

ANALISI DATI ALMA DEL PROGETTO

2016.1.01347.S.

Tirocinio presso l'Osservatorio Astronomico di Cagliari.

Tutors: *Silvia Leurini e Silvia Casu*

Studentessa: Giorgia Granata

20 Gennaio 2026

1 L'interferometria

ALMA (acronimo di Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) è lo strumento più potente, ad oggi, per studiare l'universo a lunghezze d'onda millimetriche e submillimetriche, al limite tra la luce infrarossa e le più lunghe onde radio.

Inizialmente le osservazioni in radioastronomia venivano svolte in single-dish, dunque adoperando un singolo radiotelescopio, ma per avere una maggiore risoluzione dell'oggetto era necessario avere un diametro strumentale abbastanza elevato. In pratica, tuttavia, la realizzazione di radiotelescopi single-dish con diametri superiori a 100 m risulta fortemente limitata da vincoli strutturali e ingegneristici; tali limitazioni hanno motivato lo sviluppo dell' *Interferometria*. In tale approccio osservativo viene utilizzato un insieme di radiotelescopi operanti simultaneamente, che nel loro complesso costituiscono un interferometro, con l'obiettivo di raggiungere il potere risolutivo necessario a risolvere strutture di oggetti astronomici posti a distanze sempre maggiori dalla Terra.

Il potere risolutivo di un telescopio è legato alla lunghezza d'onda λ della radiazione osservata ed al diametro D dello strumento:

$$R = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

Ove:

- R è il potere risolutivo;
- λ è la lunghezza d'onda;
- D è il diametro dello strumento (nel caso di un interferometro si adopera la Baseline ¹.)

Dal punto di vista tecnico l'interferometria è un metodo di misura che sfrutta le interferenze fra più onde coerenti fra loro, utilizzando gli interferometri, i quali permettono di eseguire misurazioni di lunghezze d'onda, di distanze e di spostamenti dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda utilizzata; con essa vengono misurate anche le velocità di propagazione della luce in vari mezzi e per vari indici di rifrazione.

ALMA, che per definizione è un interferometro, è formato da 66 antenne: cinquantaquattro da 12 metri di diametro e dodici, più piccole, da 7 metri di diametro.

Ciascuna antenna può essere manovrata con precisione e puntata con un'accuratezza angolare che permetterebbe di distinguere una palla da golf a una distanza di 15 chilometri.

Questo interferometro è installato a 5000 metri sul livello del mare nel deserto di Atacama, in Cile, e osserva a lunghezze d'onda millimetriche e submillimetriche per studiare la formazione

¹Con il termine Baseline si intende la distanza massima tra le antenne.

stellare e l'universo primordiale.

Le parabole sono esposte alle condizioni ambientali durissime dell'elevata piana di Chajnantor, con forti venti, intensa radiazione solare e temperature che variano tra i +20 ed i -20 °C.

Queste antenne d'avanguardia, combinate a formare un solo telescopio rivoluzionario, riflettono la natura cooperativa del progetto globale scientifico di ALMA.



Figura 1: ALMA. Credits: ESO.

2 La formazione stellare di alta massa

Lo studio delle stelle massicce nelle fasi evolutive iniziali rappresenta un tema di grande rilevanza nell'ambito dell'astrofisica moderna, poiché esse svolgono un ruolo dominante nell'evoluzione del mezzo interstellare e delle galassie, influenzando in modo significativo i processi di formazione stellare, il bilancio energetico e l'arricchimento chimico dell'ambiente circostante.

Nonostante i significativi progressi osservativi e teorici, la formazione delle stelle massicce rimane un problema ancora aperto. In particolare, risultano ancora oggetto di dibattito i meccanismi di accrescimento, il ruolo della pressione di radiazione, la natura dei dischi di accrescimento e le condizioni iniziali delle nubi molecolari in cui tali stelle si formano.

Approfondite ricerche in letteratura hanno portato a comprendere che una frazione significativa delle stelle massicce si formerebbe in sistemi protostellari estremamente densi e instabili, nei quali collisioni o interazioni dinamiche violente rilasciano improvvisamente energia gravitazionale, producendo outflow molecolari esplosivi, gusci in espansione e la disgregazione del sistema originario, come sostenuto da Zapata et al. [1].

La formazione stellare massiva viene descritta, dunque, come un processo altamente dinamico, violento e talvolta esplosivo, dominato da interazioni gravitazionali tra protostelle.

Il lavoro riportato nell'articolo citato fornisce una nuova evidenza osservativa di questo scenario, attraverso lo studio della regione *IRAS 12326-6245*, adoperando ALMA.

L'outflow viene interpretato come il risultato della disgregazione di un sistema giovane e compatto di protostelle massicce gravitazionalmente instabili, inizialmente molto ravvicinate ed immerse in un nucleo molecolare estremamente denso.

Le conseguenze osservabili dell'interazione dinamica estrema sono gli *Streamers molecolari*, un *Guscio polveroso in espansione* e alcune *Sorgenti stellari espulse*.

L'articolo citato sopra rafforza l'idea che la formazione di stelle con una massa maggiore alle 8 masse solari non avvenga solo tramite accrescimento regolare da disco ma spesso includa processi caotici, interazioni e fusioni di materiale.

3 Il Proposal

Per poter effettuare un'osservazione con un qualsiasi radiotelescopio è necessario scrivere una buona proposta osservativa.

Un proposal, infatti, è un documento strutturato che serve a convincere un comitato che il tempo osservativo richiesto è scientificamente valido, necessario e ben pianificato.

In particolare il primo passo dell'analisi riportata di seguito, è stato lo studio del Proposal del progetto *2016.1.01347.S*.

Le giustificazioni scientifiche che spingono a richiedere delle ore necessarie per le osservazioni, sono legate alla formazione delle stelle massicce (con masse maggiori o uguali a 10 masse solari), le quali rappresentano uno dei principali problemi aperti dell'astrofisica moderna.

Sebbene tali oggetti abbiano un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle galassie, i meccanismi fisici che ne regolano l'accrescimento restano poco compresi.

In particolare, le stelle massicce raggiungono la sequenza principale mentre sono ancora in fase di accrescimento, ponendo il problema di come il flusso di materia possa proseguire nonostante la forte pressione di radiazione.

Nella formazione stellare di bassa massa, l'esistenza di getti collimati ad altissima velocità (EHV), associati a cavità di outflow a velocità inferiori, è ben stabilita sia teoricamente sia osservativamente.

Tuttavia, non esistono ancora evidenze osservative chiare di getti collimati in YSO massivi con luminosità bolometrica $L \geq 10^4 - 10^5$ Luminosità solari, nonostante i modelli ne prevedano la presenza fino a masse stellari di 30-35 masse solari.

Verificare se tali strutture esistano anche nel regime di alta massa è cruciale per stabilire se il processo di formazione stellare sia sostanzialmente universale o se cambi qualitativamente con la massa.

Gli scopi principali dell'osservazione con ALMA, delineati nel proposal, sono i seguenti:

- Verificare l'esistenza di getti collimati ad altissima velocità (EHV) in YSO massivi, osservando direttamente la struttura cinematica tipica già nota nelle stelle di bassa massa;
- Stabilire se i deflussi molecolari massivi siano guidati da getti collimati, come nel caso delle stelle di bassa massa, oppure se siano prodotti da meccanismi differenti;
- Caratterizzare la relazione tra il getto e l'outflow su larga scala, confrontando massa e quantità di moto del gas;
- Testare direttamente le predizioni dei modelli teorici di formazione stellare massiva, in particolare riguardo alla sopravvivenza dei getti collimati in presenza della forte pressione di radiazione.

Le sorgenti selezionate come target per l'osservazione appartengono al campione ATLASGAL Top100, sono limitate in distanza e luminosità, e mostrano emissione EHV, rendendole ideali per una ricerca sistematica di getti collimati.

L'assenza di osservazioni risolutive precedenti ha permesso di svolgere le osservazioni, permettendo di testare l'esistenza dei getti nei YSO massivi.

4 Analisi dati

Le osservazioni effettuate nel 2016 con l'interferometro ALMA, a seguito dell'accettazione del proposal, hanno reso possibile l'analisi delle seguenti sorgenti:

N	Target	V (Km/s)
1	AGAL337.916-00.477	-39.60
2	AGAL301.136-00.226	-39.30
3	AGAL332.826-00.549	-57.30
4	AGAL351.581-00.352	-96.20
5	AGAL010.624-00.384	-2.80
6	AGAL012.804-00.199	36.80

Tabella 1: Sorgenti osservate nel progetto 2016.1.01347.S. e relative velocità.

Ognuna di queste sorgenti è stata osservata tramite differenti configurazioni dello strumento: con l'array da 7 metri e dunque con una risoluzione angolare nell'intorno di 5 arcsec e con l'array da 12 metri, con una risoluzione angolare ad hoc che varia tra 0.133 e 1.137 arcsec.

Da principio è stato necessario individuare i dati accessibili sull'*ALMA Archive*, a seguito delle osservazioni svolte per il progetto 2016.1.01347.S.

È stato necessario catalogare quali file di dati ci fossero e quali preview non fossero invece disponibili, probabilmente a causa di errori tecnici durante le osservazioni.

Successivamente sono state analizzate tutte le finestre spettrali per ciascuna sorgente e sono state osservate le seguenti righe spettroscopiche che trovano una corrispondenza ad una precisa finestra spettrale e questo vale per ogni sorgente studiata.

Array	SPW	Specie molecolare
12	25	CO 2-1
12	33	SiO
12	35	SO
12	37	HC3N
12	39	C18O

Tabella 2: Associazione delle SPW a ciascuna molecola, per la configurazione con l'array da 12 m.

Array	SPW	Specie molecolare
7	16	CO 2-1
7	24	SiO
7	26	SO
7	28	HC3N
7	30	C18O
7	18	OCS
7	22	H2S

Tabella 3: Associazione delle SPW a ciascuna molecola, per la configurazione con l'array da 7 m.

Successivamente tramite il software CARTA è stato possibile procedere con l'analisi dei dati. Inizialmente si è proceduto con la creazione di un anulo che permettesse di studiare lo spettro della regione scelta. Questa operazione è stata svolta per ogni finestra spettrale, per ogni sorgente, per ogni configurazione dello strumento con la finalità di associare ad ogni SPW la riga d'interesse osservata.

Tramite la query che si può effettuare direttamente tramite CARTA, è possibile svolgere lo studio spettroscopico grazie all'uso di due cataloghi molecolari:

- *CDMS – Cologne Database for Molecular Spectroscopy* il quale è il catalogo curato dall'Università di Colonia che è ampiamente usato per l'identificazione delle linee molecolari nel mezzo interstellare poichè include frequenze, intensità di transizione e livelli energetici;

- *JPL Molecular Spectroscopy Catalog* il quale è il catalogo del Jet Propulsion Laboratory (NASA) e risulta essere complementare al CDMS poichè fornisce transizioni molecolari con parametri spettroscopici accurati.

A seguito dell'associazione di ogni SPW alla riga di transizione d'interesse, è stato possibile procedere con la creazione delle mappe di momento zero, le quali si ottengono integrando l'emissione spettrale lungo l'asse della velocità, come segue:

$$M_0(x, y) = \int I(x, y, v) dv \quad (2)$$

Le mappe di momento zero sono necessarie per poter identificare dove si trova il gas molecolare o atomico, per confrontare la distribuzione di diverse molecole, per stimare la massa del gas o la densità di colonna.

Si chiamano *Mappe di Momento 0*, poichè esistono anche le *Mappe di Momento 1* le quali permettono di individuare la velocità media pesata per l'intensità e le *Mappe di Momento 2* che restituiscono una misura della dispersione della velocità, in altre parole queste ultime restituiscono una misura della larghezza della linea spettrale.

Di fatto nella radioastronomia interferometrica quando si analizza un cubo spettrale, le mappe di momento descrivono in modo compatto come è distribuita l'emissione lungo la velocità nella porzione di cielo studiata.

Si è proceduto, poi, con l'analisi delle Mappe di momento zero, con l'applicazione finale di rispettivi contorni, per ciascuna specie chimica, concentrandosi prevalentemente sullo studio delle molecole del CO e dell'SiO.

Infine è stato svolto un confronto con i dati APEX (CO 6-5) sulle righe già analizzate del CO 2-1.

5 Presentazione Risultati

A seguito dello studio delle emissioni di riga del CO e dell'SiO, si può affermare che i suddetti traccianti caratterizzano differenti parti del getto, con differenti velocità.

In particolare si può osservare che il tracciante CO caratterizza il mezzo interstellare coinvolto nel passaggio del getto ed è rappresentativo di un'emissione più lenta e meno collimata.

È necessario precisare che il gas osservato è soggetto all'effetto Doppler, per questo motivo nelle mappe di momento zero sono indicate le diciture *blue-shift* che indica la porzione di gas che si sta avvicinando a noi ed il *redshift* che invece si sta allontanando da noi.

Osservando le mappe si nota che il CO provoca un'emissione a tutte le velocità: sia alle alte che alle basse e questo è per lo più legato alla sua diffusione nel mezzo interstellare.

La molecola dell'SiO, invece, si può osservare per lo più quando avvengono degli shock astrofisici: risulta essere più shiftato verso le alte velocità come si può notare confrontando con il CO.

L'SiO, inoltre, risulta essere più collimato rispetto al CO ed è rappresentativo di un evento completamente distruttivo.

Si segnala, prima di procedere con la presentazione dei risultati, che sono stati riscontrati alcuni problemi di calibrazione, legati alla sottrazione automatica del continuo. In particolare questo problema è stato riscontrato nella sorgente AGAL010.624-00.384, e per questo motivo non è riportata nella seguente analisi.

I risultati ottenuti sono riportati di seguito e constano delle righe spettrali del CO e dell'SiO e delle mappe di momento zero delle stesse molecole, per ciascuna sorgente e per ciascuna configurazione osservativa.

5.1 AGAL301.136-00.226 - Configurazione da 7 m

I dati della sorgente AGAL301.136-00.226 sono stati acquisiti dall'array di 7 m, con una risoluzione angolare di 5.733 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

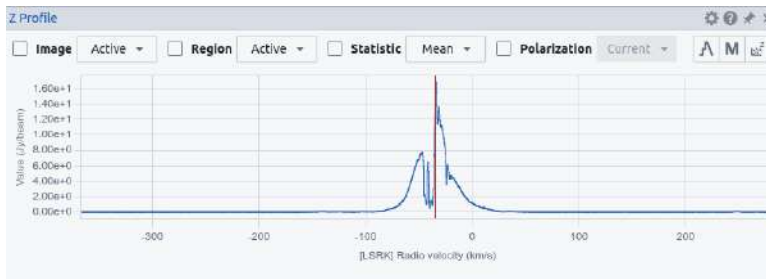


Figura 2: Riga del CO - AGAL301.136-00.226 - Array 7 m.

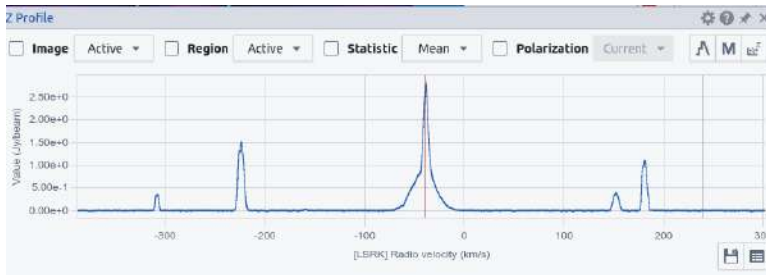


Figura 3: Riga del SiO - AGAL301.136-00.226 - Array 7 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero. In particolare viene effettuato il confronto tra il redshift ed il blueshift relativi all'SiO e al CO.

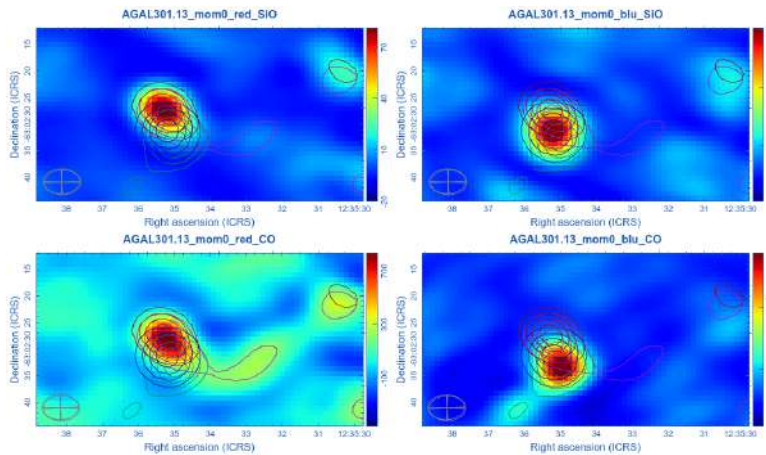


Figura 4: Mappe del Momento Zero - AGAL301.136-00.226 - Array 7 m.

5.2 AGAL301.136-00.226 - Configurazione da 12 m

I dati della sorgente AGAL301.136-00.226 sono stati acquisiti dall'array di 12 m, con una risoluzione angolare di 0.550 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

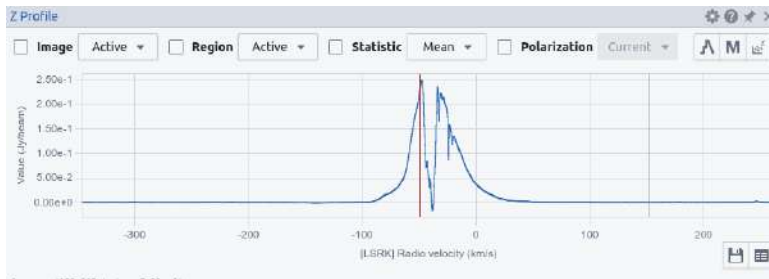


Figura 5: Riga del CO - AGAL301.136-00.226 - Array 12 m.

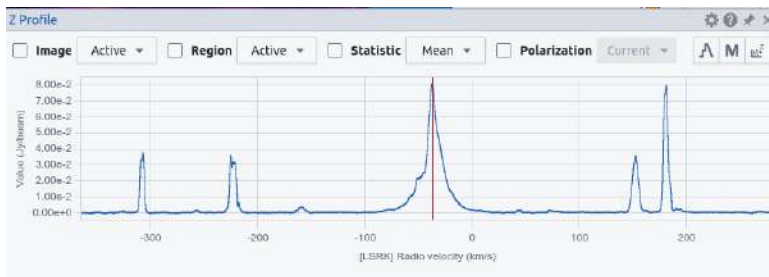


Figura 6: Riga del SiO - AGAL301.136-00.226 - Array 12 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

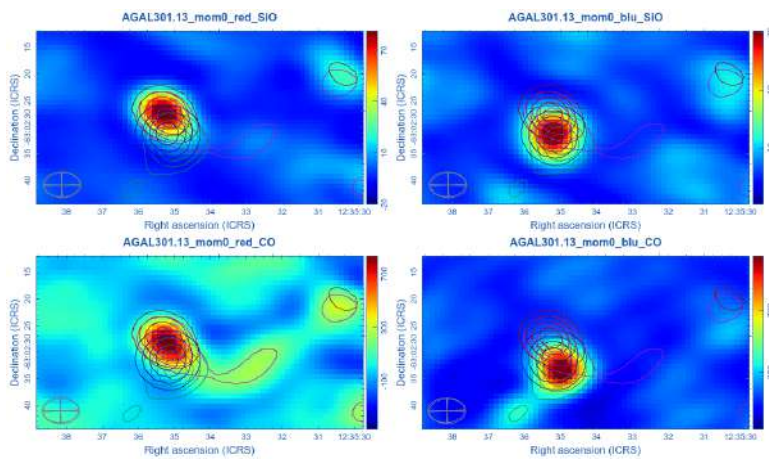


Figura 7: Mappe del Momento Zero - AGAL301.136-00.226 - Array 12 m.

5.3 AGAL332.826-00.549 - Configurazione da 7 m

I dati della sorgente AGAL332.826-00.549 sono stati acquisiti dall'array di 7 m, con una risoluzione angolare di 5.161 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

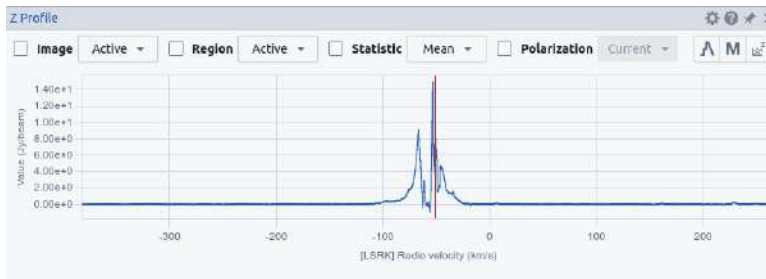


Figura 8: Riga del CO - AGAL332.826-00.549 - Array 7 m.

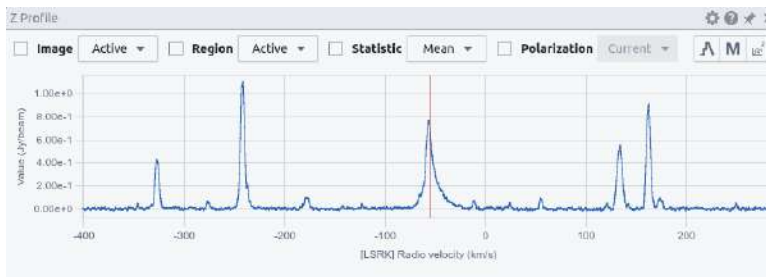


Figura 9: Riga del SiO - AGAL332.826-00.549 - Array 7 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

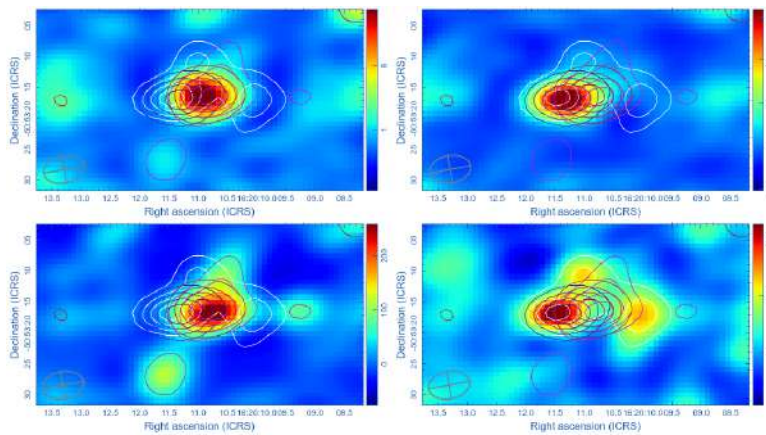


Figura 10: Mappe del Momento Zero - AGAL332.826-00.549 - Array 7 m.

5.4 AGAL332.826-00.549 - Configurazione da 12 m

I dati della sorgente AGAL332.826-00.549 sono stati acquisiti dall'array di 12 m, con una risoluzione angolare di 0.746 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

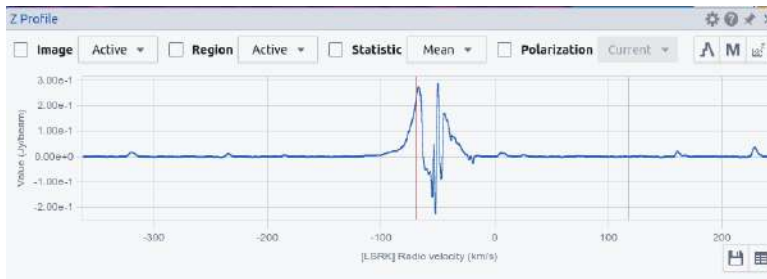


Figura 11: Riga del CO - AGAL332.826-00.549 - Array 12 m.

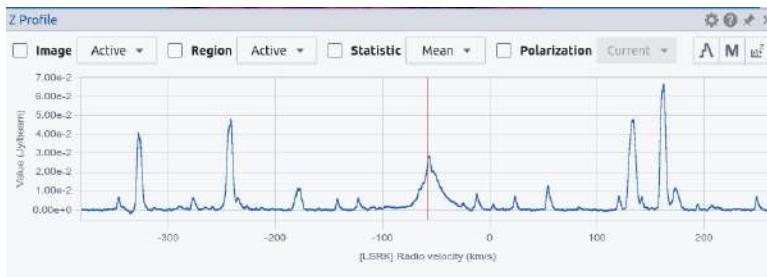


Figura 12: Riga del SiO - AGAL332.826-00.549 - Array 12 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

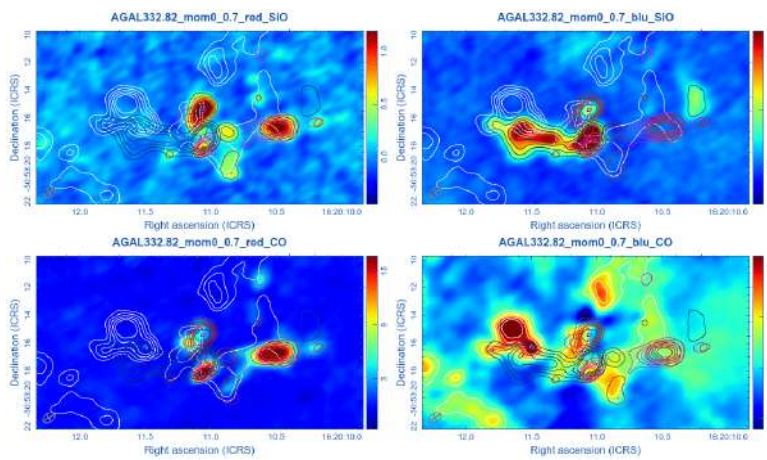


Figura 13: Mappe del Momento Zero - AGAL332.826-00.549 - Array 12 m.

5.5 AGAL337.916-00.477 - Configurazione da 7 m

I dati della sorgente AGAL337.916-00.477 sono stati acquisiti dall'array di 7 m, con una risoluzione angolare di 5.159 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

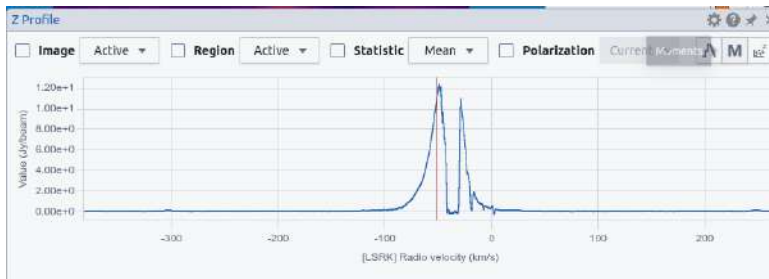


Figura 14: Riga del CO - AGAL337.916-00.477 - Array 7 m.

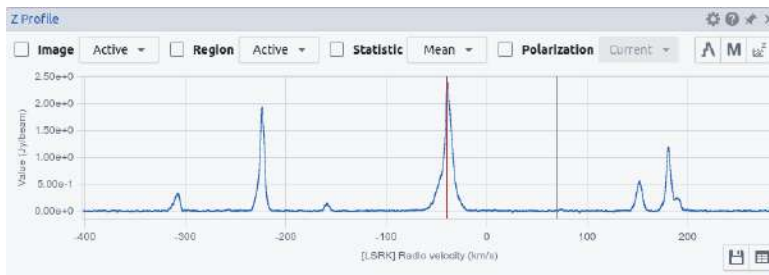


Figura 15: Riga del SiO - AGAL337.916-00.477 - Array 7 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

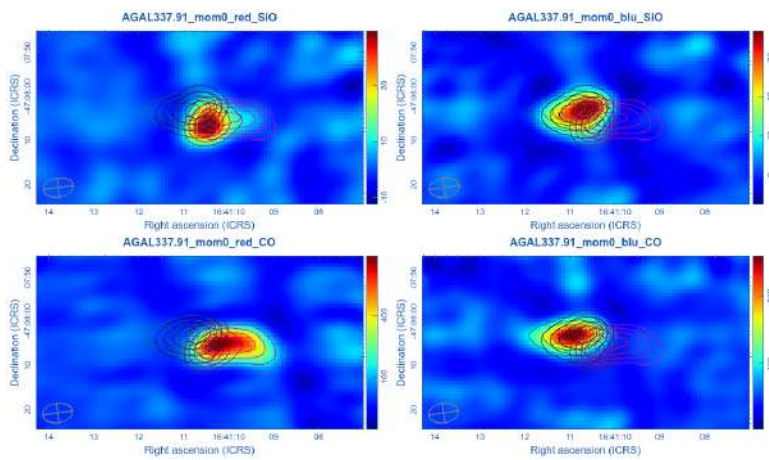


Figura 16: Mappe del Momento Zero - AGAL337.916-00.477 - Array 7 m.

5.6 AGAL337.916-00.477 - Configurazione da 12 m

I dati della sorgente AGAL337.916-00.477 sono stati acquisiti dall'array di 12 m, con una risoluzione angolare di 0.752 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

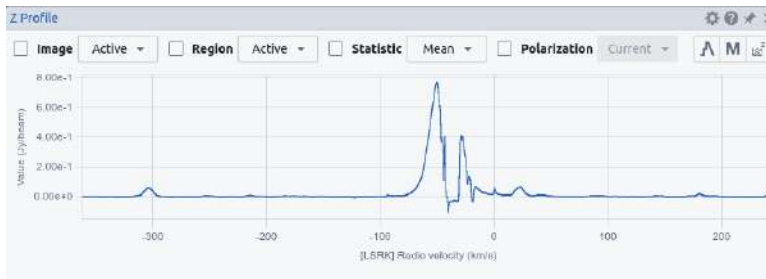


Figura 17: Riga del CO - AGAL337.916-00.477 - Array 12 m.

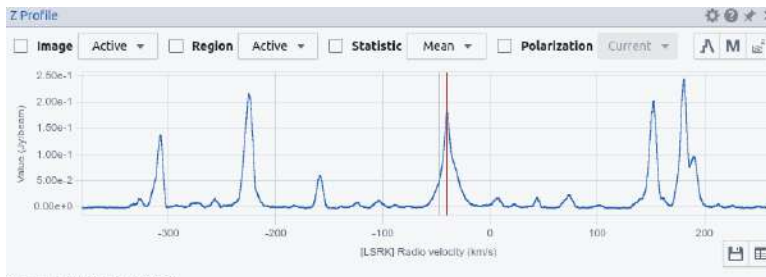


Figura 18: Riga del SiO - AGAL337.916-00.477 - Array 12 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

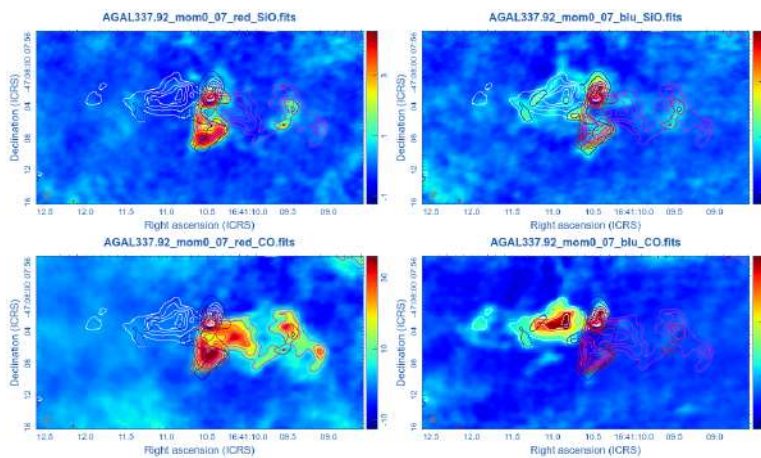


Figura 19: Mappe del Momento Zero - AGAL337.916-00.477 - Array 12 m.

5.7 AGAL351.581-00.352 - Configurazione da 7 m

I dati della sorgente AGAL351.581-00.352 sono stati acquisiti dall'array di 7 m, con una risoluzione angolare di 5.269 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

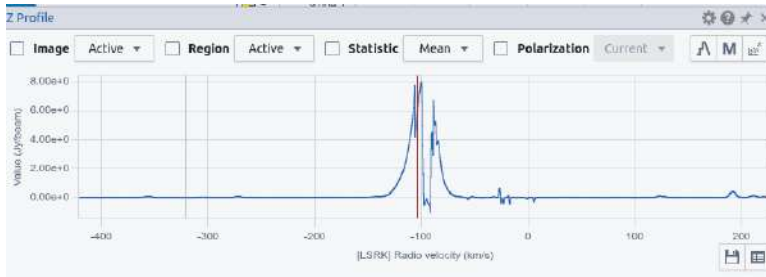


Figura 20: Riga del CO - AGAL351.581-00.352 - Array 7 m.

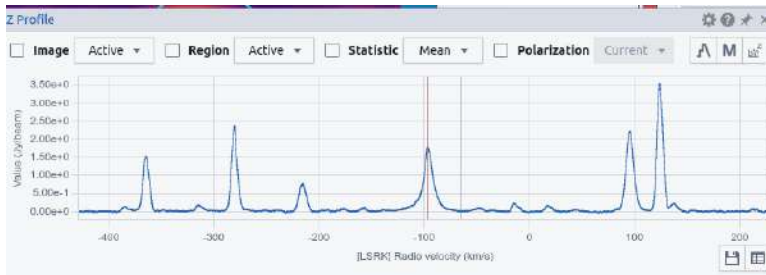


Figura 21: Riga del SiO - AGAL351.581-00.352 - Array 7 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

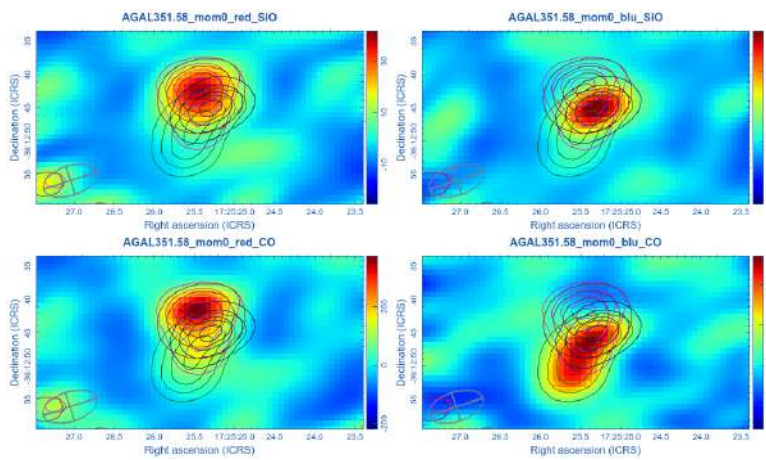


Figura 22: Mappe del Momento Zero - AGAL351.581-00.352 - Array 7 m.

5.8 AGAL351.581-00.352 - Configurazione da 12 m

I dati della sorgente AGAL351.581-00.352 sono stati acquisiti dall'array di 12 m, con una risoluzione angolare di 1.137 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

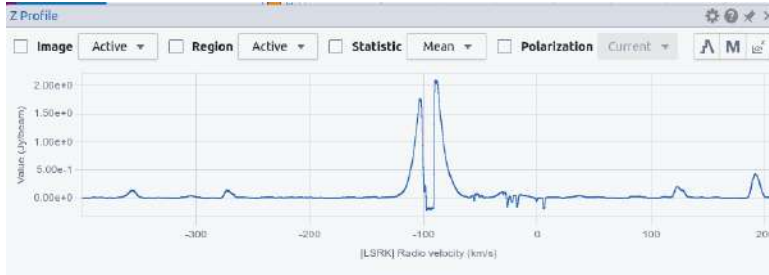


Figura 23: Riga del CO - AGAL351.581-00.352 - Array 12 m.

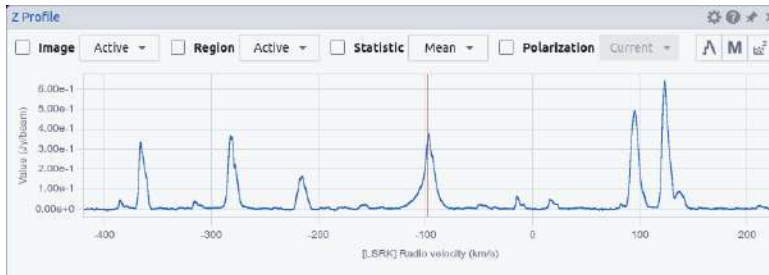


Figura 24: Riga del SiO - AGAL351.581-00.352 - Array 12 m.

Di seguito vengono riportate le Mappe di Momento Zero.

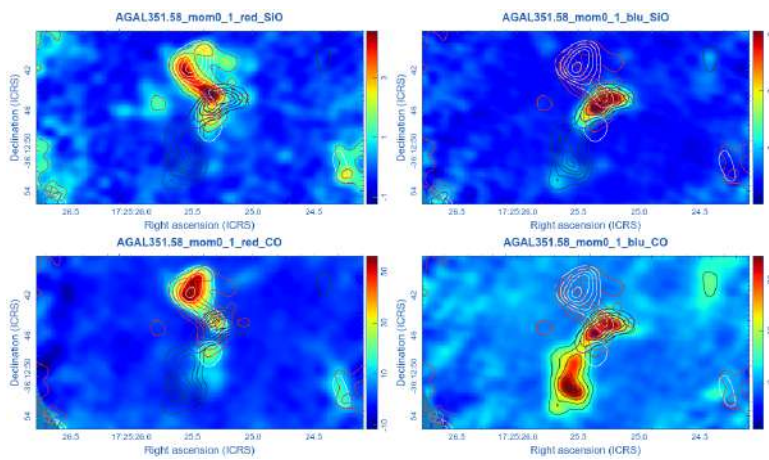


Figura 25: Mappe del Momento Zero - AGAL351.581-00.352 - Array 12 m.

5.9 AGAL012.804-00.199 - Configurazione da 7 m

I dati della sorgente AGAL012.804-00.199 sono stati acquisiti dall'array di 7 m, con una risoluzione angolare di 5.102 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

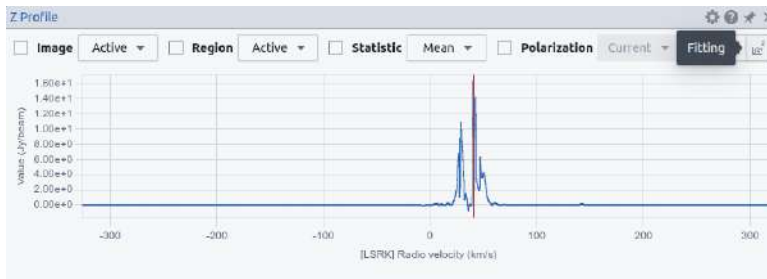


Figura 26: Riga del CO - AGAL012.804-00.199 - Array 7 m.

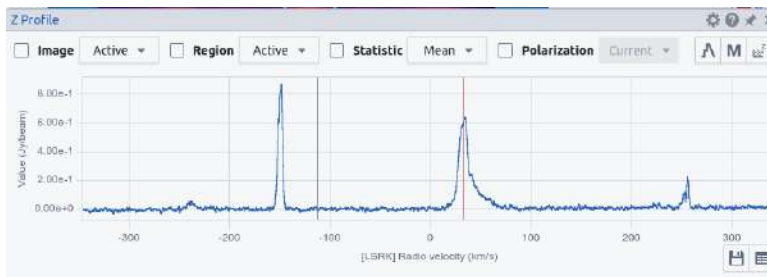


Figura 27: Riga del SiO - AGAL012.804-00.199 - Array 7 m.

Per questa sorgente è stato deciso di riportare le Mappe di Momento Zero, sia delle singole componenti, senza aggiungere i contorni sovrapposti delle altre; sia le Mappe di Momento Zero con tutti i contorni indicativi di tutte le componenti. Lo studio di questa regione di cielo risulta particolarmente interessante, poiché si ipotizza che le sorgenti osservate possano in realtà essere due distinte.

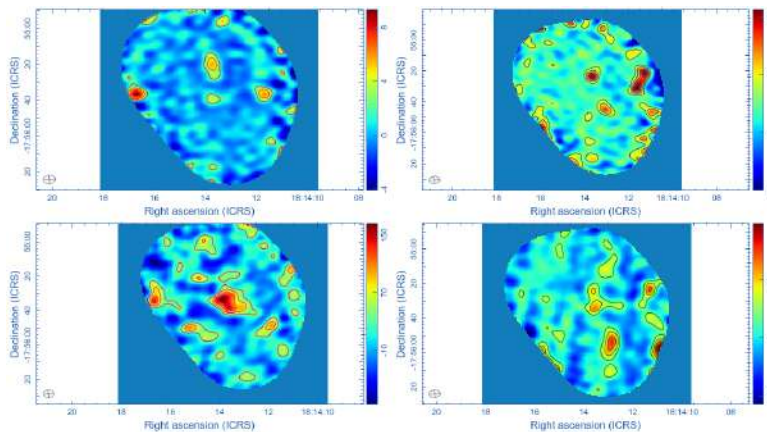


Figura 28: Mappe del Momento Zero delle singole componenti (no sovrapposizione di contorni)- AGAL012.804-00.199 - Array 7 m.

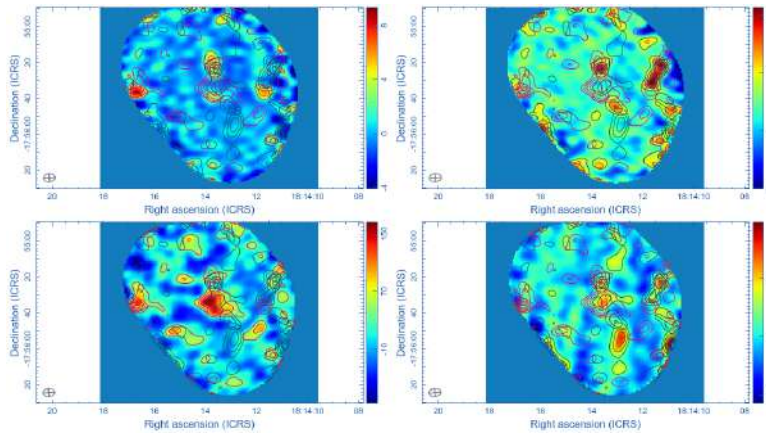


Figura 29: Mappe del Momento Zero con sovrapposizione di contorni- AGAL012.804-00.199 - Array 7 m.

5.10 AGAL012.804-00.199 - Configurazione da 12 m

I dati della sorgente AGAL012.804-00.199 sono stati acquisiti dall'array di 12 m, con una risoluzione angolare di 0.738 arcsec. Viene riportato di seguito lo studio spettroscopico relativo alle righe spettrali del CO e dell'SiO.

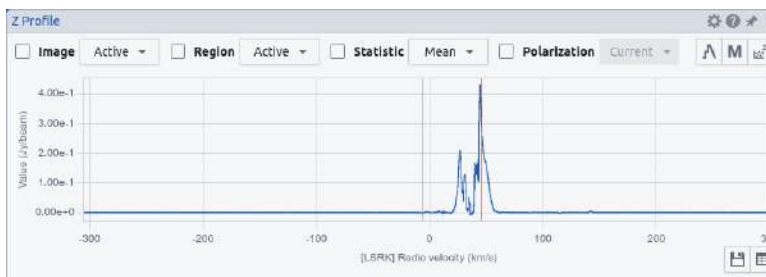


Figura 30: Rigga del CO - AGAL012.804-00.199 - Array 12 m.

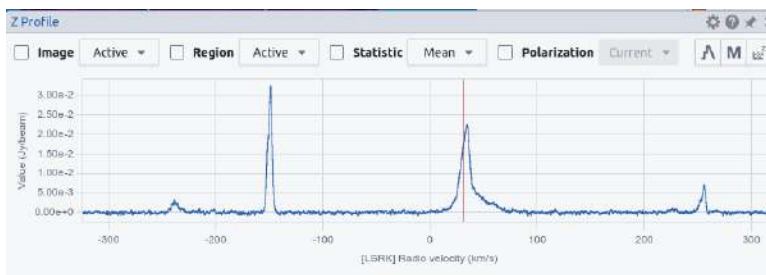


Figura 31: Rigga del SiO - AGAL012.804-00.199 - Array 12 m.

Anche in questo caso si è scelto di riportare le Mappe di Momento Zero, sia delle singole componenti, senza aggiungere i contorni sovrapposti delle altre; sia le Mappe di Momento Zero con tutti i contorni indicativi di tutte le componenti.

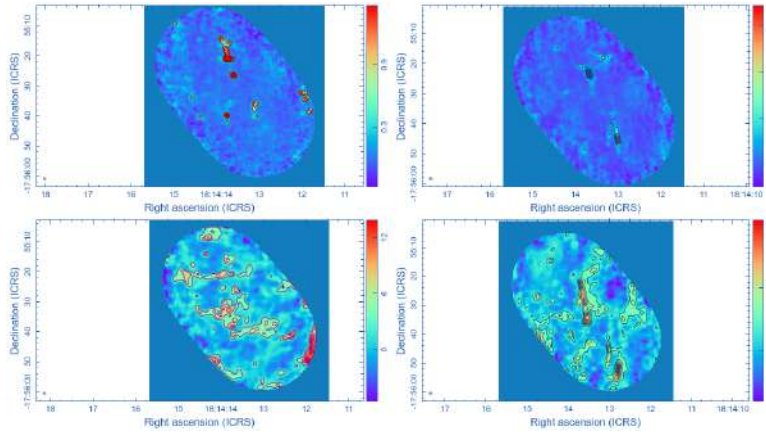


Figura 32: Mappe del Momento Zero delle singole componenti (no sovrapposizione di contorni)- AGAL012.804-00.199 - Array 12 m.

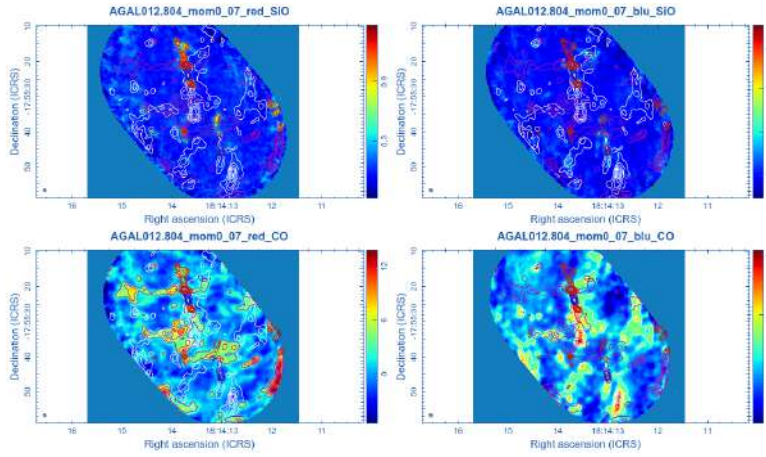


Figura 33: Mappe del Momento Zero con sovrapposizione di contorni- AGAL012.804-00.199 - Array 12 m.

6 Confronto Risultati APEX - AGAL012.804-00.199

In seguito allo studio delle Mappe di Momento Zero della sorgente AGAL012.804-00.199, si è proceduto a un'analisi comparativa tra la transizione del CO (2-1) precedentemente illustrata e la transizione del CO (6-5), quest'ultima osservata mediante il radiotelescopio APEX. Tenuto conto che APEX è un single-dish con un diametro di 12 m, ci si aspetta che i dati raccolti abbiano una risoluzione molto più bassa, se confrontati con i dati interferometrici ALMA. Per questo motivo si è deciso di confrontare i dati APEX, con quelli acquisiti con l'array da 7 m di ALMA.

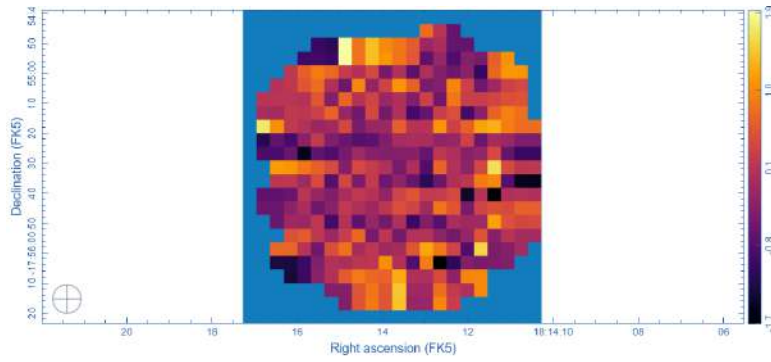


Figura 34: Mappa di Momento Zero della transizione del CO 6-5 . Osservazioni APEX.

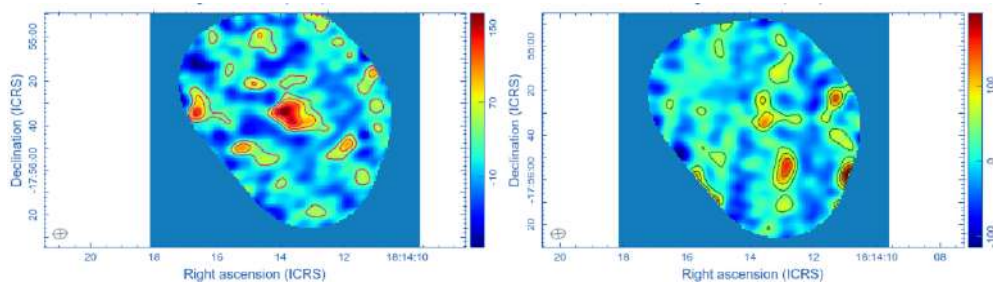


Figura 35: Mappa di Momento Zero della transizione del CO 2-1. A sinistra è rappresentato il CO sottoposto al redshift, a destra il CO sottoposto al blueshift. Osservazioni ALMA.

Dallo studio comparativo delle mappe di momento zero si osserva una significativa corrispondenza nella distribuzione spaziale della molecola del CO, evidenziata sia nei dati ottenuti con il radiotelescopio APEX sia in quelli acquisiti con l'array da 7 m di ALMA, indicando una coerenza tra le emissioni rilevate dai due strumenti.

Riferimenti bibliografici

- [1] *One, Two, Three... An Explosive Outflow in IRAS 12326-6245 Revealed by ALMA.*
Luis A. Zapata et al. (2023).