所熱力学平衡を仮定した方法（以下 LTE 法とする）を用いて、分子雲の総質量を求めた。ある分子の光学的厚み τ_ν と、ある準位 u の分子の数 N_u との関係は、以下のよう表せる^[5]。

$$\int \tau_\nu d\nu = \frac{8\pi^3 \nu |\mu_{lu}|^2}{3hc} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right] N_u \quad (\text{IV－1 0})$$

ここで、 $|\mu_{lu}|^2$ は、以下のように計算される。

$$|\mu_{lu}|^2 = \mu^2 \frac{J_u^2}{J_u(2J_u+1)} \quad (\text{IV－1 1})$$

μ は当該分子の永久電気双極子モーメント、 J_u は遷移前の回転量子数である。

局所熱力学平衡状態 (LTE) を仮定すれば、ある準位 u の分子数 N_u と全ての準位の分子の数 N_{tot} は次の式 IV－1 2 のように結びついているため、IV－1 0 式から N_u を求めることにより N_{tot} を求めることができる。

$$\frac{N_{\text{tot}}}{N_u} = \frac{Q_{\text{rot}}}{g_u} \exp\left(\frac{E_u}{kT_{\text{ex}}}\right) \quad (\text{IV－1 2})$$

ここで、 Q_{rot} は分子内の回転エネルギー準位の総和を表す量（回転分配関数）で、CO のような 2 原子分子では $Q_{\text{rot}} \approx kT_{\text{ex}}/(hB_0) + 1/3$ と近似できる^[5]。 g_u はエネルギー準位 u の縮退度であり、直線分子の場合は $g_u = g_J g_K g_I = (2J+1) \times 1 \times 1 = 2J+1$ と表せる。 E_u は 2 つの準位、 u ， l の間のエネルギーの差であり、回転定数 $B = h/(8\pi^2 I)$ を用いて $E_u = hBJ(J+1)$ と表せる。回転定数を求める際に使う I は分子の慣性モーメントである。 T_{ex} は励起温度であり、その決め方は後述する。

以上をまとめると、光学的厚み τ_ν と全ての準位の分子数 N_{tot} の間には以下の関係が成り立つ。

$$N_{\text{tot}} = \frac{3h}{8\pi^3 |\mu_{lu}|^2} \frac{Q_{\text{rot}}}{g_u} \exp\left(\frac{E_u}{kT_{\text{ex}}}\right) \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) - 1 \right]^{-1} \int \tau_\nu d\nu \quad (\text{IV－1 3})$$

光学的厚み τ_ν は放射の輝度との以下のような関係から求める。

$$\tau_\nu = -\ln \left[1 - \frac{\Delta I_\nu}{B_\nu(T_{\text{ex}}) - B_\nu(T_{\text{bg}})} \right] \quad (\text{IV} - 14)$$

ここで、 T_{bg} は背景放射の温度である。観測した輝度は、背景放射の影響を差し引いた輝度なので、 $\Delta I_\nu = I_\nu - I_\nu(0)$ の形で与えられる。以上の τ_ν の式は式IV-15 から導出した。

$$\begin{aligned} \Delta I_\nu &\equiv I_\nu - I_\nu(0) \\ &= I_\nu(0) \exp(-\tau_\nu) + B_\nu(T_{\text{ex}})[1 - \exp(-\tau_\nu)] - I_\nu(0) \\ &= [B_\nu(T_{\text{ex}}) - B_\nu(T_{\text{bg}})][1 - \exp(-\tau_\nu)] \end{aligned} \quad (\text{IV} - 15)$$

励起温度 T_{ex} は、プランクの式を逆に解いて求めた輝度温度を採用する。今回観測した輝線は CO の $J = 2 - 1$ の輝線であり、レイリージーンズの近似が精度良く成り立つ波長の範囲から外れているためである。

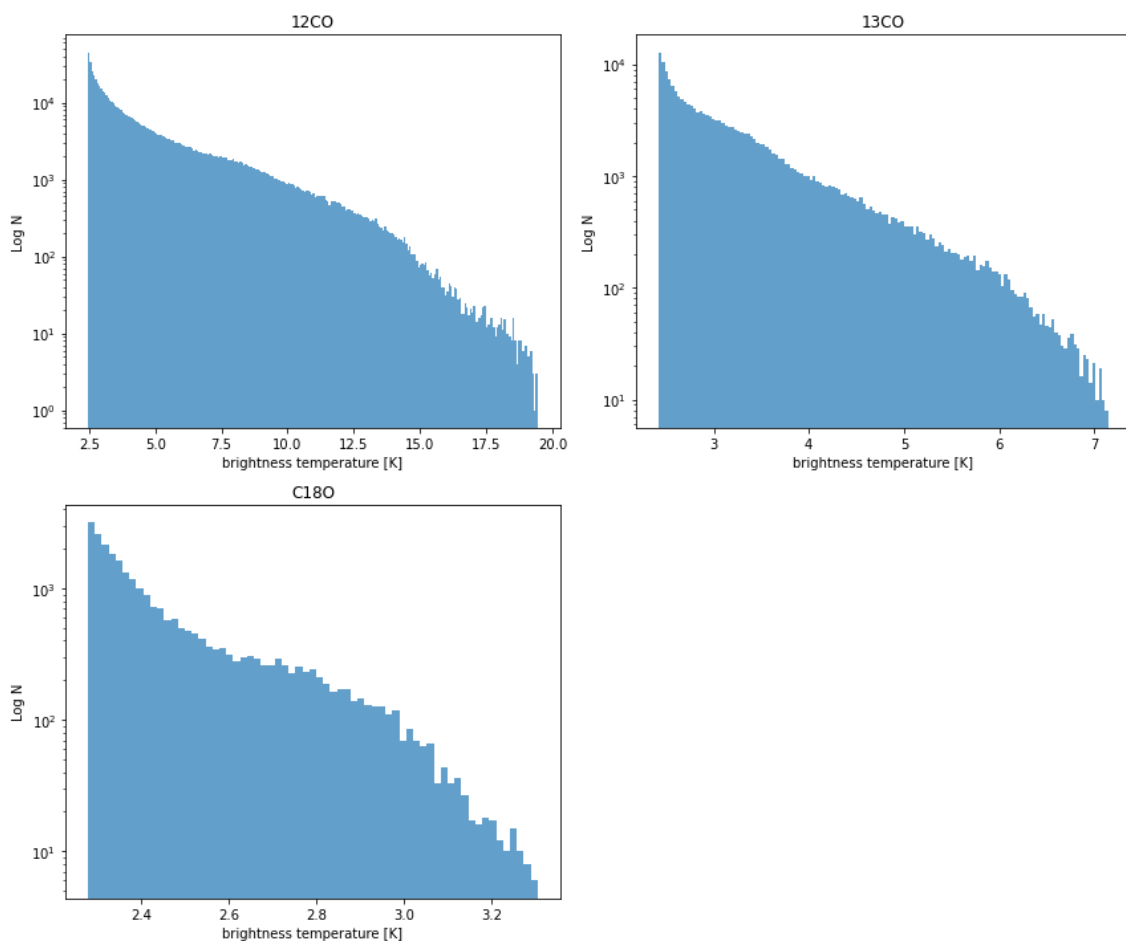
$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{IV} - 16)$$

より

$$T_{\text{ex}} = \frac{h\nu}{k} \left[\ln\left(\frac{2h\nu^3}{c^2 B_\nu} + 1\right) \right]^{-1} \quad (\text{IV} - 17)$$

以上の関係を用いて式IV-13 から全ての準位の分子数 N_{tot} を求めた。

ここから分かるように、励起温度 T_{ex} と光学的厚み τ_ν の両方を 1 つの輝線から解くことはできない。従って、今回観測した 3 つの輝線を連立して、温度と光学的厚みを求める必要がある。しかし、今回は図IV-29 に示すように ^{13}CO と C^{18}O の輝線で求めた温度は ^{12}CO で求めた温度よりも大幅に低くなってしまい、励起温度を反映しているとは考えにくい。また C^{18}O は Sh2-283 の一部でしか放射が確認できていない。そのため、今回は ^{12}CO で求めた輝度温度を使い、 ^{13}CO の放射から柱密度を求める。温度も柱密度も、ピクセルごとに上記の式を用いて計算した。



図IV－2 9 輝度温度のヒストグラム

以上のようにして求めた CO の柱密度から、分子雲の総質量を求める。地球近傍では、分子雲中の主成分である水素分子とヘリウムに対する ^{12}CO の存在比は、 $^{12}\text{CO} : \text{He} : \text{H}_2 = 1 : 10^3 : 10^4$ だと言われている^[11]。また、 ^{12}CO と ^{13}CO の存在比は、 $^{12}\text{CO} : ^{13}\text{CO} = 70 : 1$ と言われている。そのため、今回はこれらの比率を用いて水素分子とヘリウムの柱密度を推定し、質量を求める。

一方で、上記の考え方では、Sh2-283 の金属量の影響を無視してしまっている。先に触れたように、Sh2-283 の金属量は地球近傍の約 $1/3$ の値である。従って、 ^{12}CO と水素分子・ヘリウムの存在量は $^{12}\text{CO} : \text{He} : \text{H}_2 = 1 : 3 \times 10^3 : 3 \times 10^4$ となるべきであるから、この比率を用いて水素分子とヘリウムの柱密度を推定した。

今回求めた分子雲の質量と、Li et al (2020) で $^{12}\text{CO} (J = 1 - 0)$ の輝線から X-factor 法 (Conversion factor 法) で求められた分子雲の質量を表IV－2 で比較する。前述の通り、Li et al. (2020) では Sh2-283 の距離を小さく見積もっているため、この部分を較正した。また、金属量の影響を加味した推定を行っていないため、上記に倣い求められた質量を 3 倍した

値を表に載せている。

表IV－2 Sh2-283 の総質量

研究	方法	$M_{\text{total}} [\text{M}_{\odot}]$
本研究	LTE 法	5.5×10^3
Li et al. (2020)	X-factor 法	1.1×10^4

求めた値には2倍程度の違いが出た。Li et al. (2020) の研究より、今回の研究のほうが感度や分解能の高い観測を行っており、より広い範囲で CO 同位体の放射が捉えられたため、今回の研究で求めた質量が先行研究の結果を上回ると考えられたが、そのような結果にはなかった。LTE 法では、 ^{12}CO と水素分子・ヘリウム の存在量を、X-factor 法では X-factor を仮定しており、これらの値に不定性があることから、予想に反した結果が得られたのではないかと考えている。

地球近傍 1 kpc 以内 の分子雲は $10^4 - 10^6 \text{ M}_{\odot}$ 程度であり、多くが $\sim 10^4 \text{ M}_{\odot}$ である。Sh2-283 の分子雲は、これに比べるとやや小さい値になった。

IV－5 クランプ候補の同定及びそれらの質量

クランプの探索にはデンドログラム法を用いた^[14]。分子雲の中には密度の違いが存在し、クランプやコアなどの密にまとまった領域が広がった希薄な構造の中に存在する。この構造を樹形図としてまとめる方法がデンドログラム法である。デンドログラム解析は、通常輝度のデータキューブに対して行われる。密度の高い場所は、輝度も高いと期待される。

デンドログラム法ではクランプを探索する際に、以下のようなパラメータを設定する。これらのパラメータは、クランプの探索をより効果的に行うためのものである。今回実際に設定したパラメータの値や設定の意図ともに、それぞれ簡単に説明する。

1. min_value

輝度の高い場所をクランプとして見つける際に使う、輝度のしきい値である。輝度の高い領域の中に輝度がしきい値を超える部分が存在する場合のみ、その領域をクランプとして認める。

今回は min_value を、 9σ とした。クランプとして認められる部分が低い輝度であることは考えにくいからである。より高い輝度を閾値に設定することも考えたが、今回はなるべく多くのクランプの候補を得たかったため、この値とした。

2. min_delta

高密度な領域が接していた場合、それらを1つのクランプとみなすか、別個のク

ランプとみなすかを決めるために使うしきい値である。例えば2つのランプが接していた場合、それぞれの輝度のピークの値の差がしきい値より大きければ2つのランプは別個のものとしてカウントされる。

今回は min_delta を 3σ とした。データの輝度の差が誤差やゆらぎ由来のものではない有意な差である必要があるからである。

3. min_npix

ランプとみなされるために必要な最小のピクセル数を設定する。 min_npix で設定したピクセル数よりも少ないピクセル数で構成されるランプ候補は、ランプとしてカウントされない。

本来であれば min_npix にビームの面積（単位は pixcl ）の値を設定すべきだと考える。ビームサイズより小さい構造は有意に検出されたと言い難いからである。

しかし、実際には min_npix はランプの速度方向の広がりも考慮してカウントする。そのため、ランプが複数の速度成分にまたがる場合は、天球面上の半径がビームサイズより小さい場合でも、 min_npix で指定したしきい値を超えることができ、ランプとして認められる場合がある。

従って min_npix をビームサイズとする設定は、あまり意味がないため、今回は min_npix を設定せずに解析をすることにした。一方で、ビームサイズと同定された構造の大きさの関係には注意する必要がある。

ランプの探索には ^{13}CO の放射を用いて行った。 ^{12}CO での探索では、密度の高い領域をトレースするには不向きであるからである。以上のようにして検出したランプの位置を、表IV-3及び図IV-30からIV-50に示す。

図IV-30からIV-50では、それぞれのランプの輝度のピークの位置が含まれるチャンネルマップを載せている。図中にはランプの番号とランプのピークの輝度が示してある。輝度のピークの位置は、そのスライスにピークが含まれる場合のみ点で示している（点がプロットされていないということは、別のスライスにそのランプのピークが存在するということである）。ランプの範囲は線で囲っている。

今回は合計 26 個のランプ候補を同定することができた。ランプ候補の半径は中心点から外周までの距離を平均して求めた。ただし、今回のビームサイズは $29.6''$ であり、 7.9 kpc 先では 1.13 pc に相当するため、半径 0.567 pc より小さい構造は大きさが正確に求まったとは言えない。ビームサイズ以上の大きさを持つランプに対しては、ビームの影響をデコンボリューションすることが望ましいが、今回はビームサイズより小さい候補と合わせて解析をしているため行っていない。

大半の結果は、ランプ候補のサイズがビームサイズより小さく見積もられていたり、観測領域の外に見切れていたりしているが、今回は求められた範囲内でランプ候補の特性を調べる。

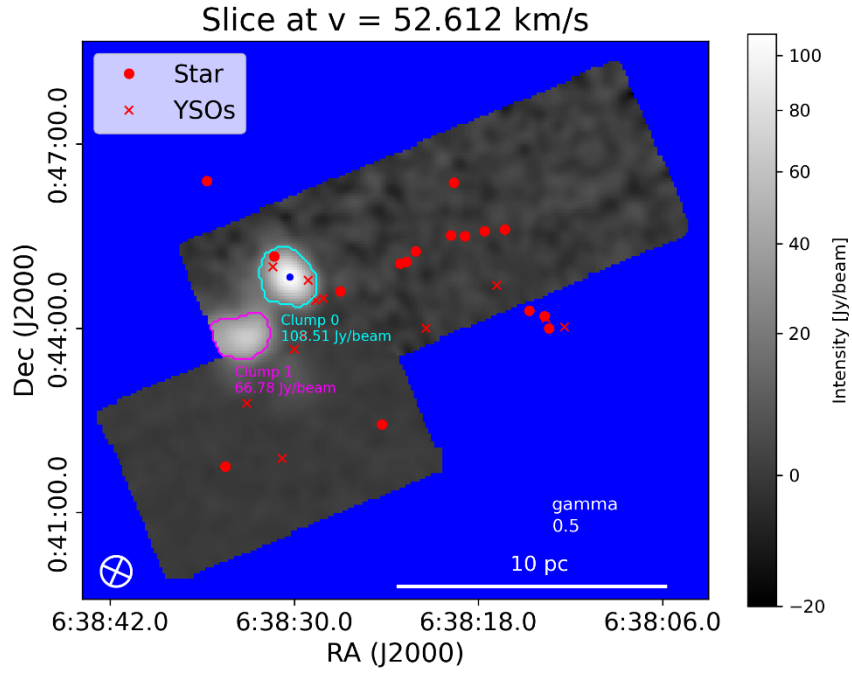
表IV－3 同定されたクランプ候補の一覧

No.	Peak			Range			Radius (pc)
	RA (J2000)	Dec (J2000)	v_{LSR} (km/s)	RA (J2000)	Dec (J2000)	v_{LSR} (km/s)	
0	38:30.3	44:50.0	52.6163	6:38:32.2 – 6:38:28.5	0:44:21.9 – 0:45:18.0	53.7274 – 51.0289	1.04
1 ^{※2}	38:33.3	43:51.0	52.7750	6:38:35.4 – 6:38:31.5	0:43:31.4 – 0:44:16.3	53.4100 – 51.5052	0.921
2 ^{※1}	38:30.1	42:54.9	51.5052	6:38:30.9 – 6:38:29.4	0:42:46.5 – 0:43:28.6	52.1401 – 51.1877	0.442
3 ^{※2}	38:06.9	47:18.7	50.5527	6:38:08.4 – 6:38:06.4	0:46:56.3 – 0:47:44.0	51.3464 – 49.6003	0.652
4 ^{※1}	38:28.3	43:11.7	49.2829	6:38:29.4 – 6:38:27.5	0:42:46.5 – 0:43:28.6	51.0289 – 48.8067	0.500
5 ^{※1}	38:13.3	46:05.8	50.2353	6:38:14.1 – 6:38:12.7	0:46:00.1 – 0:46:14.2	50.5527 – 49.9178	0.324
6 ^{※1}	38:19.3	46:17.0	49.7591	6:38:20.0 – 6:38:18.2	0:46:05.8 – 0:46:28.2	50.3940 – 49.4416	0.473
7	38:16.1	45:46.1	49.2829	6:38:18.0 – 6:38:14.8	0:45:32.1 – 0:46:05.8	50.0765 – 48.6479	0.662
8 ^{※1}	38:09.6	45:51.7	49.1241	6:38:10.3 – 6:38:07.7	0:45:37.7 – 0:46:02.9	49.7591 – 48.4892	0.474
9 ^{※1※2}	38:29.2	42:26.8	48.8067	6:38:30.0 – 6:38:28.7	0:42:18.4 – 0:42:35.3	49.2829 – 48.3304	0.321
10 ^{※1}	38:19.9	45:23.7	48.6479	6:38:22.3 – 6:38:18.4	0:45:09.6 – 0:45:34.9	48.9654 – 47.8542	0.463
11 ^{※1}	38:27.2	44:05.1	48.1717	6:38:27.9 – 6:38:26.4	0:43:42.6 – 0:44:24.7	48.6479 – 47.6955	0.483
12 ^{※1}	38:06.2	46:00.1	48.1717	6:38:07.3 – 6:38:05.1	0:45:48.9 – 0:46:08.6	48.6479 – 47.6955	0.446
13 ^{※1}	38:28.3	43:23.0	47.6955	6:38:28.7 – 6:38:27.7	0:43:17.4 – 0:43:31.4	48.3304 – 47.5368	0.269
14 ^{※1}	38:32.8	42:15.6	47.6955	6:38:33.7 – 6:38:31.5	0:42:04.4 – 0:42:26.8	48.0130 – 47.3780	0.526
15	38:27.0	44:35.9	46.9018	6:38:28.1 – 6:38:25.8	0:44:19.1 – 0:44:52.8	47.5368 – 46.1081	0.622
16 ^{※2}	38:04.9	45:57.3	46.4256	6:38:06.8 – 6:38:04.3	0:45:29.3 – 0:46:19.8	47.5368 – 45.9494	0.739
17 ^{※1}	38:23.2	45:09.6	47.0606	6:38:23.6 – 6:38:22.5	0:45:04.0 – 0:45:12.4	47.3780 – 46.9018	0.200
18	38:14.6	46:47.9	46.1081	6:38:15.7 – 6:38:12.0	0:45:37.7 – 0:47:10.3	47.2193 – 45.6319	0.873
19 ^{※1}	38:17.2	47:27.1	46.5844	6:38:18.4 – 6:38:16.1	0:47:07.5 – 0:47:35.6	47.0606 – 46.1081	0.528
20 ^{※1}	38:36.1	42:01.6	46.7431	6:38:36.5 – 6:38:35.6	0:41:53.2 – 0:42:07.2	46.9018 – 46.4256	0.237
21 ^{※1}	38:27.2	43:25.8	46.4256	6:38:27.7 – 6:38:26.6	0:43:17.4 – 0:43:39.8	46.9018 – 46.1081	0.372
22 ^{※1}	38:34.6	41:50.4	45.9494	6:38:35.6 – 6:38:34.1	0:41:39.1 – 0:41:56.0	46.4256 – 45.6319	0.296
23 ^{※1}	38:21.0	45:06.8	45.9494	6:38:21.9 – 6:38:20.4	0:44:55.6 – 0:45:18.0	46.1081 – 45.6319	0.436
24	38:28.8	44:24.7	45.3145	6:38:29.6 – 6:38:27.5	0:44:13.5 – 0:45:04.0	45.6319 – 44.9970	0.647
25 ^{※1}	38:20.0	44:41.6	44.5208	6:38:21.0 – 6:38:18.9	0:44:27.5 – 0:44:55.6	44.9970 – 44.2033	0.512

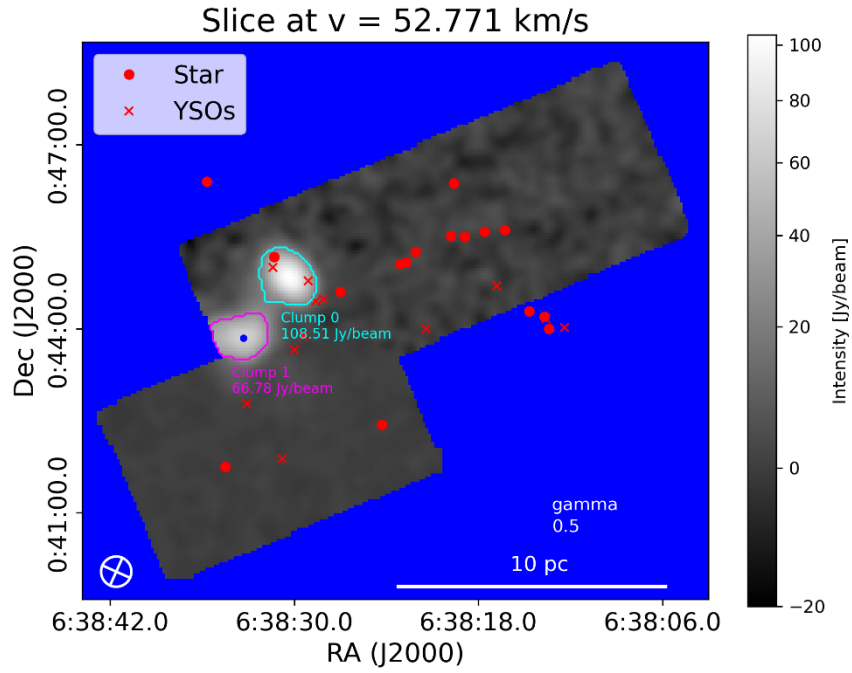
※1 ビームサイズより構造が小さいクランプ候補

※2 クランプが観測領域外に見切れているクランプ候補

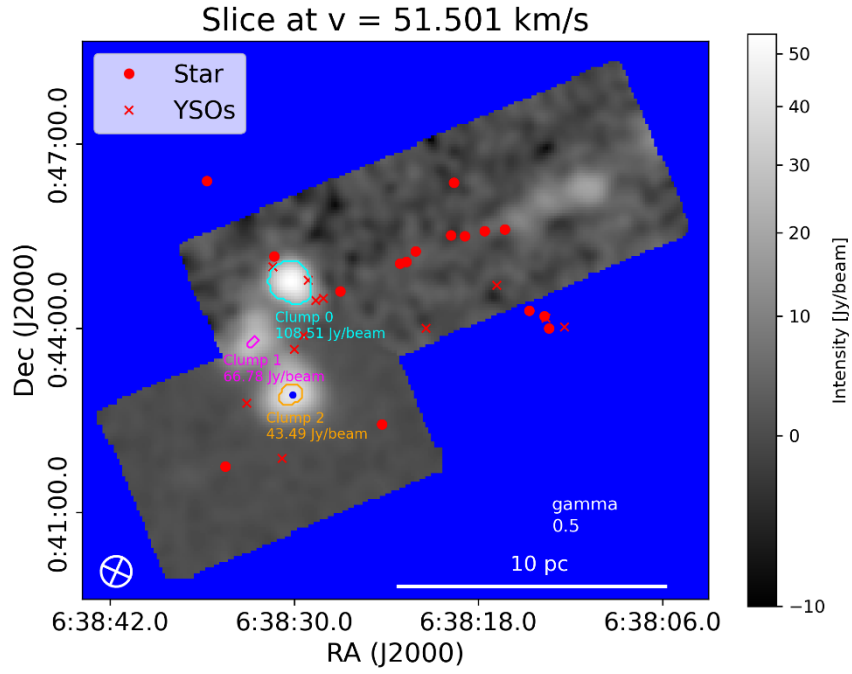
図IV－3 2 Clump 2



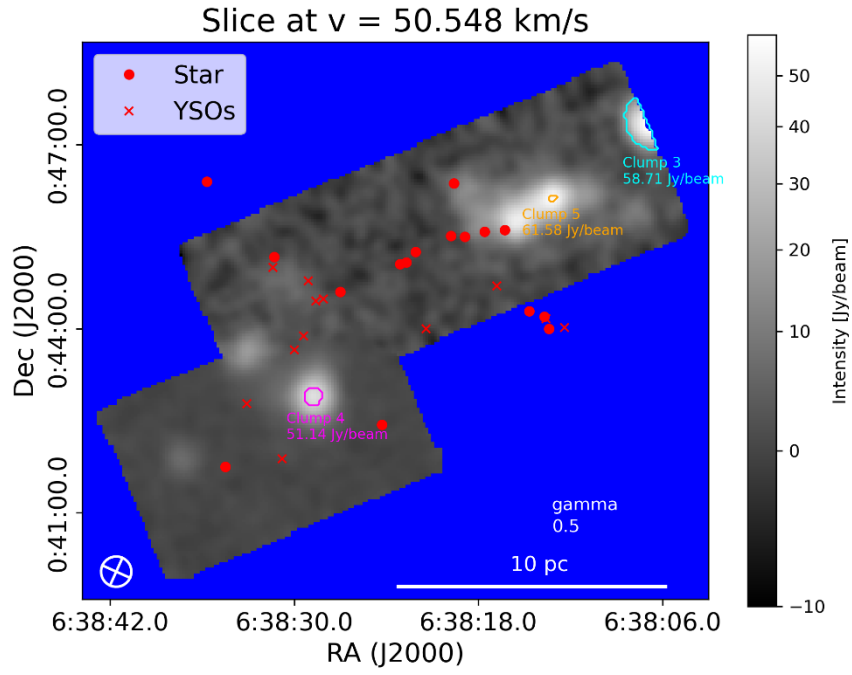
図IV－3 0 クランプ 0 ($\gamma = 1/2$)



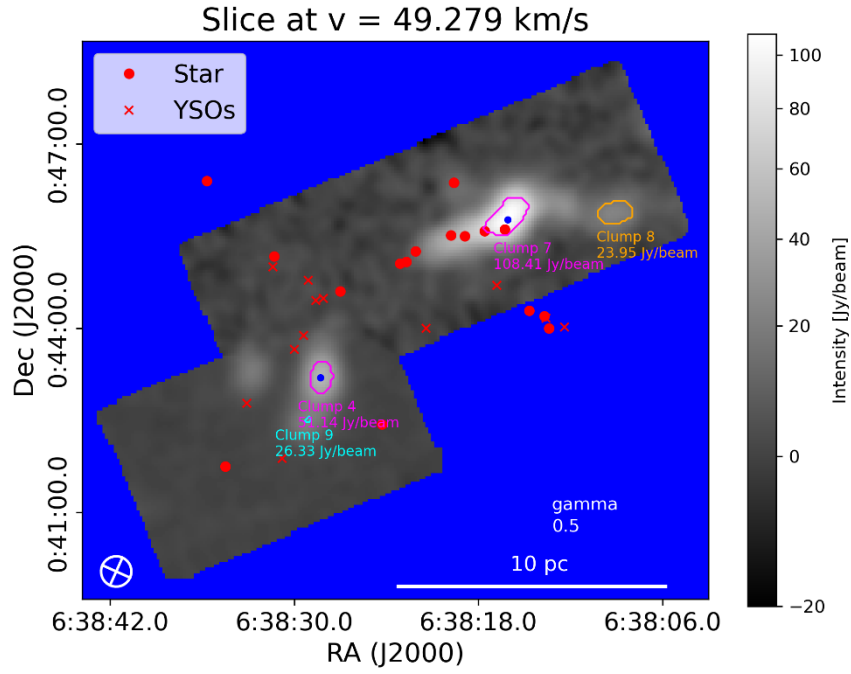
図IV－3 1 クランプ 1 ($\gamma = 1/2$)



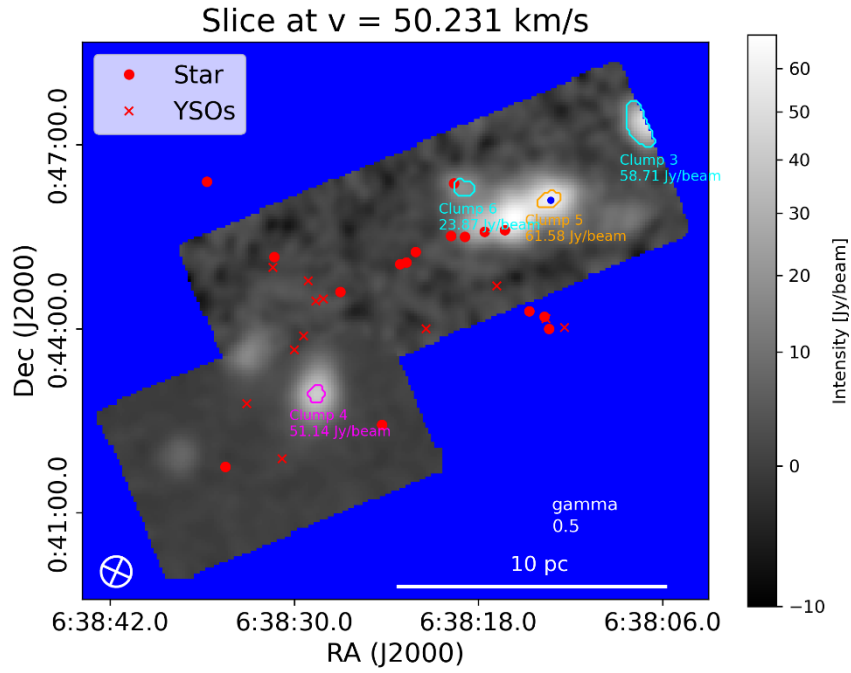
図IV-32 クラump 2 ($\gamma = 1/2$)



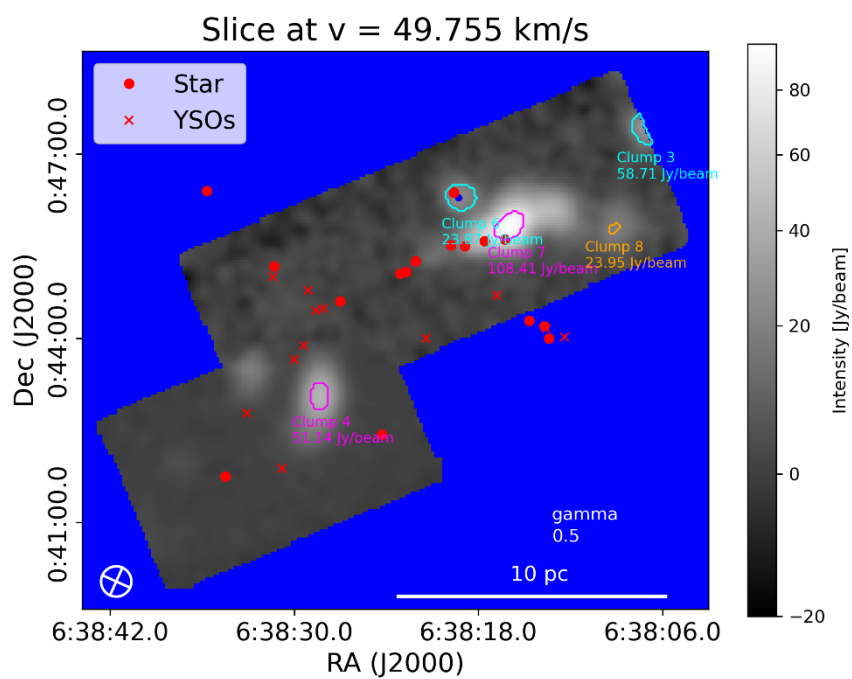
図IV-33 クラump 3 ($\gamma = 1/2$)



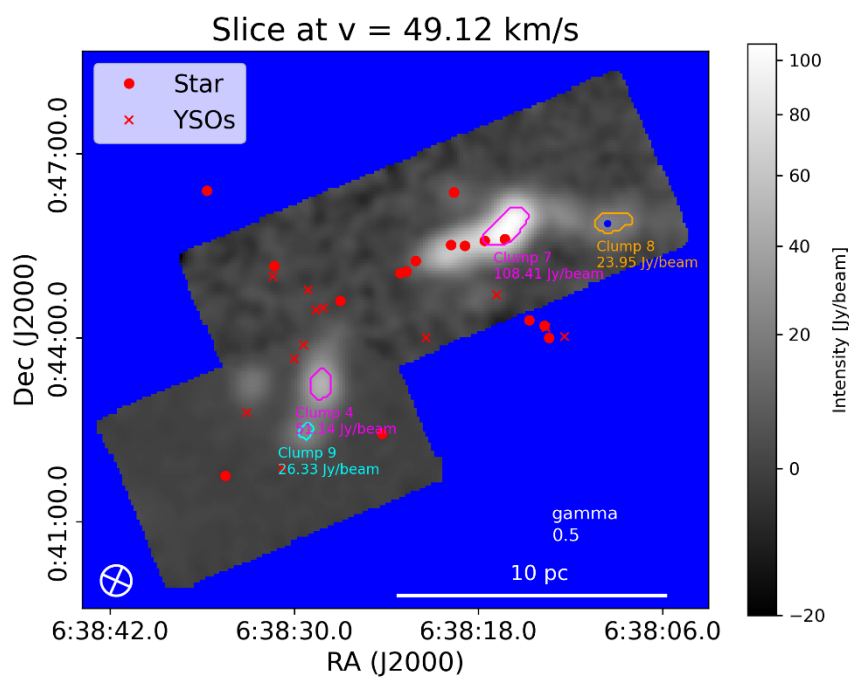
図IV-34 クラump 4, 7 ($\gamma = 1/2$)



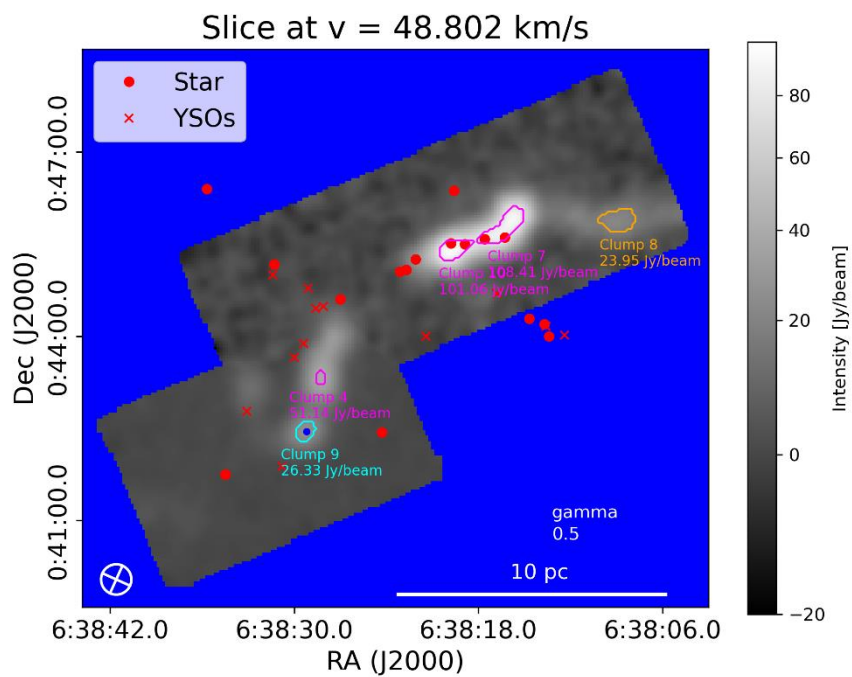
図IV-35 クラump 5 ($\gamma = 1/2$)



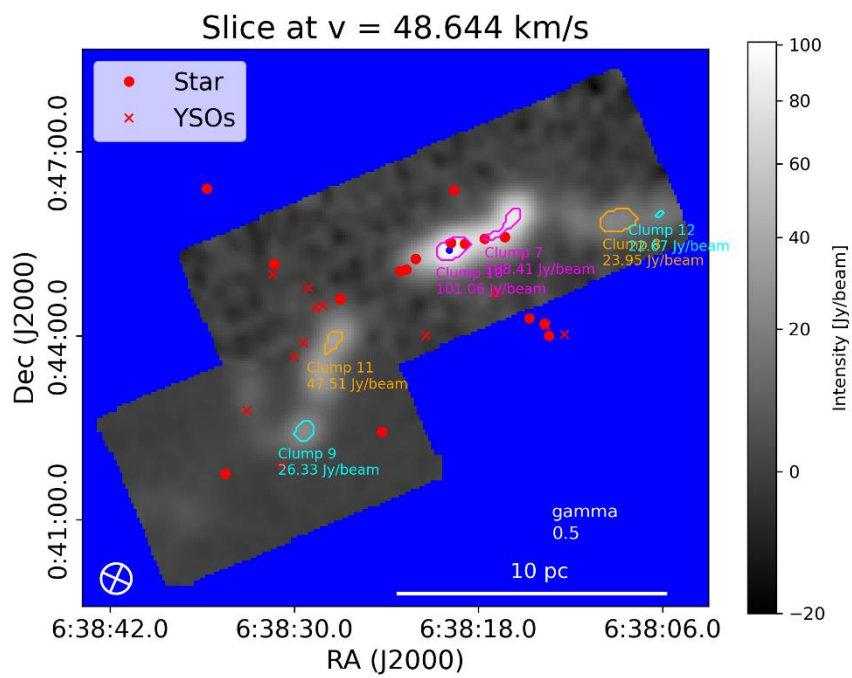
図IV-36 クラump 6 ($\gamma = 1/2$)



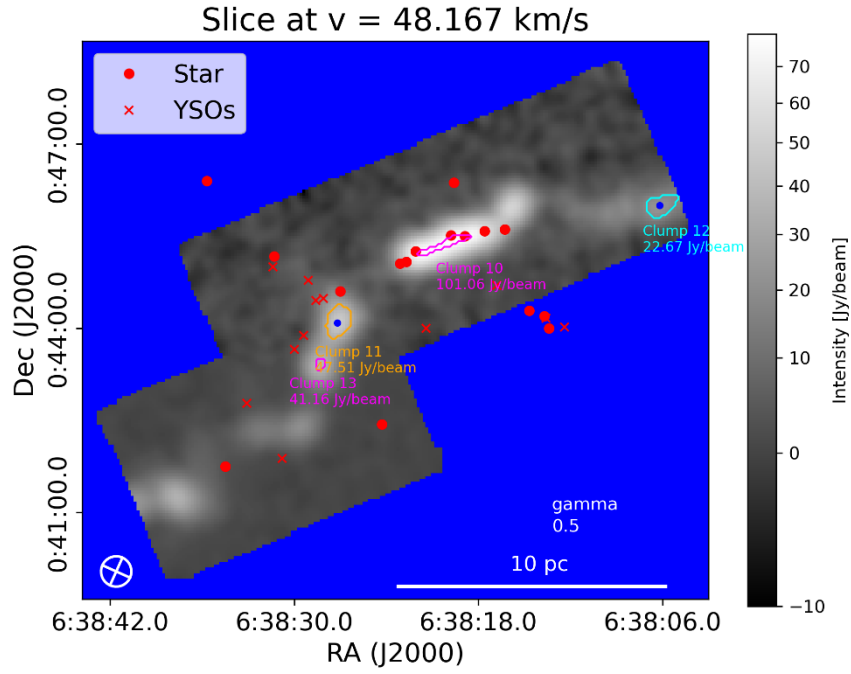
図IV-37 クラump 8 ($\gamma = 1/2$)



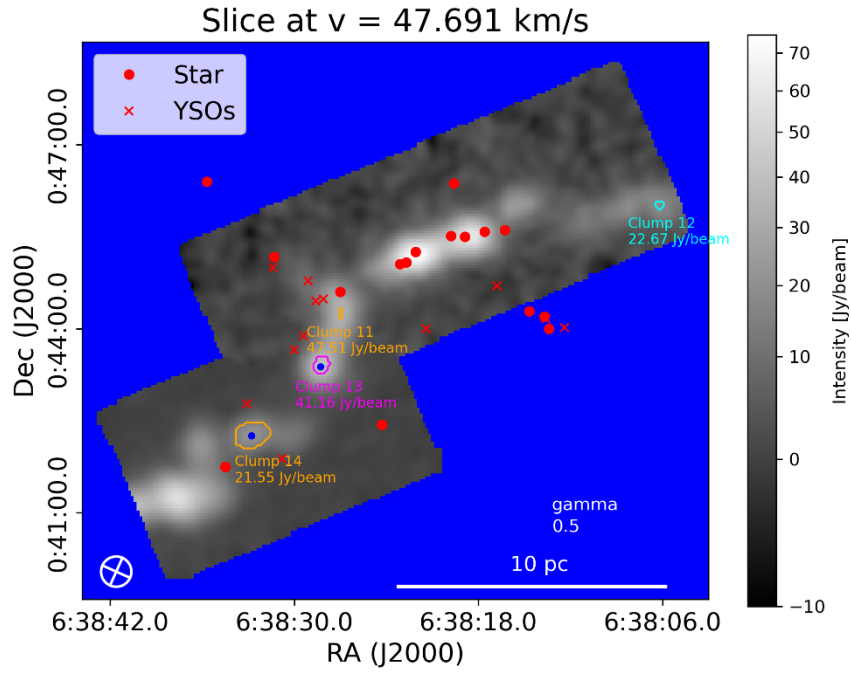
図IV-38 クラump 9 ($\gamma = 1/2$)



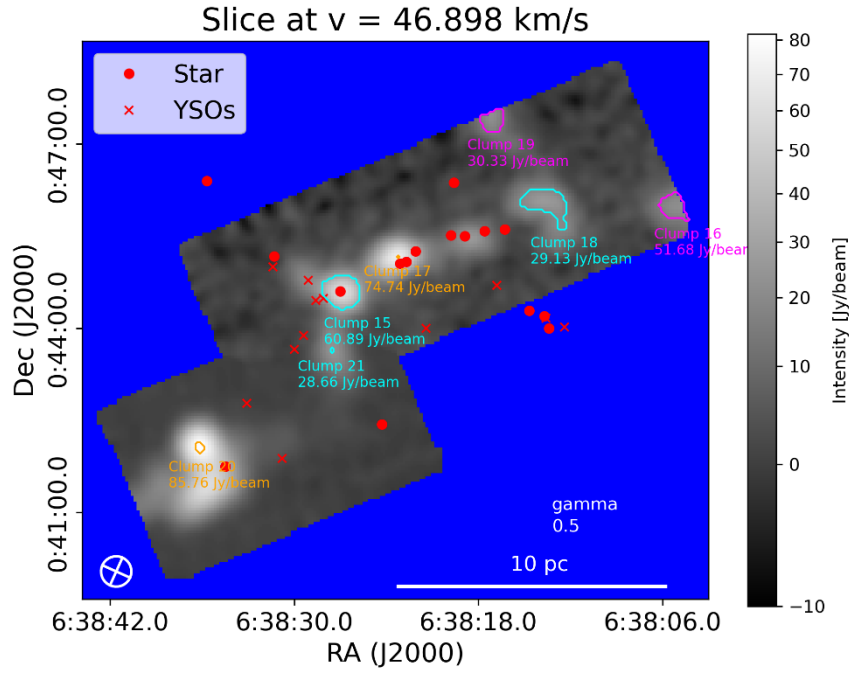
図IV-39 クラump 10 ($\gamma = 1/2$)



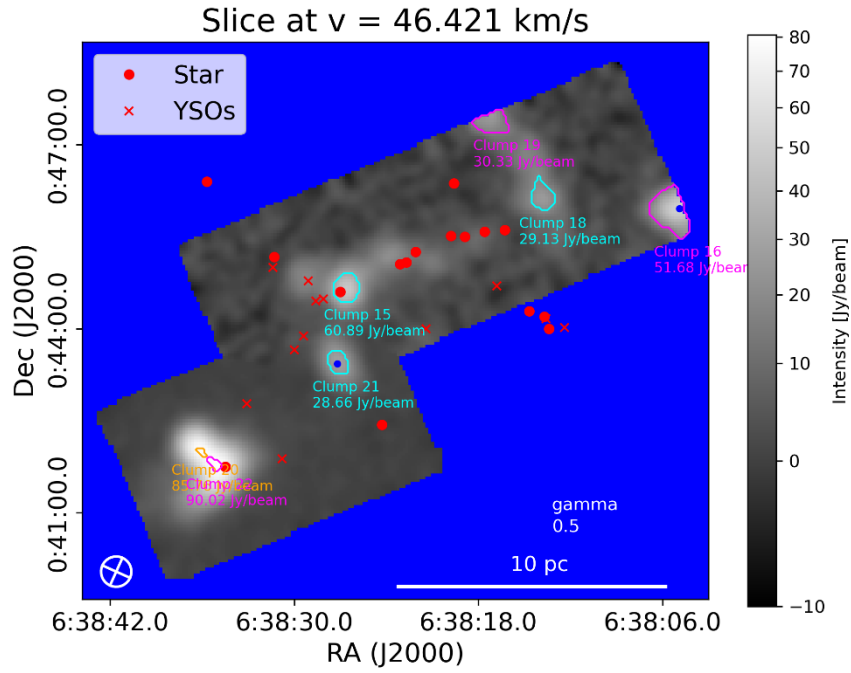
図IV-40 クラump 11, 12 ($\gamma = 1/2$)



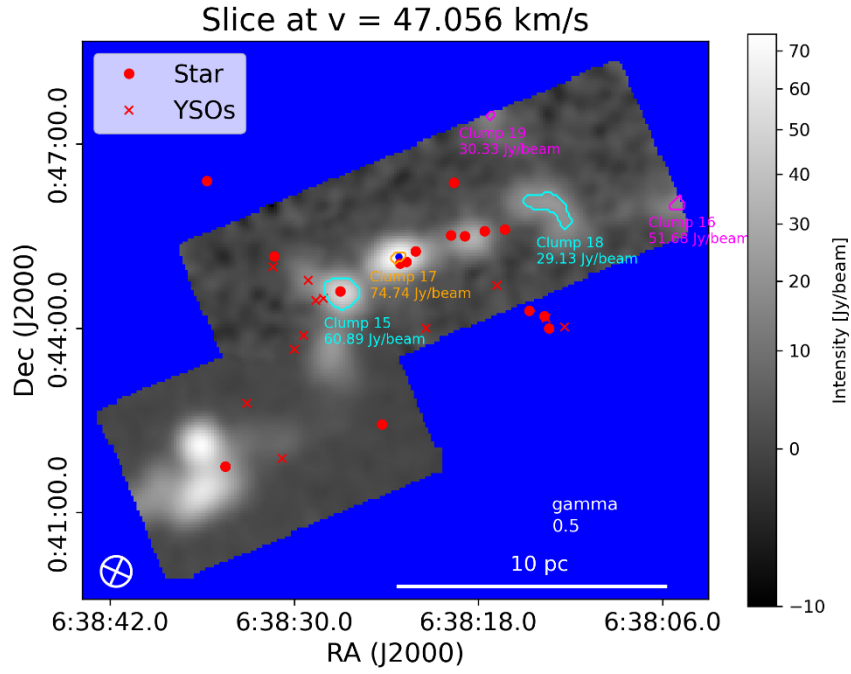
図IV-41 クラump 13, 14 ($\gamma = 1/2$)



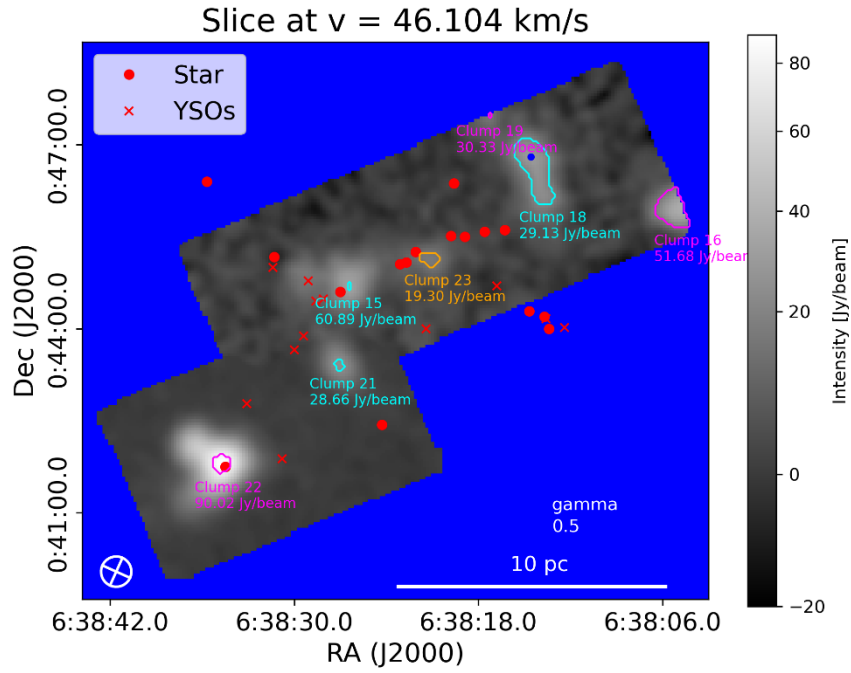
図IV-4 2 クラump 1 5 ($\gamma = 1/2$)



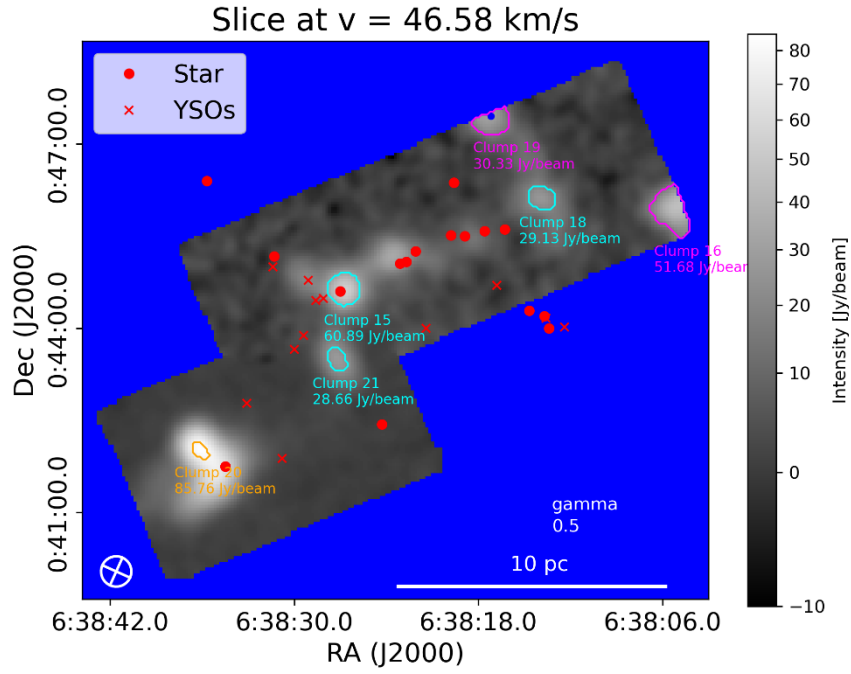
図IV-4 3 クラump 1 6, 2 1 ($\gamma = 1/2$)



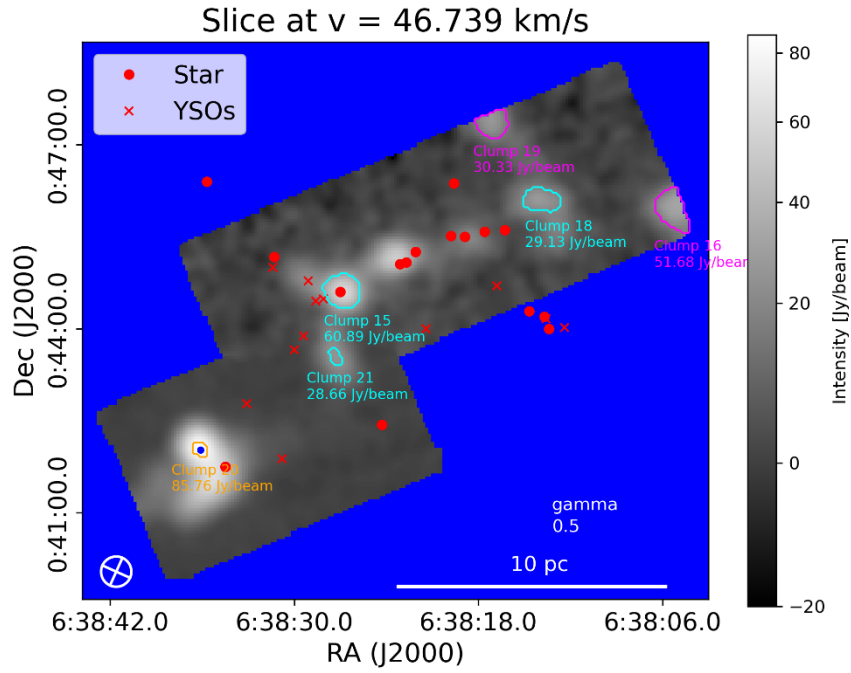
図IV-44 クラump 17 ($\gamma = 1/2$)



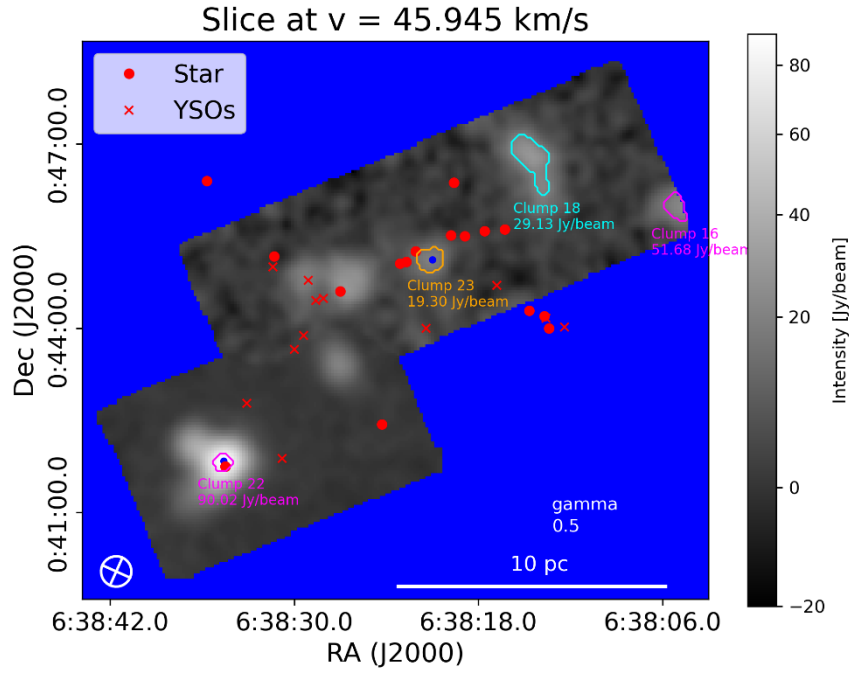
図IV-45 クラump 18 ($\gamma = 1/2$)



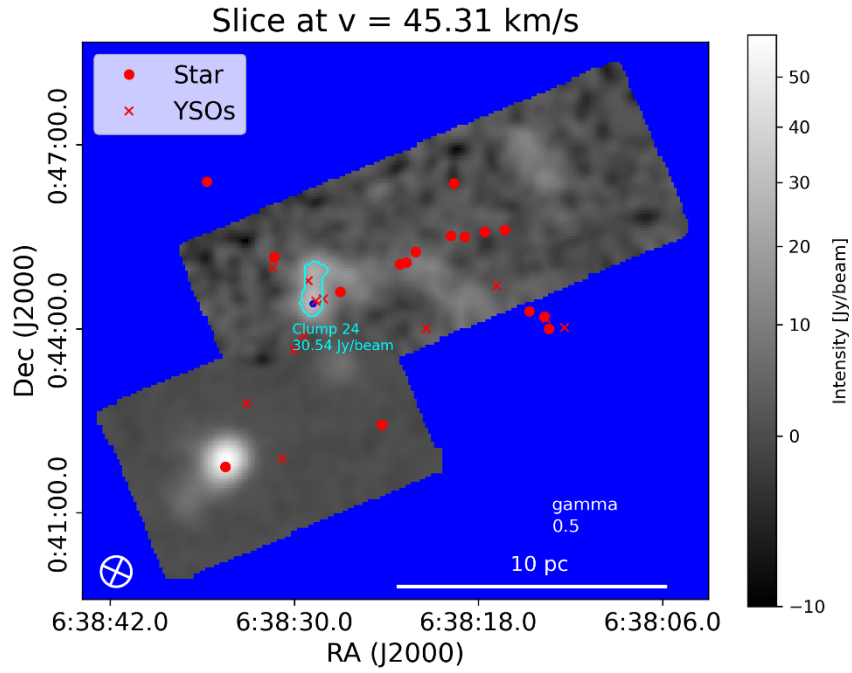
図IV-46 クラump 19 ($\gamma = 1/2$)



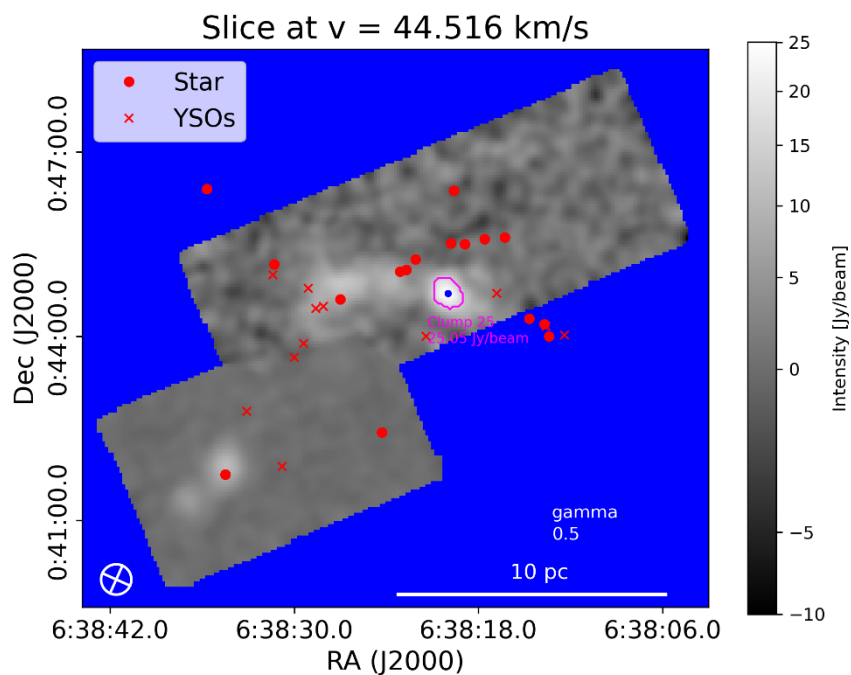
図IV-47 クラump 20 ($\gamma = 1/2$)



図IV-48 クラump 22, 23 ($\gamma = 1/2$)



図IV-49 クラump 24 ($\gamma = 1/2$)



図IV－5 0 クランプ 2 5 ($\gamma = 1/2$)

図を見ると、クランプの境界付近に恒星や YSOs が存在する傾向にあることがわかる。これはクランプのように分子雲が光学的に厚い部分では星の放射が埋もれて見えないことや、星が既に誕生した場所は分子が疎になることを示していると考えることができる。

以上のクランプ候補に対し、それぞれの物理量を見積もった結果を、表IV－4 に示す。質量は Sh2-283 の総質量を求めたときと同じ方法で見積もっている。密度の計算には、求めた半径を用いた。クランプ候補の形状を、求めた半径での球であると仮定し、質量をこの体積で割ることで密度を求めた。また、このようにして求めた密度を更に水素分子の質量で割ることで、個数密度を求めた結果も示している。ピークの輝度温度は ^{12}CO の輝度からプランクの式を逆に解いて求めた。

表IV－4 クランプの質量・密度・輝度温度

No.	Mass [$M_{\odot}$]	Density [$10^{-21} \text{ g cm}^{-3}$]	number density of H_2 [cm^{-3}]	Peak brightness temperature [K]
0	293	4.16	1240	15
1※ ²	117	2.41	721	16
2※ ¹	11	2.05	614	16.3
3※ ²	48.4	2.82	844	9.51
4※ ¹	30.6	3.94	1180	12.7
5※ ¹	7.11	3.37	1010	14.5
6※ ¹	12.1	1.85	553	7.15
7	97.3	5.41	1620	19
8※ ¹	15.9	2.41	719	12
9※ ¹ ※ ²	5.98	2.91	868	9.53
10※ ¹	38.3	6.26	1870	16.2
11※ ¹	18.3	2.62	784	13.5
12※ ¹	8.12	1.48	443	8.22
13※ ¹	5.11	4.25	1270	11.6
14※ ¹	7.69	0.855	256	9.79
15	36.6	2.46	735	14.6
16※ ²	42.5	1.70	508	10.1
17※ ¹	3.82	7.76	2320	13.3
18	35.8	0.871	260	9.61
19※ ¹	11.1	1.22	364	9.58
20※ ¹	6.85	8.34	2490	14.8
21※ ¹	6.63	2.07	620	8.84
22※ ¹	15	9.36	2800	14.2
23※ ¹	4.45	0.869	260	8.58
24	14.7	0.881	263	9.17
25※ ¹	11.2	1.35	402	8.1

※1 ビームサイズより構造が小さいクランプ候補

※2 観測領域外にも広がるため、情報が不正確なクランプ候補

質量を見ると、ほとんどのクラump候補は $10^0 - 10^1 M_{\odot}$ の範囲に収まっていることが分かる。密度も多くが $\sim 10^{-21} \text{ g/cm}^3$ であることがわかり、水素分子の個数密度に換算すると $10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$ となる。

以上の結果は、これまでの地球近傍の観測結果と照らし合わせると、小さい値である。特に、密度は一般的な分子雲のそれと変わらない値である。しかし、次に行うビリアル解析の結果では、クラump候補の質量とビリアル質量の間にある程度の整合性が取れているため、今回はこの質量をクラump候補の質量とする。

次は、ビリアル解析を行う。ビリアル解析ではクラumpが重力的に束縛されているか否かを判定する。有限の空間内を運動する多粒子系が平衡状態にあるとき、そのポテンシャルエネルギーは運動エネルギーの 2 倍となる。この状態をビリアル平衡という。それらの天体の半径がわかれば、ビリアル定理の式を天体の質量について解くことができる。こうして求まる質量がビリアル質量である。

クラumpの場合には、輝線のドップラー幅から求める速度分散 $\Delta v \text{ cm/s}$ と、クラumpの半径 $R \text{ cm}$ から以下のように求める。

$$M_{\text{vir}} = \alpha \frac{\Delta v^2 R}{G} \quad (\text{IV} - 18)$$

ただし、 $G \text{ cm}^3 \text{ s}^{-2} \text{ g}$ は万有引力定数である。 α は形状に関連する 1 程度の定数であり、今回の解析では $\alpha = 1$ とした。

こうして求まるビリアル質量 M_{vir} と、局所熱力学平衡状態を仮定し分子の光学的厚みから求める分子雲の質量 M_{LTE} を比較することで、分子雲の進化の可能性について考えることができる。 $M_{\text{vir}} > M_{\text{LTE}}$ となった場合、分子雲が自己重力で潰れる力よりも分子雲の内圧により広がる力の方が大きい状態を表しているので、このような分子雲は外圧が無い限り収縮せず、膨張していくことが予想される。一方で、 $M_{\text{vir}} < M_{\text{LTE}}$ となった場合、分子雲の潰れる力のほうが強いため、分子雲は収縮することが予想される。

速度分散 Δv はクラump候補のピークの位置での輝線のスペクトルをガウシアンフィッティングし、その分散として求めた。

半径と速度分散、そこから導出されるビリアル質量 M_{vir} 、更に LTE 法で求めた分子雲の質量 M_{LTE} を表IV-5にまとめる。

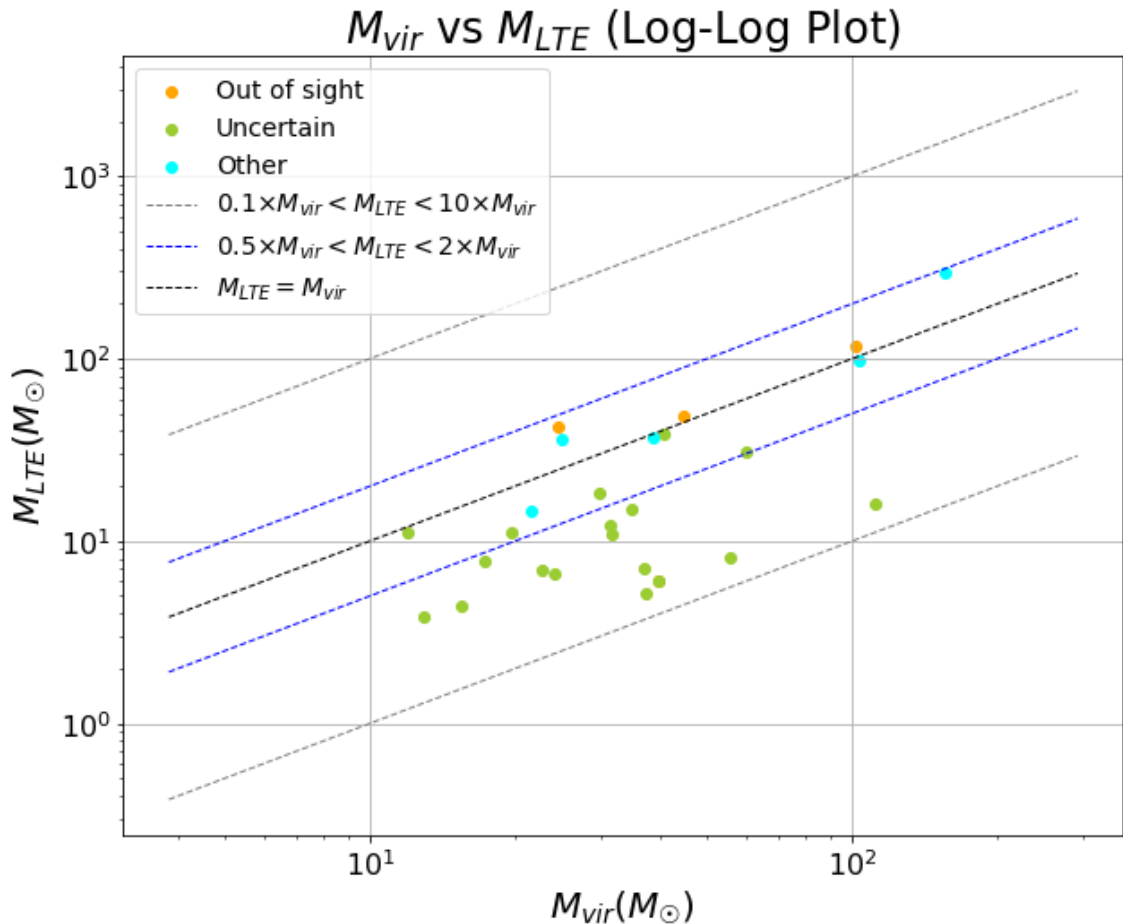
表IV-5 ビリアル質量

No.	R [pc]	Δv [10^4 cm/s]	M_{vir} [$M_{\odot}$]	M_{LTE} [$M_{\odot}$]
0	1.04	8.02	156	293
1※ ²	0.921	6.87	101	117
2※ ¹	0.442	5.56	31.7	11
3※ ²	0.652	5.42	44.5	48.4
4※ ¹	0.5	7.19	60.1	30.6
5※ ¹	0.324	6.99	36.9	7.11
6※ ¹	0.473	5.33	31.3	12.1
7	0.662	8.19	103	97.3
8※ ¹	0.474	10.0	111	15.9
9※ ¹ ※ ²	0.321	7.27	39.5	5.98
10※ ¹	0.463	6.13	40.5	38.3
11※ ¹	0.483	5.16	29.9	18.3
12※ ¹	0.446	7.32	55.6	8.12
13※ ¹	0.269	7.72	37.3	5.11
14※ ¹	0.526	3.77	17.3	7.69
15	0.622	5.17	38.7	36.6
16※ ²	0.739	3.78	24.6	42.5
17※ ¹	0.2	5.28	12.9	3.82
18	0.873	3.50	24.9	35.8
19※ ¹	0.528	3.99	19.6	11.1
20※ ¹	0.237	6.41	22.6	6.85
21※ ¹	0.372	5.27	24	6.63
22※ ¹	0.296	7.124	34.8	15
23※ ¹	0.436	3.90	15.4	4.45
24	0.647	3.78	21.5	14.7
25※ ¹	0.512	3.17	11.9	11.2

※1 ビームサイズより構造が小さいクランプ候補

※2 観測領域外にも広がるため、情報が不正確なクランプ候補

以上の結果から、クランプの質量とビリアル質量を対数プロットした結果を、図IV－5 1 に示す。図では視野の外に見切れているクランプ候補をオレンジで、求めた半径がビームサイズより小さいために大きさが不確かだと思われるクランプ候補を緑で示しており、その他のクランプ候補は水色で表した。



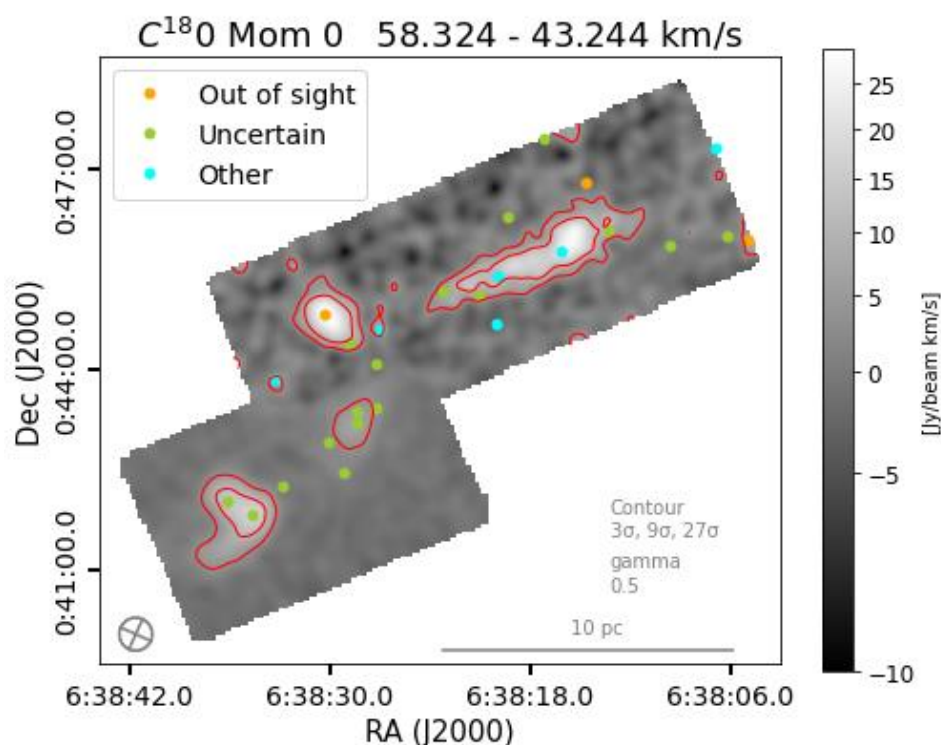
図IV－5 1 クランプの質量とビリアル質量

灰色の点線は $0.1 \times M_{\text{vir}} < M_{\text{LTE}} < 10 \times M_{\text{vir}}$ の範囲を示している。今回同定できた 26 個のクランプ候補は、全てこの範囲に収まっていることが分かる。また、青色の点線は $0.5 \times M_{\text{vir}} < M_{\text{LTE}} < 2 \times M_{\text{vir}}$ の範囲を示しており、水色でプロットされた大きさの不定性が小さいクランプ候補は、全てこの範囲に収まっている。クランプが全てビリアル平衡の状態にあるとは限らないものの、分子雲の質量とビリアル質量の対応から、求めた分子雲の質量が大きく誤っていないことを示していると考えられる。

黒色の点線はビリアル平衡となるラインを示している。このラインよりも上の領域に分布するクランプは収縮、下の領域に分布するクランプは膨張していくことが予想される。このライン付近には 6 つのクランプ候補が分布している。この 6 つのクランプはビリアル

質量との差が 20 % 以内であり、ビリアル平衡状態にあると考えられる。また、今回同定されたクランプ候補のうち、ビリアル質量より明らかに LTE 質量が大きい候補は 3 つ確認され、他のビリアル平衡のものを除く 17 個の候補はビリアル質量よりも LTE 質量が小さいことが分かる。

同定したクランプのピークの位置と C^{18}O の Moment 0 map の比較を図IV－5 2 に示す。

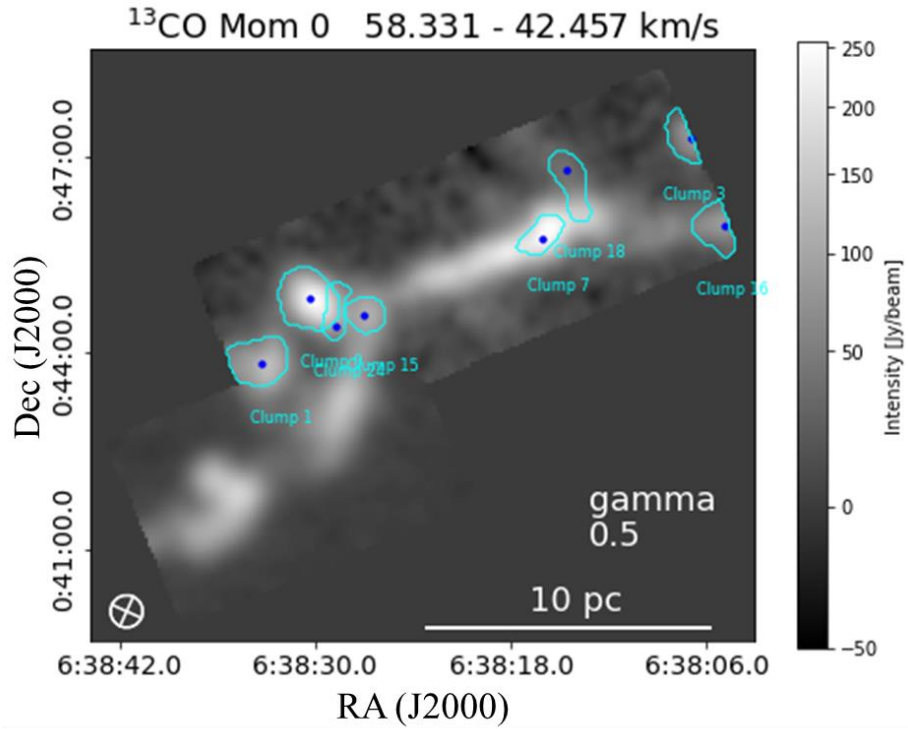


図IV－5 2 同定したクランプのピークの位置と C^{18}O の Moment 0 map の比較

これを見ると、およそ半分のクランプは C^{18}O の 3σ 以上の放射が見られる領域にピークを持たないことが分かる。分子雲コアのような高密度の領域では C^{18}O の放射も見られると考えられるため、 C^{18}O の 3σ 以上の領域から外れているクランプ候補にはコアが含まれていない可能性が高いと考えられる。

以上の解析ではビームサイズよりも小さいクランプ候補も含めて解析しているため、ビームのコンボリューションを考慮して大きさを決めることができなかった。しかし、ビームサイズ以上の大きさを持つクランプ候補に対しては、フィラメントの幅を求めたときと同様に真の大きさを求めることができる。

ビームサイズより大きい 8 つの候補の様子を図IV－5 3 に示す。



図IV－5 3 ビームサイズより大きいクランプ候補

真の大きさを用いて個数密度やビリアル質量を求めた結果を、次の表IV－6 に示す。

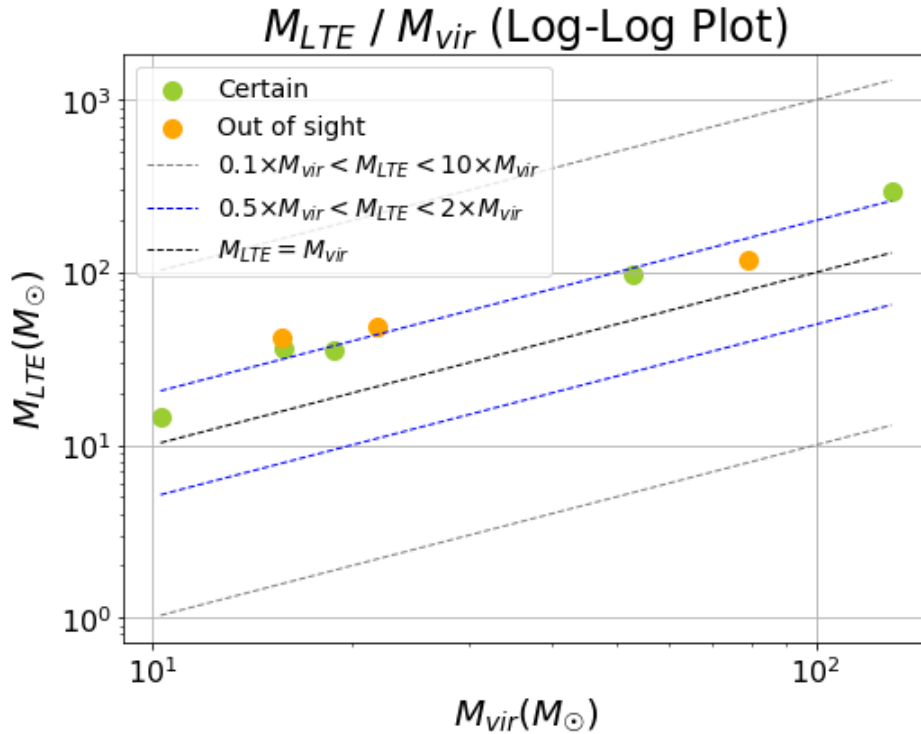
表IV－6 ビリアル質量

No.	R_{before} [pc]	R_{after} [pc]	number density of H_2 [cm^{-3}]	M_{vir} [$M_{\odot}$]	M_{LTE} [$M_{\odot}$]
0	1.04	0.872	2.15×10^3	130	293
1※1	0.921	0.726	1.49×10^3	79.2	117
3※1	0.652	0.322	7.04×10^3	21.9	48.4
7	0.662	0.342	1.18×10^4	53.0	97.3
15	0.622	0.256	1.06×10^4	15.8E	36.6
16※1	0.739	0.474	1.94×10^3	15.7	42.5
18	0.873	0.664	5.94×10^2	18.8	35.8
24	0.647	0.312	2.36×10^3	10.3	14.7

※1 観測領域外にも広がるため、情報が不正確なクランプ候補

R_{before} が補正前、 R_{after} が補正後のクランプ候補の半径である。ビームサイズ分の補正によって、クランプ候補の大きさは補正前より小さく見積もられた。この結果、密度が補正前より上昇し、ビリアル質量は減少している。分子雲は高密度であるほど半径が小さいと考えられるが、そのような相関は見られない。

ビリアル解析を行った結果を、図IV－5 4 に示す。



図IV－5 4 クランプの質量とビリアル質量（ビームサイズ以上の候補）

半径が補正され小さくなったことにより、ビリアル質量が減少し、8 つの候補は全て LTE Mass が卓越する結果になった。一方で、この 8 つの候補の中にもピークの位置に C¹⁸O の放射を持たない候補が存在するため、必ずしもこれらの候補が星形成に向かっていることを示す結果ではないと考えられる。

IV－6 Sh2-283 における低金属量環境の研究の展望

最後に研究の展望についてまとめる。

まず、今回の研究により、今まで分子雲が検出されなかった検出されていなかった領域にも分子雲が存在することがわかった。この分子雲は今回観測した領域よりも更に外側まで伸びており、今後の観測ではより広い領域で分子雲の観測を行いたい。特に視線速度が $v_{LSR} = 10 \text{ km/s}$ 付近の希薄な分子雲は観測領域から大きくはみ出て広がっており、この分子雲が収まるような広域の撮像観測が行われると良い。本論文ではこの希薄な分子雲は

Sh2-283 とは関係のない分子雲であると結論づけたが、銀河外縁部の星形成では分子雲の衝突により星形成が行われると考えられるケースが見つかっており^[4]、今回観測できなかった領域でこのような兆候が見られないか確認をする必要がある。

次に、本来行われる予定であったビームサイズ 6'' の干渉計観測について述べる。今回同定したクランプ候補の半径は、多くが $\sim 10^{-1}$ pc であり、最小のものでも 0.200 pc、直径にして 0.400 pc である。6'' の観測を行った場合は 7.9 kpc 先でも、0.23 pc の構造を分解することができ、つまり最小のクランプ候補の直径よりも小さい構造を見分けることがわかった。

クランプ候補の質量を合計すると、 $9.05 \times 10^2 M_{\odot}$ となる。近傍の分子雲コアの質量は $10^1 - 10^2 M_{\odot}$ 程度であるから、単純に商をとると 10 個以上のコアが同定される可能性があるということになる。CMF (Core Mass Function) を求められる最低限のコア数は含まれていると考えることができ、分解能が高まることによりフィラメントの密度構造も詳細に調査できるようになるため、フィラメントの密度構造と星形成の関係について研究することが可能だと考えられる。一方で、今回同定されたクランプ候補のうち、 $C^{18}O$ の放射が見える領域にピークを持たなかった半数は、分子雲コアを含んでいない可能性がある。そのため、Sh2-283 以外の天体も合わせて研究を行う必要があるかもしれない。

また、今回求められた分子雲の質量は地球近傍の分子雲と比較して低い値になった。Li et al. (2020) の結果において距離を再考し金属量の影響を加味をした値も、決して大きい値ではない。導入で触れたような低金属量環境特有の特徴は確認できなかった。しかし、Sh2-283 は星形成クラスターを含む H_{II} 領域である。フィラメント内にも、多くの YSOs が同定されている。このように、現在星形成が進んでいる場所であるにも関わらず質量が軽く見積もられているのはなぜなのか、今回解析できなかった連続波や $H\alpha$ 線を含め様々な放射による詳細な観測によって解明できると良い。

結論

- ・ Sh2-283 の励起星としては ALS 18674 を挙げることができ、この星の周りでダストの放射・ $H\alpha$ 線の放射・星形成クラスターの存在が確認できる。
- ・ Sh2-283 の距離は論文によって様々であるが、本論文では Gaia DR 2 で報告された ALS 18674 の年収視差から $7.9^{+1.3}_{-1.0}$ kpc とした。
- ・ Sh2-283 に付随する分子雲は、視線速度は ^{12}CO では $v_{\text{LSR}} = 47.061$ km/s がピークであるので、Sh2-283 の距離銀河半径における銀河の回転に従って運動していると考えられる。形状はフィラメント状で長さ 25 pc 以上、幅 1.2 pc 程度で広がっている。フィラメントは複雑に分岐しており、ハブフィラメント構造の様に分岐点で密度が高くなっている兆候が見られる。星の分布はフィラメントをよく追従している。
- ・ 視線速度 10 km/s の付近で、Sh2-283 と重なって見える希薄な分子雲がある。この分子雲の視線速度は地球からの距離約 1 kpc における銀河回転に乗った運動で説明ができるものであり、Sh2-283 と相互作用している兆候は見られなかったため、同じ方向に見える別の雲だと考えられる。
- ・ Sh2-283 に付随する分子雲の総質量は LTE 法より $5.5 \times 10^3 M_{\odot}$ と求められた。地球近傍では分子雲の質量は $10^4 - 10^6 M_{\odot}$ 程度と見積もられており、これに比べると小さい値になった。
- ・ デンドログラム法により、分子雲の中に 26 個のクランプ候補を同定した。クランプ候補の質量も最大で $293 M_{\odot}$ と、近傍の分子雲の結果と比べると小さくなった。しかし、ベリアル解析の結果、ベリアル質量とは整合性が取れていることがわかった。
- ・ 26 個のクランプ候補のうち、6 つがベリアル平衡状態にあると考えられる。残りの候補のうち 3 つがベリアル質量より大きく、その他は全てベリアル質量より小さい。
- ・ クランプ候補の質量を合計すると $9.05 \times 10^2 M_{\odot}$ となり、分子雲コアが 10 個以上含まれている可能性がある。今後、高分解能の観測でフィラメントの密度分布やコアの質量を見積もることができれば、この分子雲のなかで星形成の進化について考えることができるだろう。また、求められた分子雲の質量が $5.5 \times 10^3 M_{\odot}$ と小さめであるにも関わらず、活発に星形成が行われている理由も分かるかもしれない。一方で、今回同定されたクランプ候補のうち半数は C^{18}O の放射の位置にピークを持たず、コアを含まない可能性もあるため、他の天体も合わせて研究する必要があるかもしれない。
- ・ 今回観測した範囲の外側にも分子雲が広がっている様に兆候が確認できた。今後はより広域の観測にも目を向ける必要がある。

謝辞

この研究を進める上でご指導賜りました、指導教員の百瀬宗武先生に厚く御礼申し上げます。研究がなかなか進まず、最後の最後まで的を射ない質問を繰り返すなど、ご心配をおかけする機会が多かったにも関わらず、最後まで励ましの言葉を頂き、ありがとうございます。

また、副指導教員の米倉寛則先生にも大変お世話になりました。発表会の際にご指摘をいただいたお陰で、研究を正しい視点から見つめ直すことができました。

折原龍太先輩にも感謝申し上げます。研究が進まないなか、進捗を気にかけて親身に相談に乗ってくださり、大変嬉しかったです。先輩に頂いた数々のご助言のお陰で、データの解析を終えることができました。

田辺義浩様には発表の改善点をご教授いただきました。研究室外でお会いしたときにも、励ましの言葉をいただきました。水木敏幸様にはゼミの時間に多くのお時間を頂戴してしまい、申し訳ございませんでした。島尻芳人様にはマップの合成に関してお力添えいただきました。

研究室の皆様には、気さくに接していただき、良い環境で研究ができました。楽しさも真面目さもある研究室で、辛いときも頑張ることができました。

最後に、大学院に進学することを何も言わずに認めてくださった家族と、いつも応援してくださった祖父母、親友に感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

1. Bica1& Dutra. (2003), 2003A&A...404..223B
2. Russeil et al. (2007), 2007A&A...470..161R
3. Richards et al (2012), 2012AJ....144...89R
4. Izumi et al (2014), 2014ApJ...795...66I
5. Mangum & Shirley (2017), 2015PASP..127..266M
6. Fernández et al. (2017), 2017A&A...597A..84F
7. Bobotsis and Fich (2019), 2019ApJ...884...77B
8. Bragança et al. (2019), 2019A&A...625A.120B
9. Li et al. (2020), 2020ApJS..249...27L
10. 祖父江義明, 有本信雄, 家正則 編. 銀河 II 第 1 版 シリーズ現代の天文学第 5 巻 . 第 I 部第 2 章, 第 II 部第 7 章
11. 福井康雄, 犬塚秀一郎, 大西利和, 中居直正, 舞原俊憲, 水野亮 編. 星間物質と星形成 第 1 版 シリーズ現在の天文学第 6 巻. 第 I 部第 3 章
12. Gaia データベース (<https://gea.esac.esa.int/archive/>)
13. SIMBAD Astronomical Database (<http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>)
14. Astronomical Dendrograms in Python (<https://dendrograms.readthedocs.io/en/stable/>)

付録 I Weblog の確認方法

はじめに

ここでは Weblog の確認方法を紹介する。

Weblog とは、ALMA のデータ処理パイプラインによって生成されるログである。データの処理手順、品質保証、診断情報、データ処理の結果のプロットなどが含まれている。従って、観測データが手元に届いた際、最初に見るべき情報である。

この Weblog を閲覧するには少し特殊な手順を踏む必要がある。今回はその中でも、ローカルホストを使って閲覧する方法を紹介する。この方法は手順が少ないところに利点がある。一方で、ブラウザのセキュリティ設定により、ウェブログを使用できないことがある。このような場合は、コマンドラインからセキュリティ設定を一時的に変更したブラウザを使用するなどして、問題を回避する必要がある。もしそれでも問題を回避できなければ、参考文献を参考に CASA を使用して Weblog を表示する方法をとることができる。

Weblog をローカルホストで確認する方法

1. 使用する PC に Python3 を導入する

Weblog の確認には、PC に Python3 の環境が整っていることが必要である。Mac ではデフォルトでこの環境が備わっているはずなので、Windows PC や Linux PC を使用する場合はコマンドプロンプトから Python3 のインストールを完了させておかなければならない。

2. Weblog をコンピュータ上にダウンロードする

Weblog をローカルホストで確認するために、コンピュータ上に Weblog をダウンロードする必要がある。Weblog は ALMA の製品パッケージの「qa」というディレクトリの中に含まれており、「qa」の中の `tgz` ファイルを解凍することにより使用できるようになる。

`tar` ファイルを解凍すると、「html」というフォルダが存在する。このフォルダの中に Weblog の内容が含まれているので、このフォルダごと PC 上のアクセスしやすい場所に置いておくとうまいだろう。

3. Weblog をダウンロードしたパスに移動する

コマンドプロンプトを開き、「`cd`」コマンドで「html」を置いたパスに移動する。再度「`cd`」コマンドを使用して「html」が作業ディレクトリになるように移動する。

4. ローカルホストに接続する

「html」でローカルホストを起動する。機動の際には、コマンドプロンプトに以下のようなコマンドを打ち込む。

```
python3 -m http.server 8080 --bind 127.0.0.1
```

これでローカルホストが立ち上がるはずである。なお、サーバーの番号「8080」は使用していない番号であればどれでも構わない。

コマンドに誤りがなければ、以下のように表示されるはずである。

```
Serving HTTP on 127.0.0.1 port 8080 (http://127.0.0.1:8080/) ...
```

5. Web ブラウザで Weblog にアクセスする

最後にブラウザに以下の URL を入力し、weblog の内容を確認する。

```
http://127.0.0.1:8080/index.html
```

ブラウザは、Mac OS や Linux のユーザーの場合は Firefox が推奨される。しかし、CASA 6.2.1-7 以降の ALMA パイプラインによって作成されたウェブログは、機能に制限はあるものの Chrome や Safari などが使える。

正しく表示できると、図 1 のような画面が表示される。

2021.2.00084.5 - Home

127.0.0.1:8080/t1-1.html

Home

By Topic

By Task

2021.2.00084.5

Observation Overview

Project	uid://A001/X15a2/X5b0
Principal Investigator	
OUS Status Entity Id	uid://A001/X15aa/X1de
Observation Start	2022-08-18 15:48:14 UTC
Observation End	2022-09-06 12:45:24 UTC

Pipeline Summary

Pipeline Version	2021.2.0.128 (documentation)
CASA Version	6.2.1.7 (environment)
IERSeop2000 Version	0001.0162 (last date: 2022-08-02 00:00:00)
IERSpredict Version	0623.0934 (last date: 2022-12-03 00:00:00)
Pipeline Start	2022-09-06 16:20:36 UTC
Execution Duration	9:29:46

Observation Summary

Measurement Set	Receivers	Num Antennas	Time (UTC)		On Target	Baseline Length				
			Start	End		Min	Max	RMS	Size	
Observing Unit Set Status: uid://A001/X15aa/X1de Scheduling Block ID: uid://A001/X15aa/X1d2 Scheduling Block Name: Sh2-283- b_06_TP										
Session: session_1										
uid__A002_X1d251c_X54c3.ms	ALMA Band 6	3	2022-08-18 15:48:14	2022-08-18 17:01:13	0:35:20	55.5 m	91.0 m	72.6 m	1.5 GB	
			MS dates not fully covered by IERSeop2000. CASA will use IERSpredict.							
uid__A002_X1d251c_X54c3.ms.atmcor.atmtype1	ALMA Band 6	3	2022-08-18 15:54:29	2022-08-18 17:00:38	0:35:20	55.5 m	91.0 m	72.6 m	2.3 GB	
			MS dates not fully covered by IERSeop2000. CASA will use IERSpredict.							
uid__A002_X1d251c_X54c3.ms.atmcor.atmtype1_bl	ALMA Band 6	3	2022-08-18 15:54:29	2022-08-18 17:00:38	0:35:20	55.5 m	91.0 m	72.6 m	2.3 GB	
			MS dates not fully covered by IERSeop2000. CASA will use IERSpredict.							
Scheduling Block ID: uid://A001/X15aa/X1d2 Scheduling Block Name: Sh2-283- b_06_TP										

図 付録 I - 1 Weblog のホーム画面

以上のコードを実行すると Weblog を開けるはずだが、画面に「t1-1.html」という文字だけが表示されることがある。この状態のときは「html」内に含まれる「index.html」が正常に動いていないと考えられるので、この中身を書き換えるか、最初から次のようにコマンドを打ち込み「t1-1.html」を開いてしまうのが良い。

`http://127.0.0.1:8080/t1-1.html`

また、著者の場合は、何らかの影響で「html\resources\css」にあるはずの「all.min.css」のパスが「html\resources\resources\css」となっており、「t1-1.html」内の「link rel="stylesheet" href="resources/css/all.min.css" type="text/css"/>」というコードが機能しなくなっている例が見られた。表示がうまくできなかった場合は、何らかのエラーが生じているはずなので、ブラウザの開発者ツールからコンソールタブをチェックし、エラーの確認を行うとヒントが得られるかもしれない。

以上の手順で Weblog のトップページを表示させることができる。まずは画面左上の「By Task」タブから、タスク別に内容を確認してみることをお勧めする。まずは、13 番の「hsd_imaging」を確認すると RMS の情報やコンタミネーションを確認できるので良いだろう。

参考文献

1. What is the best way to view the weblog?
(<https://help.almascience.org/kb/articles/what-is-the-best-way-to-view-the-weblog>)
- 2.

付録Ⅱ

Channel Map の一覧

ここでは元データである Channel Map の様子を全て紹介する。

図 1 から図 96 まだが ^{12}CO 、図 97 から図 192 まだが ^{13}CO 、図 193 から図 288 まだが C^{18}O の Map である。図 289 以降に視線速度 $v_{\text{LSR}} \cong 10 \text{ km/s}$ 付近の分子雲の様子を示すが、この分子雲は ^{12}CO 以外の輝線は検出されなかったので、 ^{12}CO の結果しか載せない。

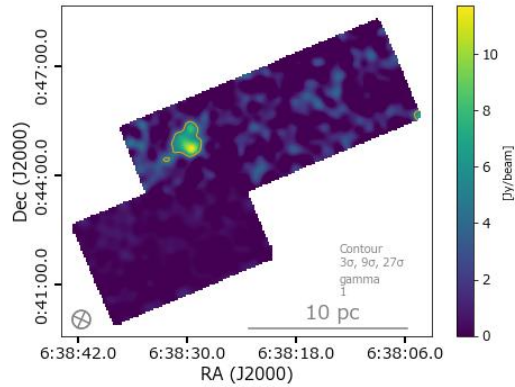


図 付録Ⅱ-1 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

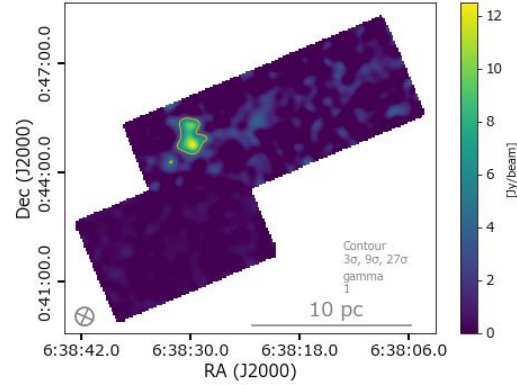


図 付録Ⅱ-2 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

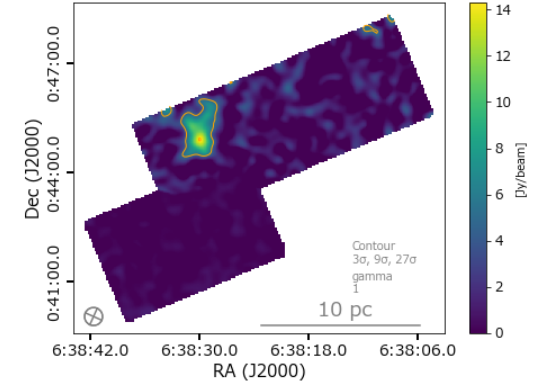


図 付録Ⅱ-4 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

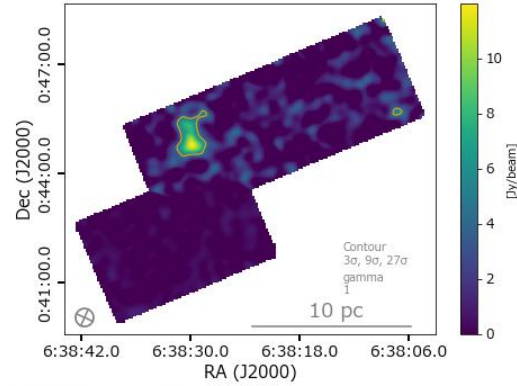


図 付録Ⅱ-3 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

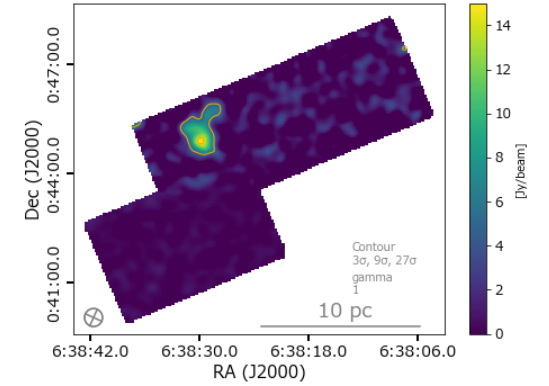


図 付録Ⅱ-5 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

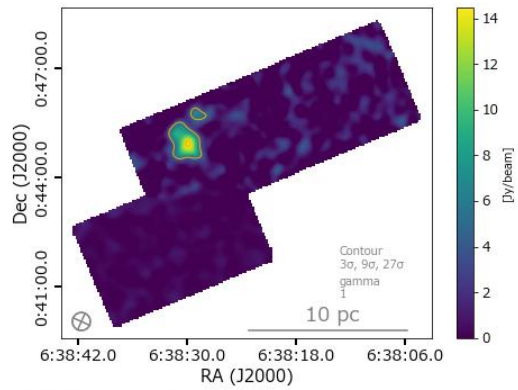


図 付録 II - 6 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

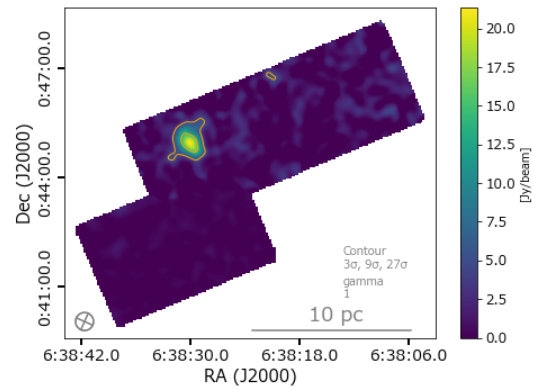


図 付録 II - 8 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

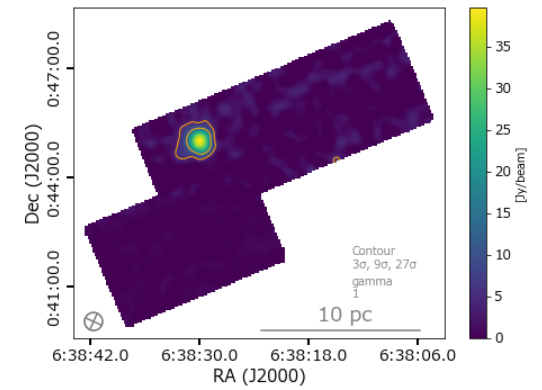


図 付録 II - 10 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

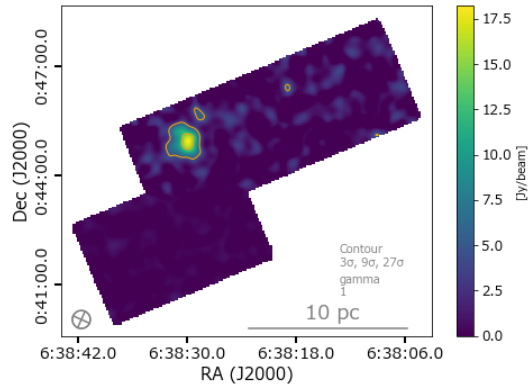


図 付録 II - 7 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

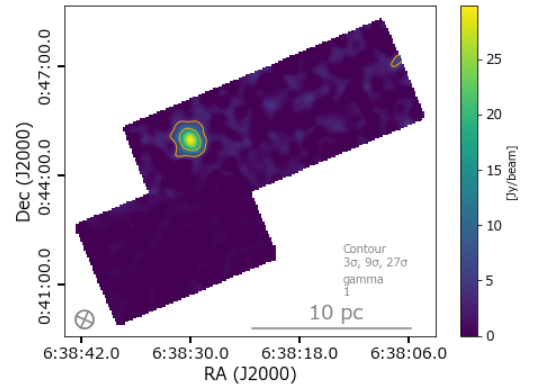


図 付録 II - 9 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

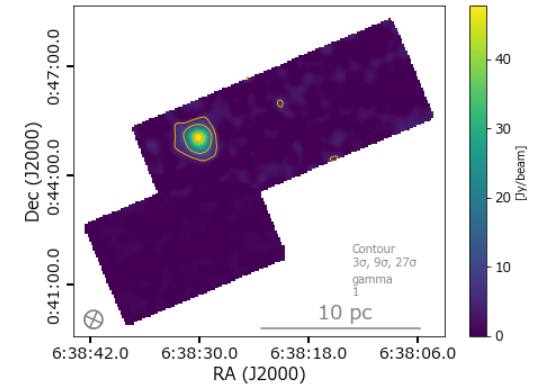


図 付録 II - 11 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

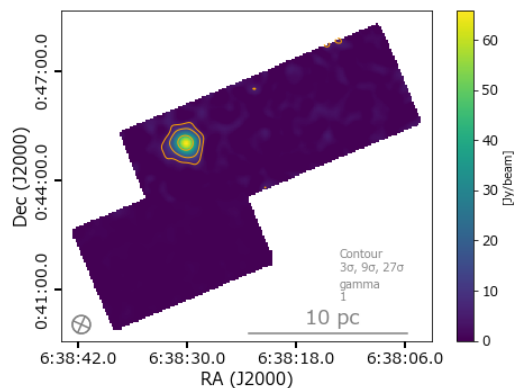


図 付録Ⅱ－12 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

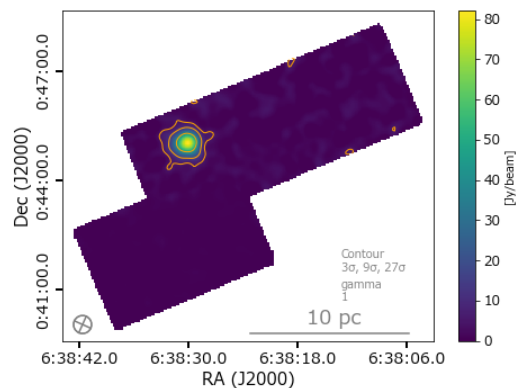


図 付録Ⅱ－14 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

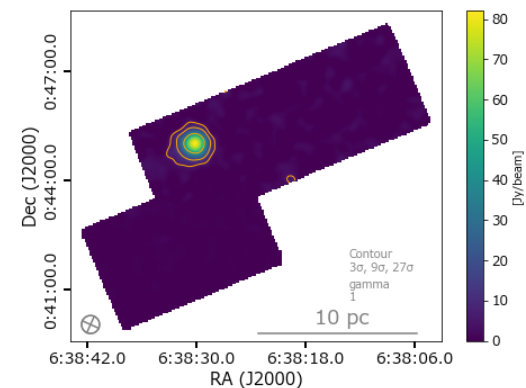


図 付録Ⅱ－16 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

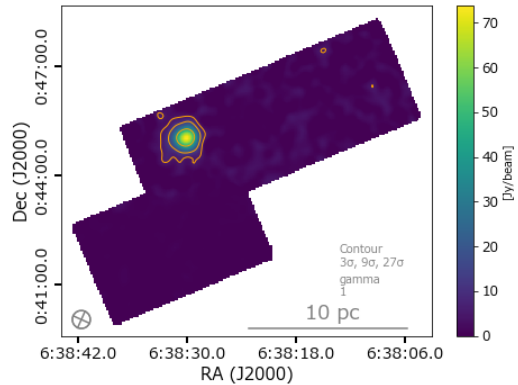


図 付録Ⅱ－13 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

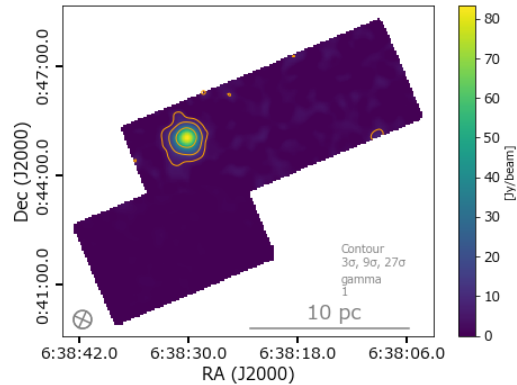


図 付録Ⅱ－15 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

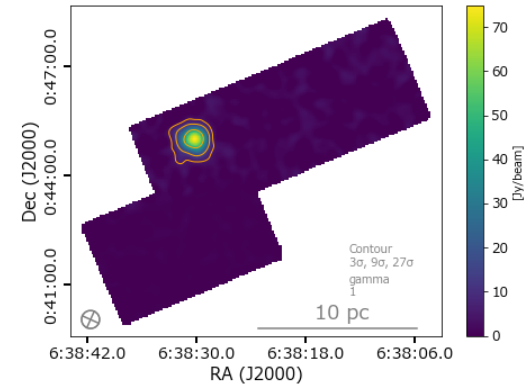


図 付録Ⅱ－17 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

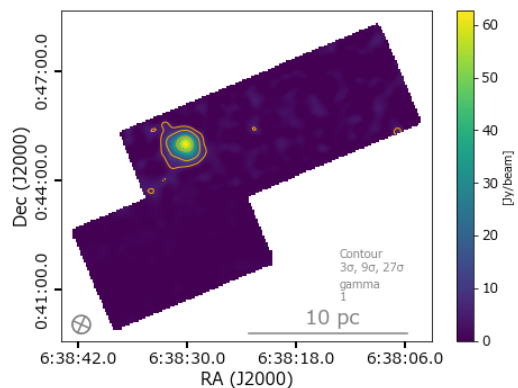


図 付録Ⅱ－18 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

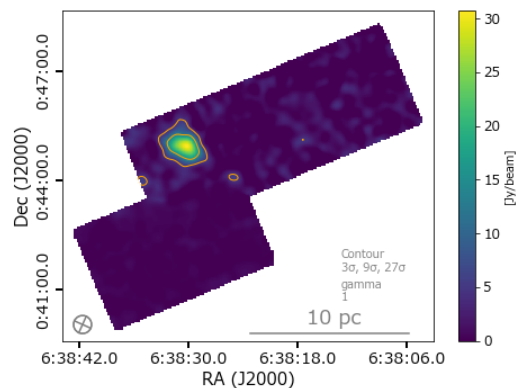


図 付録Ⅱ－20 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

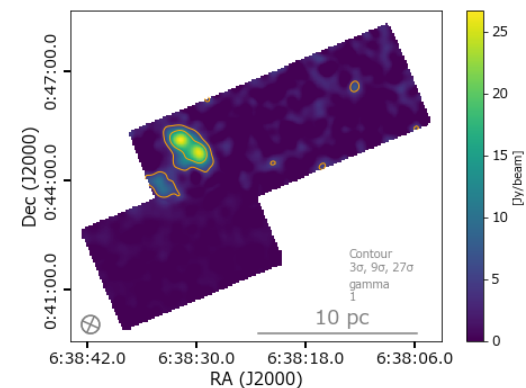


図 付録Ⅱ－22 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

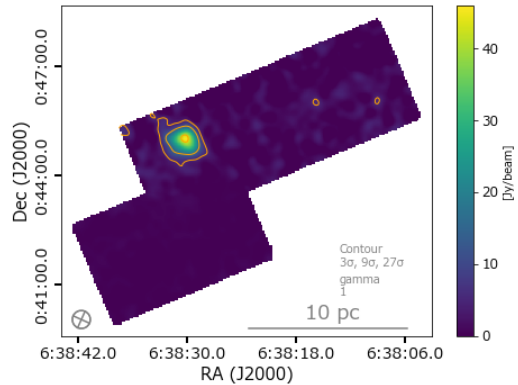


図 付録Ⅱ－19 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

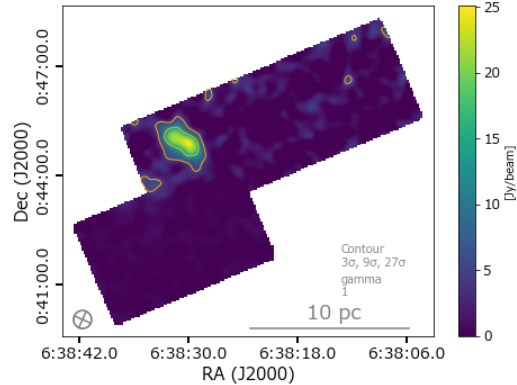


図 付録Ⅱ－21 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

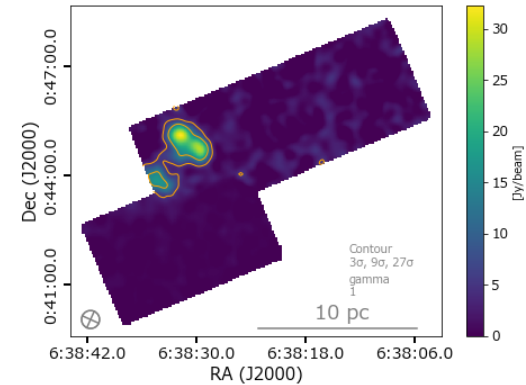


図 付録Ⅱ－23 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

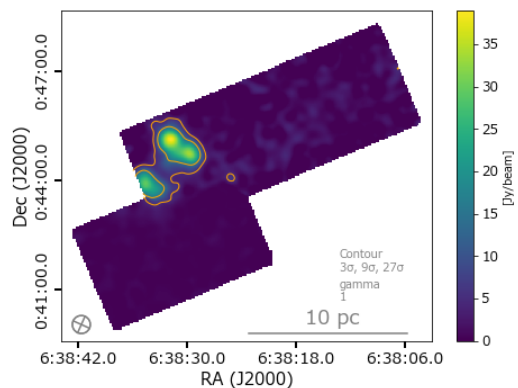


図 付録Ⅱ－24 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

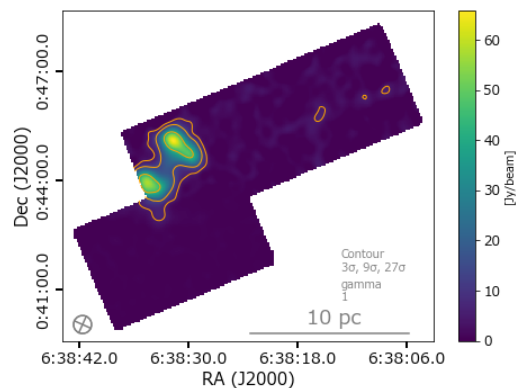


図 付録Ⅱ－26 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

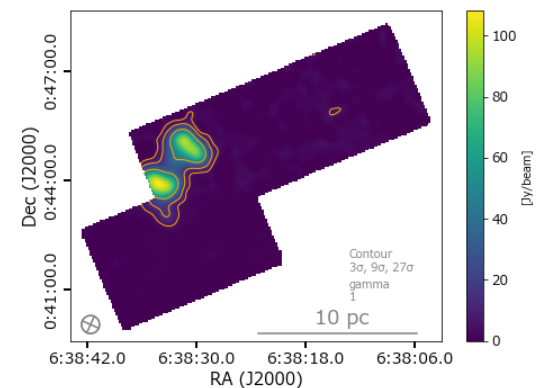


図 付録Ⅱ－28 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

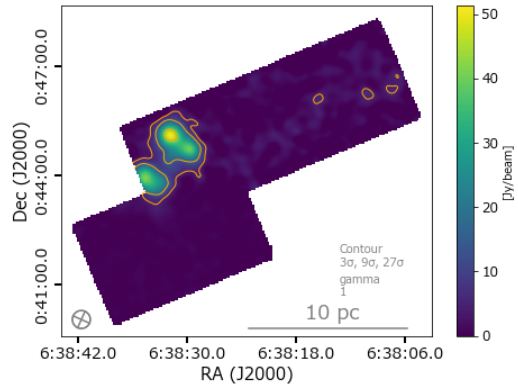


図 付録Ⅱ－25 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

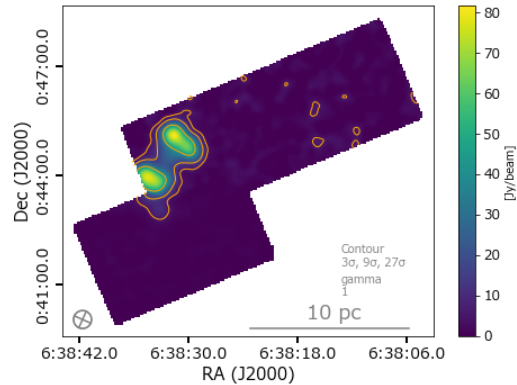


図 付録Ⅱ－27 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

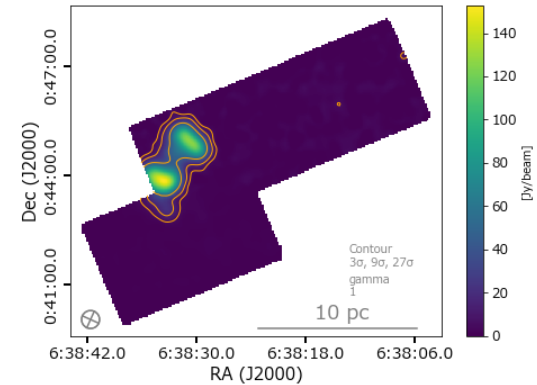


図 付録Ⅱ－29 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

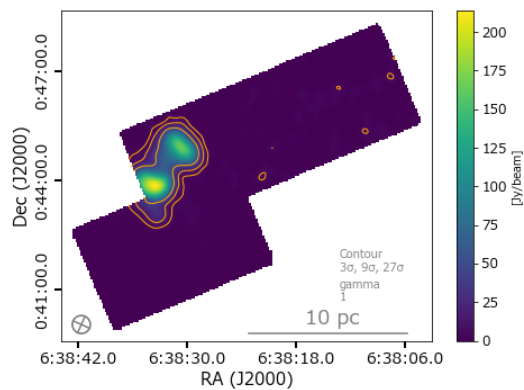


図 付録Ⅱ－30 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

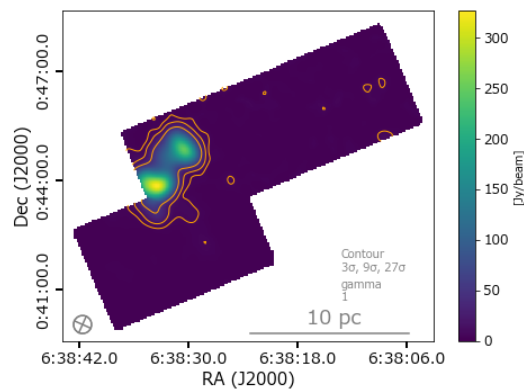


図 付録Ⅱ－32 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

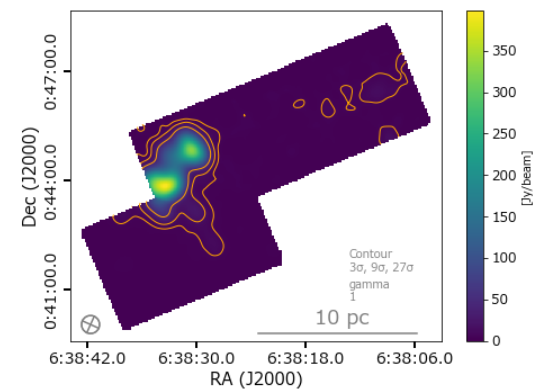


図 付録Ⅱ－34 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

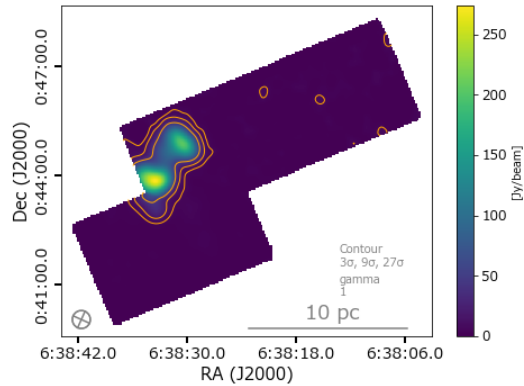


図 付録Ⅱ－31 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

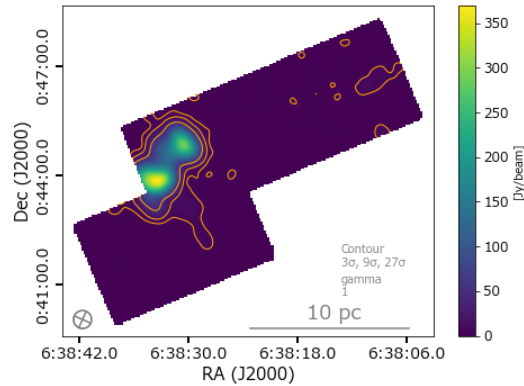


図 付録Ⅱ－33 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

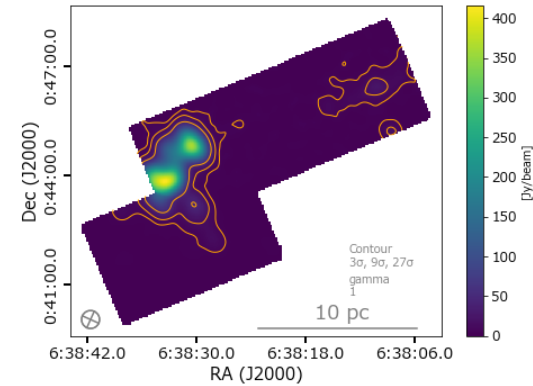


図 付録Ⅱ－35 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

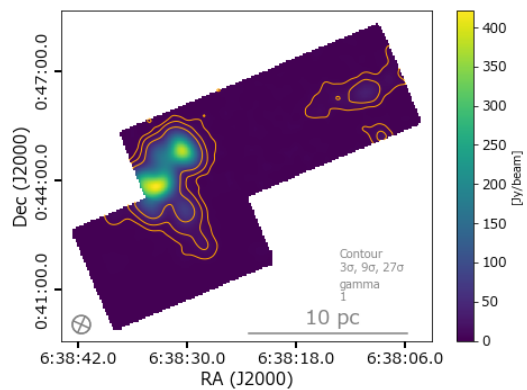


図 付録Ⅱ－36 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

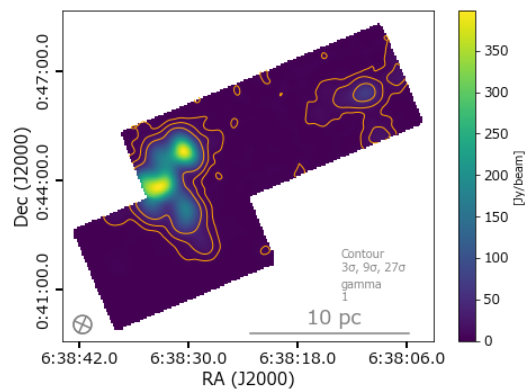


図 付録Ⅱ－38 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

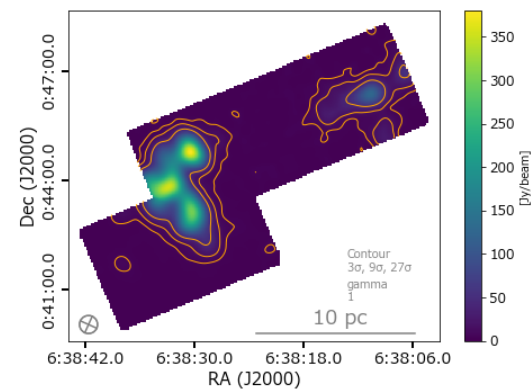


図 付録Ⅱ－40 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

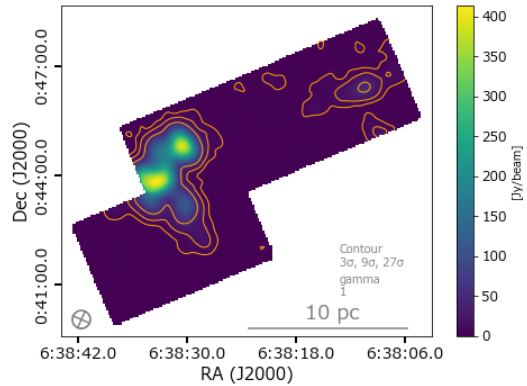


図 付録Ⅱ－37 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

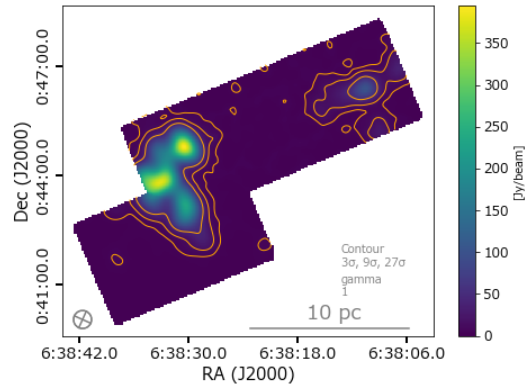


図 付録Ⅱ－39 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

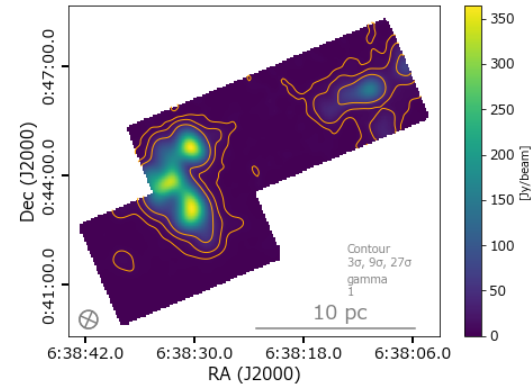


図 付録Ⅱ－41 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

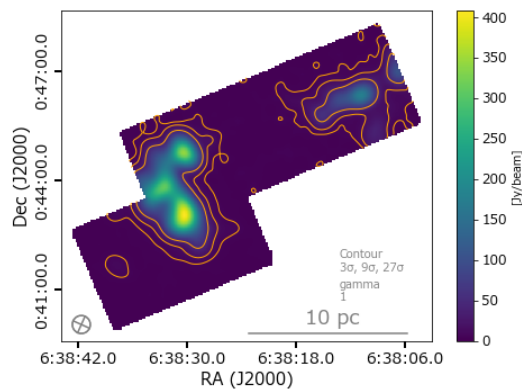


図 付録Ⅱ－42 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

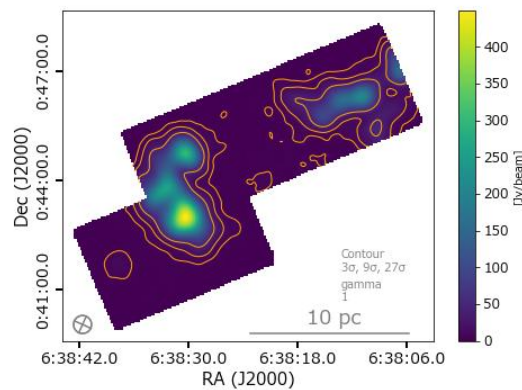


図 付録Ⅱ－44 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

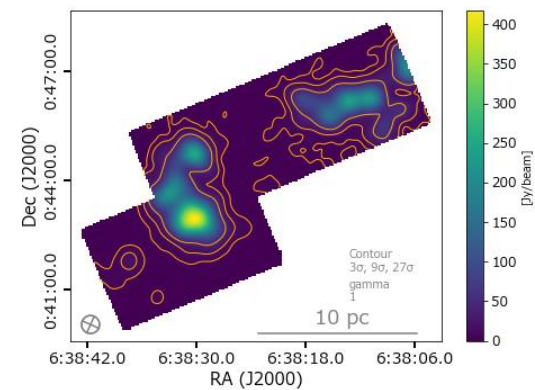


図 付録Ⅱ－46 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

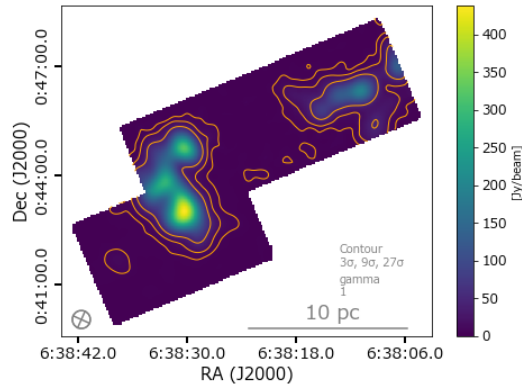


図 付録Ⅱ－43 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

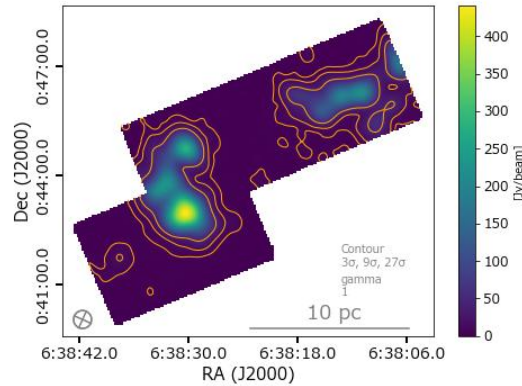


図 付録Ⅱ－45 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

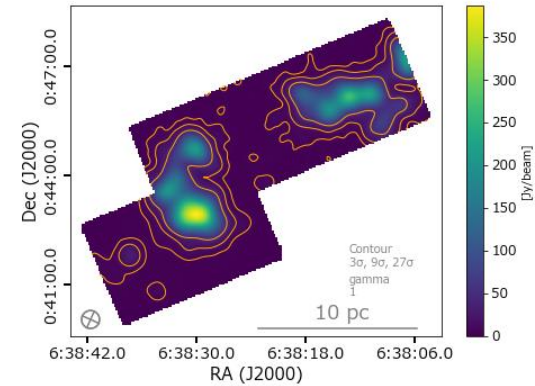


図 付録Ⅱ－47 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

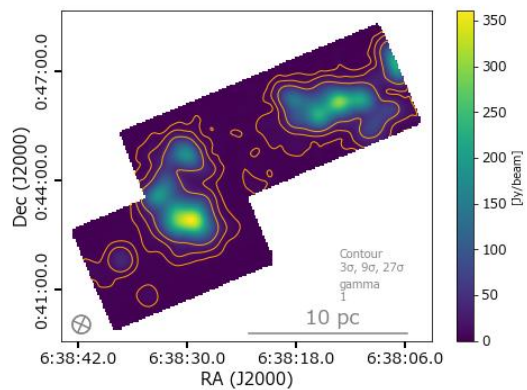


図 付録Ⅱ－48 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

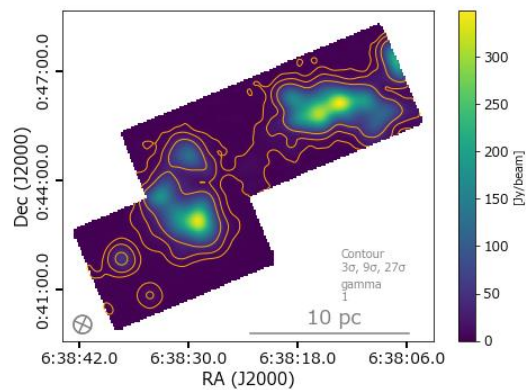


図 付録Ⅱ－50 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

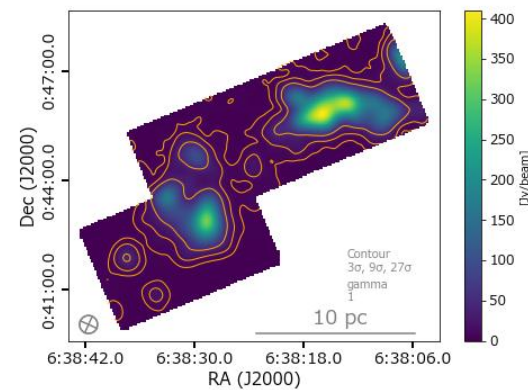


図 付録Ⅱ－52 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

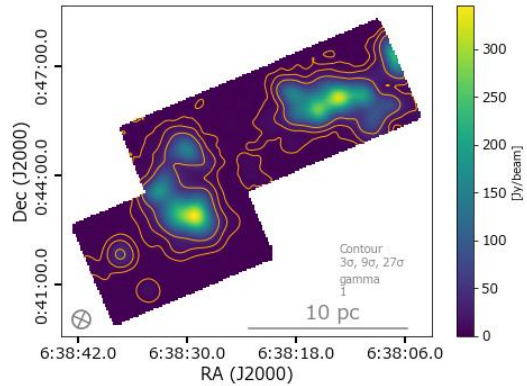


図 付録Ⅱ－49 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

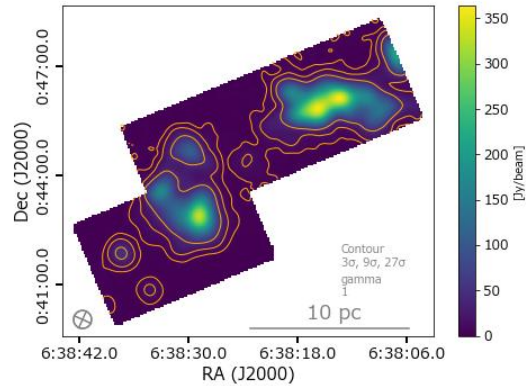


図 付録Ⅱ－51 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

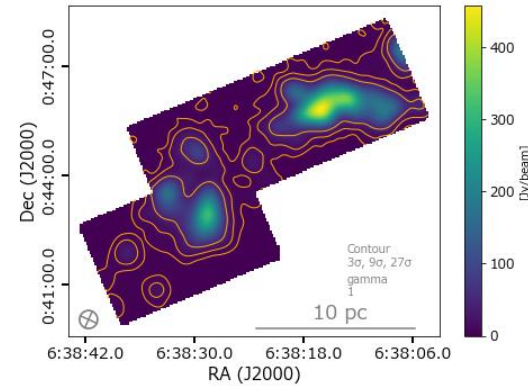


図 付録Ⅱ－53 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

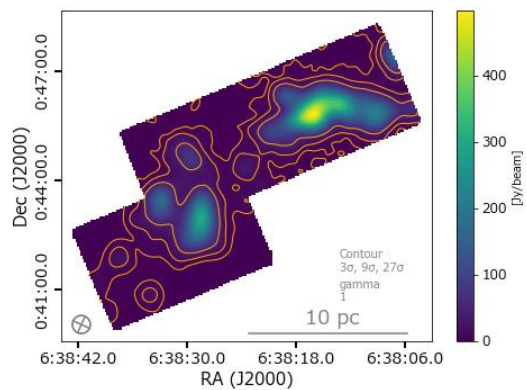


図 付録Ⅱ－54 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

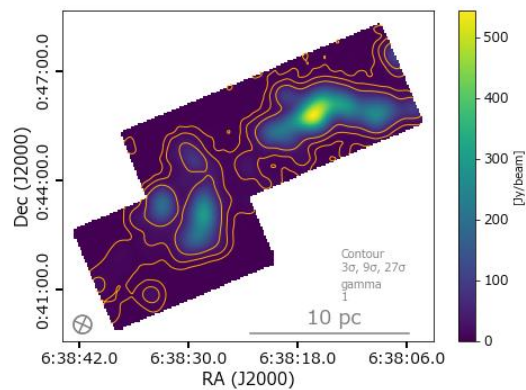


図 付録Ⅱ－56 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

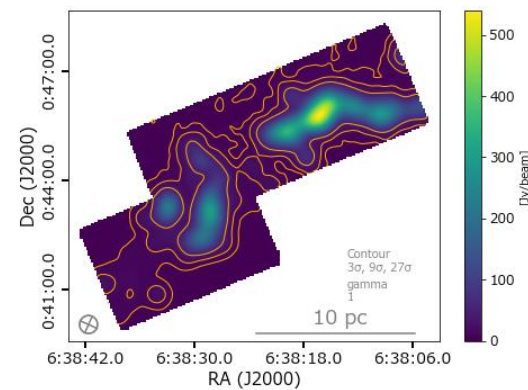


図 付録Ⅱ－58 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

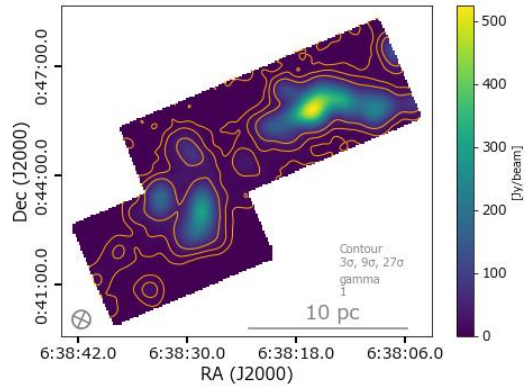


図 付録Ⅱ－55 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

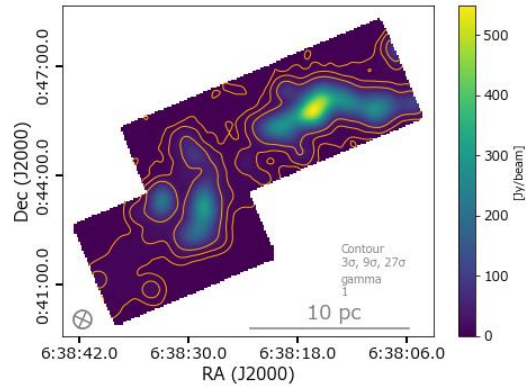


図 付録Ⅱ－57 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

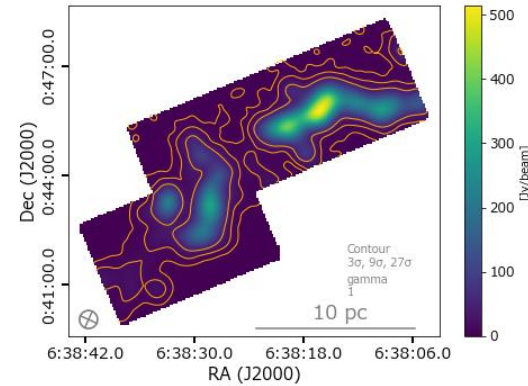


図 付録Ⅱ－59 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

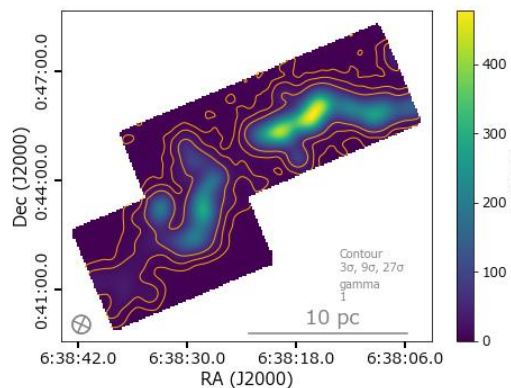


図 附録II-60 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

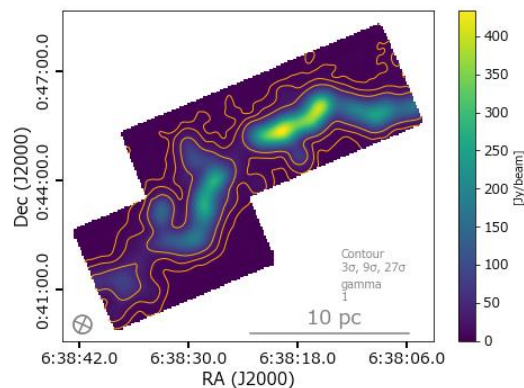


図 附録II-62 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

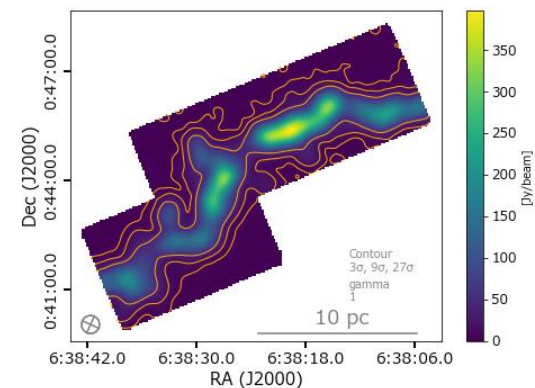


図 附録II-64 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

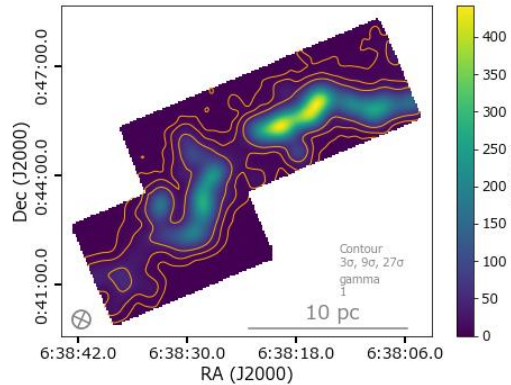


図 附録II-61 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

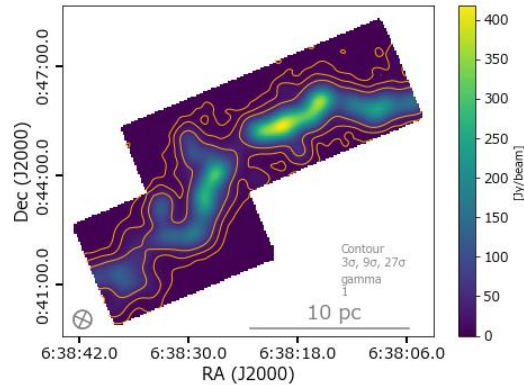


図 附録II-63 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

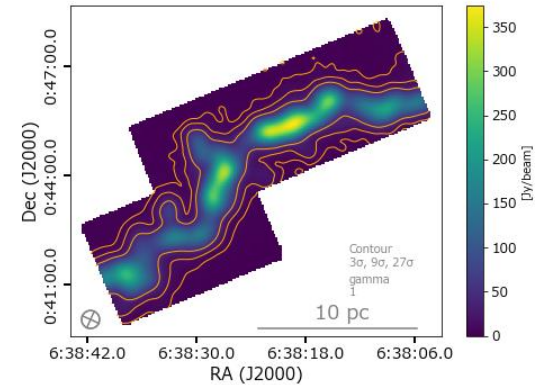


図 附録II-65 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

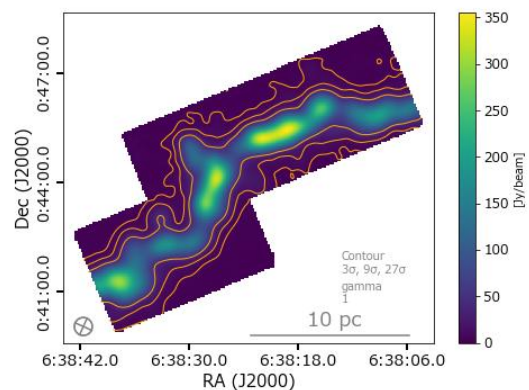


図 付録Ⅱ－66 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

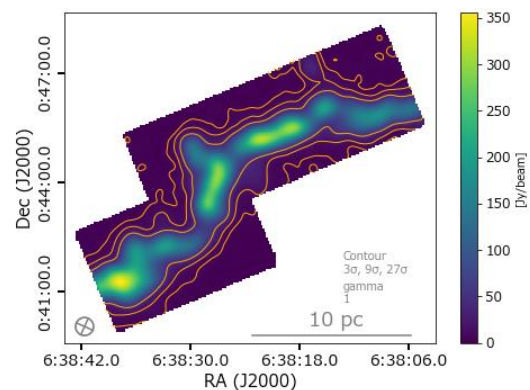


図 付録Ⅱ－68 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

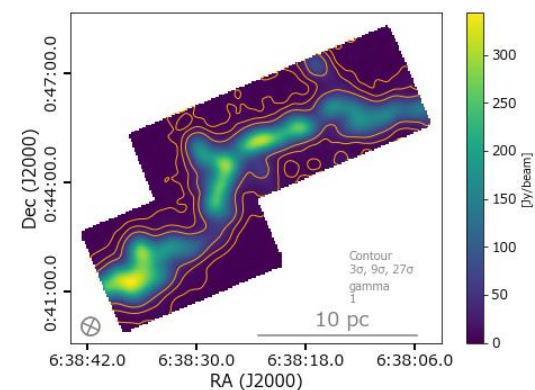


図 付録Ⅱ－70 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

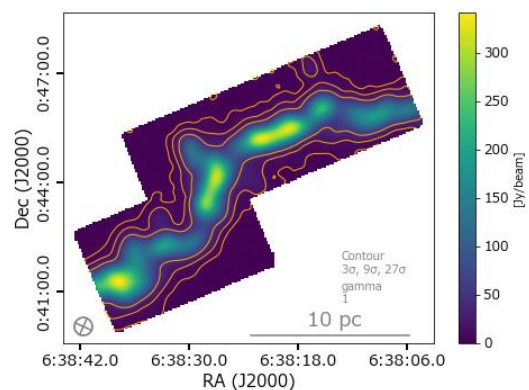


図 付録Ⅱ－67 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

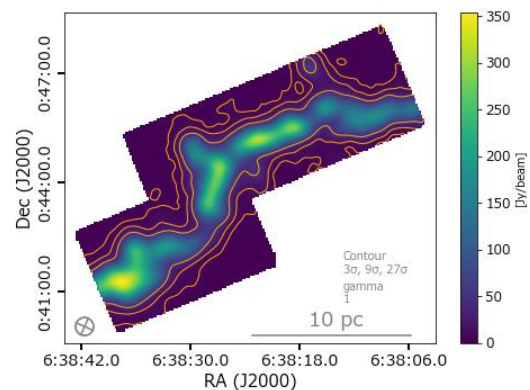


図 付録Ⅱ－69 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

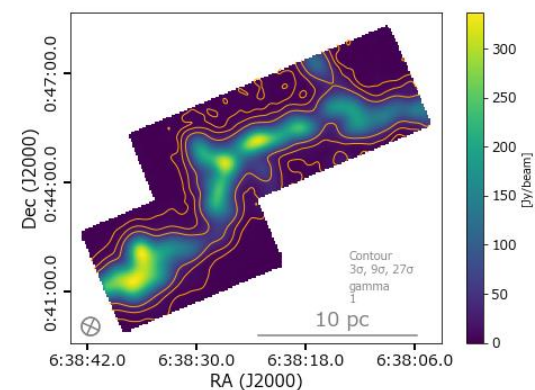


図 付録Ⅱ－71 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

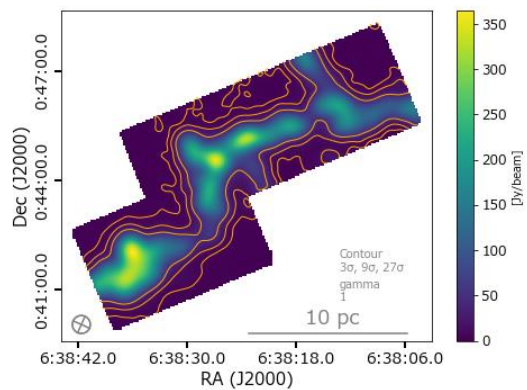


図 付録Ⅱ－72 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

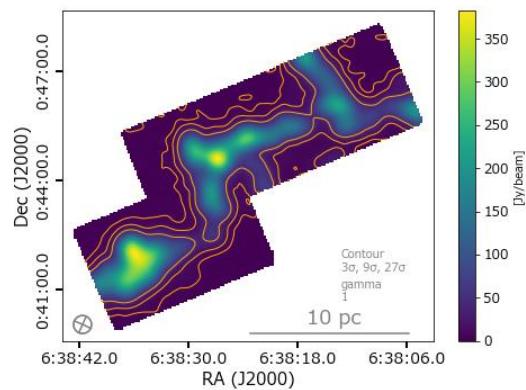


図 付録Ⅱ－74 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

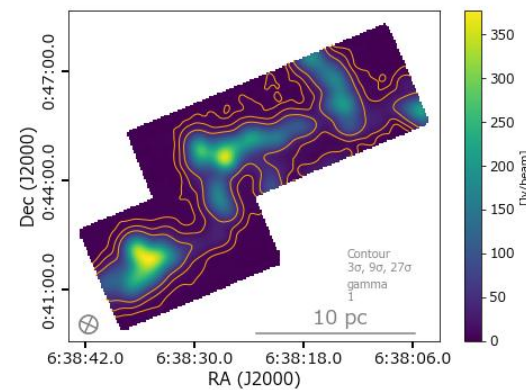


図 付録Ⅱ－76 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

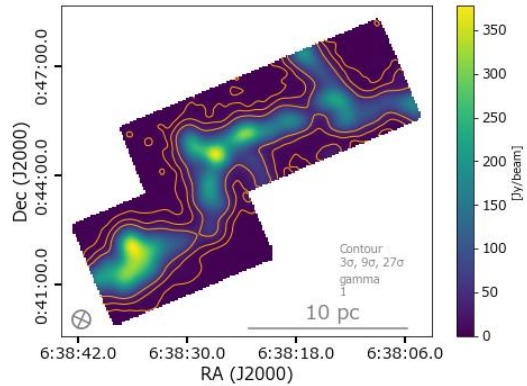


図 付録Ⅱ－73 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

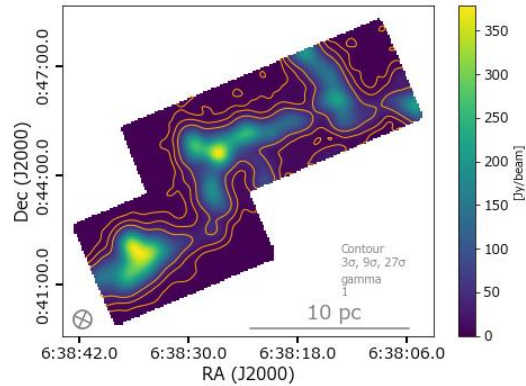


図 付録Ⅱ－75 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

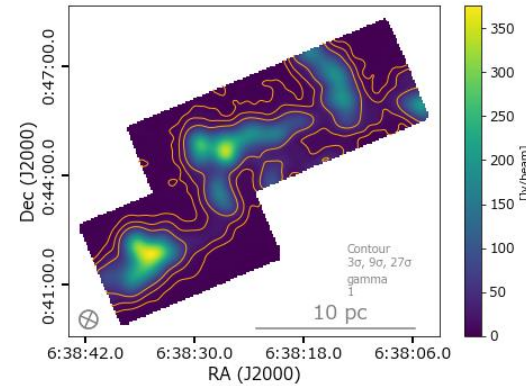


図 付録Ⅱ－77 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331 \text{ km/s}$

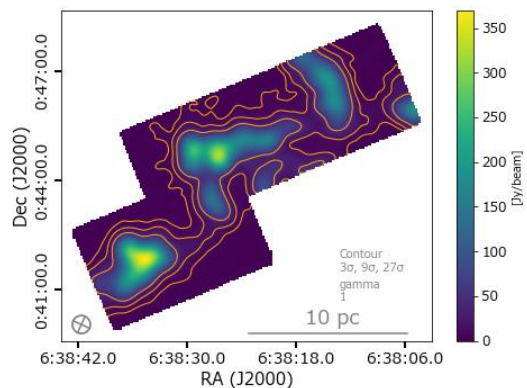


図 付録Ⅱ－78 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

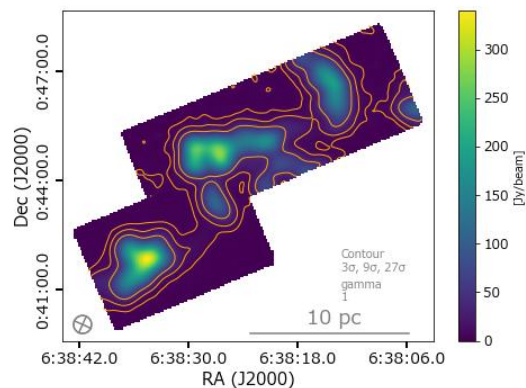


図 付録Ⅱ－80 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

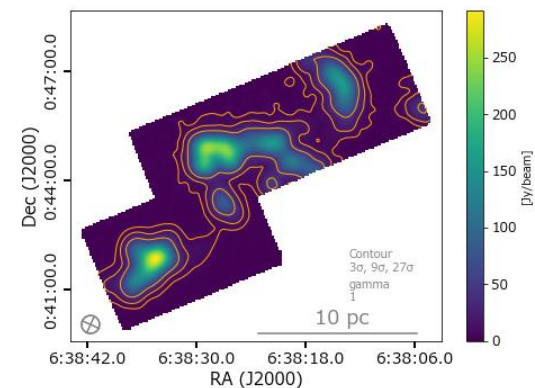


図 付録Ⅱ－82 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

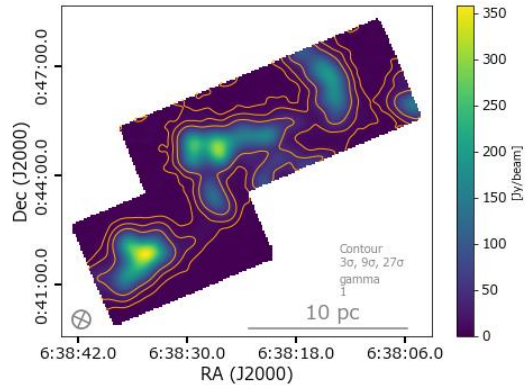


図 付録Ⅱ－79 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

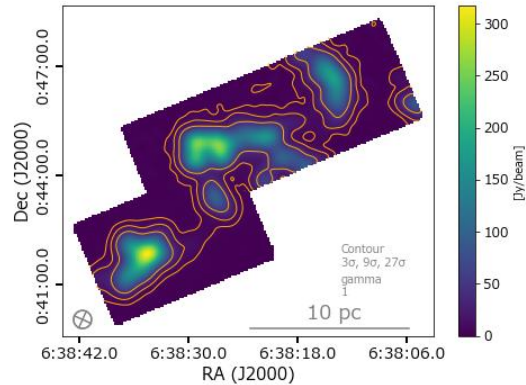


図 付録Ⅱ－81 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

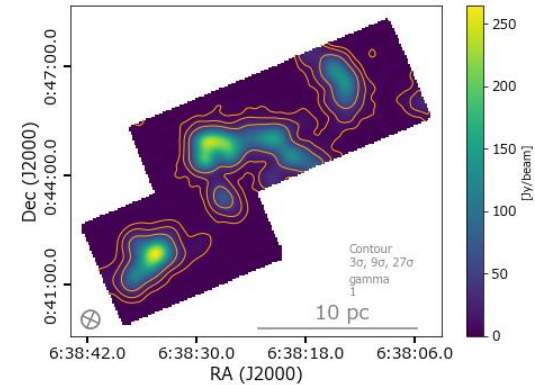


図 付録Ⅱ－83 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

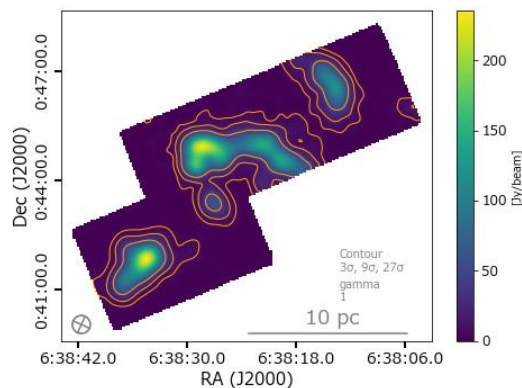


図 付録Ⅱ－84 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

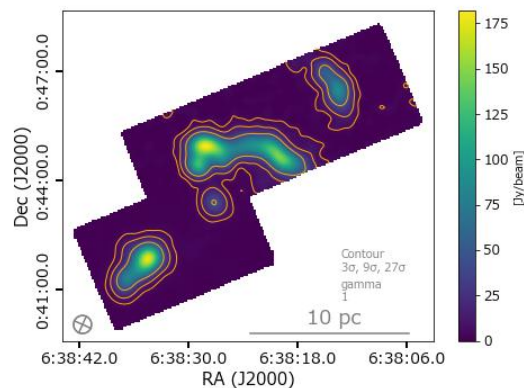


図 付録Ⅱ－86 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

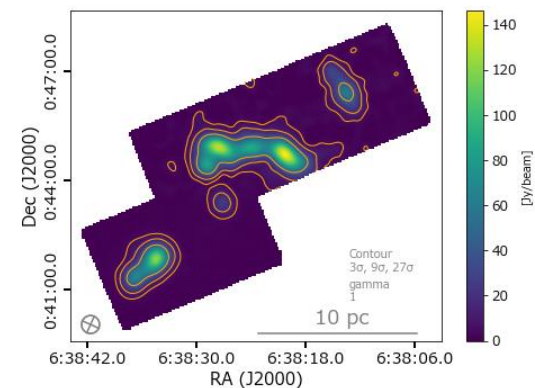


図 付録Ⅱ－88 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

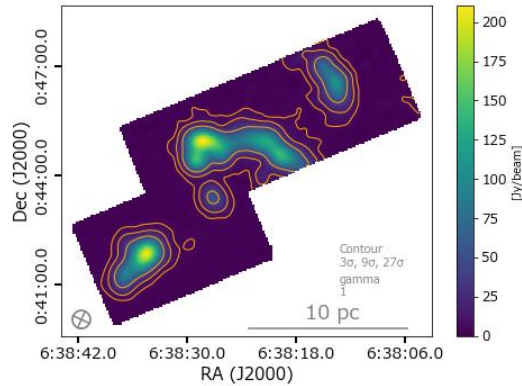


図 付録Ⅱ－85 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

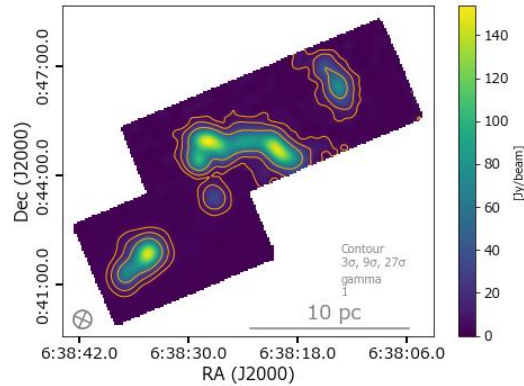


図 付録Ⅱ－87 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

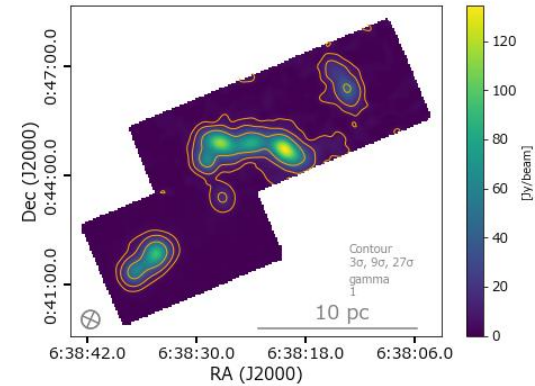


図 付録Ⅱ－89 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

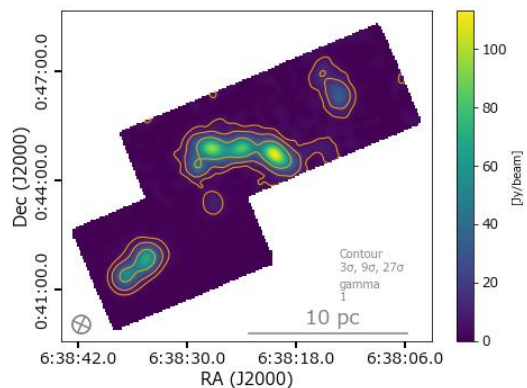


図 付録Ⅱ－90 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

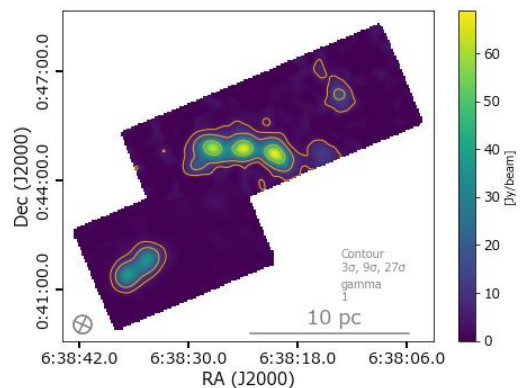


図 付録Ⅱ－92 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

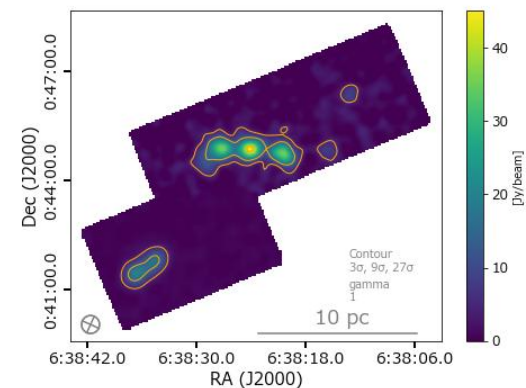


図 付録Ⅱ－94 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

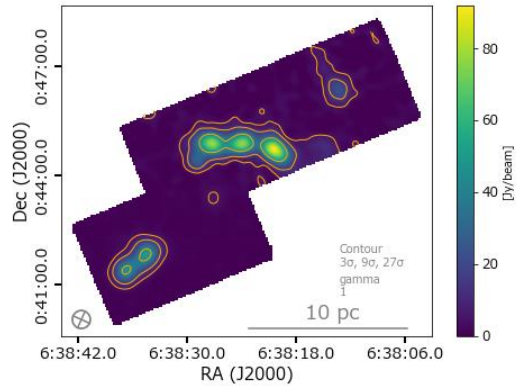


図 付録Ⅱ－91 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

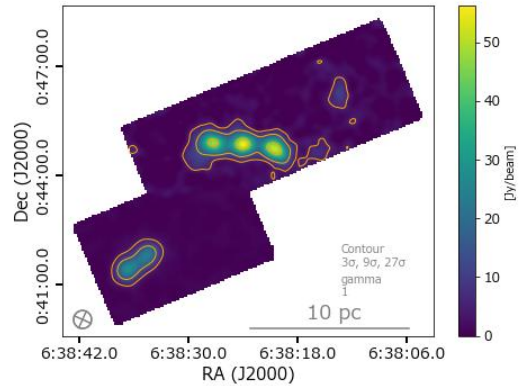


図 付録Ⅱ－93 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

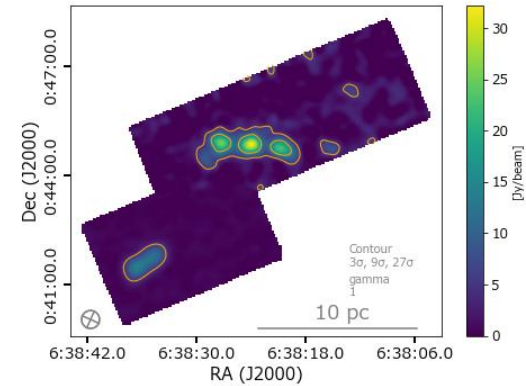


図 付録Ⅱ－95 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

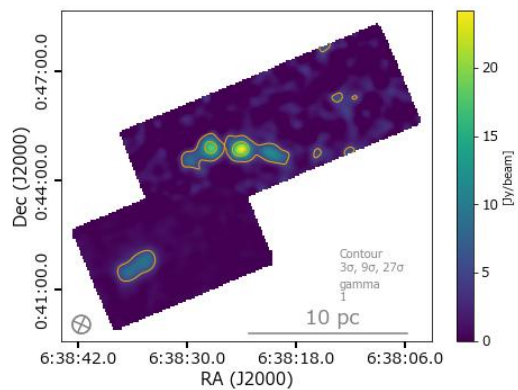


図 付録Ⅱ－96 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

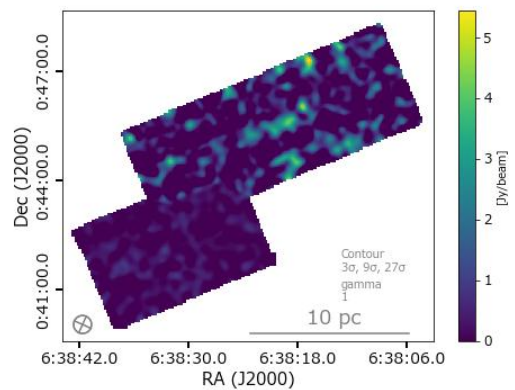


図 付録Ⅱ－98 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

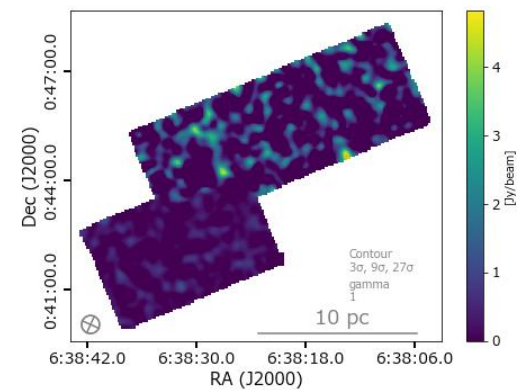


図 付録Ⅱ－100 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

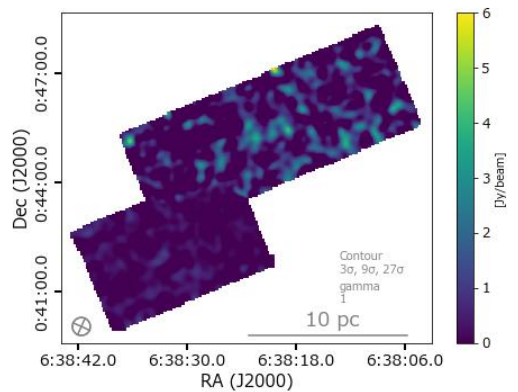


図 付録Ⅱ－97 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

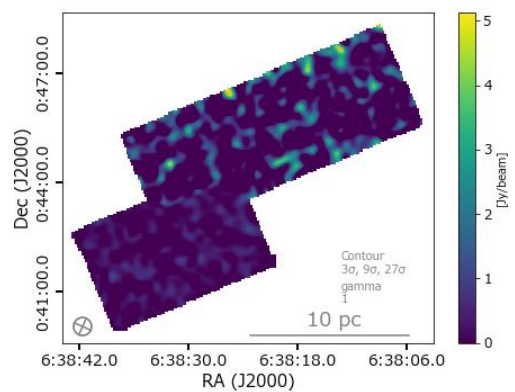


図 付録Ⅱ－99 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

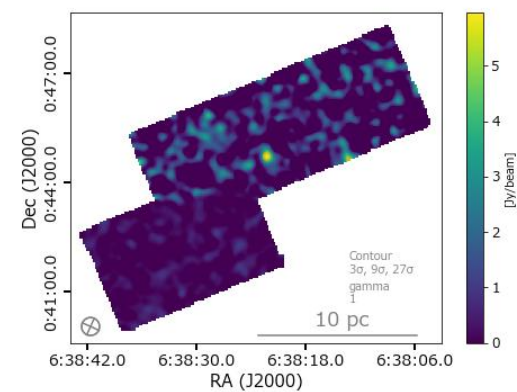


図 付録Ⅱ－101 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

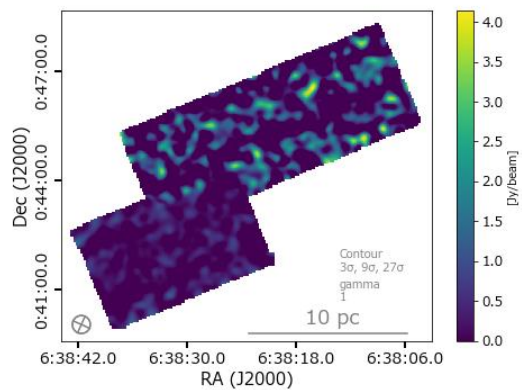


図 付録 II - 102 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

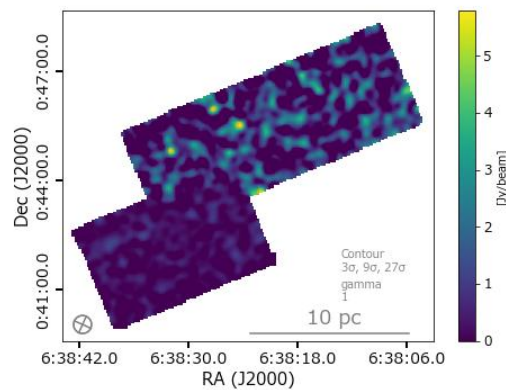


図 付録 II - 104 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

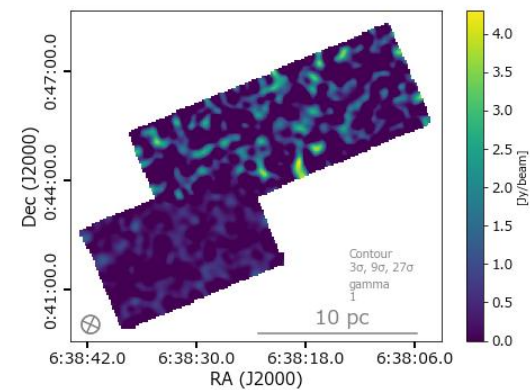


図 付録 II - 106 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

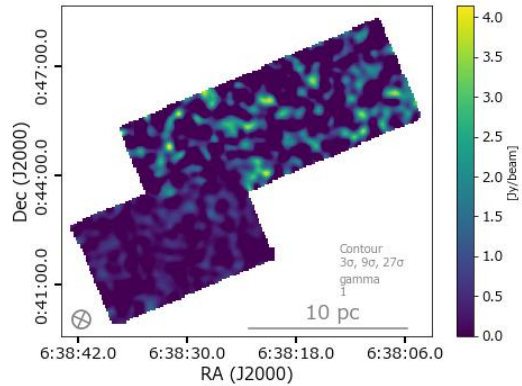


図 付録 II - 103 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

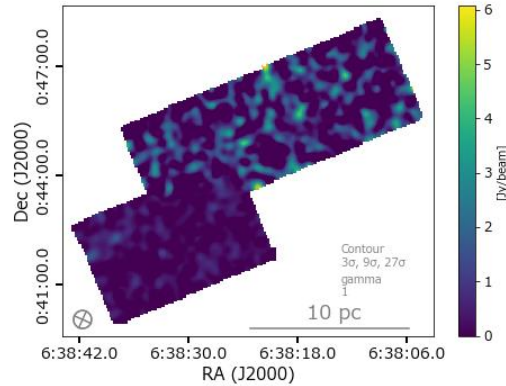


図 付録 II - 105 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

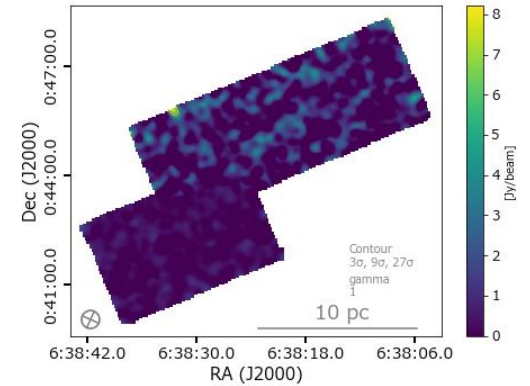


図 付録 II - 107 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

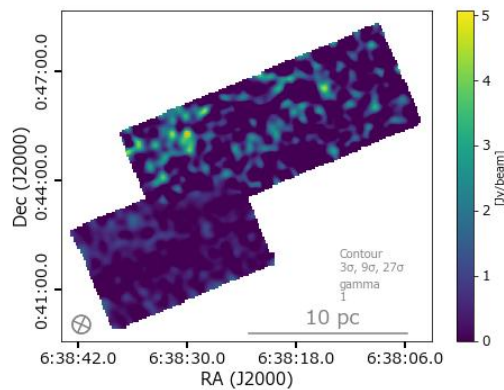


図 付録 II - 108 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

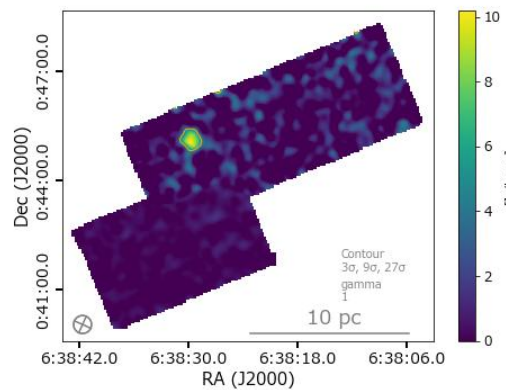


図 付録 II - 110 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

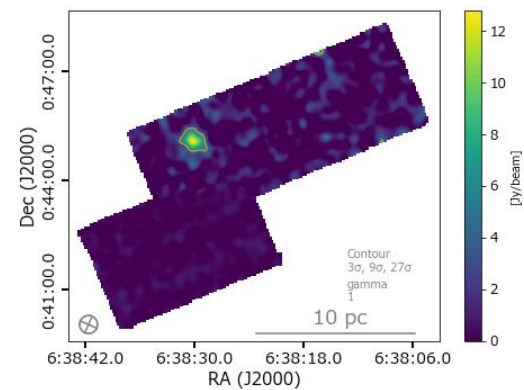


図 付録 II - 112 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

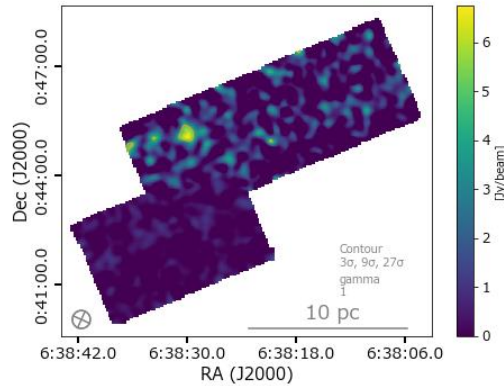


図 付録 II - 109 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

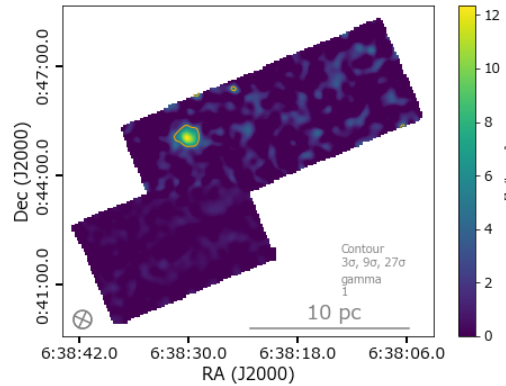


図 付録 II - 111 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

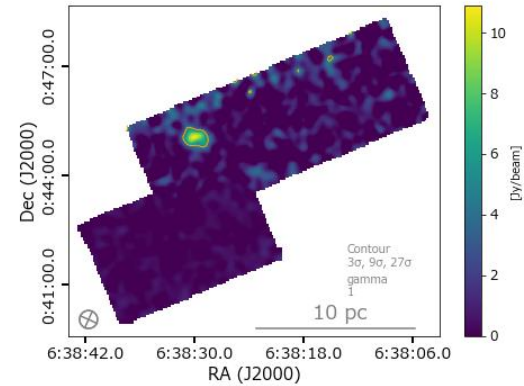


図 付録 II - 113 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

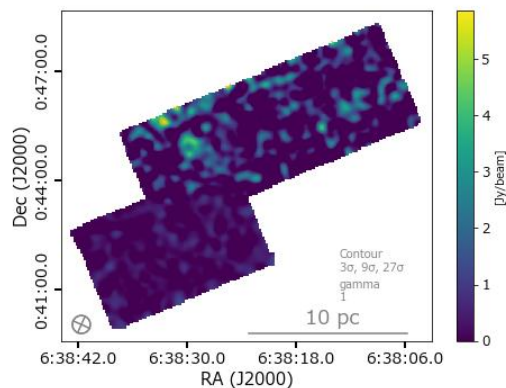


図 付録 II - 114 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

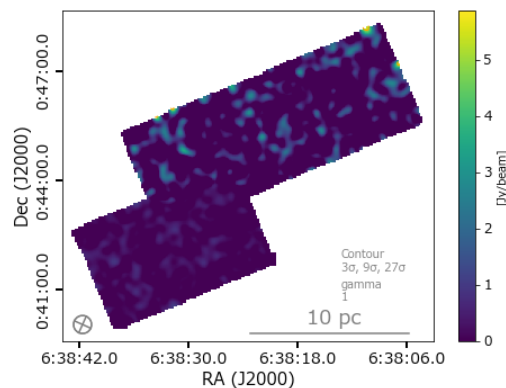


図 付録 II - 116 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

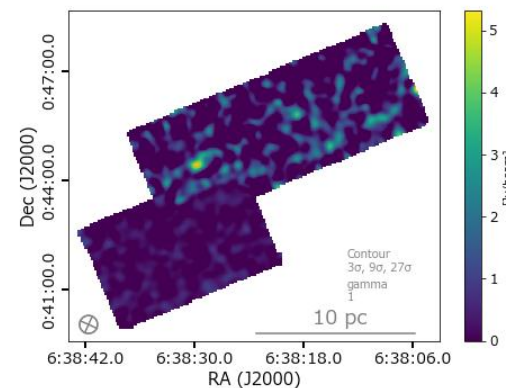


図 付録 II - 118 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

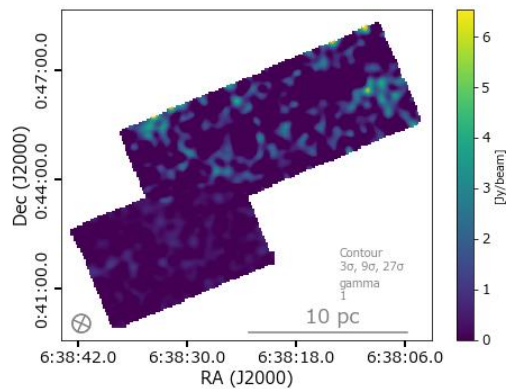


図 付録 II - 115 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

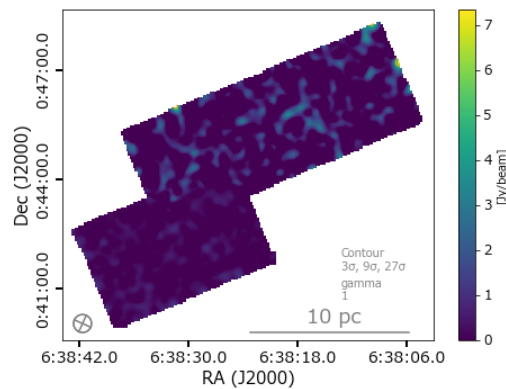


図 付録 II - 117 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

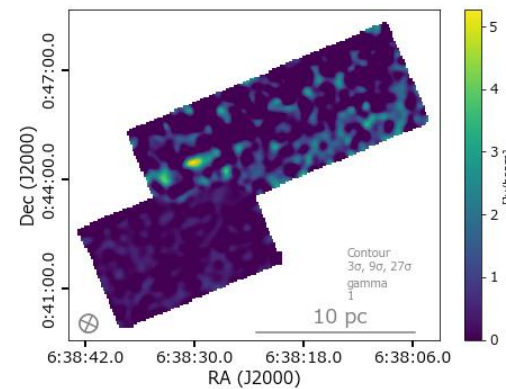


図 付録 II - 119 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

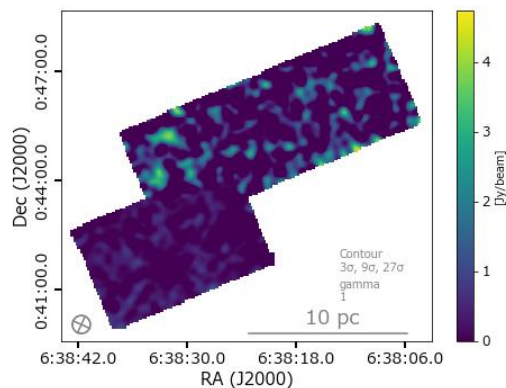


図 付録 II - 120 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

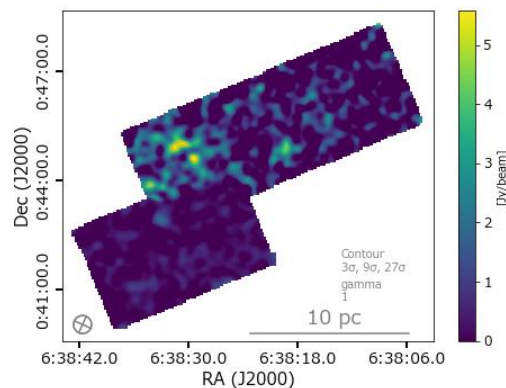


図 付録 II - 122 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

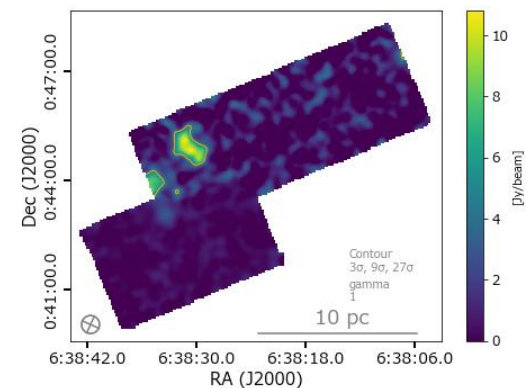


図 付録 II - 124 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

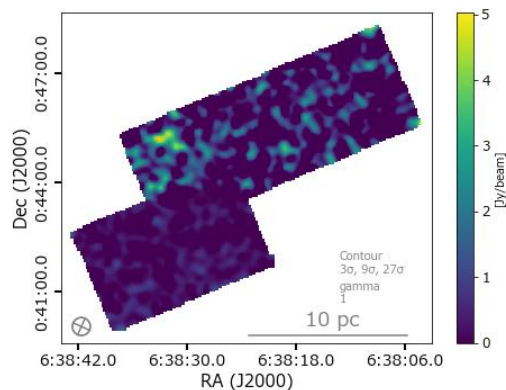


図 付録 II - 121 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

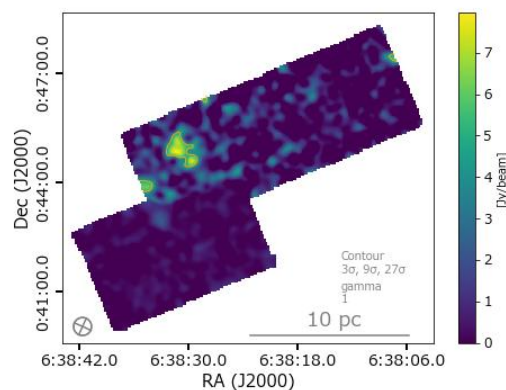


図 付録 II - 123 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

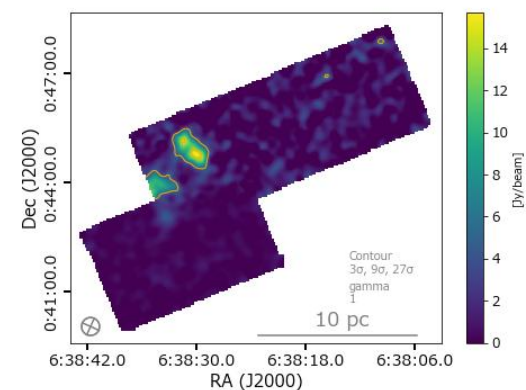


図 付録 II - 125 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

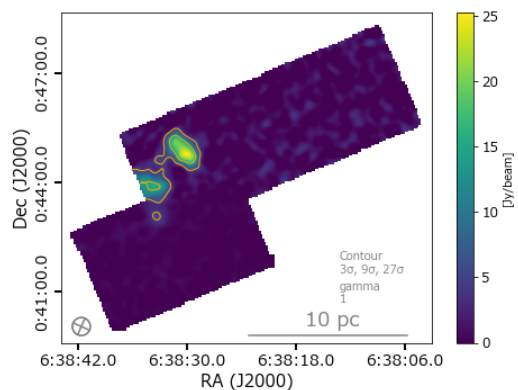


図 付録 II - 126 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

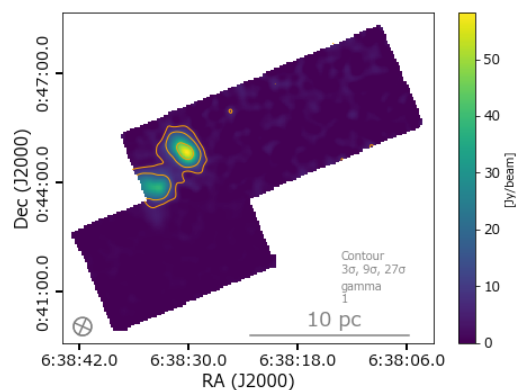


図 付録 II - 128 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

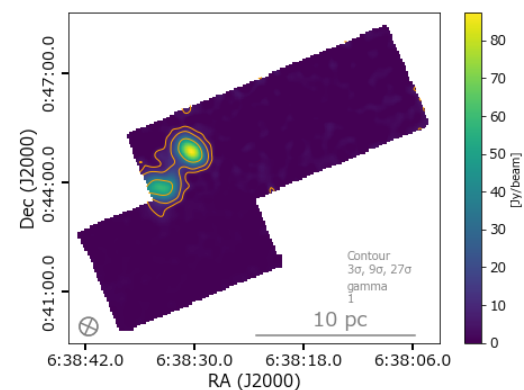


図 付録 II - 130 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

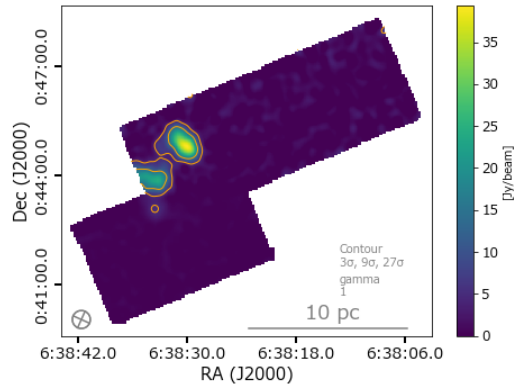


図 付録 II - 127 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

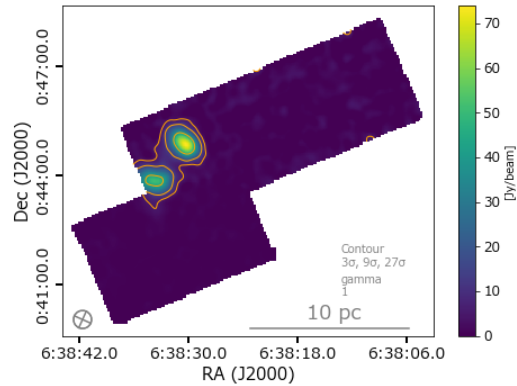


図 付録 II - 129 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

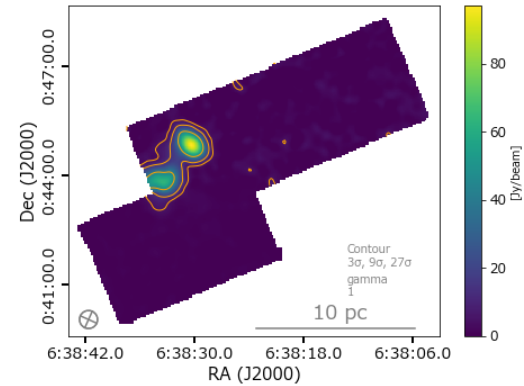


図 付録 II - 131 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

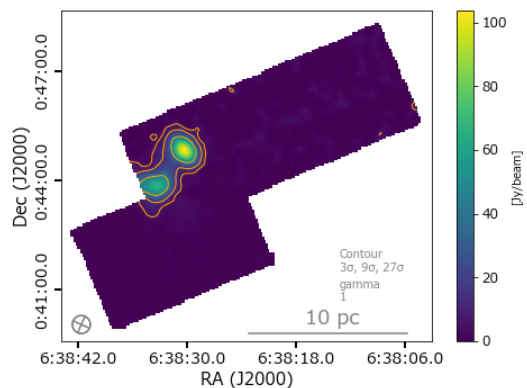


図 付録Ⅱ－132 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

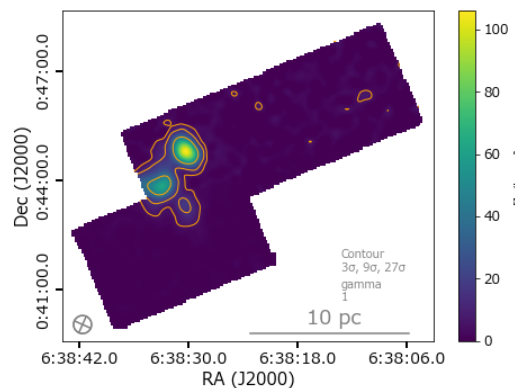


図 付録Ⅱ－134 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

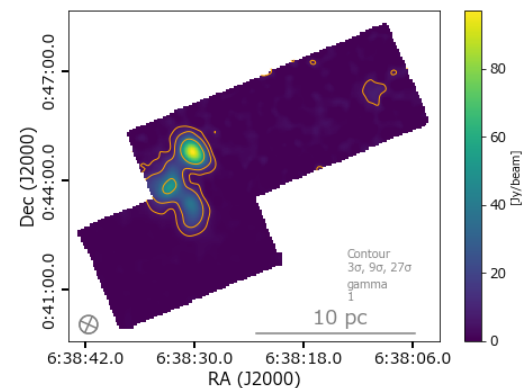


図 付録Ⅱ－136 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

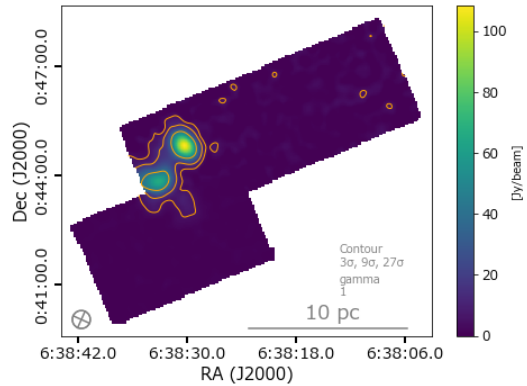


図 付録Ⅱ－133 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

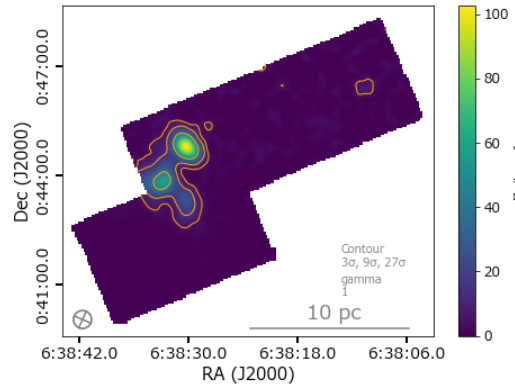


図 付録Ⅱ－135 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

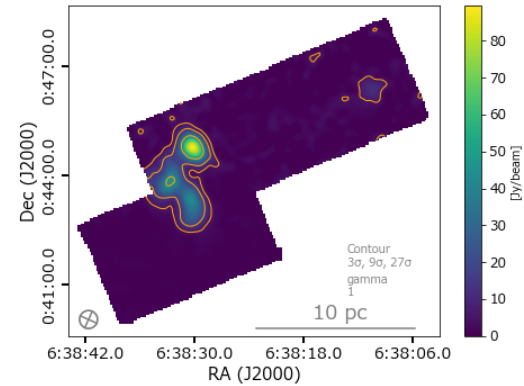


図 付録Ⅱ－137 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

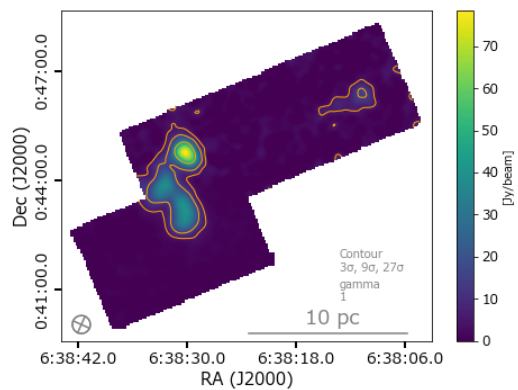


図 付録Ⅱ－138 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

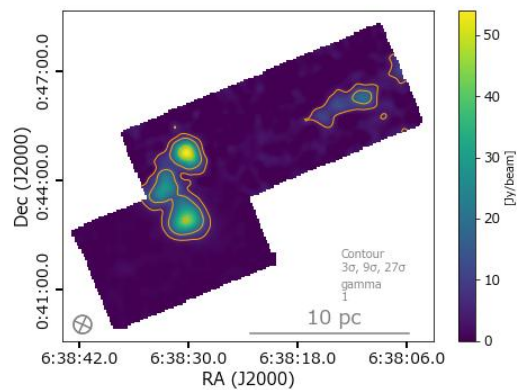


図 付録Ⅱ－140 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

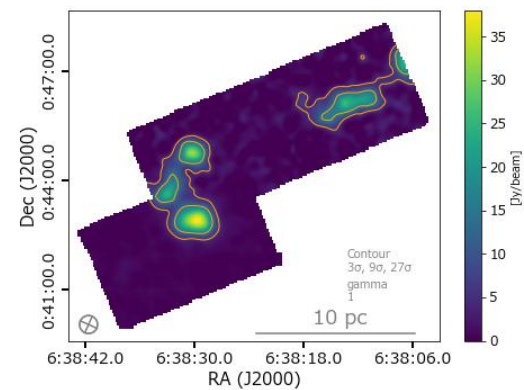


図 付録Ⅱ－142 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

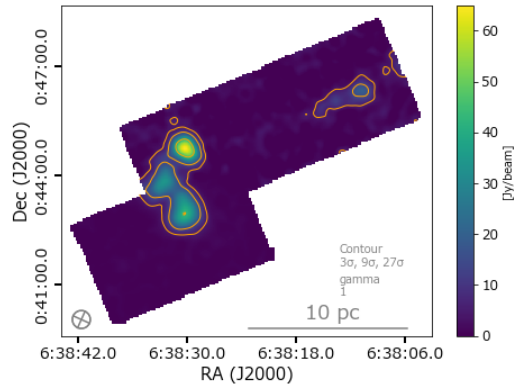


図 付録Ⅱ－139 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

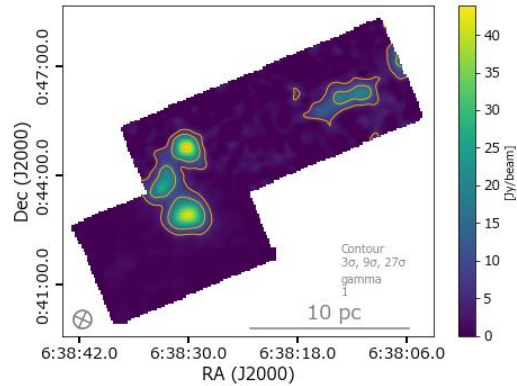


図 付録Ⅱ－141 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

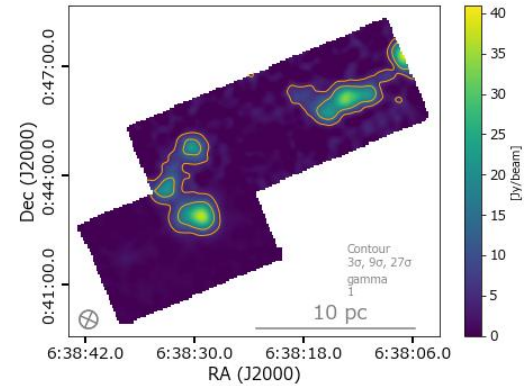


図 付録Ⅱ－143 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

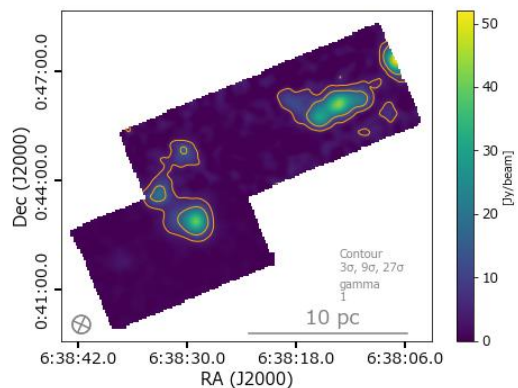


図 付録Ⅱ－144 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

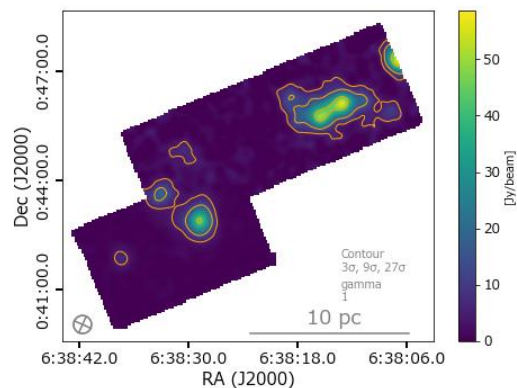


図 付録Ⅱ－146 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

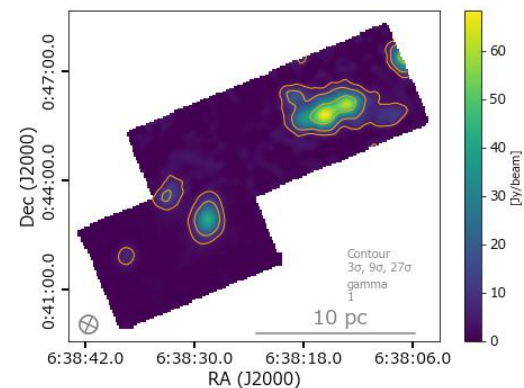


図 付録Ⅱ－148 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

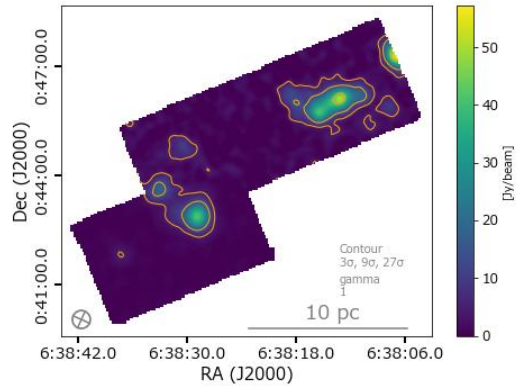


図 付録Ⅱ－145 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

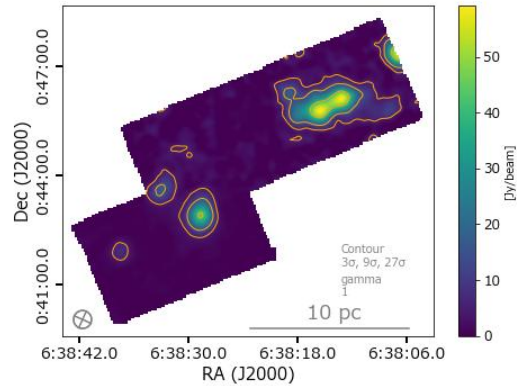


図 付録Ⅱ－147 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

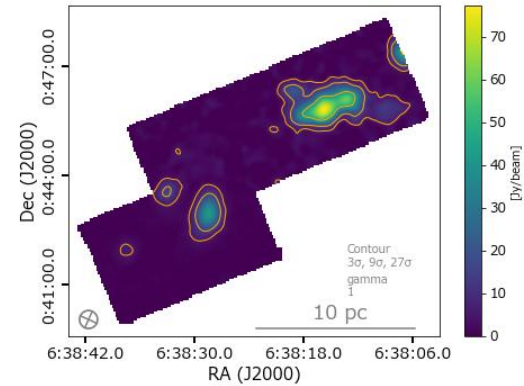


図 付録Ⅱ－149 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

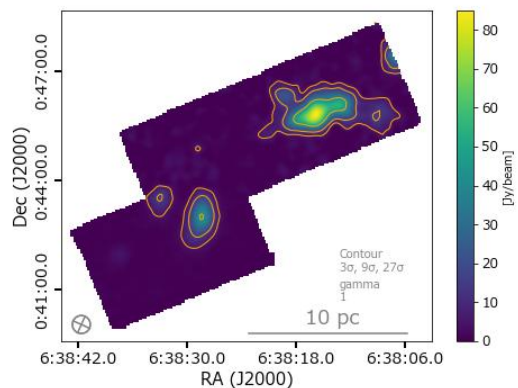


図 付録Ⅱ－150 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

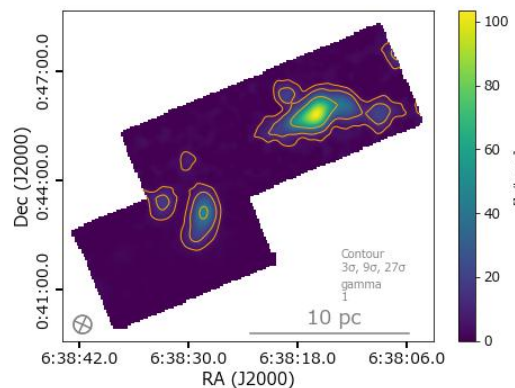


図 付録Ⅱ－152 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

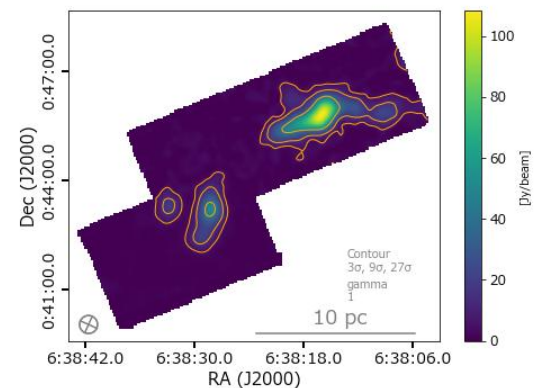


図 付録Ⅱ－154 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

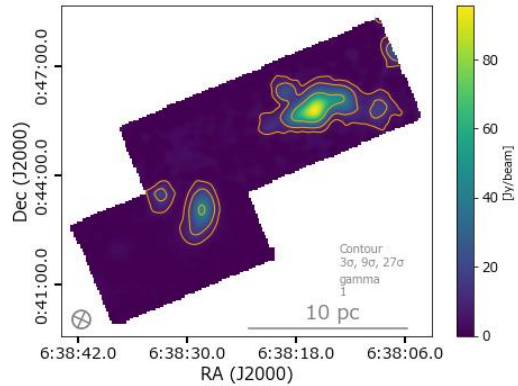


図 付録Ⅱ－151 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

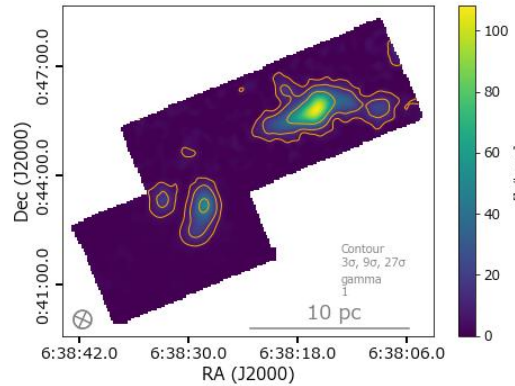


図 付録Ⅱ－153 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

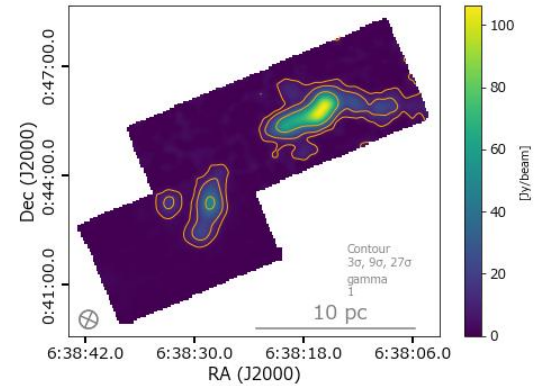


図 付録Ⅱ－155 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

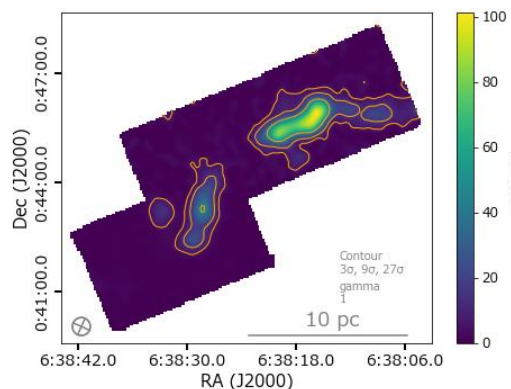


図 付録Ⅱ－156 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

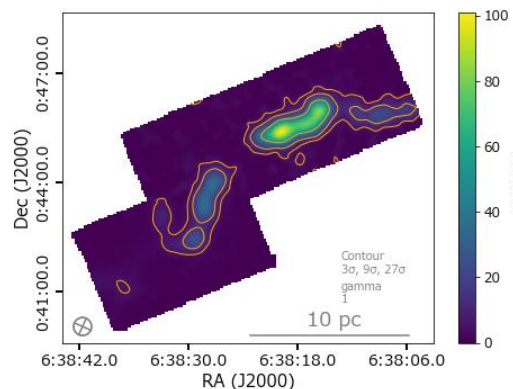


図 付録Ⅱ－158 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

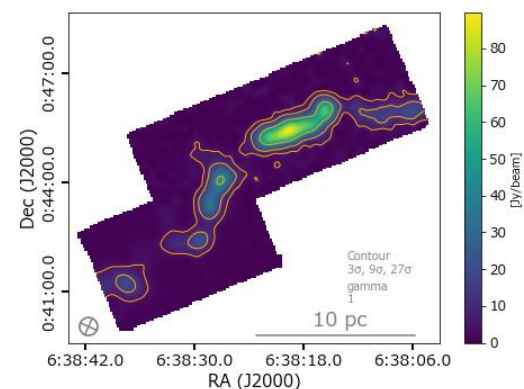


図 付録Ⅱ－160 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

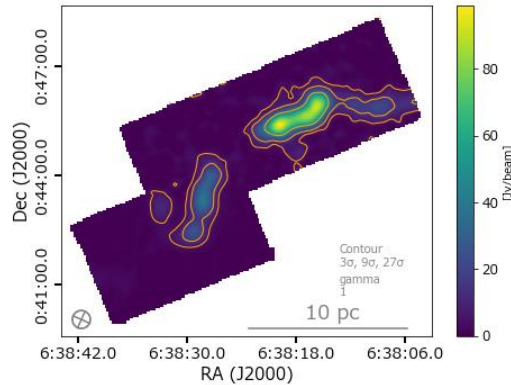


図 付録Ⅱ－157 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

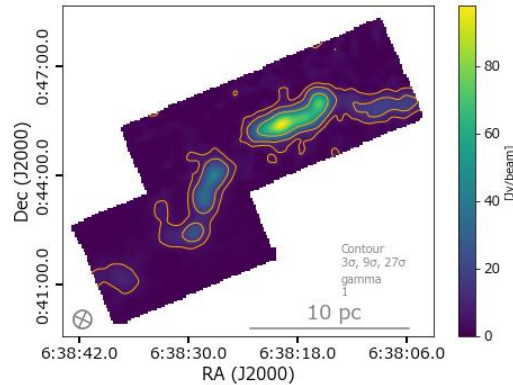


図 付録Ⅱ－159 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

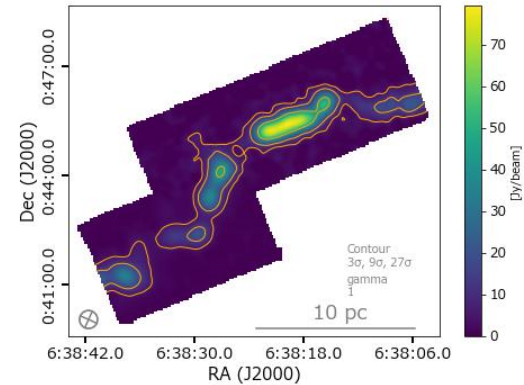


図 付録Ⅱ－161 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

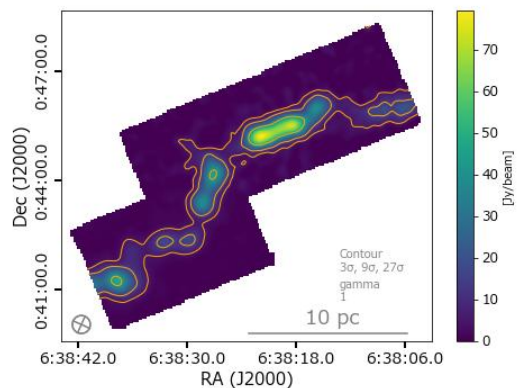


図 付録Ⅱ－162 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

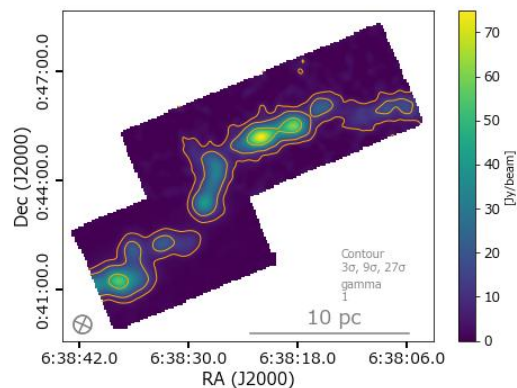


図 付録Ⅱ－164 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

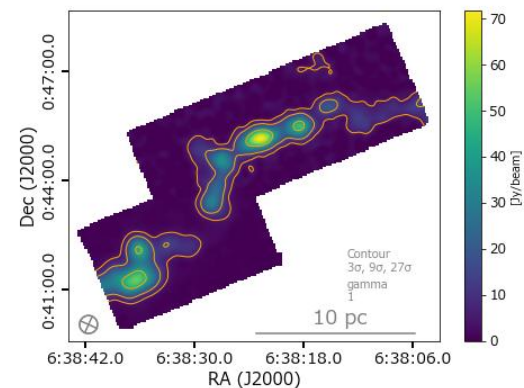


図 付録Ⅱ－166 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

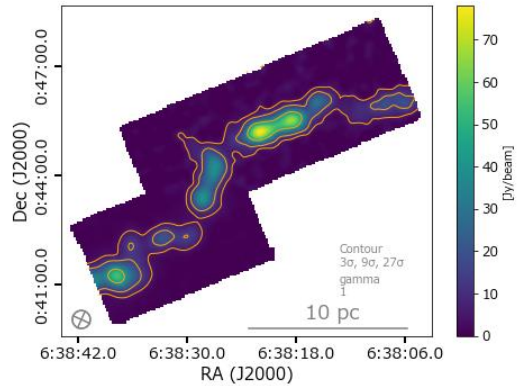


図 付録Ⅱ－163 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

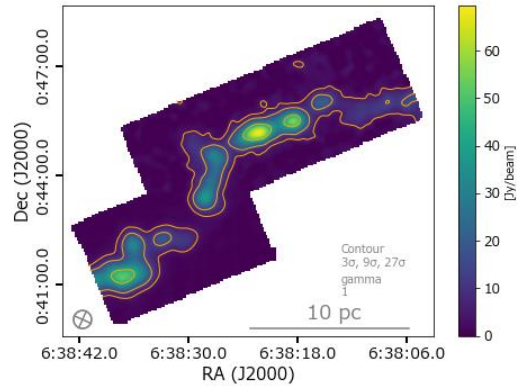


図 付録Ⅱ－165 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

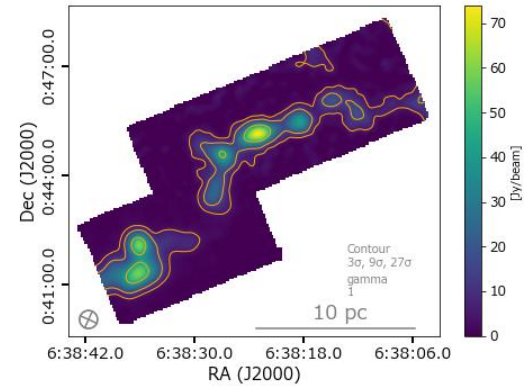


図 付録Ⅱ－167 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

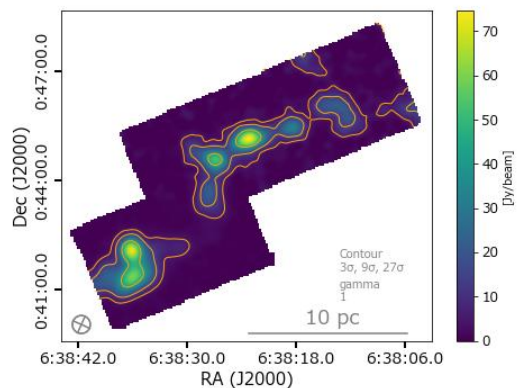


図 付録 II - 168 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

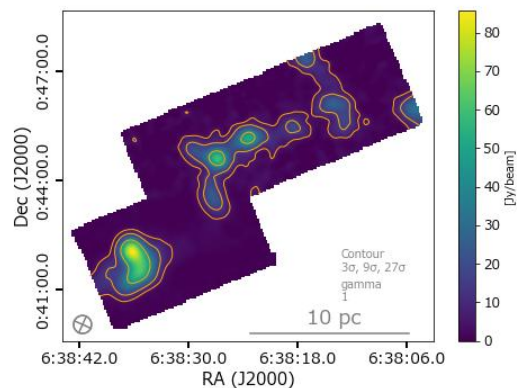


図 付録 II - 170 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

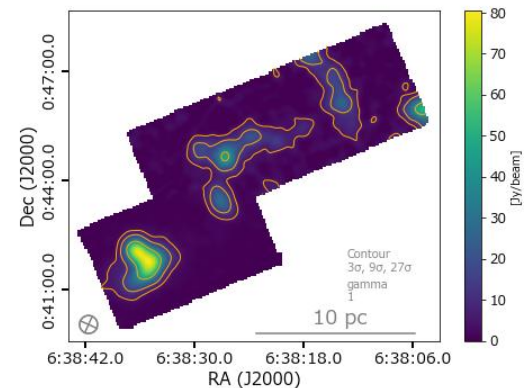


図 付録 II - 172 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

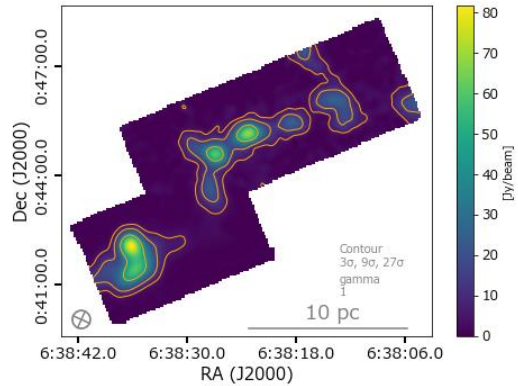


図 付録 II - 169 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

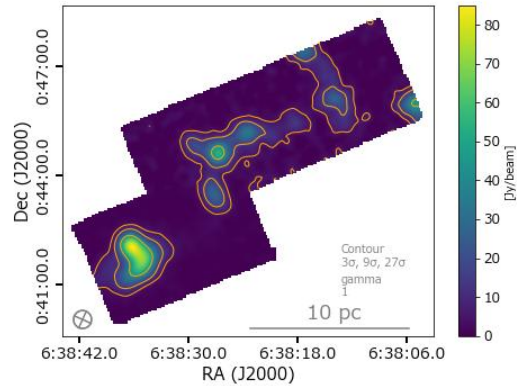


図 付録 II - 171 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

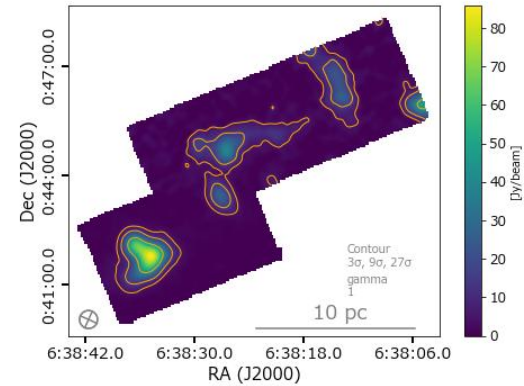


図 付録 II - 173 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

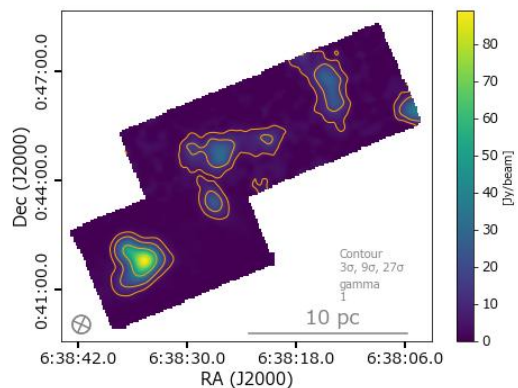


図 付録 II - 174 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

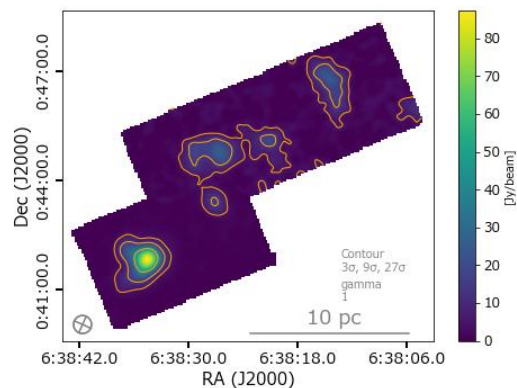


図 付録 II - 176 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

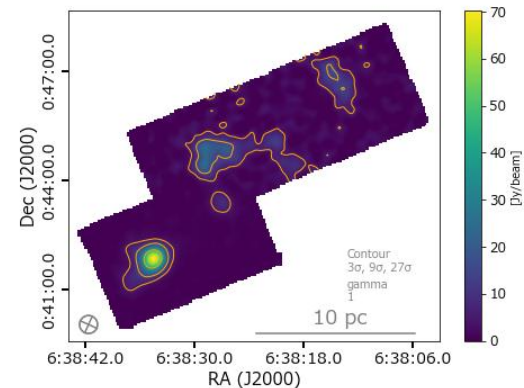


図 付録 II - 178 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

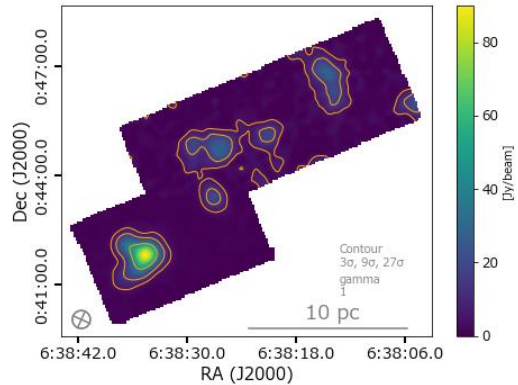


図 付録 II - 175 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

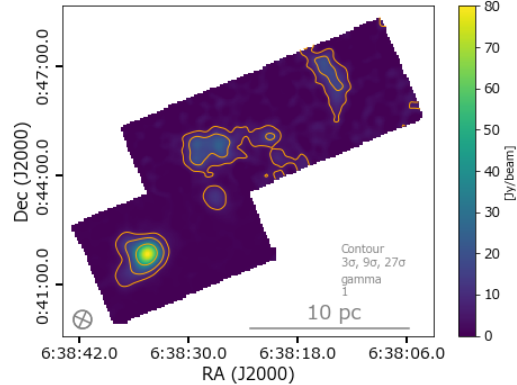


図 付録 II - 177 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

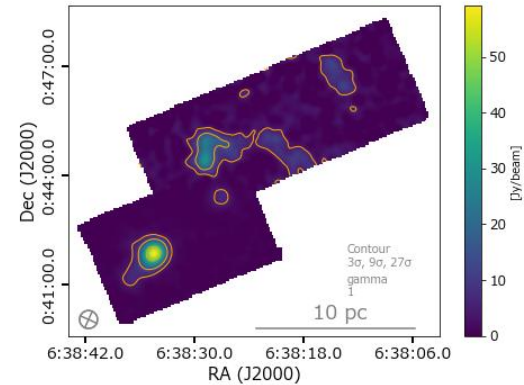


図 付録 II - 179 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

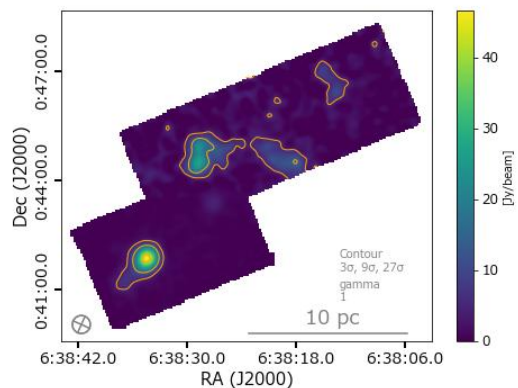


図 付録Ⅱ－180 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

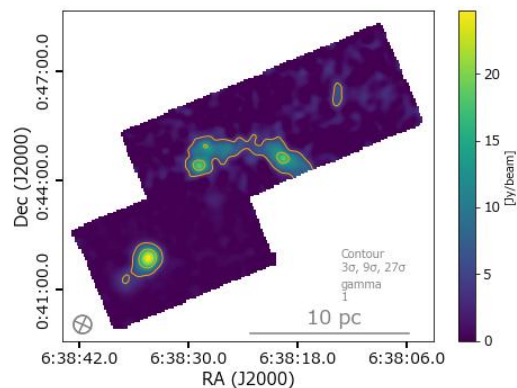


図 付録Ⅱ－182 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

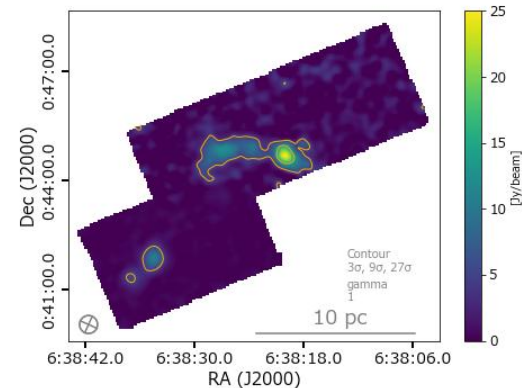


図 付録Ⅱ－184 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

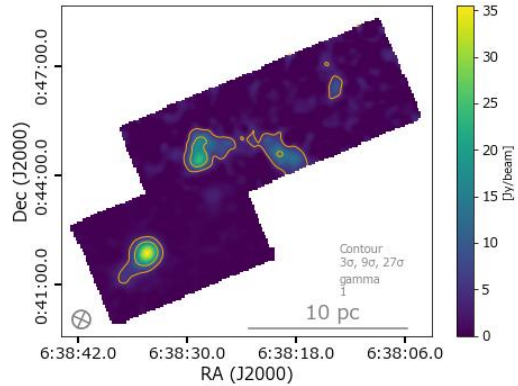


図 付録Ⅱ－181 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

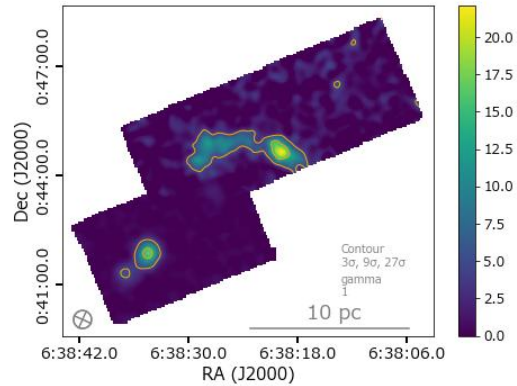


図 付録Ⅱ－183 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

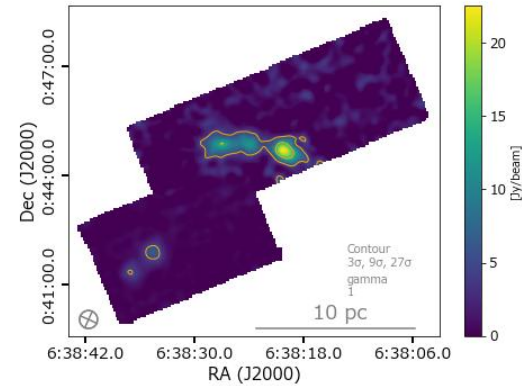


図 付録Ⅱ－185 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

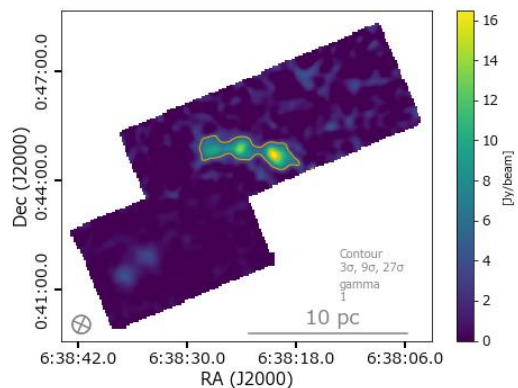


図 付録 II - 186 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

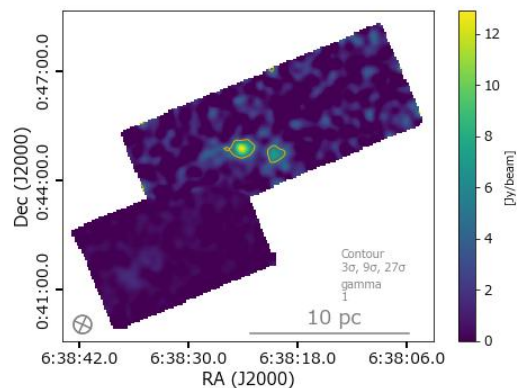


図 付録 II - 188 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

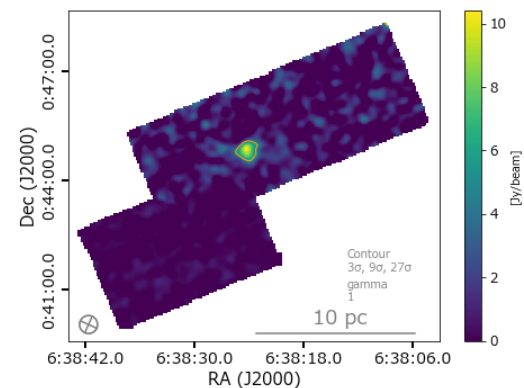


図 付録 II - 190 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

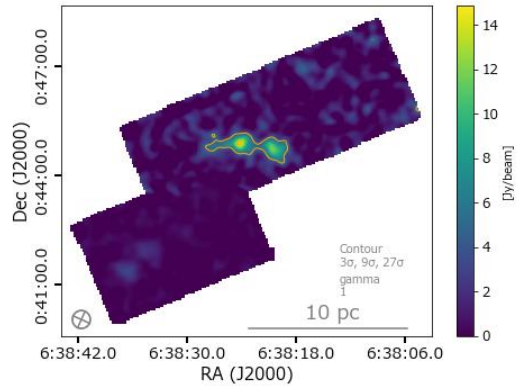


図 付録 II - 187 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

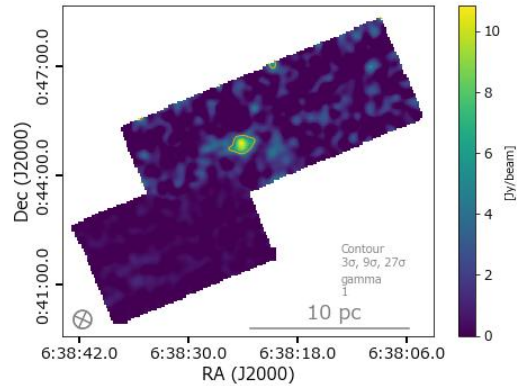


図 付録 II - 189 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

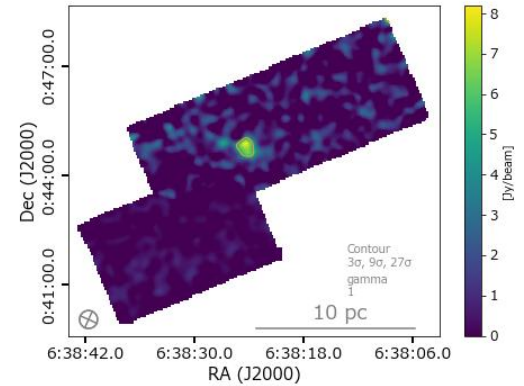


図 付録 II - 191 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

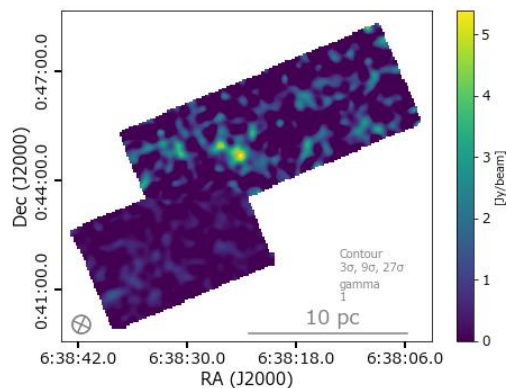


図 付録 II - 192 ^{13}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

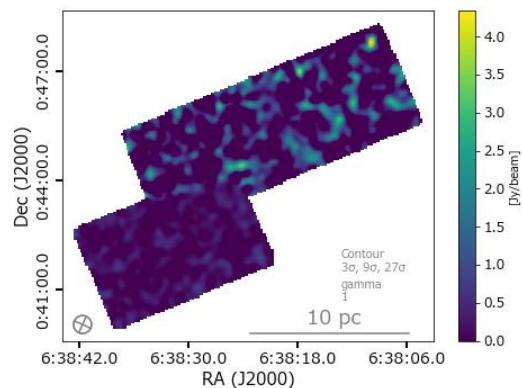


図 付録 II - 194 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

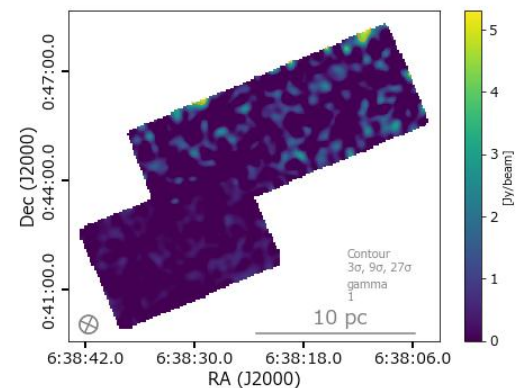


図 付録 II - 196 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

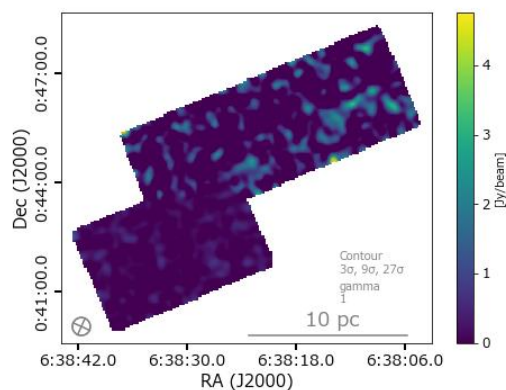


図 付録 II - 193 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

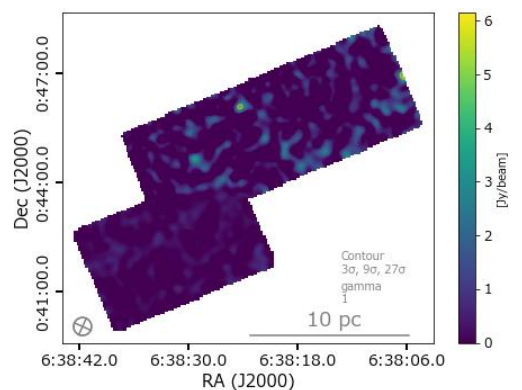


図 付録 II - 195 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

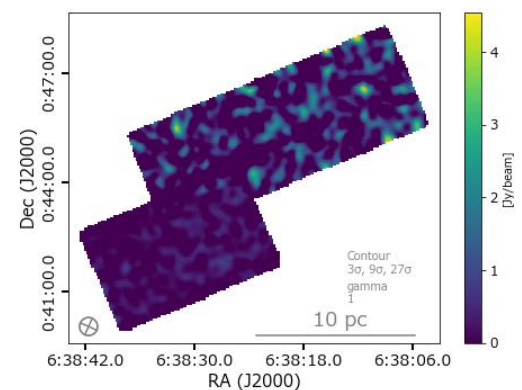


図 付録 II - 197 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

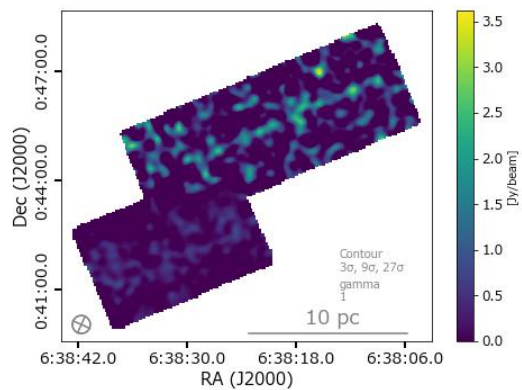


図 付録Ⅱ－198 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

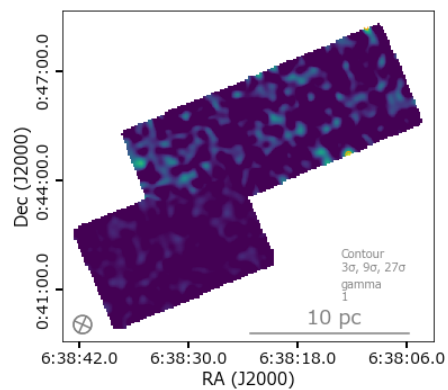


図 付録Ⅱ－200 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

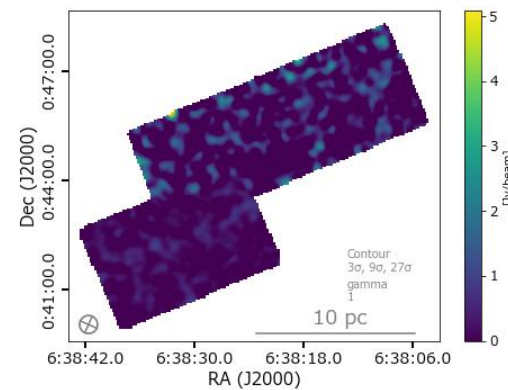


図 付録Ⅱ－202 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

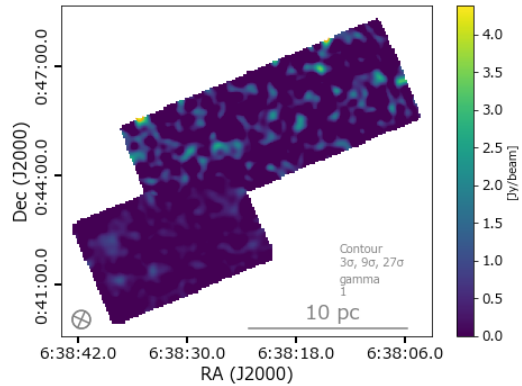


図 付録Ⅱ－199 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

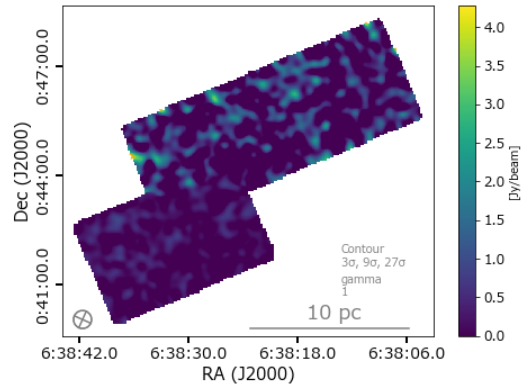


図 付録Ⅱ－201 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

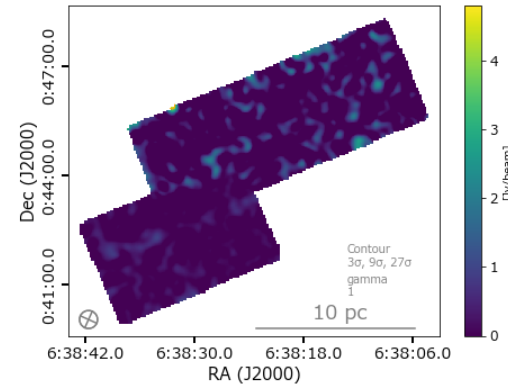


図 付録Ⅱ－203 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

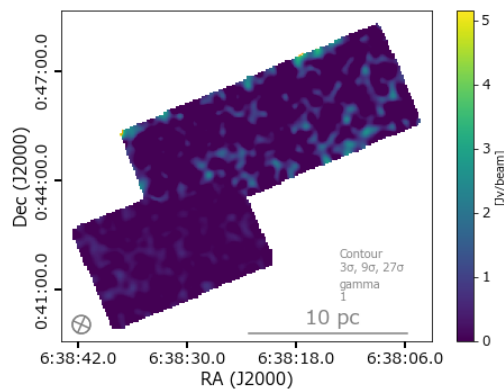


図 付録 II - 204 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

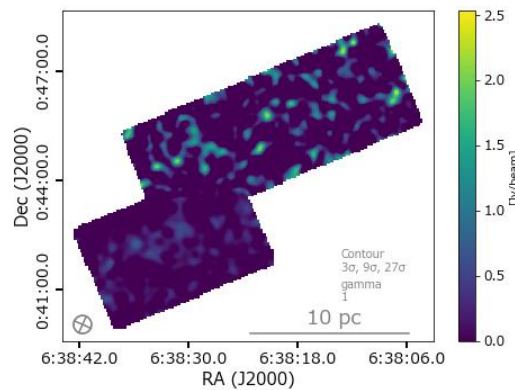


図 付録 II - 206 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

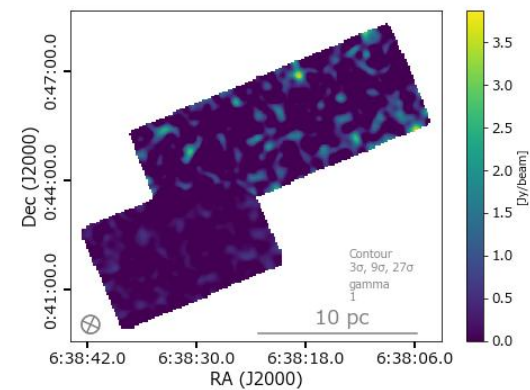


図 付録 II - 208 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

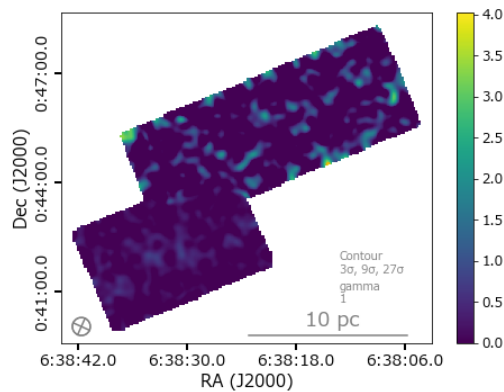


図 付録 II - 205 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

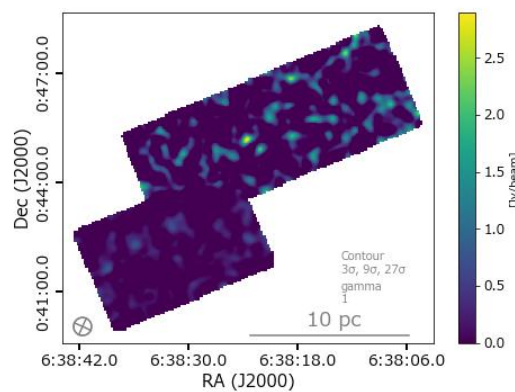


図 付録 II - 207 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

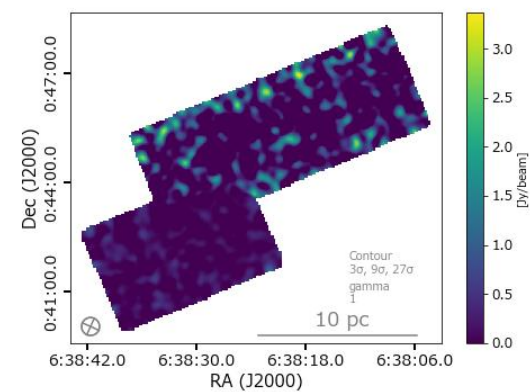


図 付録 II - 209 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

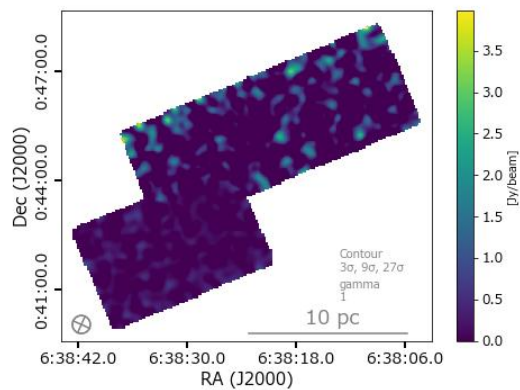


図 付録Ⅱ－210 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

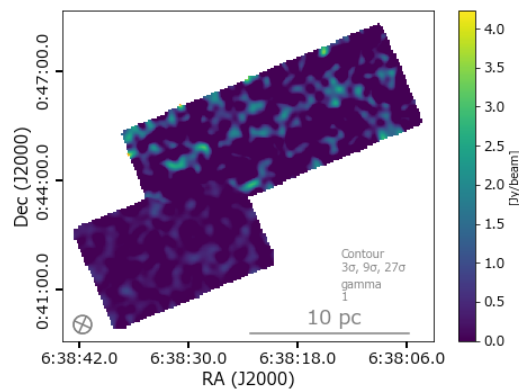


図 付録Ⅱ－212 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

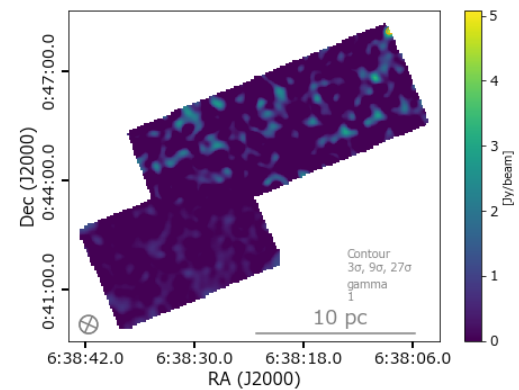


図 付録Ⅱ－214 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

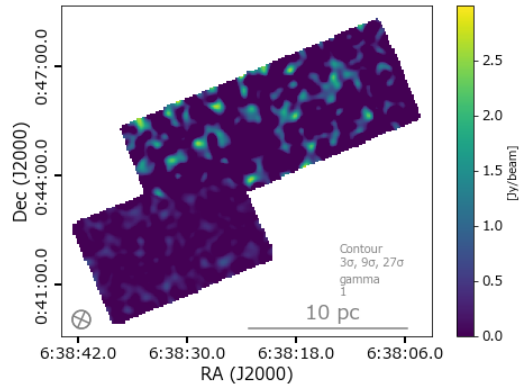


図 付録Ⅱ－211 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

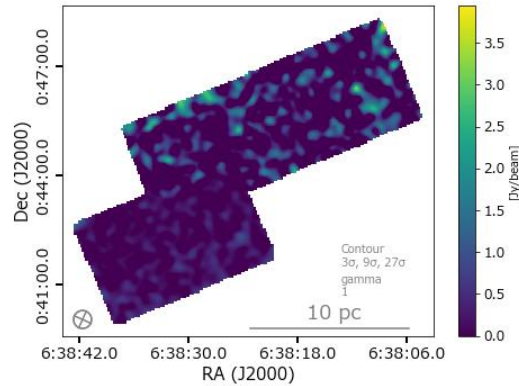


図 付録Ⅱ－213 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

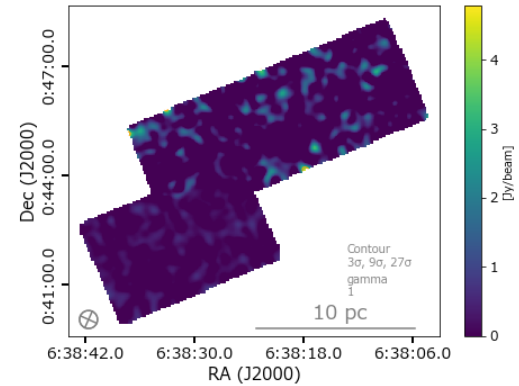


図 付録Ⅱ－215 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

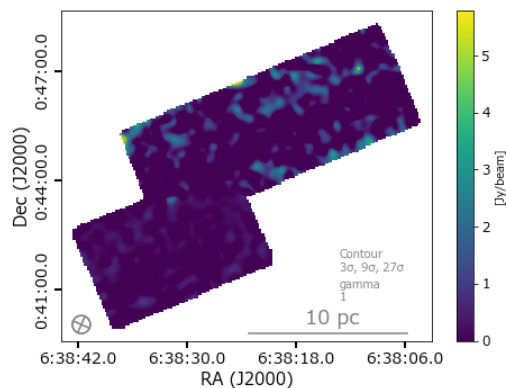


図 付録 II - 216 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

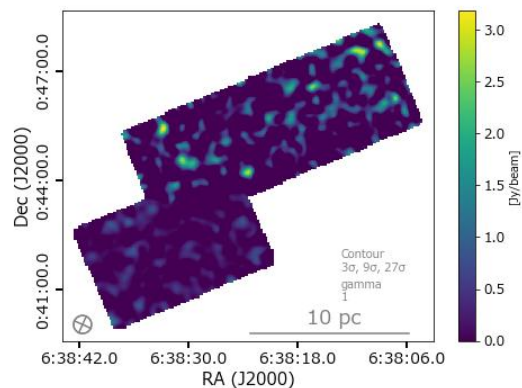


図 付録 II - 218 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

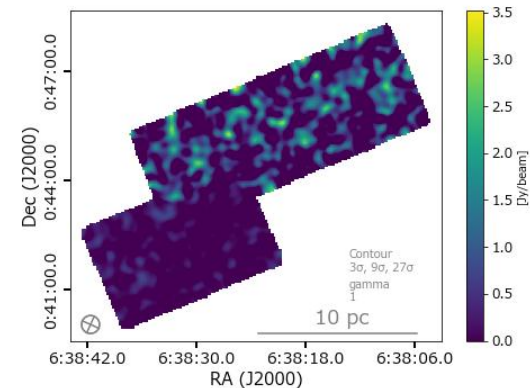


図 付録 II - 220 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

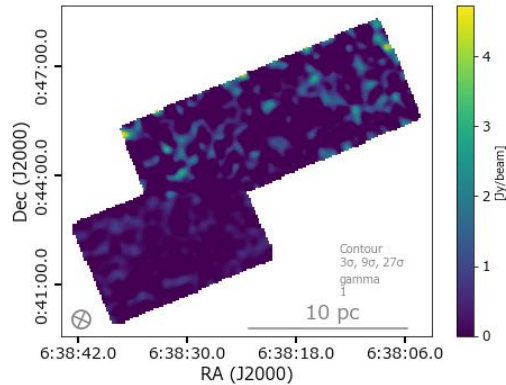


図 付録 II - 217 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

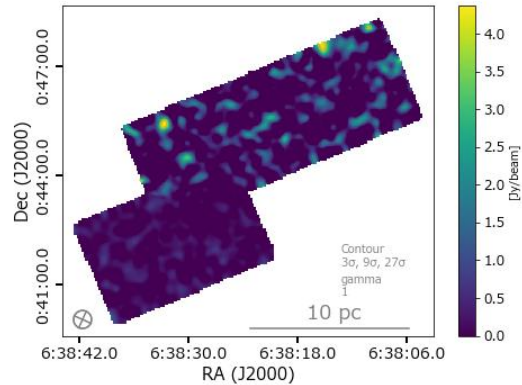


図 付録 II - 219 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

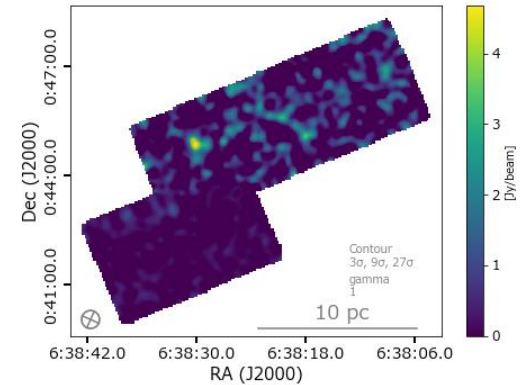


図 付録 II - 221 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

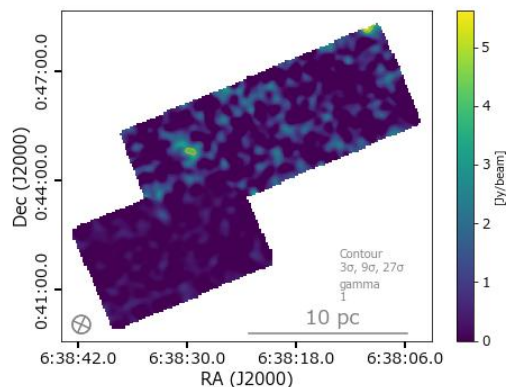


図 付録 II - 222 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

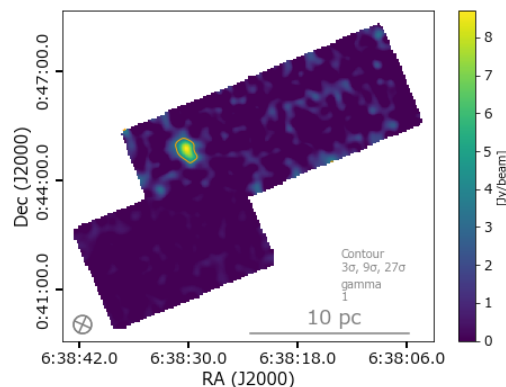


図 付録 II - 224 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

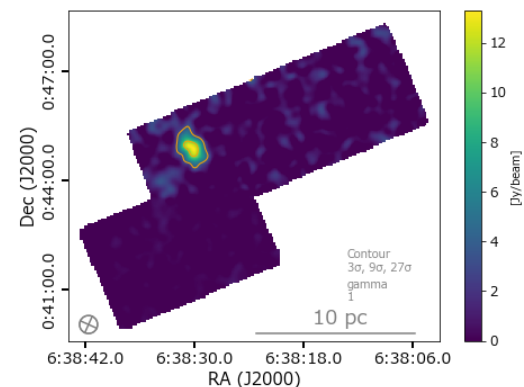


図 付録 II - 226 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

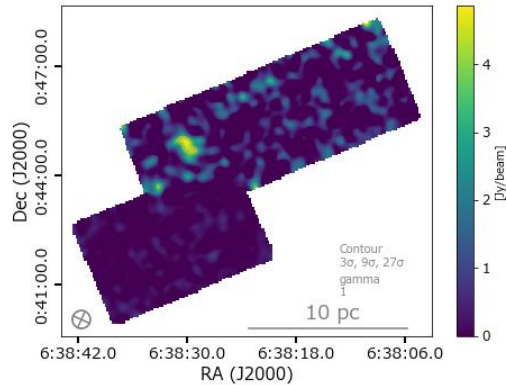


図 付録 II - 223 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

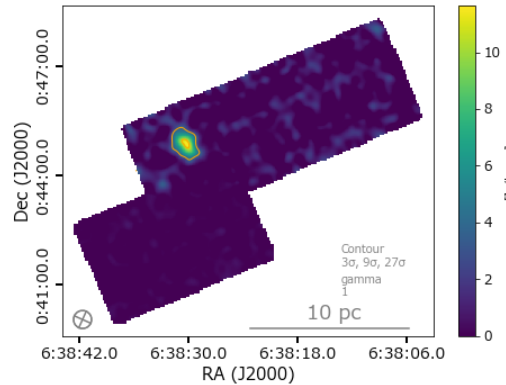


図 付録 II - 225 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

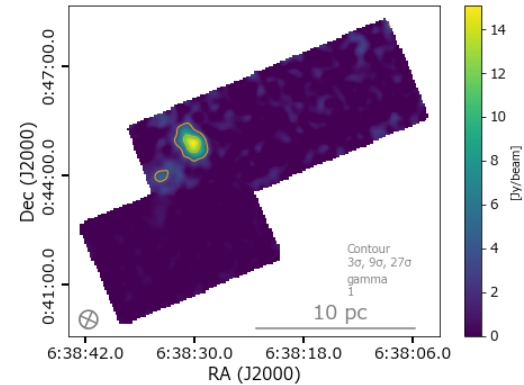


図 付録 II - 227 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

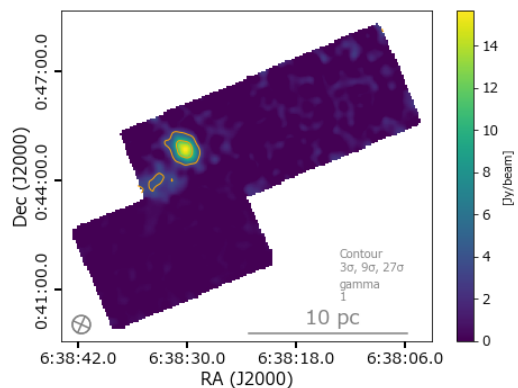


図 付録Ⅱ－228 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

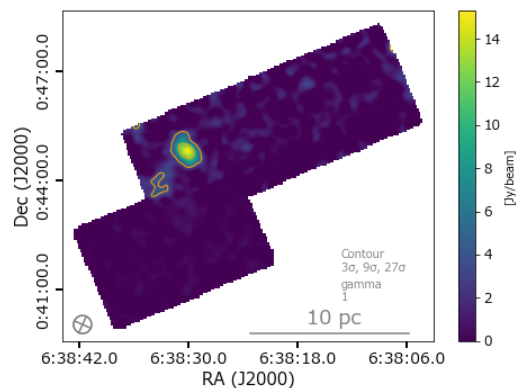


図 付録Ⅱ－230 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

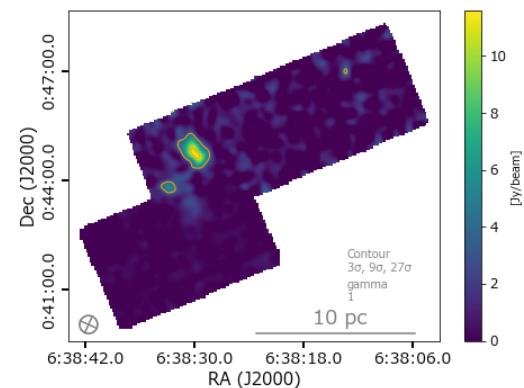


図 付録Ⅱ－232 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

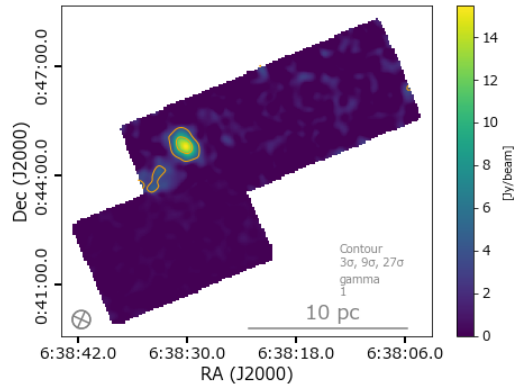


図 付録Ⅱ－229 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

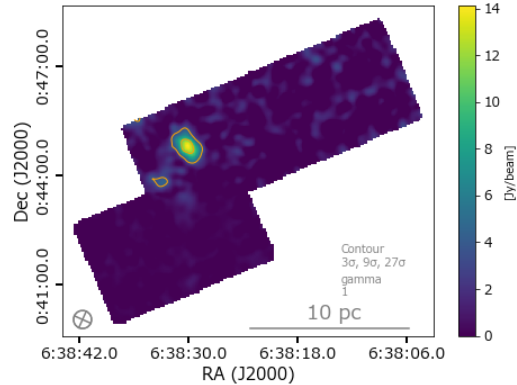


図 付録Ⅱ－231 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

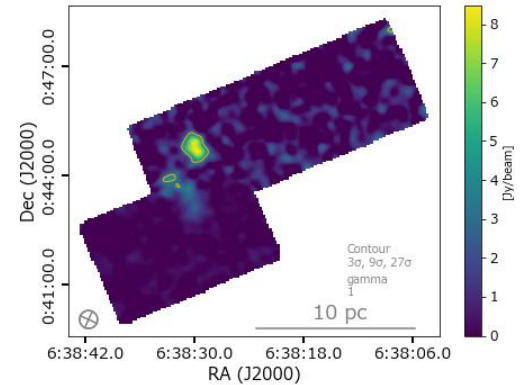


図 付録Ⅱ－233 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

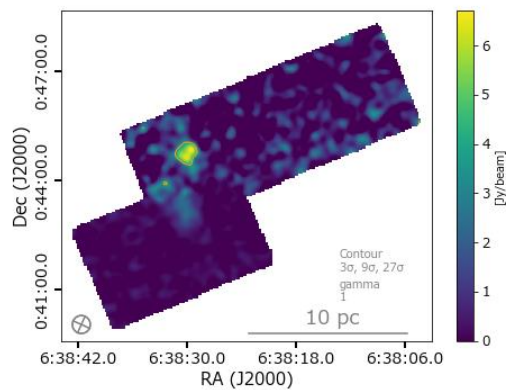


図 付録 II - 234 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

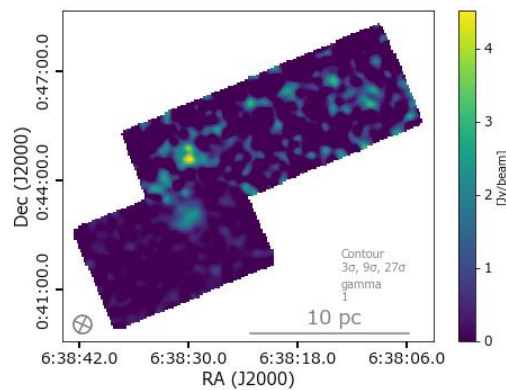


図 付録 II - 236 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

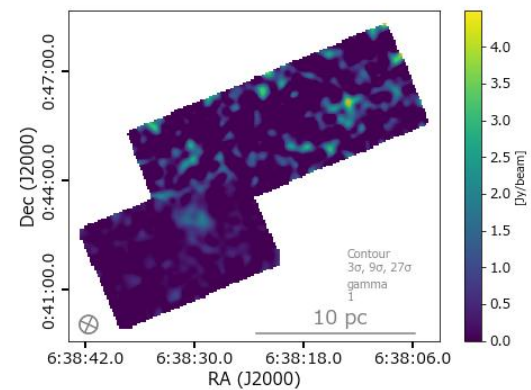


図 付録 II - 238 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

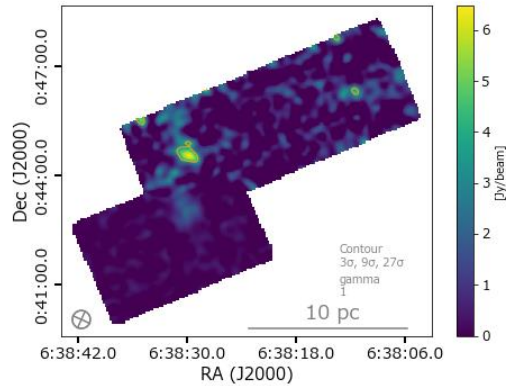


図 付録 II - 235 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

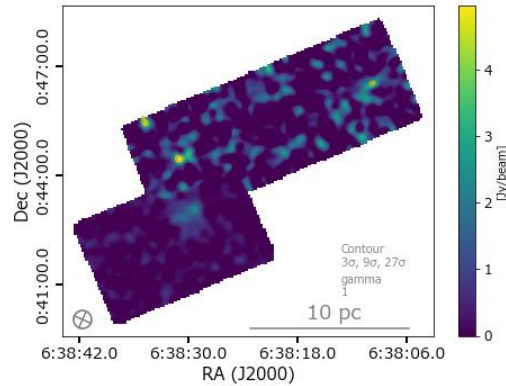


図 付録 II - 237 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

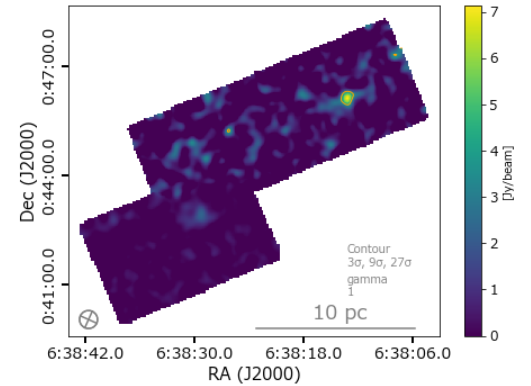


図 付録 II - 239 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

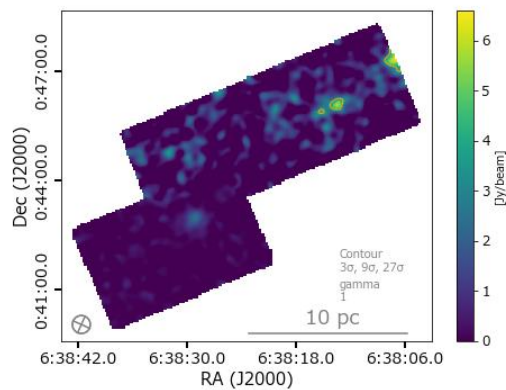


図 付録Ⅱ－240 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

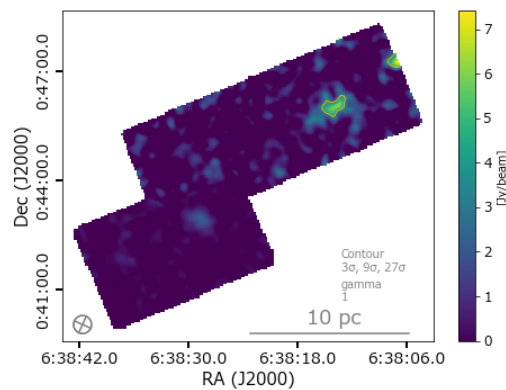


図 付録Ⅱ－242 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

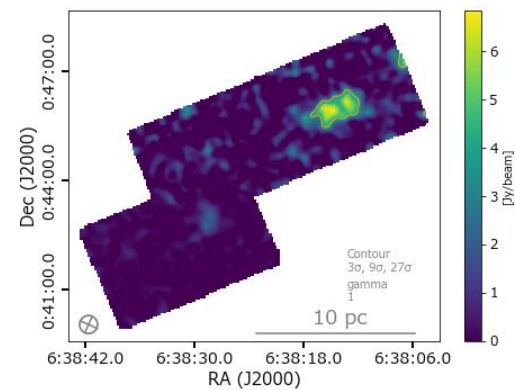


図 付録Ⅱ－244 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

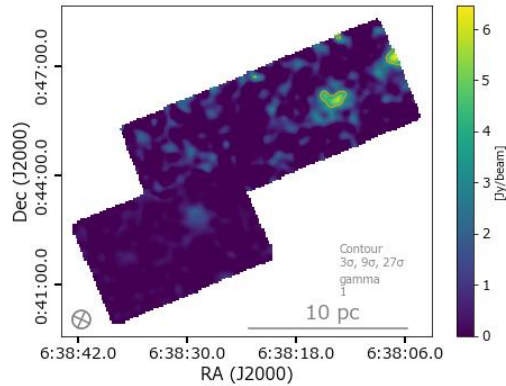


図 付録Ⅱ－241 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

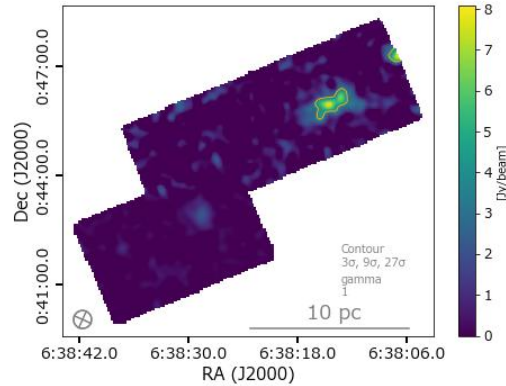


図 付録Ⅱ－243 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

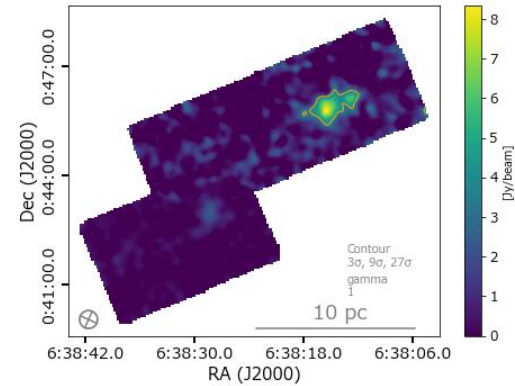


図 付録Ⅱ－245 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

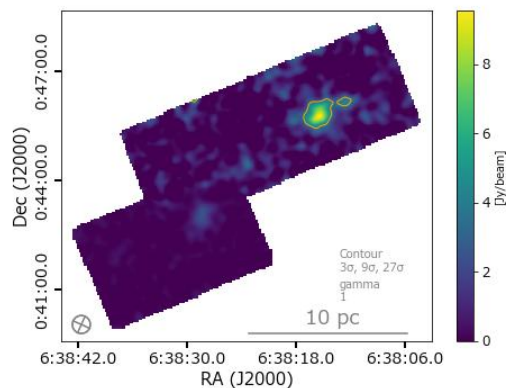


図 付録 II - 246 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

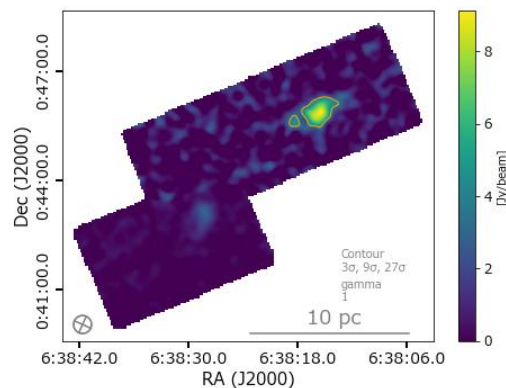


図 付録 II - 248 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

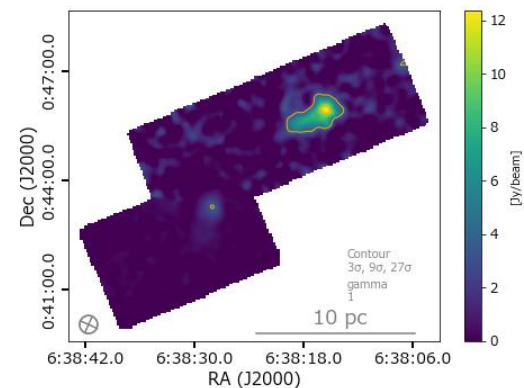


図 付録 II - 250 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

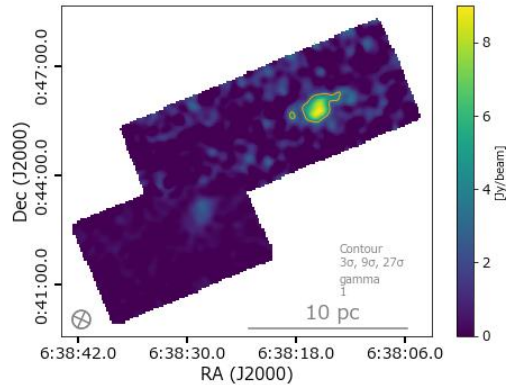


図 付録 II - 247 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

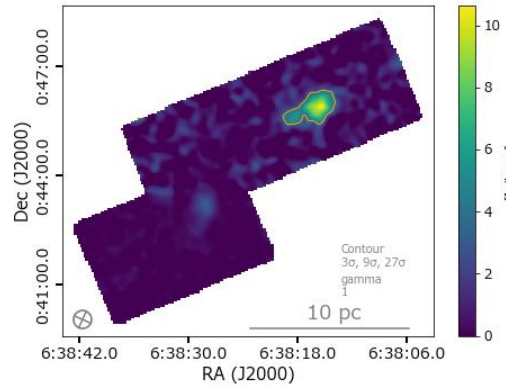


図 付録 II - 249 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

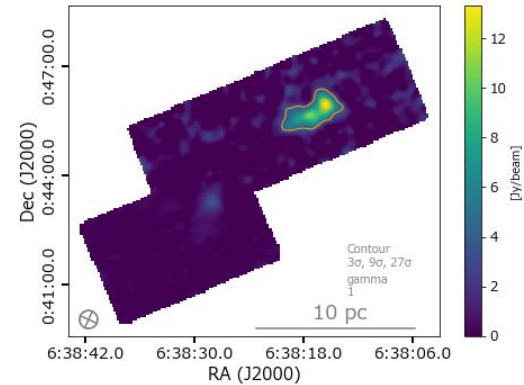


図 付録 II - 251 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

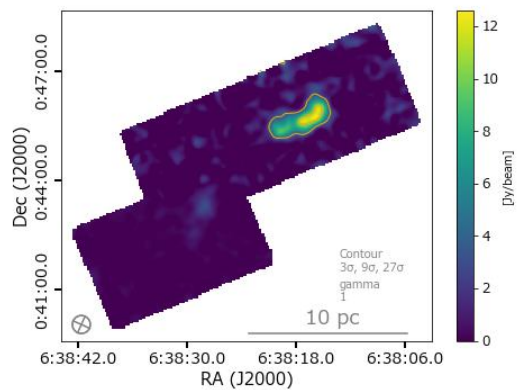


図 付録Ⅱ－252 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

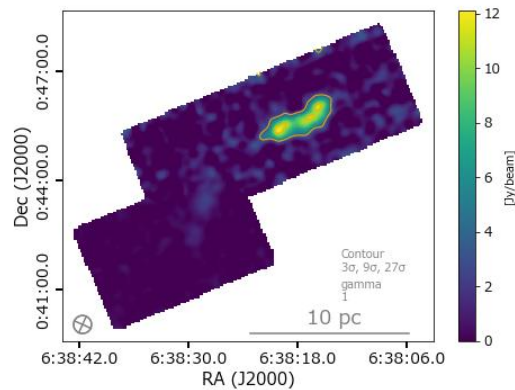


図 付録Ⅱ－254 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

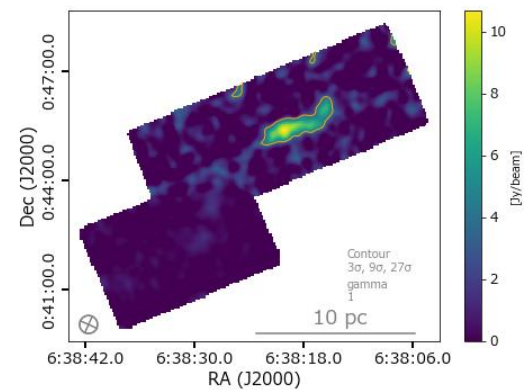


図 付録Ⅱ－256 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

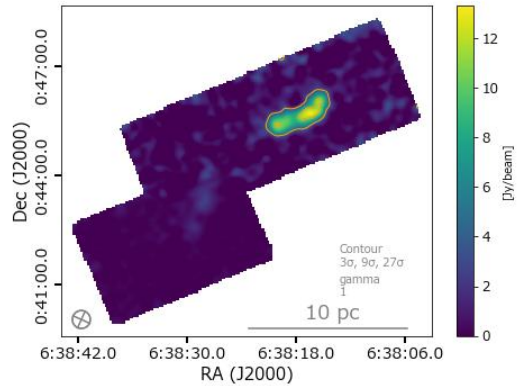


図 付録Ⅱ－253 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

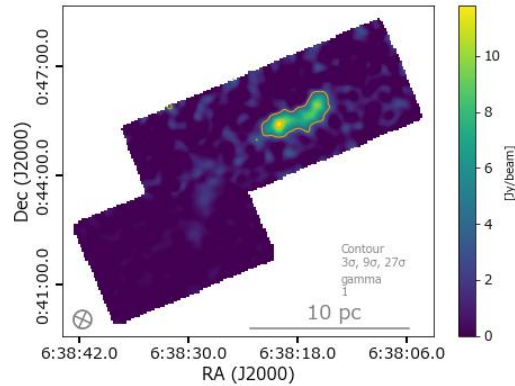


図 付録Ⅱ－255 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

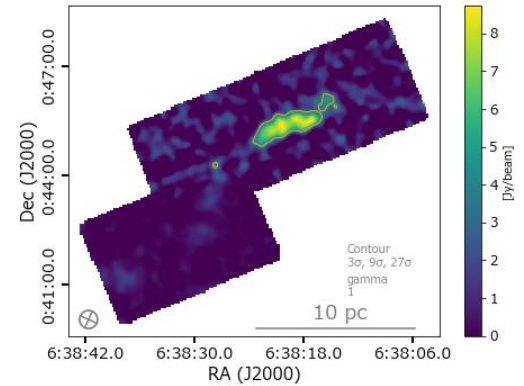


図 付録Ⅱ－257 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

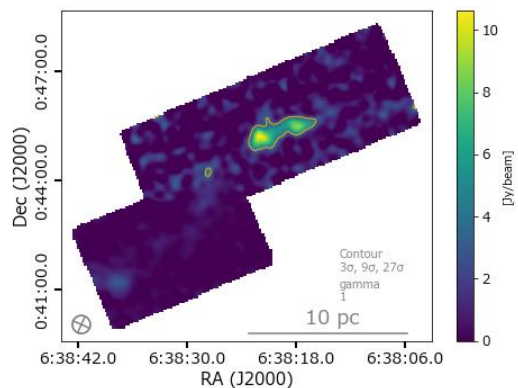


図 付録 II - 258 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

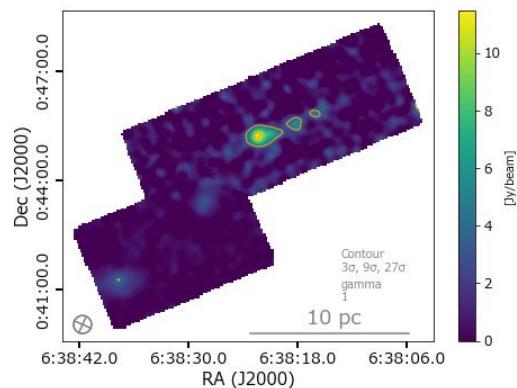


図 付録 II - 260 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

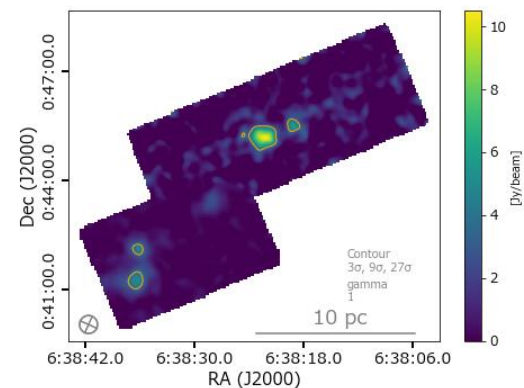


図 付録 II - 262 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

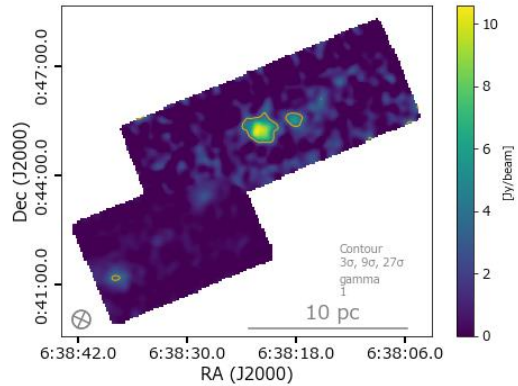


図 付録 II - 259 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

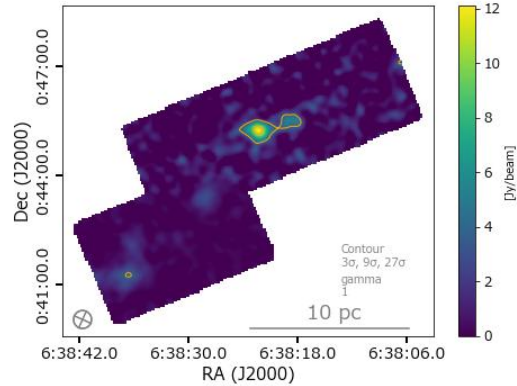


図 付録 II - 261 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

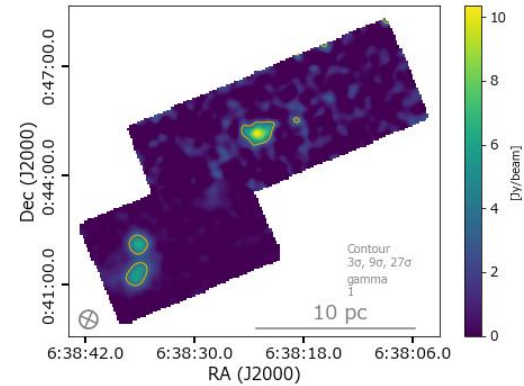


図 付録 II - 263 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

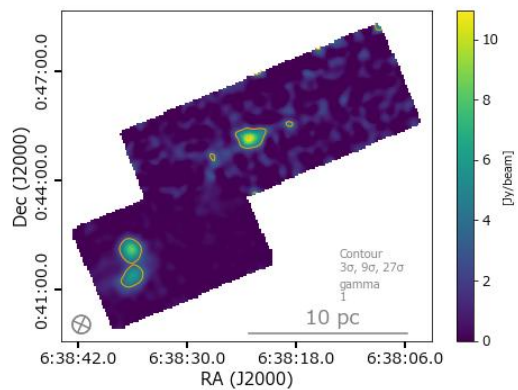


図 付録Ⅱ－264 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

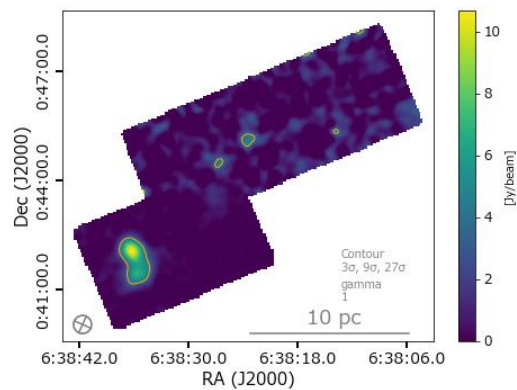


図 付録Ⅱ－266 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

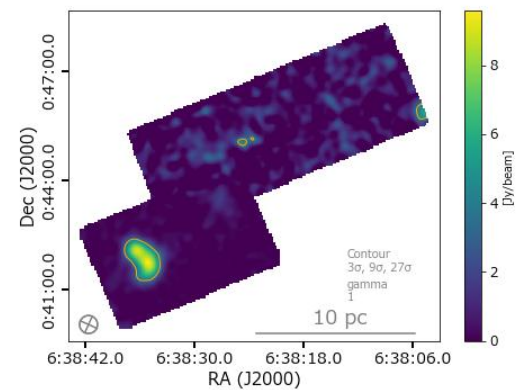


図 付録Ⅱ－268 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

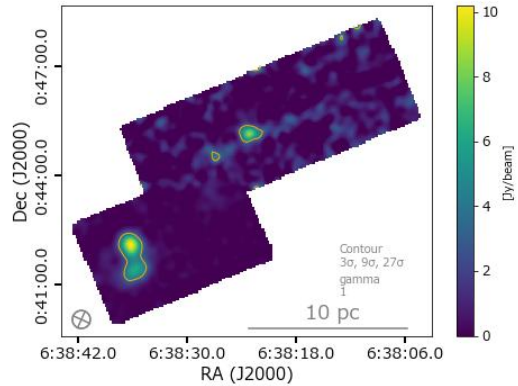


図 付録Ⅱ－265 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

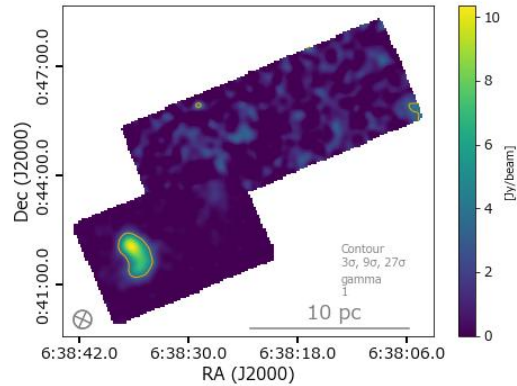


図 付録Ⅱ－267 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

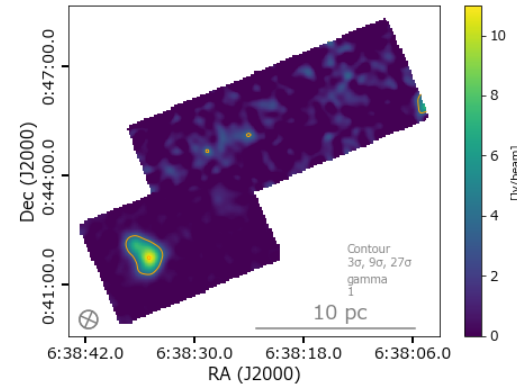


図 付録Ⅱ－269 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

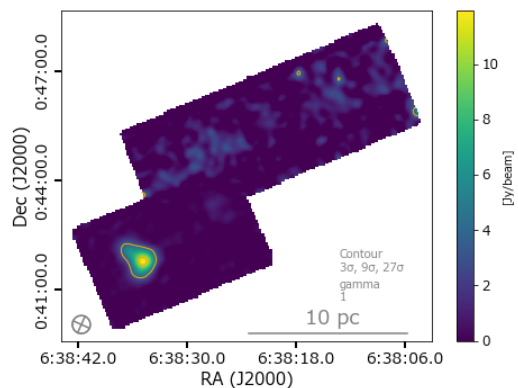


図 付録Ⅱ - 270 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

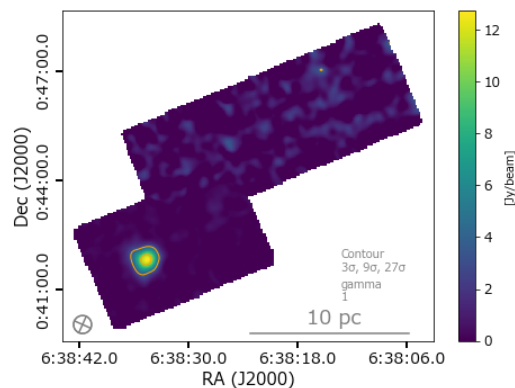


図 付録Ⅱ - 272 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

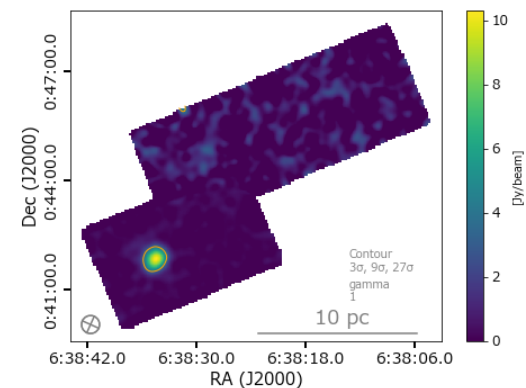


図 付録Ⅱ - 274 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

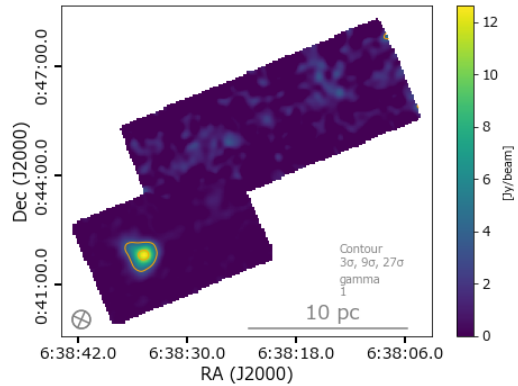


図 付録Ⅱ - 271 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

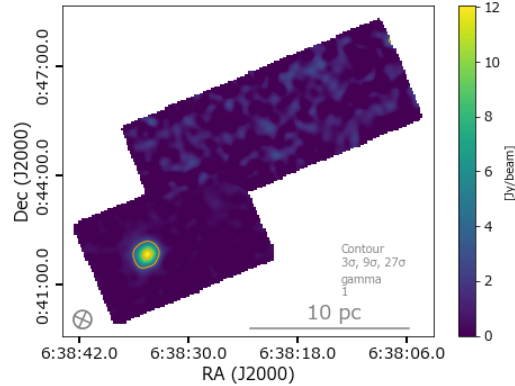


図 付録Ⅱ - 273 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

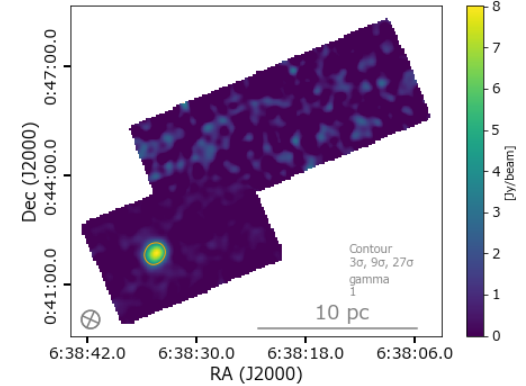


図 付録Ⅱ - 275 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

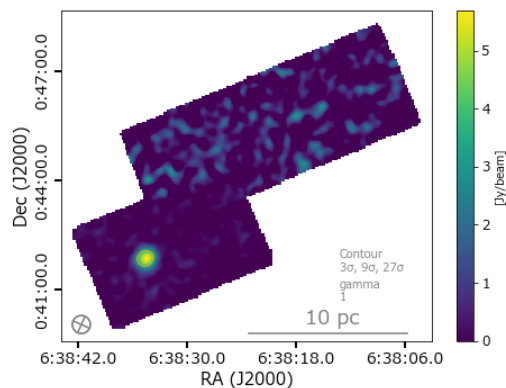


図 付録 II - 276 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

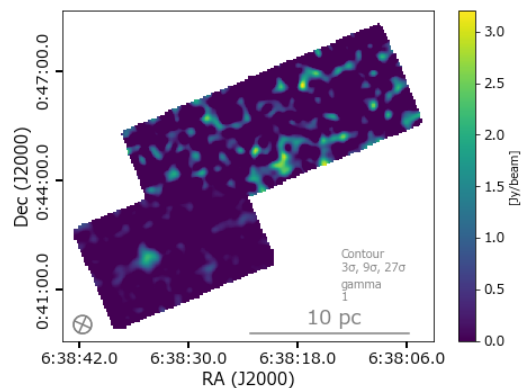


図 付録 II - 278 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

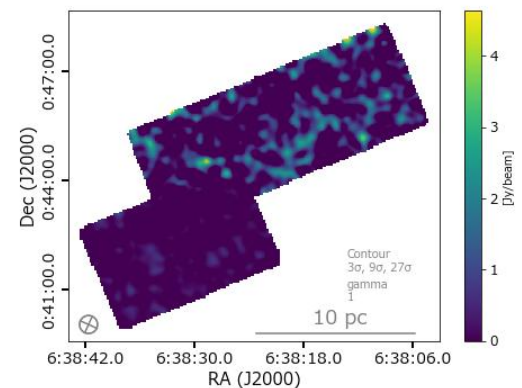


図 付録 II - 280 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

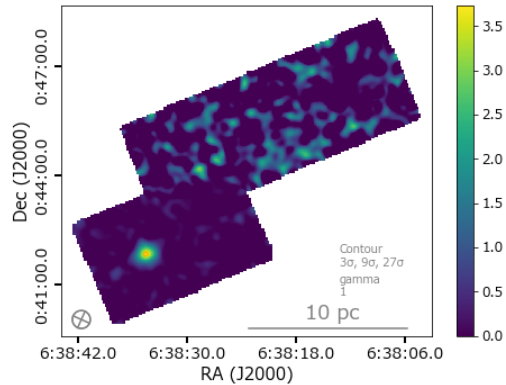


図 付録 II - 277 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

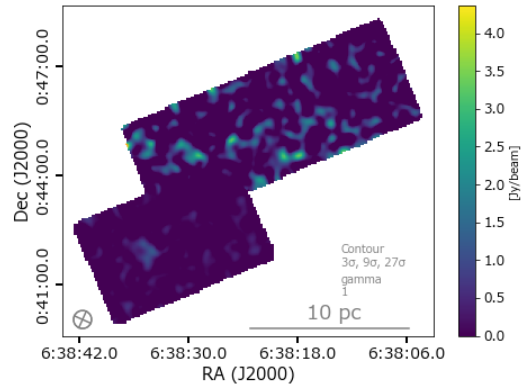


図 付録 II - 279 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

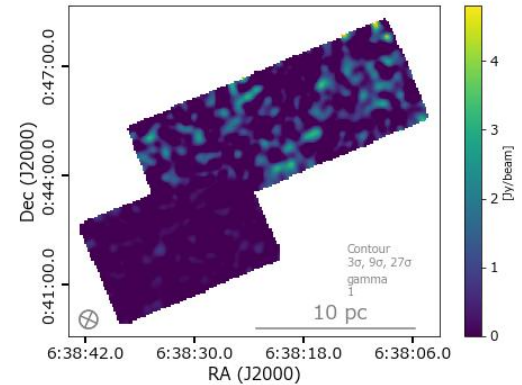


図 付録 II - 281 C^{18}O ch Map $v_{\text{LSR}} = 58.331$ km/s

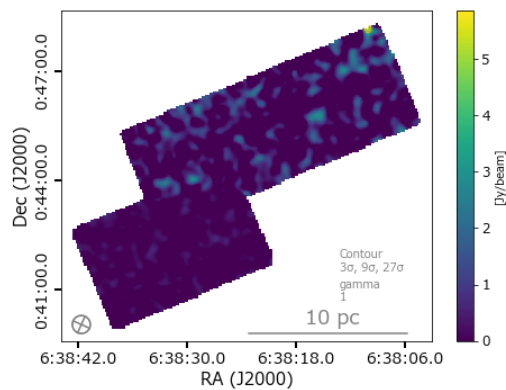


図 付録Ⅱ－282 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

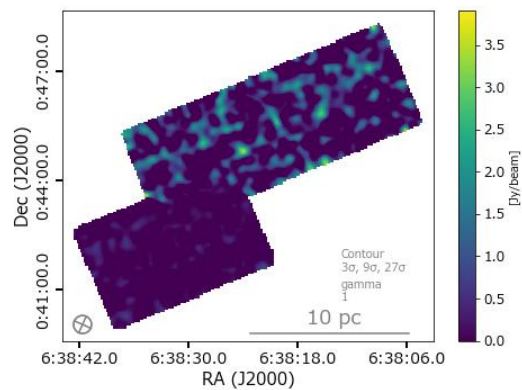


図 付録Ⅱ－284 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

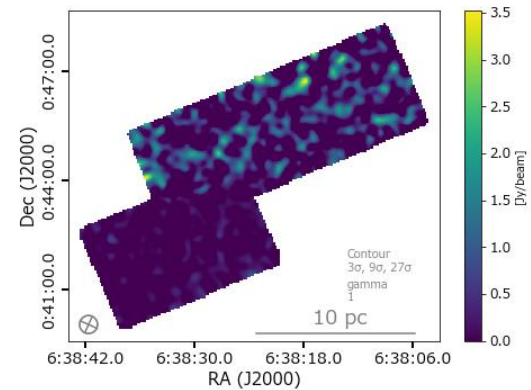


図 付録Ⅱ－286 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

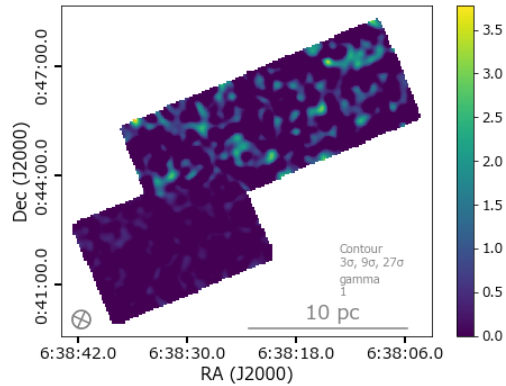


図 付録Ⅱ－283 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

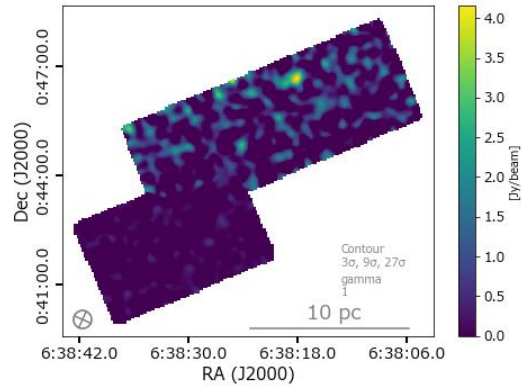


図 付録Ⅱ－285 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

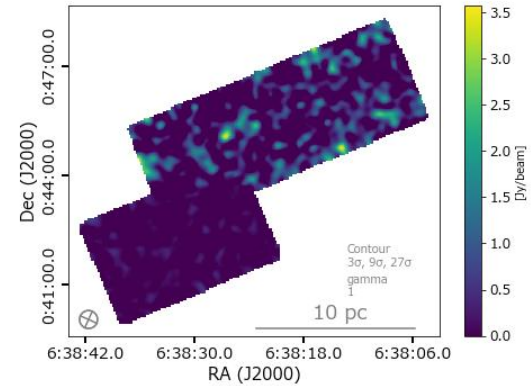


図 付録Ⅱ－287 C¹⁸O ch Map $v_{LSR} = 58.331$ km/s

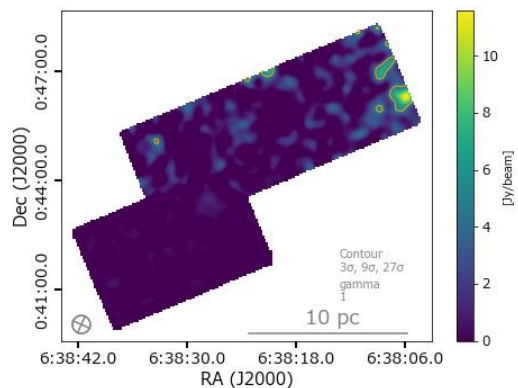


図 付録Ⅱ－289 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

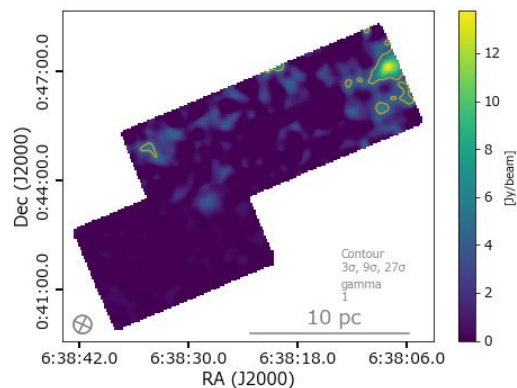


図 付録Ⅱ－291 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

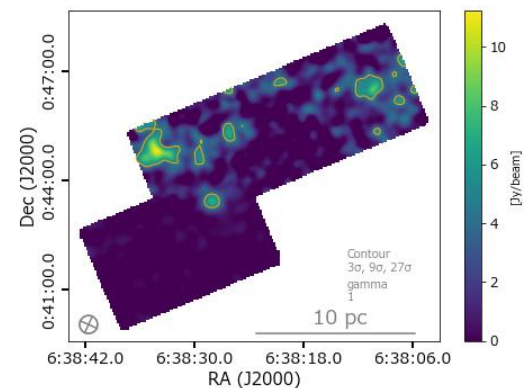


図 付録Ⅱ－293 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

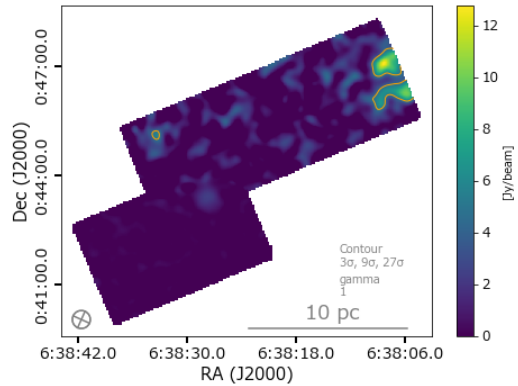


図 付録Ⅱ－290 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

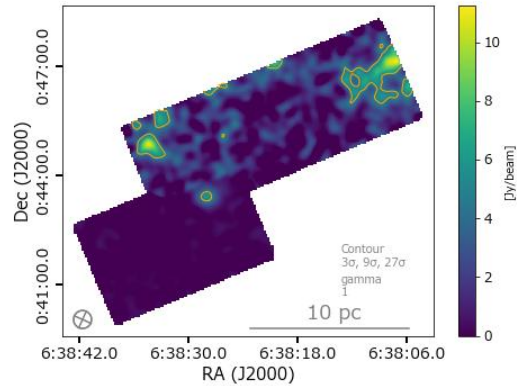


図 付録Ⅱ－292 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

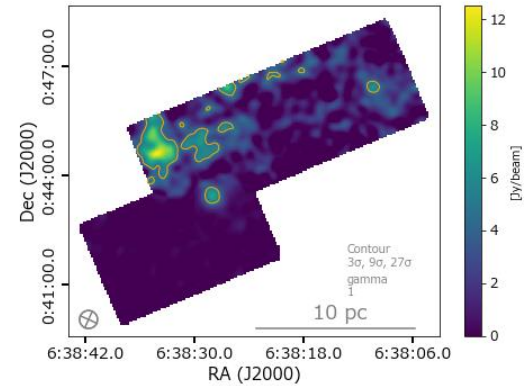


図 付録Ⅱ－294 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

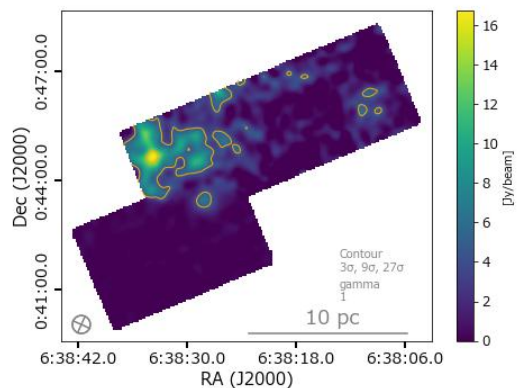


図 付録Ⅱ－295 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

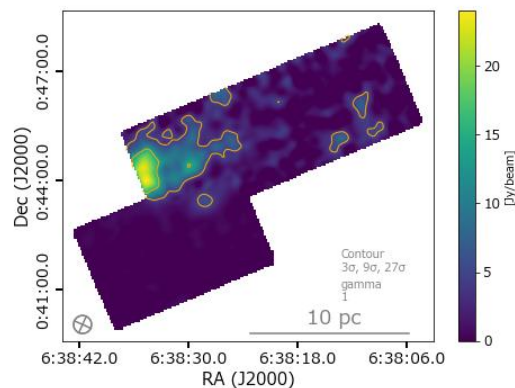


図 付録Ⅱ－297 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

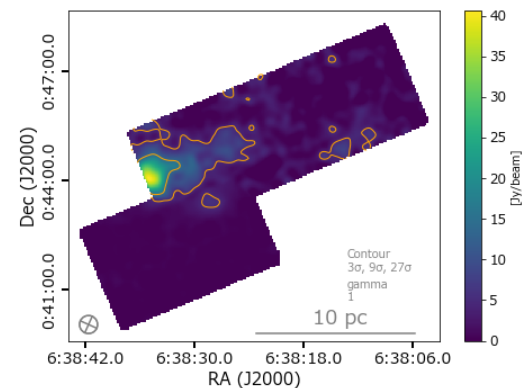


図 付録Ⅱ－299 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

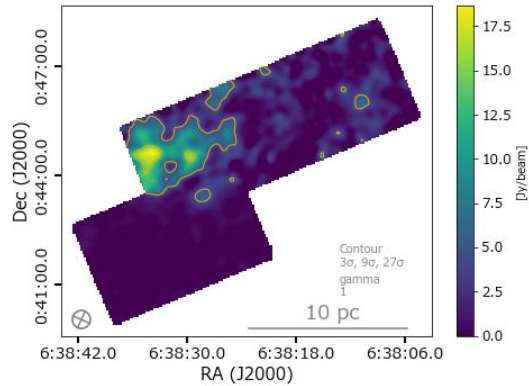


図 付録Ⅱ－296 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

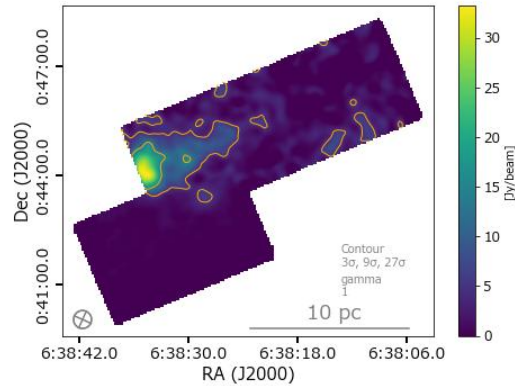


図 付録Ⅱ－298 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

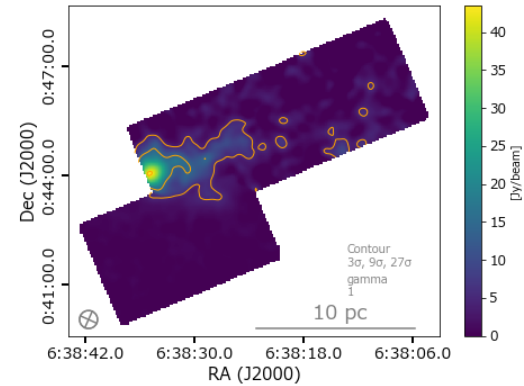


図 付録Ⅱ－300 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

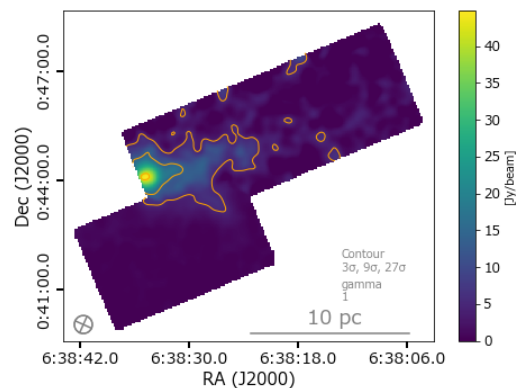


図 付録 II - 301 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

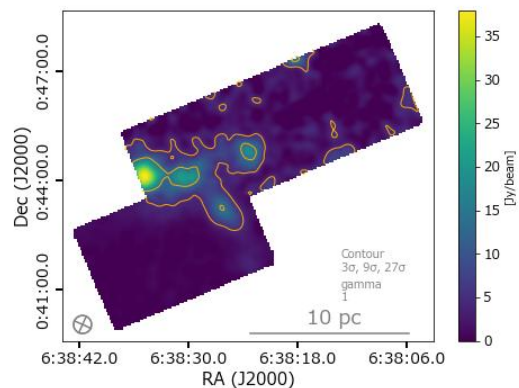


図 付録 II - 303 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

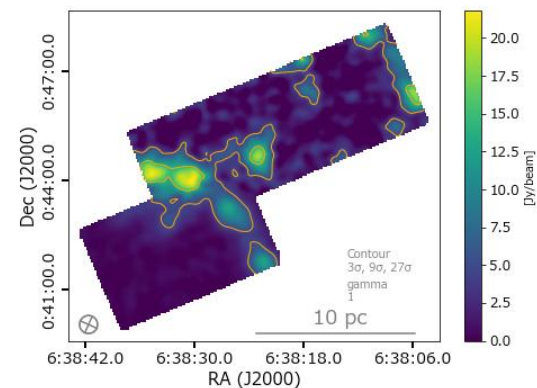


図 付録 II - 305 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

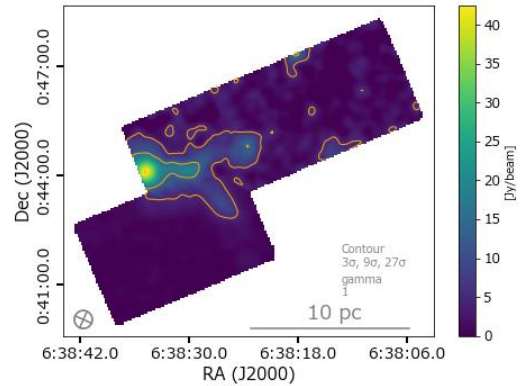


図 付録 II - 302 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

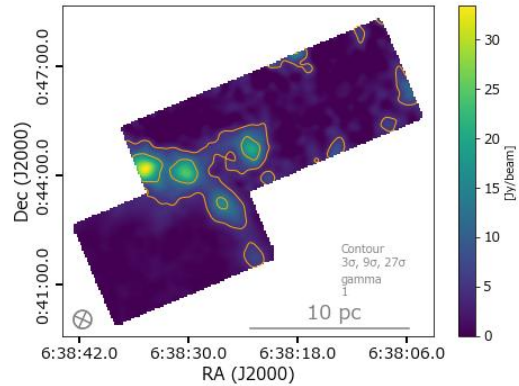


図 付録 II - 304 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

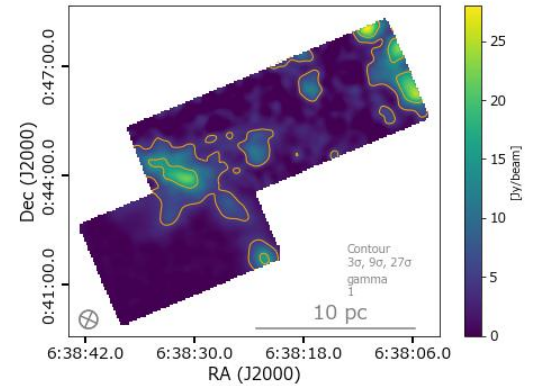


図 付録 II - 306 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

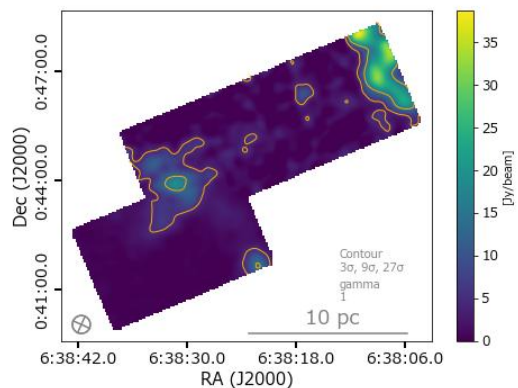


図 付録Ⅱ－307 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

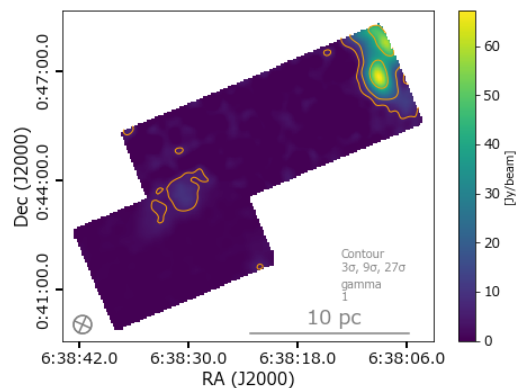


図 付録Ⅱ－309 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

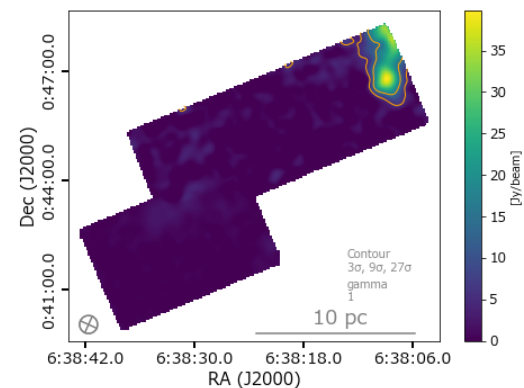


図 付録Ⅱ－311 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

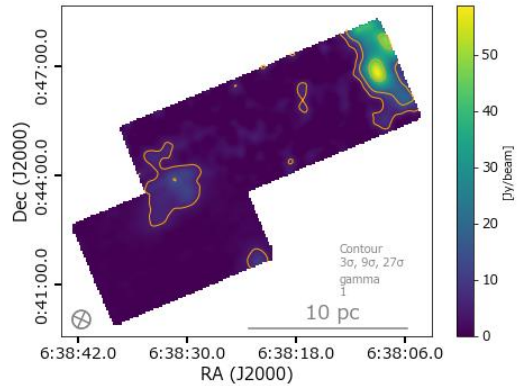


図 付録Ⅱ－308 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

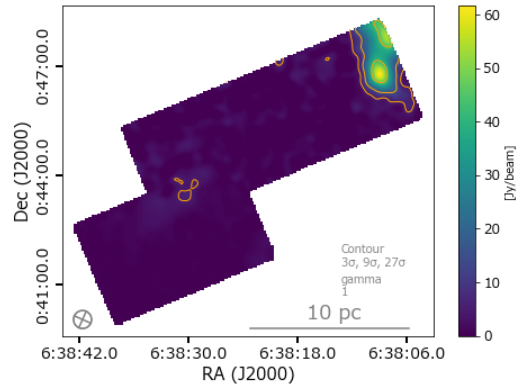


図 付録Ⅱ－310 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

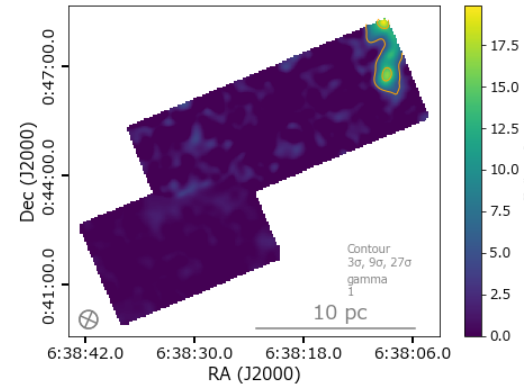


図 付録Ⅱ－312 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s

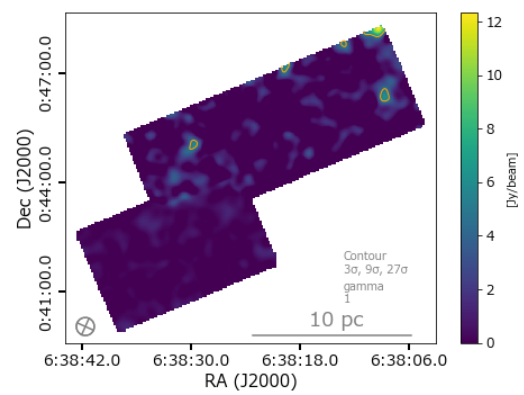


図 付録Ⅱ - 313 ^{12}CO ch Map $v_{\text{LSR}} = 14.361$ km/s