



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MODELOS DINÁMICOS DE FLUJOS EXPLOSIVOS EN
ASTROFÍSICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

JORGE ALBERTO OSORIO CABALLERO

TUTOR

DR. PEDRO RUBEN RIVERA ORTIZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A ti que estas leyendo esto, gracias.

Se le agradece al Dr. Pedro Ruben Rivera Ortíz, por ser tutor de este trabajo, por su apoyo y dedicación, así como al pasajero Dr. Ary Rodríguez González, quien supervisó el proyecto desde su concepción a su final. Sin la ayuda de ambos este trabajo no hubiera sido posible.

Así mismo se les agradece a María del Carmen Caballero Rosas y a Midori Tanya Lizbeth Marin Garduño, quienes durante todo el proceso prestaron su apoyo y compañía cuando fue necesario y con quienes sé que puedo contar en el futuro.

Por otro lado, considerando la trayectoria completa por la universidad, es importante agradecer a mis compañeros que recorrieron larga parte del trayecto conmigo; Alberto V., Guillermo Q., Oscar M., Oscar T., Marco R. y Daniela G. Además de profesores y ayudantes que fueron fundamentales en mi trayectoria académica, así como en mi formación docente, Cuauhtli Martínez Guerrero, Ernesto Vázquez, Liliana Hernández, Pedro Rivera, Ary Rodríguez, Antonio Castellanos y Antonio García.

Del mismo modo se le agradece a los miembros del grupo de astronomía del Instituto de Ciencias Nucleares, quienes me recibieron amablemente, con quienes he trabajado y espero seguir haciéndolo; Ary Rodríguez, Liliana Hernández, Pedro Rivera, Antonio Castellanos, Malinalli Perez e Ivan Castorena.

Se extienden agradecimientos a toda mi familia, quienes son una parte esencial de mi desarrollo personal.

Finalmente agradezco el apoyo del proyecto: *Estudio de la formación de cúmulos estelares masivos*, con código: LANCAD-UNAM-DGTIC-408 y a la beca de apoyo

a SNI-III. Así mismo se agradece el apoyo al proyecto papiit *La Formación estelar promovida por regiones HII* con con numero de proyecto PAPIIT: IN109518.

JAOC.

Resumen

Las regiones de formación estelar masiva muestran procesos físicos que promueven la formación de múltiples estrellas y, en ocasiones, eventos explosivos que inhiben la formación de las asociaciones de estrellas masivas. Estos procesos de destrucción de cúmulos en formación son ahora muy estudiados, pues queda una gran cantidad de dudas relacionadas con estos eventos, que se han observado en la región BN/KL de Orión y, más recientemente, en las regiones G5.89 y DR21. Aunque se han formulado múltiples hipótesis para explicar el origen y evolución de estos objetos, aun deben ser caracterizados con mayor profundidad. En este trabajo estamos interesados en realizar un estudio que nos ayude a encontrar las condiciones iniciales de los tres flujos explosivos.

Motivados en el trabajo de Rivera-Ortiz et al., (2019 a, b y 2021) acerca del flujo explosivo encontrado en la región de Orión BN/KL con emisión en hidrógeno molecular, en donde se propone un modelo dinámico para explicar el comportamiento de los flujos filamentosarios que componen la región, analizaremos las regiones G5.89 y DR21, así como la región de Orión BN/KL, tomando una muestra de los dedos, con emisión en la molécula de CO. Los "dedos" de CO observados, y reportados en la literatura, de cada una de estas regiones tienen información de la velocidad radial y tamaño proyectado de cada dedo para cada evento explosivo, con estos datos se obtendrán las condiciones iniciales de los grumos que formaron cada uno de los dedos observados (en Orión BN/KL, G5.89 y DR21) utilizando el modelo de plasmón presentado en Rivera-Ortiz et al. (2019a, RO19a de aquí en adelante).

Para esto hemos reducido las ecuaciones presentadas en RO19a, para resolver cada una de las estructuras en Orión BN/KL, G5.89 y DR21 y hemos obtenido la masa y velocidad inicial de cada uno de los grumos eyectados en el evento explosivo. Además, hemos propuesto una edad de cada uno de estos eventos explosivos que se presentan en ese trabajo.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Origen de los flujos explosivos	5
1.2. Proyecto de tesis	9
1.3. Objetivos	9
2. Dinámica de los flujos explosivos	11
2.1. Marco teórico	11
2.1.1. Plasmón de masa constante	12
2.1.2. Pérdida de masa en plasmones en movimiento	14
2.1.3. Cálculo de condiciones iniciales por desaceleración del gas	15

2.2. Análisis previo	17
3. Objetos y ángulos de proyección.	23
3.1. Orión BN/KL	24
3.1.1. Datos observados	26
3.1.2. Cálculo de ángulos de proyección	26
3.2. G5.89	31
3.2.1. Datos observados	31
3.2.2. Cálculo de ángulos de proyección	34
3.3. DR21	37
3.3.1. Datos observados	38
3.3.2. Cálculo de ángulos de proyección	39
3.4. Análisis	43
4. Condiciones iniciales	49
4.1. Orión BN/KL	50
4.2. G5.89	56
4.3. DR21	61
5. Conclusiones	67

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
Apéndice A. Apéndice de herramientas numéricas	71
A.1. ANGLES.F90	71
A.2. INTTTES.F90	72
A.3. INTTTESM.F90	73

1 Introducción

El estudio de la formación estelar es relativamente reciente. En los años 50, Guillermo Haro (Haro, 1952) y George Herbig (Herbig, 1951) descubrieron observaciones de nebulosas, ahora conocidas como objetos HH, que durante muchos años fueron consideradas como la manifestación de las mismas protoestrellas. Durante los años 60 y 70 se encontraron similitudes con los espectros de remanentes de supernovas, lo que sugería que en realidad los objetos HH estaban siendo expulsados por estrellas en formación que se encontraban oscurecidas por gas y polvo de alta densidad (Schwartz, 1977).

Paralelamente, el desarrollo de radiotelescopios en longitudes de onda milimétricas y el mapeo de nubes moleculares, como por ejemplo la línea de 2.3 mm de CO $J=1 \rightarrow 0$, permitió encontrar nuevamente material expulsado (Snell et al., 1980). En los años 80 se crearon los primeros modelos de estos objetos, producidos por estrellas en formación y permitieron formar el paradigma actual de formación de estrellas de baja masa (e.g. Cantó, 1980).

El proceso mediante el cual una estrella es formada comienza cuando estructuras filamentosarias de la escala de varios pársecs se forman dentro de una nube molecular. Estas estructuras acretarán materia formando un núcleo pre-estelar en la nube, el cual seguirá acretando material. La caída de materia producirá una protoestrella en el centro del núcleo y, a causa de la acreción, la conservación del momento angular y la presencia de campo magnético, se generarán jets perpendiculares al disco de rotación con velocidades del orden de $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ durante la etapa llamada Clase 0, y en algunos casos la eyección terminal genera objetos HH. Mientras la acreción continua, el material que lo alimenta se encuentra concentrado en el disco de acreción, y aunque la eyección de material no es tan colimada, aun tiene una dirección perpendicular al disco en los objetos Clase I. Dicho disco eventualmente se convertirá en el disco protoplanetario, responsable de la generación de planetas en los objetos Clase II. Finalmente el disco formará planetas y la protoestrella empezará a generar procesos nucleares generando lo que se conoce como objetos Clase III. Estas etapas están resumidas en el cuadro derecho de la Fig. 1.1 (André, 2002)

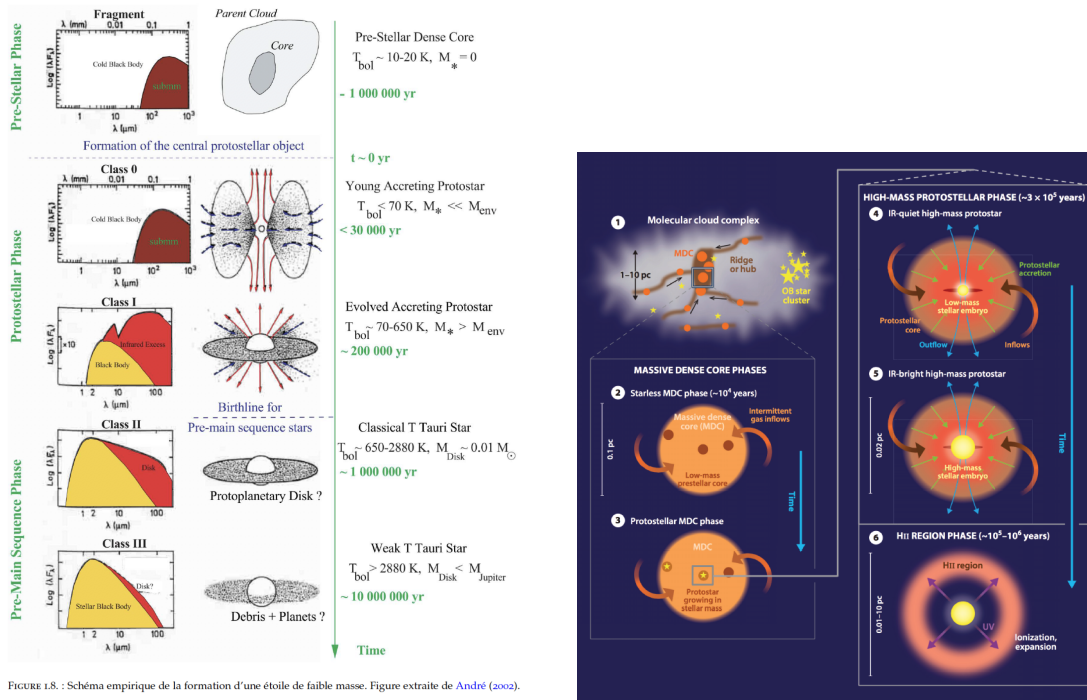


Figura 1.1: Esquema de formación estelar de baja y media masa (André, 2002), lado izquierdo y esquema de formación de estrellas de alta masa (Motte et al., 2018), lado derecho.

Bajo este paradigma, los flujos moleculares de los objetos en Clase 0 y Clase I son inherentes a la formación estelar. Estos son flujos bipolares y comúnmente encontrados en protoestrellas como complemento a los jets estelares, aunque dichos flujos poseen velocidades alrededor de los 30 km s^{-1} , que es mucho menor que la velocidad de los jets. Estos flujos inyectan una gran cantidad de momento, masa y energía en el medio interestelar y dada su interacción con el mismo, alcanzarán temperaturas suficientemente altas como para producir una fuerte emisión para trazadores como el monóxido de carbono. Los modelos de eyección de flujos moleculares incluyen variabilidad en la velocidad de eyección de material (Raga & Cantó, 1990), precesión (Eisloffel et al., 1996) y campos magnéticos (Raga et al., 2010). La Fig. 1.2 es un esquema de un flujo bipolar molecular saliendo de un núcleo denso de gas molecular. Como se puede ver, el flujo supersónico forma estructuras de gas chocado (superficies de trabajo) sobre el eje de simetría del jet. Otras estructuras de gas denso y chocado se observan debido a la interacción de las paredes la cavidad de gas caliente que con el gas de la nube materna.

En general, el proceso de formación anteriormente descrito es ampliamente conocido y estudiado en la formación de estrellas de baja masa debido a la gran cantidad de estrellas que existen de este tipo en comparación con las estrellas de alta masa (i.e., Shu, Adams & Lizano, 1987). Sin embargo, cuando se trata de la formación de estrellas con masas mayores a las 8 masas solares (M_{\odot}) el proceso no es tan claro, ya

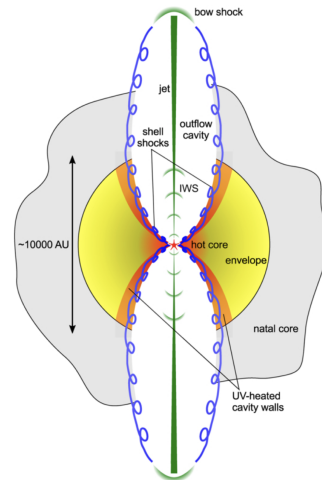


Figura 1.2: Esquema de como un flujo bipolar molecular interactúa y re-estructura al medio interestelar, creando estructuras densas y compactas, debido al gas chocado por el flujo supersónico (Van Dishoeck et al., 2011).

que teóricamente es mas complicado generar estrellas masivas, con los mecanismos conocidos para estrellas de baja masa, como lo es la acreción de materia, debido a que la presión de radiación, por la enorme cantidad de fotones producidos por las estrellas masivas, es lo suficientemente fuerte para limitar dicho proceso a una masa limite y por lo tanto, la acreción es limitada por la conservación de momento angular (Zinnecker & Yorke, 2007). El estudio de estas regiones también es una área de investigación actual y muy activa (Motte et al., 2018). Los procesos por los que pasan las estrellas de alta masa para formarse incluyen pasos que se muestran en el cuadro izquierdo de la Fig 1.1 y se enlistan a continuación (ver Dyson & Williams, 1997):

1. Hay evidencia clara de que la formación de estrellas masivas ocurre en los filamentos de nubes moleculares densas, con líneas de emisión de moléculas como el CO y HCO^+ .
2. En una segunda etapa se observa una nube fría y mas densa que resulta mas compleja químicamente, que es descrita como una nube infrarroja oscura de gas, pues lo único que la ilumina es la emisión infrarroja del fondo de microondas. Sin embargo esta nube da señales de formación estelar como emisión por colisiones y másares.
3. Para la tercer etapa ya tenemos un objeto protoestelar masivo, aun inmerso en el gas, comenzando a elevar la temperatura del mismo, generando emisión de una gran variedad de moléculas.
4. En la etapa siguiente muestra emisión de una capa delgada y tibia de gas que cae acercándose y siendo calentado por la protoestrella.

- Finalmente se observa una región ionizada de diámetro menor a las regiones HII comúnmente estudiadas que será conocida como región ultra compacta HII (UCHII), así mismo en esta fase se observan flujos moleculares saliendo de la región en donde la nueva estrella ha sido formada.

Regiones como las que fomentan este tipo de estructuras pueden ser observadas en el complejo molecular de Orión (OMC), la cual ha sido ampliamente observada y de la que mostramos un mapa de contorno integrado en CO (1-0) en la figura 1.3. en el cual se encuentran las dos nubes moleculares OMC1 y OMC2, que se pueden ver más claramente en el acercamiento mostrado en la figura 1.3. Para este trabajo nos concentraremos en la región de Orión BN/KL, que se encuentra inmersa en la OMC1.

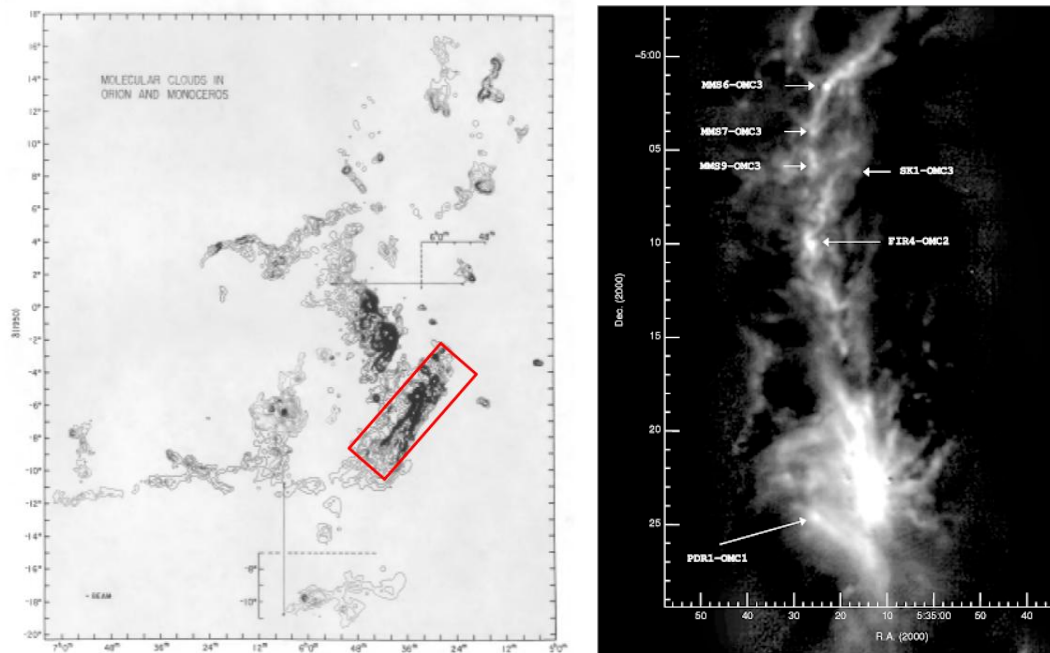


Figura 1.3: Imágenes del complejo molecular de Orión (OMC). En el lado izquierdo se muestra un mapa de contorno integrado del complejo molecular de Orión en emisión de CO(1-0) (Maddalena et al., 1986). En la región resaltada se encuentran las nubes moleculares OMC1 y 2. En el lado derecho se ve un acercamiento del área señalada en el mapa de contornos, en donde se puede apreciar claramente la OMC1.(Johnstone, 2003).

Sin embargo, el descubrimiento de flujos moleculares isotrópicos, conocidos recientemente como flujos explosivos, presenta un reto al panorama completo de formación de estrellas de baja y alta masa, pues parecen surgir de regiones donde varias protoestrellas se forman simultáneamente, lo que sugiere una interconexión entre ambos fenómenos y parecen mostrar la interacción entre ellas. El primer ejemplo de estos flujos es la región de Orion BN/KL (Blecklin & Neugebauer, 1957, Kleinmann & Low, 1967), que mostraba un espectro con desplazamientos al rojo correspondientes a varias veces $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ sin ninguna dirección preferencial. En los años 90, con

el aumento en la resolución en las observaciones, se encontró su morfología (Allen & Burton, 1993, Baño-Espulgues, 2014) y muy pronto se consideró que alguna explosión pudo originar este flujo. Esto fue finalmente determinado al encontrar una ley de Hubble en cada uno de los filamentos por Zapata et al., (2009).

El evento explosivo en la región BN/KL de Orión, ha sido de gran interés astronómico debido a que presenta una estructura particular con múltiples filamentos que tienen emisión detectada en hidrógeno molecular, como se muestra en la figura 1.4, y monóxido de carbono (CO), con energía de unos pocos órdenes de magnitud mas pequeña que una supernova. Además, dichos filamentos presentan edades cinemáticas similares y, por su dirección, parecen provenir un origen común (Nissen et al., 2006). Esto parece indicar que su origen fue en un momento muy corto y desde el mismo punto, por lo que una posible explicación es que un evento con características explosivas tuvo lugar con un origen temporal y espacial definido. Hasta el día de hoy solo se han reportado tres casos de objetos con estas características, de los cuales Orión es el más cercano y es el prototipo en el que se han propuesto mecanismos y modelos sobre su origen (Bally et al., 2015, Dempsey et al., 2020, Zapata et al., 2009, Zapata et al., 2011, Zapata et al., 2020). Estos objetos provienen de regiones de formación de estrellas masivas, en donde la probabilidad de tener un encuentro cercano de objetos protoestelares es más alta.

Es posible que la dificultad para observar estos eventos tan energéticos radique en la corta duración de la explosión y el poco tiempo que tardan en evolucionar hasta que el material eyectado se confunde con el medio interestelar, así como la interacción con otros eventos en la región, por ejemplo, Salas et al., (1999) reportó que un viento emitido por IRc2 interfiere con el flujo de Orion BN/KL y podría quebrantarlo en 2000 yr. Por lo que se vuelve muy importante conocer el proceso que los forma y así inferir su efecto en el enriquecimiento molecular del medio interestelar. Zapata et al., (2020) ha determinado que un límite inferior para la tasa de ocurrencia de un flujo explosivo es similar a la tasa de explosión de supernovas.

1.1. Origen de los flujos explosivos

Existen algunos modelos que se han propuesto como origen de estos flujos explosivos, entre los que se encuentran los siguientes:

- **Modelo de Bally**

Se han estudiado los efectos que estrellas desbocadas podrían tener en el medio interestelar. Esto llevo a que Bally et al., (2015) propusiera un modelo para

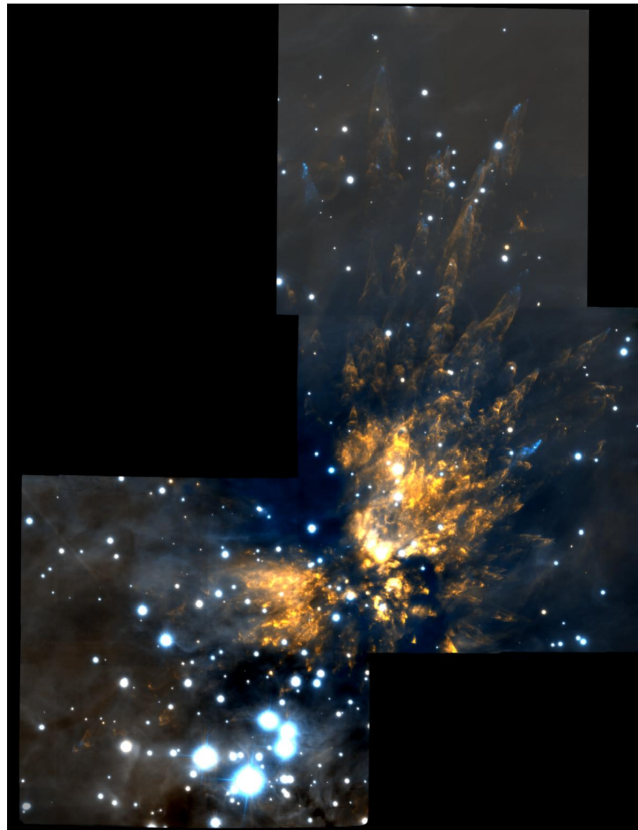


Figura 1.4: Region Orión BN/KL, Localizada en la OMC1, con emisiones de H₂ en amarillo y emisión de [FeII] en azul. En esta figura puede notarse con claridad los dedos de la región (Bally et al., 2015).

explicar la formación de la región de los dedos de Orión en BN/KL a través de la interacción dinámica de un cúmulo de estrellas con un cuerpo estelar desbocado. En este modelo, el sistema forma estrellas binarias y el exceso de energía se libera en la destrucción del cúmulo. En este proceso, las envolturas de las estrellas del cúmulo interactúan gravitacionalmente generando los bullets, que en su camino van generando los dedos en repetidas órbitas de interacción. Sin embargo, las características específicas de los filamentos de CO en los dedos no son claras en el modelo.

■ **Dedos como inestabilidades**

Las inestabilidades de Rayleigh-Taylor son un mecanismo plausible para formar los dedos de Orión a través de un viento variable en el tiempo y amortiguado por un medio denso. Esto es consistente con Stone et al., (1995) y con Dempsey et al., (2020) quienes simularon vientos variables y encontraron una morfología similar a los dedos de Orión. Sin embargo, aun falta analizar mas este modelo desde el punto de vista dinámico.

■ **Supernova planetaria**

Este modelo plantea que flujos como estos pueden ser causados al terminar el tiempo de vida de una estrella masiva, con un numeroso sistema planetario alrededor de ella, de modo que cuando termina la vida de la estrella masiva y esta explota como supernova liberará la órbita de los exoplanetas alrededor de ella, saliendo como proyectiles, de modo que se generaran los dedos (Raga et al., 2021). En este nuevo modelo es necesario aun estudiar como se forman los filamentos debido al material interestelar que es atraído por el gran potencial de los exoplanetas.

■ **Explosión dinámica**

Rivera-Ortiz et al., (2019b y 2021) propusieron que al pasar un objeto estelar masivo por un cúmulo autogravitante de grumos de material nebuloso, este se destruiría, expulsando los grumos en distintas direcciones preferencialmente en la dirección de movimiento del objeto masivo. Sin embargo, un pequeño ángulo de perspectiva es suficiente para observar estos grumos con las características observadas en los flujos explosivos.

En este trabajo intentaremos extender el modelo dinámico por Rivera-Ortiz (2019a, 2019b) que modela cada uno de los dedos como plasmones, es decir un grumo que al ser acelerado e interactuar con el medio externo será estructurado y frenado por dicha interacción. Con este modelo se han obtenido relaciones entre la pérdida de masa y la desaceleración del plasmón, así como el hecho de que a dedos con mayor velocidad de eyección le corresponden tiempos de vida menores, aunque los radios finales de los dedos serán los mismos, ya que esta solo dependerá de las características iniciales del plasmón. Además, gracias a este modelo se ha estimado que la edad que un objeto

Tabla 1.1: Datos generales de las tres regiones explosivas Orión BN/KL, G5.89 y DR21, que se estudian en este trabajo, Los dedos de CO son la muestra aproximada que se obtuvo para este trabajo.

	BN/KL	DR21	G5.89
Edad [yr]	500	10000	1000
Energía [erg]	$2 - 6 \times 10^{47}$	$\leq 10^{48}$	10^{46-49}
Distancia [pc]	385	1360	3000
Tamaño [cm]	3.44×10^{17}	2.3×10^{18}	5.8×10^{17}
Filamentos en H ₂	~ 200	-	-
Filamentos en CO	~ 26	~ 17	~ 12

explosivo es de alrededor unos cuantos miles de años, lo que es consistente con las pocas veces que se han observado este tipo de objetos.

Nosotros reproduciremos los resultados obtenidos con este modelo para Orión BN/KL, utilizando información conocida (Tab. 1.1) y analizando además como cambian estos resultados tomando parámetros diferentes para la edad del objeto. Habiendo comparado los resultados que obtengamos con nuestros modelos, con los obtenidos en los artículos previamente mencionados, confirmando que son consistentes, utilizaremos nuestros modelos para estudiar los objetos DR21 y G5.89. Las observaciones de estos objetos muestran grandes similitudes en estructura y morfología a la que se observa en Orión BN/KL. Sin embargo, debido a que son mucho más lejanos, solo se han podido identificar unos cuantos filamentos o dedos de CO en recientes observaciones altamente sensitivas, siendo esta, también, la causa de que no haya observaciones en hidrógeno molecular observándose principalmente en CO, que es más fácil de detectar, por lo que un modelo probado para este tipo de objetos con observaciones en CO resulta sumamente útil.

Con datos observacionales de estos dos objetos buscaremos una edad dinámica de ambos con un modelo balístico, que nos servirá como una primera aproximación para obtener una edad estimada para los grupos de CO de Orión BN/KL, G5.89 y DR21. A cada uno de los dedos observados, les aplicaremos el modelo del plasmón para obtener datos como las velocidades de eyección de cada uno de los dedos su pérdida de masa y una aproximación de su tiempo de vida.

1.2. Proyecto de tesis

Las estrellas jóvenes y masivas dentro de cúmulos muy poblados tienen una alta probabilidad de sufrir encuentros dinámicos cercanos que pueden llevar a eventos energéticos y de carácter explosivos. Hasta ahora Orión BN/KL se ha convertido en el prototipo de un flujo explosivo aunque durante la última década, con el aumento en sensibilidad y resolución de radiotelescopios como ALMA¹, se han confirmado más eventos de esta naturaleza en las regiones DR21 y G5.89. Esto motiva a encontrar un mecanismo que pueda explicar como se generan este tipo de eventos explosivos y cuál es su importancia en el enriquecimiento químico y energético en la formación estelar. Cada uno de estos eventos explosivos se caracteriza por una estructura de largos filamentos de alta velocidad que parecen haber sido impulsados en un evento único y en dirección isotrópica alrededor de un centro en común, en donde probablemente tuvo lugar el encuentro dinámico.

Siendo Orión BN/KL la región más cercana a 385 pc, se han podido comparar modelos teóricos y numéricos con las observaciones de los filamentos. Esta región es la única donde los filamentos han podido ser detectados en emisión infrarroja de hidrógeno molecular, llamados “fingers” o dedos, y en emisión de radio de la molécula de CO, llamados “streamers”, a diferencia de las otras dos regiones, donde solamente se ha detectado la emisión de CO. Esta ventaja en la información de Orión BN/KL ha permitido que se comprenda parcialmente la ecuación de movimiento de los dedos y las condiciones iniciales individuales de cada filamento.

Es por esto que usando el modelo dinámico desarrollado para Orión BN/KL puede ser posible obtener las condiciones iniciales de cada una de las regiones explosivas.

1.3. Objetivos

Se realizará una revisión del modelo del plasmón, utilizado por Rivera-Ortiz et al., (2019a y b) para analizar la región de Orión BN/KL con observaciones en hidrógeno molecular, para poder aplicarlo a los dedos de observaciones de CO, y de este modo encontrar las condiciones iniciales de los flujos de las regiones de Orión BN/KL, DR21 y G5.89. Este estudio nos ayudará a entender mejor la naturaleza de este tipo de eventos explosivos usando observaciones de CO y debido a que las regiones G5.89 y DR21 no tienen observaciones en hidrógeno molecular, dado su distancia, no se

¹Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, Chile, ~1 mm, <https://www.eso.org/public/spain/teles-instr/alma/>

espera tenerlas en un futuro, propondremos un mecanismo que pueda ser utilizado en objetos lejanos sin emisión de H_2 detectada. Para cumplir con esto se plantean los siguientes objetivos específicos.

- Hacer una revisión de las propiedades observacionales de los flujos explosivos, sintetizando sus propiedades en común.
- Realizar nuevas aproximaciones para la cálculo de la edad de cada uno de los objetos por medio de diferentes métodos.
- Obtener las condiciones físicas de los objetos de nuestras muestras utilizando los modelos teóricos publicados en Rivera-Ortiz et al., (2019a, b y 2021).

En la presente tesis se discutirá el modelo dinámico de Rivera-Ortiz et al. (2019a) en el capítulo 2, en el capítulo 3 se dará una descripción mas completa de los flujos explosivos encontrados hasta ahora y se intentará determinar la edad de cada uno. En el capítulo 4 se aplicará el modelo dinámico para encontrar las condiciones iniciales para la muestra de objetos y finalmente haremos un repaso de los resultados obtenidos y sus implicaciones en el capítulo 5.

2 Dinámica de los flujos explosivos

El estudio de la mecánica clásica nos permite hacer predicciones sobre la trayectoria de un objeto conociendo su posición y momento en un punto dado, de modo que podemos predecir hacia donde irá, así como realizar suposiciones sobre el origen de su movimiento. Al tratar con simultáneamente con objetos que no interactúan con fuerzas externas, como en el caso de explosiones o colisiones, conocer la trayectoria y la masa de múltiples miembros de la colisión nos permite encontrar las características dinámicas en común entre sus trayectorias, de modo que podemos conocer donde tuvo lugar la colisión y aproximar la energía y momento implicado en el evento.

En el caso de flujos explosivos, como los que estudiaremos en este trabajo, resulta de particular importancia conocer el lugar y las condiciones en que tuvo origen la explosión, para poder entender su causa, ver si coincide para los múltiples objetos que se han observado con estas características y determinar si su existencia esta ligada a los procesos de formación estelar masiva, así como la probabilidad de que puedan ocurrir y observarse flujos explosivos similares.

De este modo plantearemos un modelo dinámico para encontrar parámetros iniciales que a un tiempo dado reproduzcan las características observadas de cada dedo originado en un flujo explosivo. Para esto empezaremos explicando los modelos dinámicos que han sido usado hasta ahora para explicar el movimiento de un grumo de gas que se se mueve a alta velocidad a través del medio interestelar.

2.1. Marco teórico

La primera aproximación que se hace para entender la vida de los flujos moleculares es la del movimiento balístico. Consiste en suponer que el material que se mueve a alta velocidad no interactúa dinámicamente con el medio, es decir, no hay fricción

con el medio circundante y tampoco hay objetos que lo aceleren gravitacionalmente. Bajo esta suposición, la edad es comparable a la distancia que el flujo ha recorrido dividida por su velocidad. En el caso de Orión BN/KL, las edades balísticas que se encuentran van desde los 500 yr hasta los 4000 yr (Cunningham, 2006; Bally et al., 2011). Esta conclusión va en contra de la suposición de que todos los dedos tuvieron un origen simultáneo.

Sin embargo, el origen geométrico de los dedos de Orión coincide con el origen geométrico de los objetos protoestelares BN, I y x, que tienen una edad balística de 500 yr y que parecen haber sido liberados de un cúmulo estelar en formación. En este caso la aproximación es mucho más sólida, ya que al ser objetos tan masivos no tendrán una interacción dinámica importante con el medio interestelar, por lo que su origen debe estar muy relacionado con el flujo explosivo. Gracias a eso, la suposición que predomina en estos flujos es que fueron expulsados simultáneamente o en un periodo despreciable en comparación con su tiempo de vida. Esto nos lleva a pensar que los dedos que tienen una mayor edad tendrían que haber experimentado un fuerte frenado a lo largo de su trayectoria. Por otra parte, Zapata et al., (2009), Zapata et al., (2010) y Zapata et al., (2019) han usado la suposición de un origen simultáneo para obtener los ángulos de proyección de los filamentos de CO observados en Orión BN/KL, en DR21 y en G5.89, asumiendo una edad fija de 500, 10000 y 645 yr, respectivamente.

Aun así, en el caso de los dedos de Orión, el frenado es evidente pues la edad balística no depende del ángulo de proyección, por lo que hace falta una ecuación de movimiento que pueda explicar la historia dinámica de cada dedo. Por el momento, las observaciones muestran que al frente de un dedo hay una nube densa, también conocida como grumo o *bullet*, que interactúa con el medio interestelar. Empezaremos explicando el modelo de un plasmón, es decir, un grumo de gas en equilibrio de presiones dinámica y externa, para luego describir las ecuaciones de movimiento en el caso de que este plasmón pierda masa, como parece ser el caso debido al material que va dejando en su movimiento en lo que podemos llamar *cola*. En este trabajo nos concentraremos en el modelo de plasmón, el cual ha sido utilizado en el estudio de los dedos de Orión BN/KL Rivera-Ortiz et al., (2019 a,b y 2021), de modo que continuaremos su estudio en Orión BN/KL y lo usaremos para encontrar las desaceleraciones en otros objetos como DR21 y G5.89.

2.1.1. Plasmón de masa constante

De Young & Axford, (1967) y Cantó et al. (1998), propusieron el modelo del plasmón, que consiste en considerar un grumo isotérmico con una longitud radial

R_c , a la que nos referiremos como radio de aquí en adelante, densidad de partículas n_c y a temperatura T_c , que choca contra un medio de densidad constante n_a (Fig. 2.1a). Eventualmente, este grumo comenzará a deformarse al buscar un equilibrio entre la presión dinámica del grumo y la presión térmica del ambiente (Fig. 2.1 b), de este modo el plasmón estratificará su presión y densidad, aunque conservará la masa original M_0 , dada por n_c y R_c , dentro de su envolvente (Fig. 2.1c)

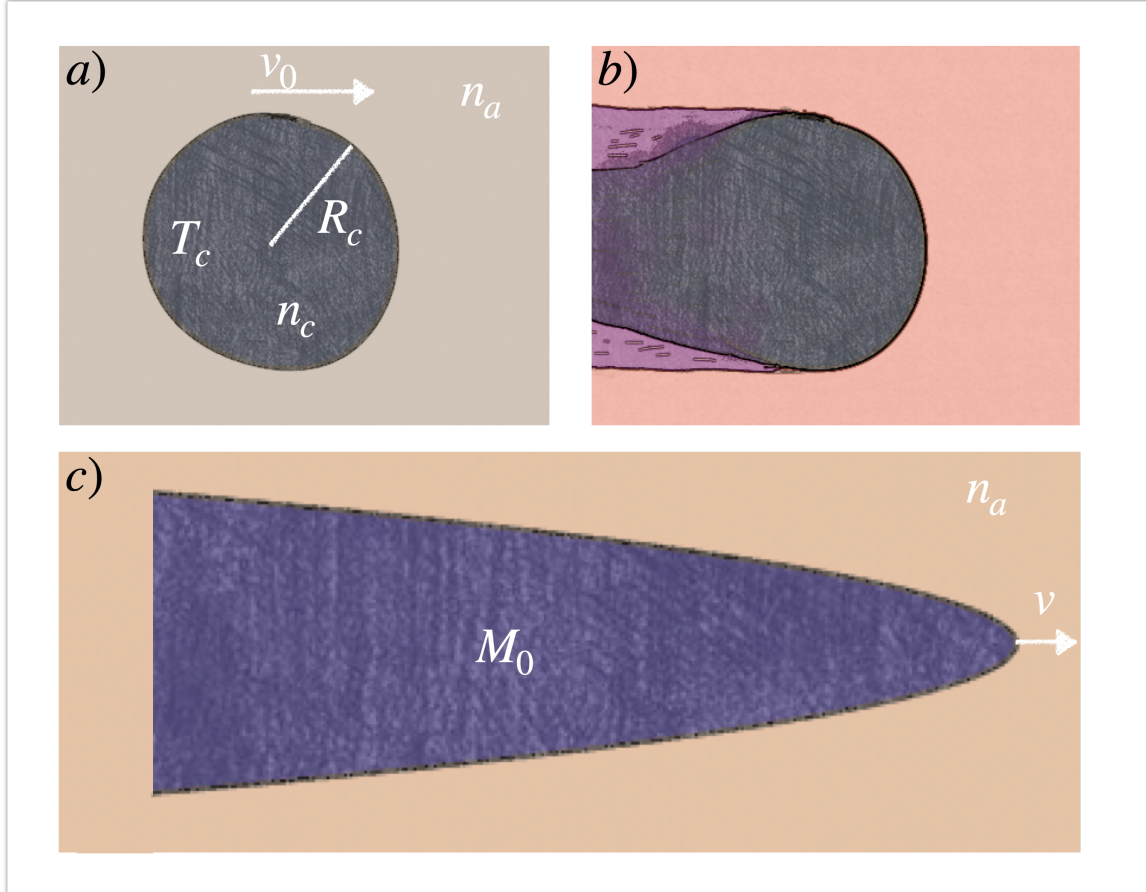


Figura 2.1: En el cuadro a) podemos observar al grumo de gas con una temperatura y densidad particulares, diferentes al medio en reposo. En el cuadro b) de la imagen podemos ver a el grumo acelerando y chocando con le medio, empezando a estirarse. Finalmente el cuadro c) nos muestra el plasmón formado, con una masa constante M_0 .

La forma de esta envolvente esta dada justamente por el equilibrio de presiones y genera un área que sufre una fuerza de arrastre causada por la interacción con el medio. Esta fuerza es la única que acelera al plasmón, lo que permite resolver su ecuación de movimiento. De modo, la solución de esta ecuación diferencial conduce a las ecuaciones de velocidad y posición adimensionales, $u = \frac{v}{v_0}$ y $r = \frac{R}{r_0}$, respectivamente, expresados como

$$u = \left(1 - \frac{\tau}{3}\right)^3, \quad (2.1)$$

$$r = \frac{3}{4} \left[1 - \left(1 - \frac{\tau}{3}\right)^4\right] \quad (2.2)$$

donde v_0 es la velocidad con la que el objeto es lanzado, $\tau = \frac{t}{t_0}$ es un tiempo adimensional que usa un tiempo de escala $t_0 = \left(\frac{M_0 v_0}{\frac{\pi}{2}(\pi^2 - 4)\rho_a c^4}\right)^{\frac{1}{3}}$ y r_0 es simplemente $r_0 = v_0 t_0$.

De las ecuaciones 2.1 y 2.2 podemos ver que a $\tau = 0$ se cumple que $u = 1$ y $r = 0$, que es consistente con las condiciones iniciales. Además, puede definirse el tiempo de vida de un plasmón $\tau_f = 3$ como el tiempo necesario para que el plasmón llegue a una velocidad $u = 0$, lo que implica que el plasmón viajará una distancia $r = 3/4$. Por otro lado, usando la velocidad y la edad de un plasmón a un tiempo cualquiera τ sería posible obtener sus condiciones iniciales v_0 y t_0 .

Sin embargo, estas ecuaciones no reproducen adecuadamente el comportamiento del flujo en Orión BN/KL, como ha sido discutido por RO19a. Esto puede deberse a que sea necesario usar un modelo que considere la pérdida de masa del plasmón por su interacción con el medio.

2.1.2. Pérdida de masa en plasmones en movimiento

RO19a proponen que en un sistema de referencia que se mueve con el vértice de un plasmón podemos distinguir tres regiones como se muestra en la Fig. 2.2: una región interna al plasmón, una región donde el material interno se mezcla con el material arrastrado del medio, y el medio estático. La primera región pierde material a través de su superficie por un proceso de evaporación que se relaciona con el material presente en cada punto, o mejor dicho, su densidad, y con la velocidad del sonido interna. Esto puede ser descrito por una tasa de pérdida de masa por unidad de área, μ , proporcional a la densidad y a la velocidad del sonido del plasmón $\mu = \lambda \rho c$, donde λ es un parámetro geométrico menor a uno.

Podremos plantear entonces un sistema de ecuaciones para la masa, tiempo de evolución y distancia tal que,

$$m = e^{-\alpha\left(1-\frac{v}{v_0}\right)}, \quad (2.3)$$

$$\tau = \int_{v/v_0}^1 u^{-2/3} e^{-\frac{\alpha}{3}(1-u)} du, \quad (2.4)$$

y

$$r = \int_{v/v_0}^1 u^{1/3} e^{-\frac{\alpha}{3}(1-u)} du, \quad (2.5)$$

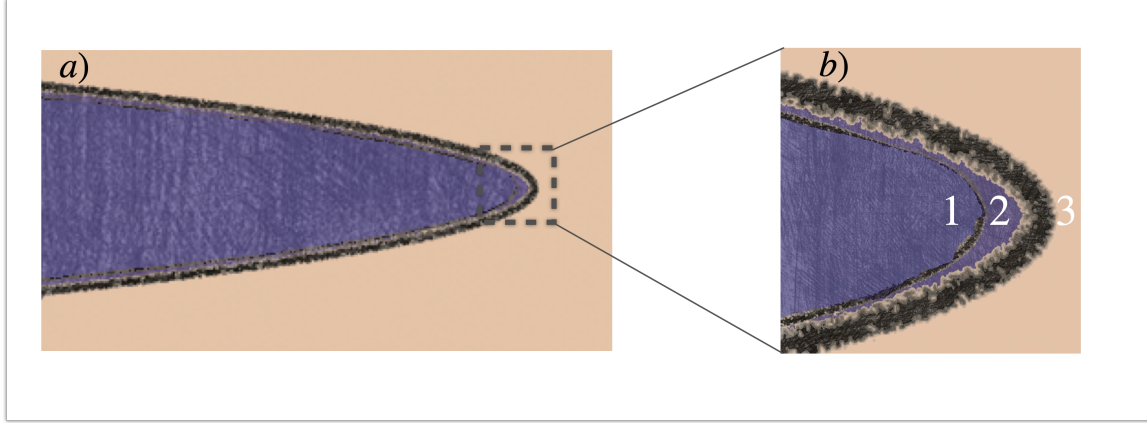


Figura 2.2: En el cuadro a) de la figura podemos ver el plasmón completamente formado, sin embargo en el acercamiento del cuadro b) de la figura podemos apreciar la pérdida de masa del plasmón, en este podemos ver tres regiones, separadas por el choque con el medio y el choque en reversa, la región uno contiene el material del plasmón y a región tres al medio, sin embargo la masa del plasmón escapara a través de la región 2.

2.1.3. Cálculo de condiciones iniciales por desaceleración del gas

Para determinar los parámetros fundamentales que controlan la dinámica de los grumos a alta velocidad, tales como la velocidad de eyección v_0 , el tamaño inicial del grumo R_{cl} , la densidad de material eyectado ρ_{cl} y la densidad del ambiente ρ_a , o en su lugar el contraste inicial de densidad

$$\beta = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_{cl}}}, \quad (2.6)$$

usamos un análisis basado en el plasmón propuesto por De Young & Axford, (1967), Cantó et al., (1988) y RO19a. Suponiendo que en el momento de la eyección tenemos un grumo esférico, podremos expresar la masa inicial como,

$$M_0 = \frac{4\pi R_{cl}^3 \rho_{cl}}{3} = \frac{4\pi R_{cl}^3 \rho_a}{3\beta^2}. \quad (2.7)$$

Suponemos un mismo tamaño inicial para todos los grumos ($R_{cl} = 90$ au) y una densidad del ambiente de 10^7 cm^{-3} , con esto podremos estimar las condiciones de eyección. La densidad del plasmón no será constante dado el alargamiento por la distancia recorrida y el desprendimiento de masa incluido en el modelo.

En esta sección exploraremos un modelo que toma en cuenta la desaceleración de grumo conforme este pierde su masa por la interacción con el ambiente. Este es el

modelo desarrollado en Rivera-Ortiz et al., (2019a), y como fue establecido en este, sin importar las características originales del grumo, la interacción inicial con el medio lo transformará en un plasmón, como fue propuesto por De Young & Axford, (1967) y Cantó et al., (1998), agregando la pérdida de masa.

De este modo, habiendo planteado una masa inicial en 2.7, podremos reescribir las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, ahora en una forma no paramétrica, que nos permita analizar sus resultados contra datos observacionales, de la siguiente manera (RO19a).

$$M = M_0 e^{-\alpha \left(1 - \frac{v}{v_0}\right)}, \quad (2.8)$$

$$t = t_0 \int_{v/v_0}^1 u^{-2/3} e^{-\frac{\alpha}{3}(1-u)} du, \quad (2.9)$$

y

$$R = v_0 t_0 \int_{v/v_0}^1 u^{1/3} e^{-\frac{\alpha}{3}(1-u)} du, \quad (2.10)$$

respectivamente, donde M_0 es la masa inicial del grumo, v_0 la velocidad de eyección, $u = \frac{v}{v_0}$ es la velocidad adimensional, α es un parámetro, que llamaremos parámetro de evaporación, está dado por,

$$\alpha = \frac{8\lambda}{\pi + 2} \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1}} \left(\frac{1}{\beta}\right), \quad (2.11)$$

y una escala de tiempo t_0

$$t_0 = \frac{R_{cl}}{\beta^2} \left(\frac{16\pi}{3\xi_{DA}(\gamma - 1)^2}\right)^{1/3} \frac{1}{v_0}, \quad (2.12)$$

con $\xi_{DA} = 9.22$ del modelo De Young & Axford, (1967), $\lambda = 0.0615$, obtenido mediante simulaciones numéricas por RO19a, y $\gamma = 1.4$ que es el coeficiente adiabático para un gas ideal diatómico.

Combinando las ecuaciones (2.11) y (2.12), obtenemos.

$$\left[\frac{v_0}{\text{km s}^{-1}}\right] \left[\frac{t_0}{\text{yr}}\right] = 233 \left[\frac{R_{cl}}{\text{au}}\right] \alpha^2. \quad (2.13)$$

El propósito de este trabajo es usar las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10, para aproximar los parámetros físicos, como la masa, la velocidad de eyección, densidad, de cada uno de los grumos originales que producirán los dedos que observamos y que son formados por su interacción con el medio.

2.2. Análisis previo

Con el modelo del plasmón expresado anteriormente se construyó el código INTTES.F90, que resuelve numéricamente las ecuaciones del modelo, por medio de una integración por suma de Riemann. Para verificar la precisión del código, este debe arrojar resultados consistentes para distintos valores del parámetro de evaporación y la velocidad inicial.

En la Fig. 2.3, se gráfica radio logarítmico contra la velocidad para distintos valores del parámetro de evaporación, α y podemos ver que existe una relación proporcional entre el aumento del factor α , el radio de los dedos.

En tanto la Fig.2.4, se gráfica el tiempo de vida logarítmico contra velocidad para distintos valores del parámetro de evaporación respectivamente, podemos ver que existe una relación proporcional entre el aumento del factor α , la edad de los dedos.

Por otro lado en la Fig. 2.5, se gráfica el radio logarítmico contra velocidad para distintos valores de velocidad inicial, podemos observar que el cambio en la velocidad inicial no afectara el radio final.

Finalmente en la Fig.2.6,se gráfica el tiempo de vida logarítmico contra velocidad para distintos valores de velocidad inicial, podemos observar que el cambio en la velocidad inicial implica una mayor desaceleración en los dedos reduciendo su tiempo de vida. Estos resultados son consistentes con el modelo del plasmón planteado por RO19a.

De modo que al haber estudiado el modelo propuesto por Rivera-Ortiz et al., (2019a) y probado un código que resuelve las ecuaciones y reproduce el comportamiento esperando, teniendo bien probado nuestra aproximación numérica y código, procederemos a analizar cada uno de los dedos de cada uno de los objetos de esta tesis.

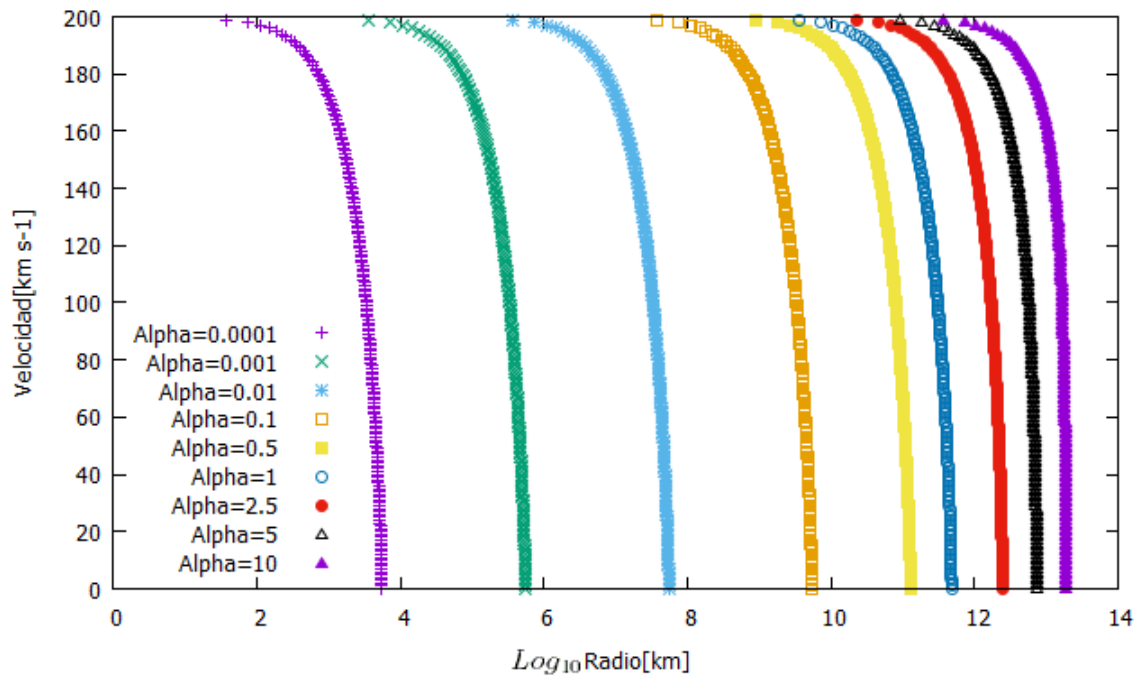


Figura 2.3: Gráfica del radio logarítmico contra la velocidad, de un dedo en un flujo explosivo calculados con el modelo del plasmón con pérdida de masa (Rivera-Ortiz et al., 2019a), para distintos valores del parámetro de evaporación, α , en la cual se puede observar que el aumento en el valor de α equivaldrá a un menor radio final .

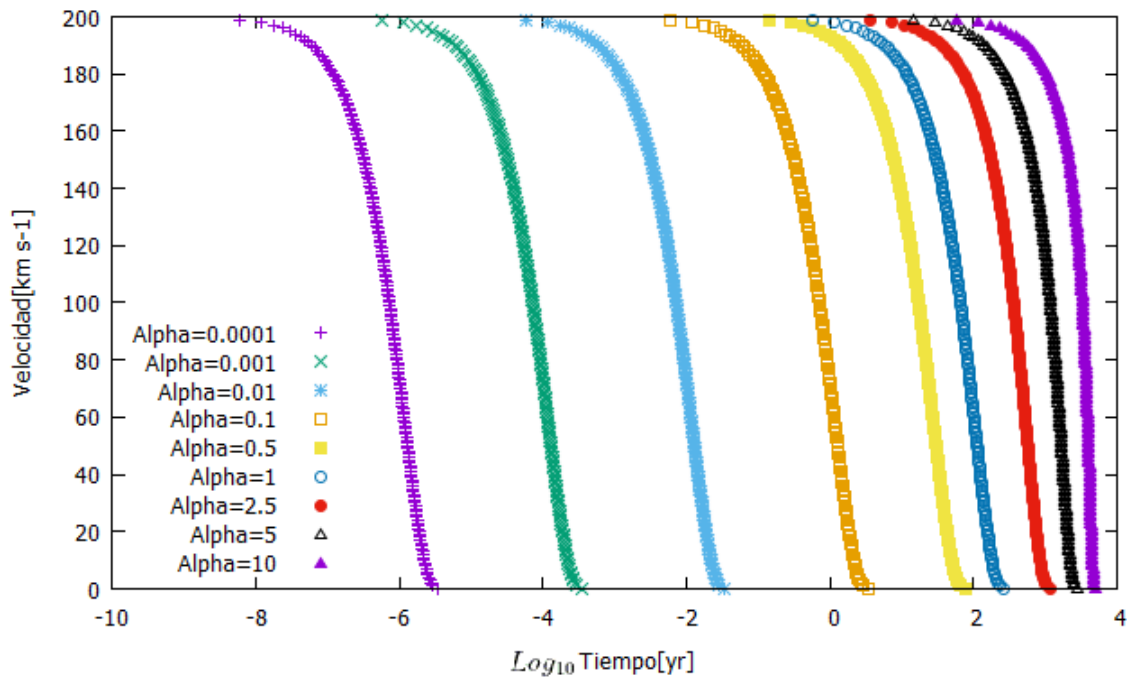


Figura 2.4: Gráfica tiempo de vida logarítmico contra velocidad, de un dedo en un flujo explosivo calculados con el modelo del plasmón con pérdida de masa (Rivera-Ortiz et al., 2019a), para distintos valores del parámetro de evaporación, α , en la cual se puede observar que tendremos una relación entre el aumento de α y el aumento del tiempo de vida .

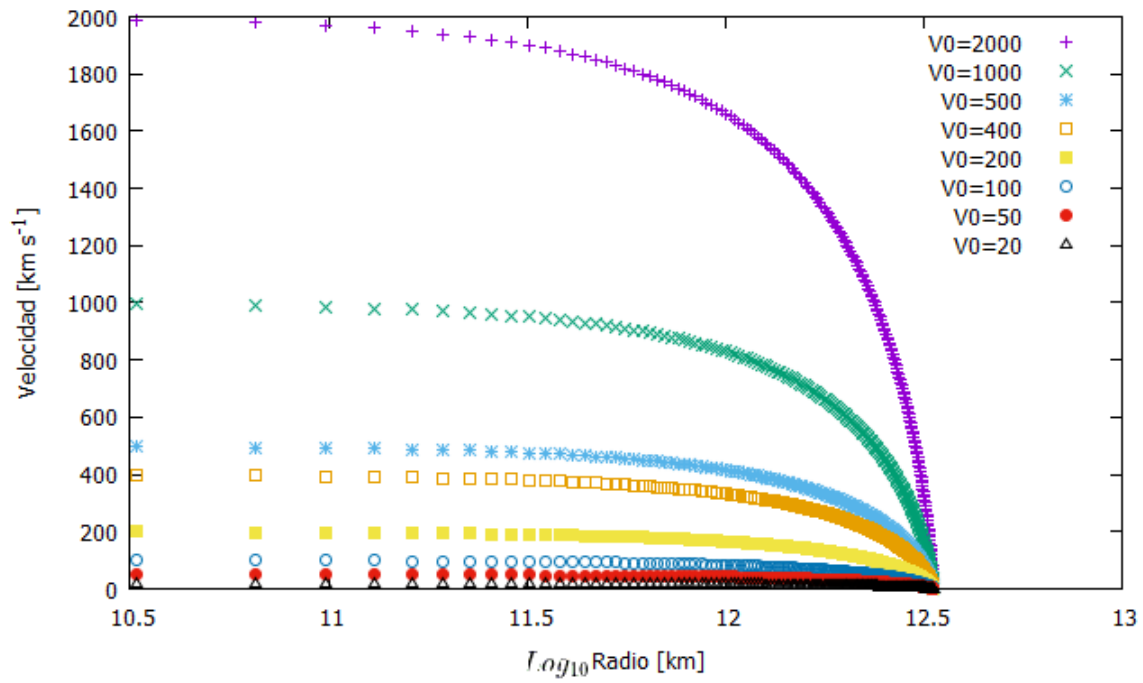


Figura 2.5: Gráfica radio logarítmico contra velocidad, de un dedo en un flujo explosivo calculados con el modelo del plasmón con pérdida de masa (Rivera-Ortiz et al., 2019a), para distintos valores de velocidad inicial, V_0 , en la cual se puede observar que sin importar el valor de V_0 el radio final del dedo siempre será el mismo.

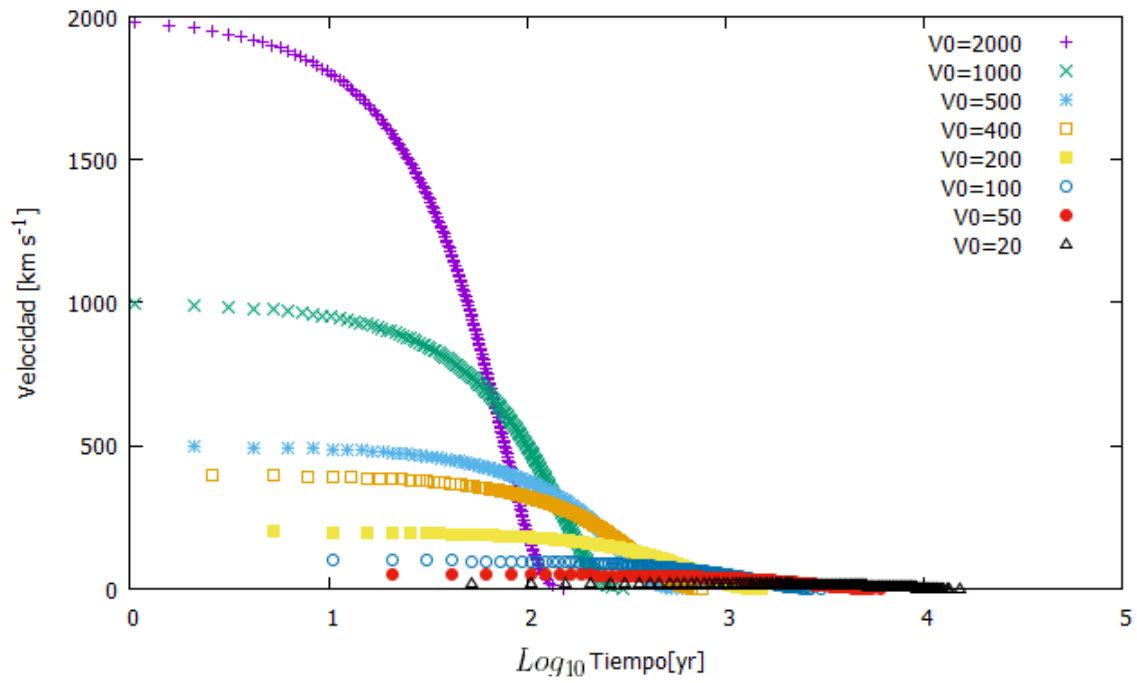


Figura 2.6: Gráfica de tiempo de vida logarítmico contra velocidad, de un dedo en un flujo explosivo calculados con el modelo del plasmón con pérdida de masa (Rivera-Ortiz et al., 2019a), para distintos valores de velocidad inicial, en la cual se puede observar que a mayores V_0 les corresponde menores tiempo de vida.

3 Objetos y ángulos de proyección.

En este capítulo examinaremos cada uno de los eventos explosivos observados y tomaremos una muestra de los datos observacionales reportados de dedos para cada objeto. Posteriormente, calcularemos el tamaño y ángulo de proyección, de cada objeto, para conseguir aproximaciones de la edad de cada evento. Para tener un estudio completo de cada uno de los dedos, hemos utilizado una nomenclatura para identificarlos y en trabajos posteriores poderlos estudiar de forma individual.

La observación de estas nubes moleculares depende de la emisión dada por distintas transiciones debidas al cambio entre diferentes estados cuánticos. Estas transiciones pueden ser rotacionales, que se dan por un cambio en el estado de rotación de un núcleo con respecto a otro. También pueden ser transiciones vibracionales, por el cambio del estado de vibración con respecto a su posición de equilibrio. Por último, las transiciones electrónicas que suponen un cambio del estado energético de la nube de electrones de la molécula; cada una de estas transiciones tienen una temperatura característica asociada y, por lo tanto, las condiciones para producirlas dependen de la temperatura del gas molecular. Al tratarse de nubes moleculares frías, las transiciones predominantes serán las transiciones rotacionales.

Para mapear un objeto, regularmente se utiliza la molécula con mayor emisión. En el caso del medio interestelar la molécula mas abundante es hidrógeno molecular, H_2 . Sin embargo, esta molécula no posee un momento dipolar permanente, así que no podrá emitir radiación en las condiciones de una nube molecular fría, sino que es necesario que el gas tenga temperatura del orden de 10^3 K, condición que puede cumplirse en choques; de este modo se recurre a la segunda molécula mas abundante, que es el monóxido de carbono CO. El CO es la segunda más abundante en el medio interestelar pero solamente representa una fracción de $\sim 1.8 \times 10^{-4}$ de la abundancia del hidrógeno molecular. Debido a que el CO es una molécula resistente, dada su energía de disociación de 11.2 eV, la temperatura característica de sus transiciones es del orden de la temperatura cinética promedio de las nubes moleculares y a que su momento dipolar eléctrico es pequeño, resulta la molécula una molécula muy adecuada para realizar observaciones de nubes moleculares.

3.1. Orión BN/KL

El complejo molecular de Orión esta conformado por múltiples regiones como lo son la nebulosa de Orión y el flujo explosivo de Orión conocido como la región de Orión Becklin–Neugebauer/Kleinman–Low (Orion BN/KL), siendo el primer objeto estelar joven y masivo detectado en el infrarojo, y está inmerso en la nube molecular de Orión (OMC1, por sus siglas en inglés) dentro de la nebulosa de Orión que se encuentra a una distancia de ~ 388 pc. Este último ha sido detectado gracias a observaciones del complejo, particularmente las de CO¹² con transición $J = 2 \rightarrow 1$ a 2.6 mm (fig 3.1).

Este flujo causó gran intriga tras su observación debido a que, a diferencia de otros flujos en regiones cercanas, este no tenía una estructura bipolar colimada. En lugar de eso, está formado por múltiples filamentos, conformados en parte por CO y H₂, a los que se les nombró dedos, tal que todos parecían tener un origen y edad común de ≈ 500 yr, habiendo sido causados, al parecer, por el mismo evento explosivo.

Rodríguez et al., (2005) reportaron múltiples objetos estelares cercanos a la región que coincidían con el origen común y con la edad aproximada, estas observaciones fueron discutidas y puestas a prueba con distintos modelos dinámicos (Bally et al., (2015), Raga et al., 2021, Rivera-Ortiz et al., (2019b y 2021)).

Bally et al., (2011) obtuvo edades cinemáticas para los dedos de Orión BN/KL de entre 500 y 4000 yr, considerando que los dedos son el resultado de la interacción de escombros de una explosión y el medio que los rodea. Con el modelo del plasmón de Rivera-Ortiz et al., (2019a) se reconciliaron las edades balísticas de Bally et al., (2011) con la edad de la interacción de las protoestrellas BN, x e I (Rodríguez et al., 2017, Bally et al., 2020). Estos modelos han ayudado a explicar que algunos dedos de CO no tienen una componente de hidrógeno molecular asociada y a predecir una pérdida de masa para cada plasmón.

En este trabajo buscaremos expandir estos resultados utilizando un modelo que considere frenado en los plasmones por su interacción con el medio y con esto obtener nuevas aproximaciones para el tiempo dinámico, tamaño y pérdida de masa de los dedos de nuestras tres regiones de estudio.

Figure 4. from The ALMA View of the OMC1 Explosion in Orion
 null 2017 APJ 837 60 doi:10.3847/1538-4357/aa5c8b
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa5c8b>
 © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

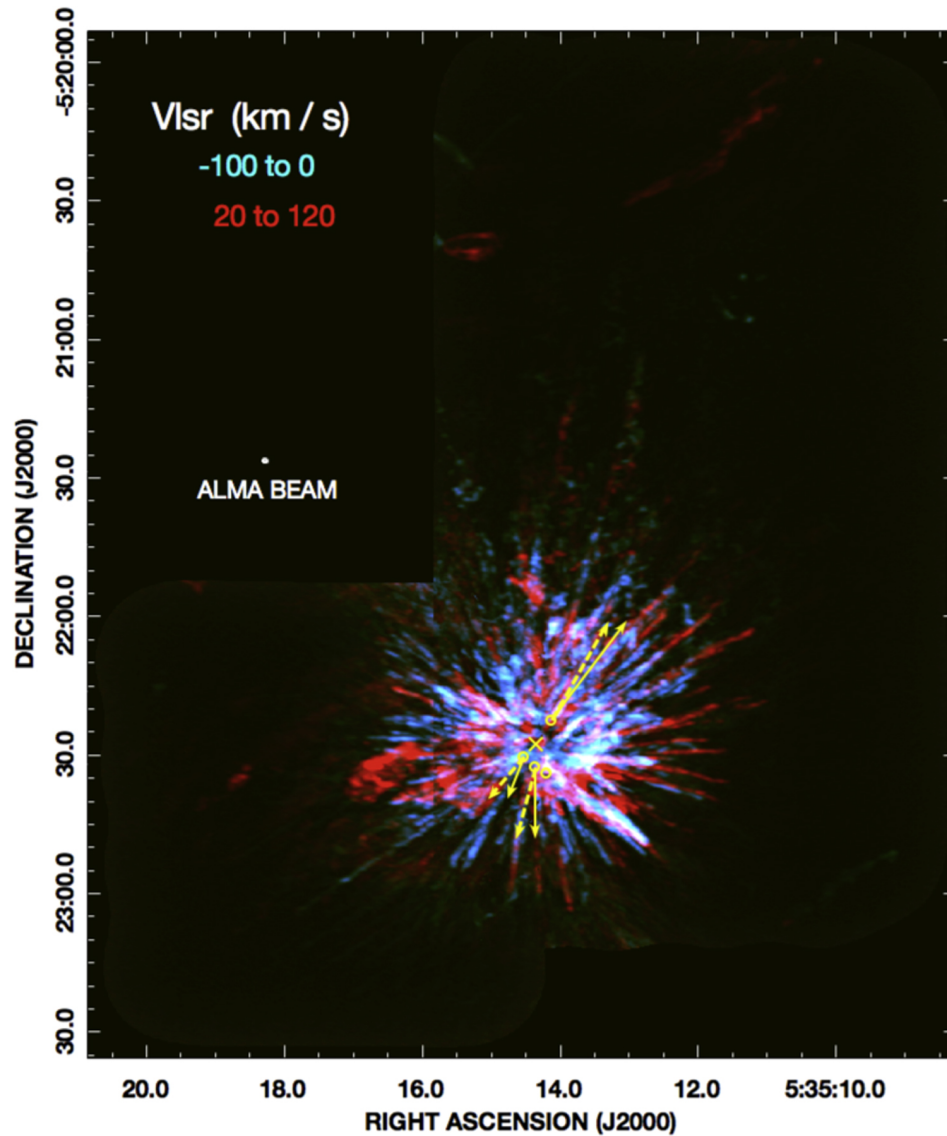


Figura 3.1: Mapa en CO de la región OMC1, donde las marcas verdes y azules muestran la emisión de salida de $V_{LSR} = -100$ a 0 km s^{-1} ; las marcas rojas muestran la emisión de $V_{LSR} = +20$ a $+120 \text{ km s}^{-1}$. Los círculos amarillos muestran la localización de estrellas masivas ejecutadas de la región OMC1; de arriba a bajo son el objeto BN/KL, la fuente I, fuente x y IRC4 (Bally et al., 2017).

3.1.1. Datos observados

Partiendo de las observaciones reportadas por Zapata et al., (2009), se obtuvieron datos para una muestra de dedos de CO de la región de Orión BN/KL, La Tabla 3.1 muestra la distancia proyectada y velocidad radial de la parte fontral de los dedos que hemos digitalizado de la Fig. 3.2 (ver Zapata et al., 2009). La digitalización de la punta de los dedos se obtuvo con el software de digitalización "WebPlotDigitizer-4.4¹", haciendo cuatro medidas separadas y promediadas, y con estas mediciones se obtuvo la desviación estándar de las medidas. Esta desviación estándar la hemos utilizado como la incertidumbre de estos datos. Con el objetivo de facilitar el tratamiento de los datos se le asignó a cada uno de los dedos un identificador, en donde hemos utilizado la etiqueta BN/KL y un número consecutivo para cada dedo, y que se observa en la primera columna de esta tabla.

Las velocidades de los dedos van desde -104 hasta 114 km s⁻¹ y el tamaño va desde 11" hasta 60" de arco. Cada dedo individual presenta una velocidad que sigue una expansión homóloga tipo Ley de Hubble.

La identificación de cada uno de la punta de los dedos, de la Tabla 3.1 se muestran graficados en una figura de posición radial proyectada contra velocidad radial en la Fig. 3.3. Podemos observar que los grumos se encuentran distribuidos isotrópicamente en este diagrama.

3.1.2. Cálculo de ángulos de proyección

Para calcular los ángulos de proyección hemos desarrollado un código numérico (que se encuentra en el apéndice A.1, programa ANGLES.F90), el cual busca el ángulo de proyección de cada dedo, es decir el ángulo θ con el cual están siendo proyectados respecto al plano de cielo. Para obtener el ángulo se considera la edad balística τ y la edad balística aparente τ_a , es decir, la obtenida con la velocidad radial V_r y su longitud proyectada R_p . De esta forma podemos escribir:

$$\tau_a = \frac{R_p}{V_r}, \quad (3.1)$$

siendo $R_p = R \cos \theta$ y $V_r = V \sin \theta$ las componentes observadas. Entonces tenemos

¹<https://apps.automeris.io/wpd/>

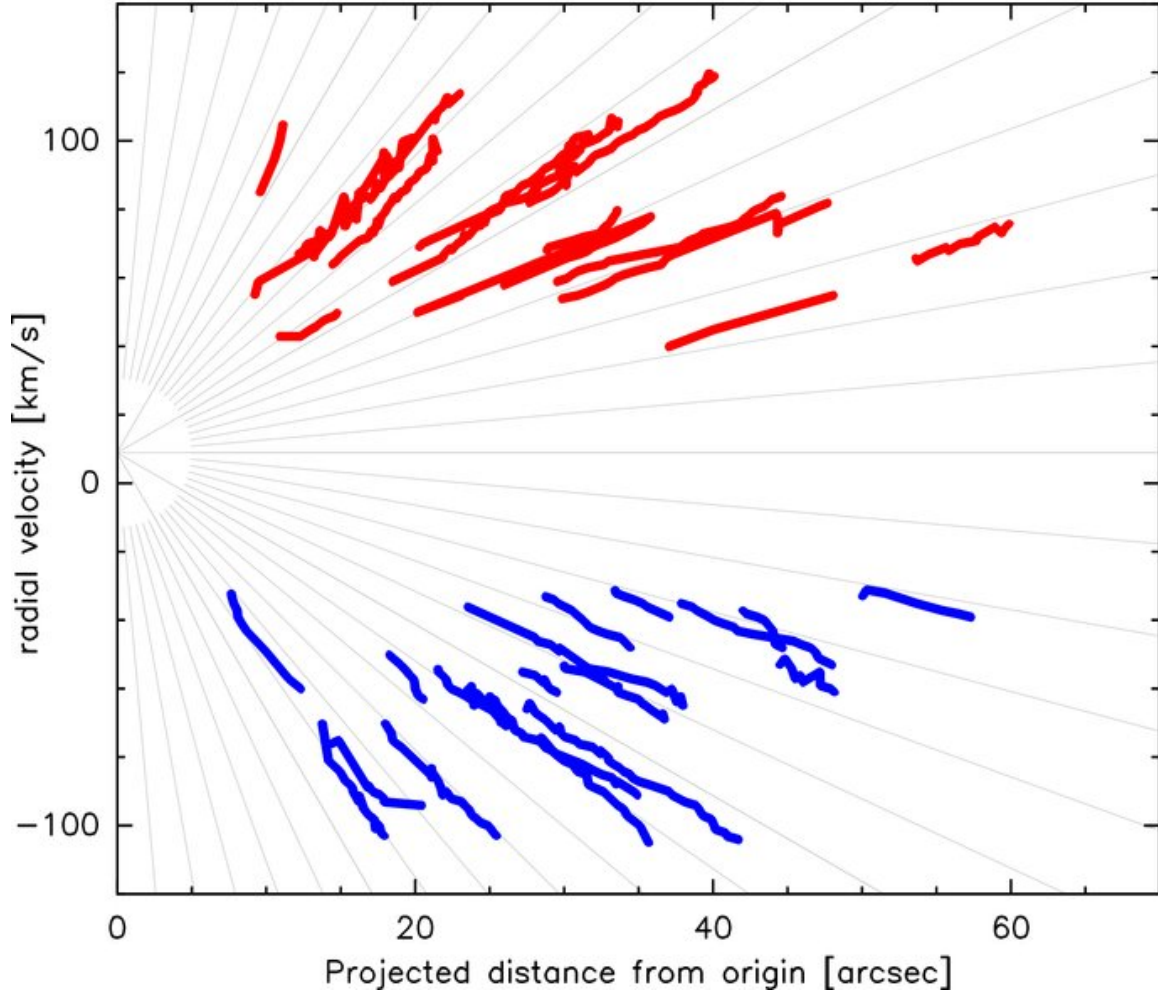


Figura 3.2: Diagrama posición (proyectada)-velocidad radial de las estructuras tipo jet observado en Orion BN/KL en la línea de CO(2-1): velocidad radial como función de la distancia en el cielo con respecto al centro común de los filamentos de CO, mostrando en azul aquellas que tienen corrimiento al azul y en rojo aquellas que tienen corrimiento al rojo. Hasta donde la precisión de nuestras medidas nos permiten observar, todas las velocidades varían linealmente con la distancia, sin alguna señal de desaceleración detectable, y casi todos los filamentos parecen empezar desde la misma velocidad radial común de $9 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$, i.e. alrededor de un valor de 9 km s^{-1} del material inactivo en los alrededores de BN (Kwan & Scoville, 1976). Las líneas en gris empiezan en 9 km s^{-1} a $R=0$. Notemos que las velocidades entre -35 y 35 km s^{-1} no pueden ser investigadas por contaminación interferométrica con gas molecular extendido.

que

$$\frac{R_p}{V_r} = \frac{R \cos \theta}{V \sin \theta} = \frac{\tau}{\tan \theta} \quad (3.2)$$

Tabla 3.1: Datos de posición y velocidad de los grupos de CO, en Orion BN/KL, reportados por Zapata et al., (2009).

ID	Distancia Proyectada ± 0.33 [arcseg]	Velocidad Radial ± 0.72 [km s ⁻¹]
BNKLF1	11.14	105.22
BNKLF2	23.18	114.23
BNKLF3	21.29	101.04
BNKLF4	14.92	49.87
BNKLF5	40.07	119.84
BNKLF6	33.53	106.14
BNKLF7	36.05	77.94
BNKLF8	44.72	83.81
BNKLF9	47.87	82.38
BNKLF10	60.03	75.98
BNKLF11	48.29	54.83
BNKLF12	57.50	-39.29
BNKLF13	48.20	-53.26
BNKLF14	48.20	-61.22
BNKLF15	37.25	-39.55
BNKLF16	34.64	-48.43
BNKLF17	38.15	-64.88
BNKLF18	36.92	-69.19
BNKLF19	29.66	-61.48
BNKLF20	41.87	-104.30
BNKLF21	34.76	-88.89
BNKLF22	20.75	-63.83
BNKLF23	25.58	-103.26
BNKLF24	12.43	-60.70
BNKLF25	18.07	-103.52
BNKLF26	20.60	-94.25

y finalmente

$$\tan \theta = \tau \frac{V_r}{R_p}. \quad (3.3)$$

Con nuestro código ANGLES.F90 se encontraron los valores de tamaño, velocidad y ángulo de proyección, para edades de 500, 1000 y 2000 yr, y se muestran en la Tabla 3.2.

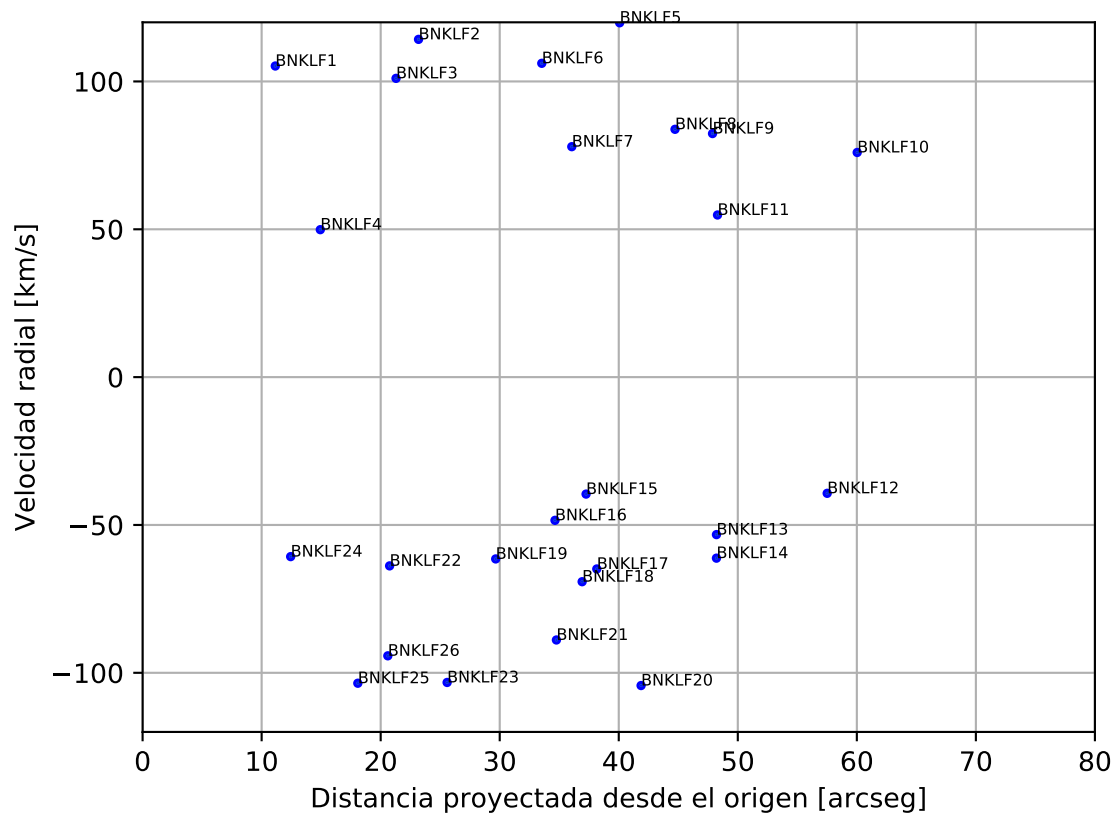


Figura 3.3: Esta figura muestra la posición contra velocidad, además de la nomenclatura, de los dedos de la muestra de Orión BN/KL seleccionada para su estudio, con los datos obtenidos de la Fig. 3.2, que es también, figura 2 de Zapata et al., (2009).

Tabla 3.2: Distancia recorrida, ángulos de proyección y velocidad calculada para cada dedo para edades de de 500, 1000 y 2000 yr, para los dedos de BN/KL.

ID	t=0.5 kyr			t=1 kyr			t=2 kyr		
	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [km s $^{-1}$]	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [km s $^{-1}$]	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [k ms $^{-1}$]
BNKLF1	16.59	0.37	112	33.18	0.19	107	66.36	0.09	105
BNKLF2	18.01	0.63	142	36.02	0.35	121	72.04	0.18	116
BNKLF3	15.93	0.65	127	31.86	0.36	108	63.73	0.19	102
BNKLF4	7.86	0.83	74	15.72	0.50	56	31.45	0.26	51
BNKLF5	18.89	0.88	189	31.45	0.26	51	75.58	0.29	125
BNKLF6	16.73	0.85	162	33.47	0.52	122	66.94	0.28	110
BNKLF7	12.28	1.03	153	24.57	0.70	102	49.15	0.40	84
BNKLF8	13.21	1.09	184	26.43	0.77	117	52.86	0.45	93
BNKLF9	12.98	1.13	193	25.97	0.81	120	51.95	0.48	93
BNKLF10	11.98	1.23	232	23.96	0.96	133	47.92	0.62	93
BNKLF11	8.64	1.27	185	17.29	1.01	104	34.58	0.67	70
BNKLF12	-6.19	-1.38	-214	-12.39	-1.21	-112	-24.78	-0.92	-65
BNKLF13	-8.39	-1.27	-184	-16.79	-1.02	-103	-33.59	-0.69	-69
BNKLF14	-9.65	-1.23	-186	-19.30	-0.96	-107	-38.61	-0.62	-75
BNKLF15	-6.23	-1.28	-142	-12.47	-1.04	-78	-24.94	-0.71	-52
BNKLF16	-7.63	-1.20	-135	-15.27	-0.91	-79	-30.54	-0.57	-57
BNKLF17	-10.23	-1.13	-154	-20.46	-0.82	-95	-40.92	-0.49	-73
BNKLF18	-10.90	-1.09	-151	-21.81	-0.77	-96	-43.63	-0.45	-77
BNKLF19	-9.69	-1.05	-124	-19.39	-0.72	-82	-38.78	-0.41	-67
BNKLF20	-16.44	-0.97	-185	-32.89	-0.63	-129	-65.78	-0.35	-111
BNKLF21	-14.01	-0.96	-155	-28.03	-0.62	-109	-56.06	-0.34	-94
BNKLF22	-10.06	-0.87	-99	-20.13	-0.53	-74	-40.26	-0.28	-66
BNKLF23	-16.28	-0.73	-139	-32.56	-0.42	-113	-65.13	-0.22	-105
BNKLF24	-9.57	-0.64	-75	-19.14	-0.35	-64	-38.28	-0.18	-61
BNKLF25	-16.32	-0.56	-122	-32.64	-0.30	-108	-65.29	-0.15	-104
BNKLF26	-14.86	-0.67	-120	-29.72	-0.38	-101	-59.44	-0.19	-96

De la Tabla 3.2 podemos observar en el caso de los dedos de Orion BN/KL tenemos 26 dedos de CO en nuestra muestra. Para el caso cuando tomamos un tiempo de evolución del evento de 0.5 kyr, el módulo de la velocidad mínima y máxima de proyectadas es de 74 y 232 km s⁻¹ respectivamente, correspondiendo a un tamaño de 5.25×10^3 y 8.00×10^3 au, y un ángulo de proyección $\theta = 0.83$ y 1.23 rad, respectivamente. Al aumentar el tiempo con el que se calculan las propiedades, los grumos tendrán velocidades menores y tamaños calculados mayores. Usando la velocidad calculada y el ángulo de proyección para diferentes edades propuestas buscaremos un límite máximo de la edad de nuestro de nuestro objeto (sección 3.4).

3.2. G5.89

La región G5.89-0.39, o solo G5.89, es una región masiva de formación estelar que se encuentra a una distancia de 2.99 ± 0.19 kpc y contiene una región UCHII con una envolvente en expansión con una edad cinemática de 600 ± 250 yr.

Recientes observaciones realizadas con ALMA, con una resolución de $\approx 0.1''$, señalan que se trata de una explosión similar a las que se encuentran en BN/KL y DR21 que al ser observado en CO se distinguen alrededor de 30 filamentos moleculares, con una edad aproximada de 1000 yr y una energía de 10^{46-49} erg, (ver Zapata et al., 2020).

3.2.1. Datos observados

Se tomaron a consideración las observaciones reportadas por Zapata et al., (2020) y que se muestran en este trabajo en la Fig. 3.4. En ella podemos ver los flujos de la región mostrando en rojo aquellos velocidad positivas o redshift y en azul aquellos que con velocidad negativas o blueshift. Esta figura nos muestra una gran isotropía en la dirección de los dedos eyectados en G5.89. Como se puede ver, hay dedos que se mueven alejándose y acercándose a nosotros. Esta misma figura también muestra una expansión tipo Ley de Hubble, donde las partes más lejanas de los dedos, al centro u origen de la explosión, van a velocidades mayores.

De la Fig 3.5 (ver Zapata et al., 2020), se tomó una muestra de los dedos en G5.89 y se digitalizaron la parte frontal de los dedos, al igual que para la región Orión BN/KL, con 4 mediciones para obtener una incertidumbre en nuestros datos. Los resultados de la digitalización, al igual que un identificador, en donde hemos utilizando la etiqueta

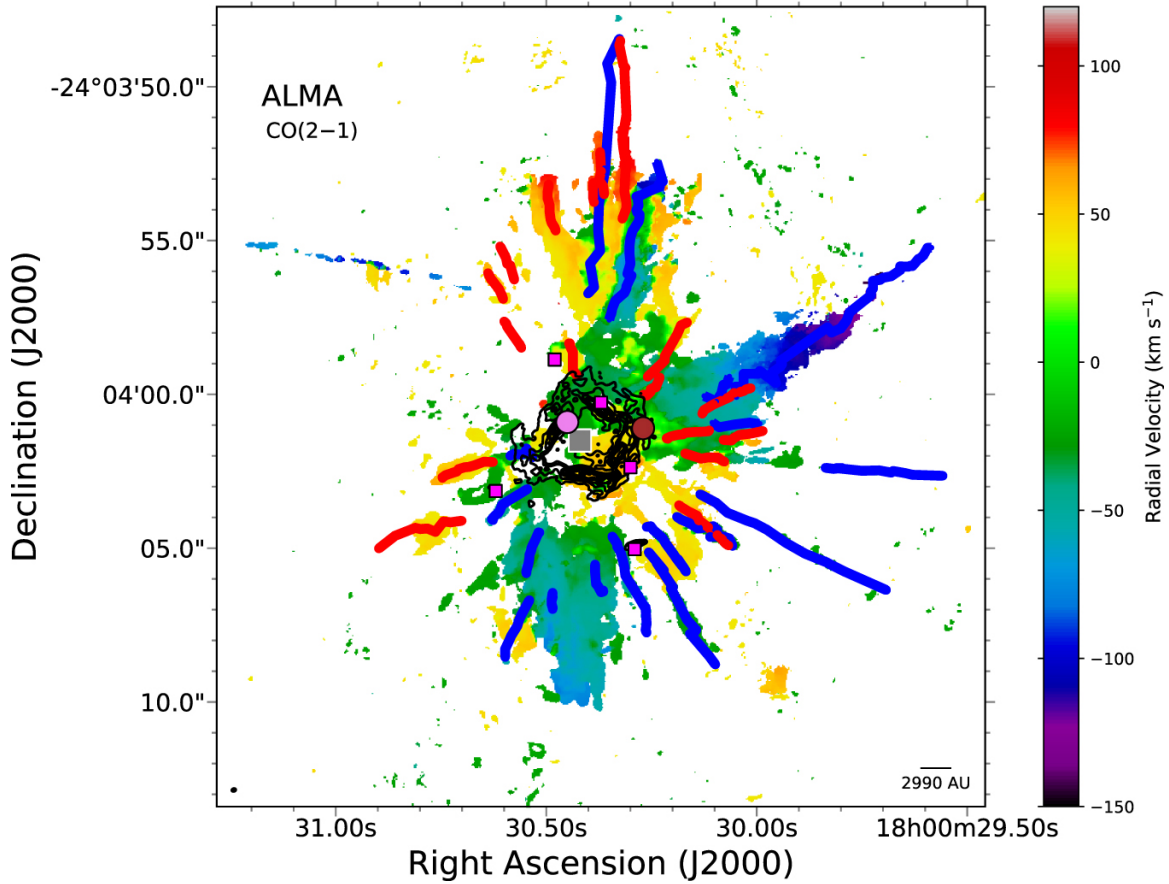


Figura 3.4: ALMA CO(2-1) superposición del mapa del primer momento con los filamentos explosivos, acercándose (azul) y alejándose (rojo), en el flujo de salida G5.89–0.39 y el continuo de emisión de 1.3mm, en los contornos sigue la parte central de la región UCHII. En estas longitudes de onda la emisión de la región UCHII aun esta dominada por emisión libre-libre (Hunter et al., 2008). Para realizar este mapa, se integraron en velocidades radiales desde -150 a -20 km s^{-1} para la emisión corrida al azul, en tanto para la emisión corrida al rojo las velocidades varían de 40 a 120 km s^{-1} . Los contornos varían del 10% al 70% del pico de emisión, con pasos del 10%. El pico de la emisión continua milimétrica esta en 34 mJy beam^{-1} . La posición y velocidad de cada condensación puede verse en la imagen 3D presentada en la Figura 3. En la parte inferior izquierda de la imagen se muestra el contorno de chorro sintetizada de la imagen lineal a media intensidad. en la parte derecha se encuentra la barra de error (en km s^{-1}) de velocidad radial LSR (local standard of rest). En la esquina inferior derecha también se muestra la escala espacial a una distancia de 2.99 kpc. Las ubicaciones de las fuentes llamadas Feldt's star (Feldt et al., 2003; círculo rosa) y Estrella Puga (Puga et al., 2006; círculo café) se muestran en el centro del flujo explosivo. Los rectángulos magenta muestran la ubicación de los objetos reportados por SMA (Hunter et al., 2008). Los cuadros grises marcan el origen del flujo. Zapata et al., (2020).

G5.89F y un número consecutivo para cada dedo, se muestran en la Tabla 3.3 y se encuentran graficados en la Fig. 3.6.

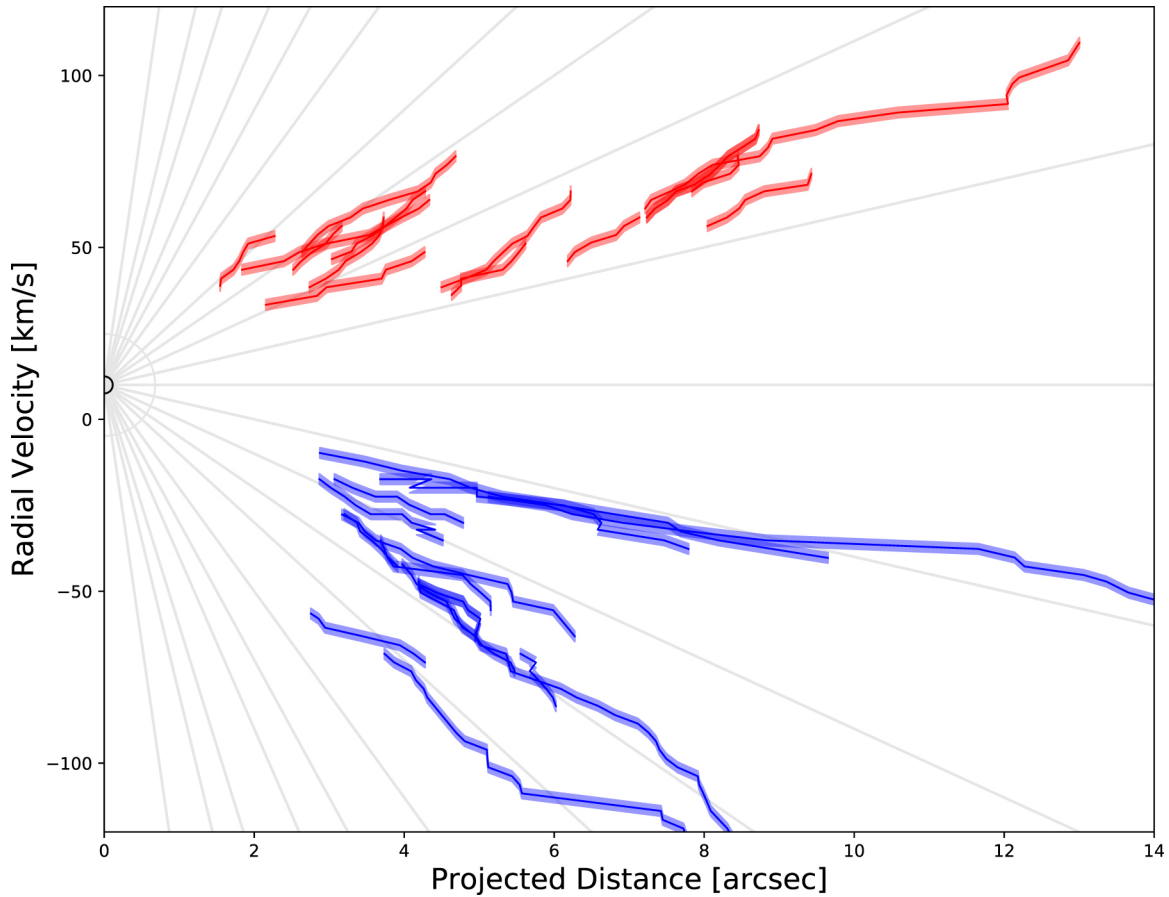


Figura 3.5: Diagrama de posición-velocidad de los filamentos explosivos de CO(2-1) en el flujo G5.89–0.39 con las observaciones actuales de ALMA. Solamente se han incluido las velocidades máximas en el rango de $\pm 120 \text{ km s}^{-1}$; hay algunos filamentos moleculares que están fuera de esta ventana como puede verse en la Figura 1. Se han graficado en azul los filamentos que se aproximan y en rojo aquellos que se alejan. En cada uno de los filamentos la sombra alrededor de ellos representa el error que es al ~ 0.1 .^{en} distancia y 1.2 km s^{-1} , para la velocidad radial. Igual que en los casos de los flujos explosivos de BN-KL y DR21, todas las velocidades linealmente con la distancia sin una desaceleración definida. Casi todos los filamentos parecen converger a una velocidad sistémica en el rango de 12 a -10 km s^{-1} . La velocidad de la nube en la mayoría de las líneas moleculares detectadas es alrededor de $\sim 9 \text{ km s}^{-1}$ (Hunter et al., 2008; Su et al., 2009). Las líneas grises comienzan en $R=0$ y a una velocidad radial de 0 km s^{-1} .

La Tabla 3.3 muestra la distancia proyectada y velocidad radial para 12 dedos de la región de G5.89. Como podemos ver, el módulo de velocidad radial mayor en G5.89 es de $\sim 120 \text{ km s}^{-1}$ y la menor de 30 km s^{-1} , además la distancia angular proyectada en segundos de arco de la muestra de dedos que estamos utilizando es de entre 2.3 y 13".

La Fig. 3.5 muestra que la muestra de dedos seleccionados en G5.89 son isotrópicos, a pesar de ser muchos menos que los que hemos usados para el caso de Orión BN/KL.

Tabla 3.3: Datos de posición y velocidad de los grupos de CO de G5.89 reportados por Zapata et al., (2020).

ID	Distancia Proyectada ± 0.33 [arcseg]	Velocidad Radial ± 0.72 [km s ⁻¹]
G5.89F1	2.26	53.22
G5.89F2	4.66	76.19
G5.89F3	4.25	48.60
G5.89F4	6.21	65.30
G5.89F5	9.42	70.98
G5.89F6	12.99	109.23
G5.89F7	9.62	-40.43
G5.89F8	4.76	-30.01
G5.89F9	4.49	-35.10
G5.89F10	6.25	-62.81
G5.89F11	4.25	-70.63
G5.89F12	7.73	-119.41

3.2.2. Cálculo de ángulos de proyección

Nuevamente, utilizando el programa ANGLES.F90 con los datos de la muestra de dedos de CO para G5.89, encontramos los valores de tamaño, ángulo de proyección y velocidad utilizando tiempos de evolución de 500, 1000 y 2000 yr. Usando la ecuación 3.1 encontramos los resultados que se presentan en la Tabla 3.4.

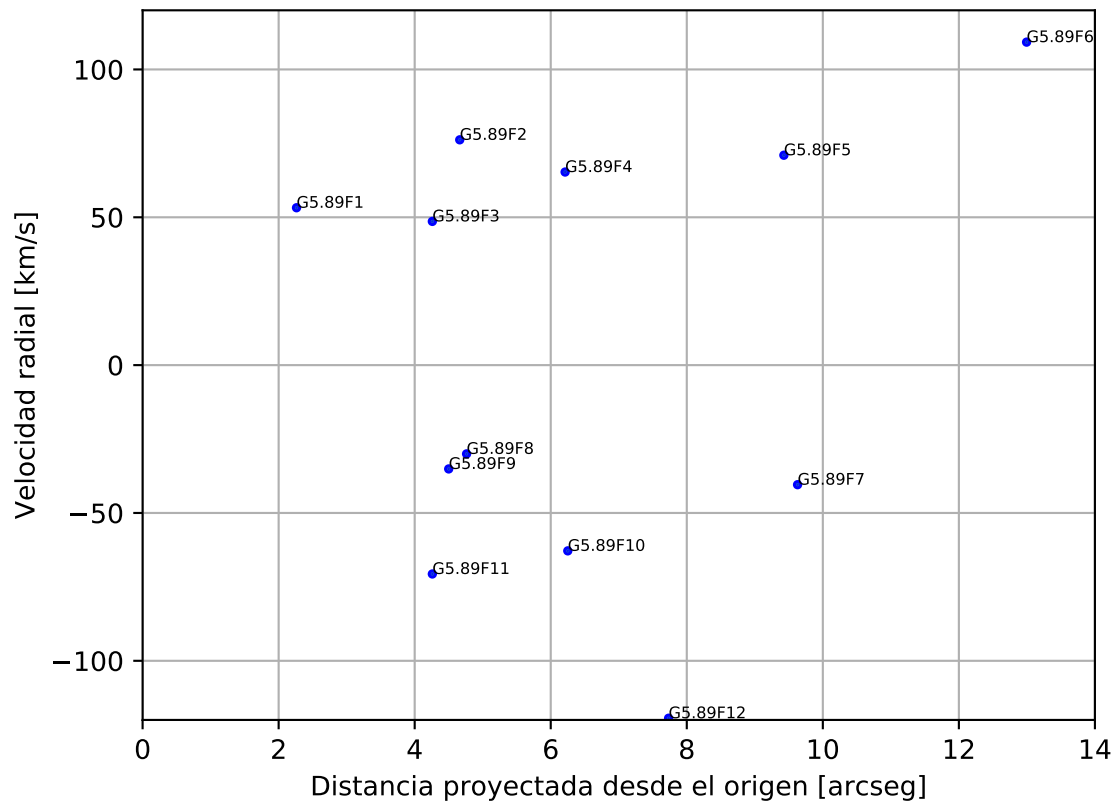


Figura 3.6: Velocidad contra posición de los dedos de la muestra seleccionada de G5.89 para su estudio, con los datos obtenidos de la Fig. 3.5, que es también, figura 2 Zapata et al., (2020).

Tabla 3.4: Distancia recorrida, ángulos de proyección y velocidad calculada para cada dedo para edades de de 500, 1000 y 2000 yr, para los dedos de G5.89.

ID	t=0.5 kyr			t=1 kyr			t=2 kyr		
	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [km s $^{-1}$]	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [km s $^{-1}$]	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [k ms $^{-1}$]
G5.89F1	16.59	1.25	335	33.18	0.98	190	66.36	0.64	131
G5.89F2	18.01	1.39	671	36.02	1.23	349	72.04	0.96	201
G5.89F3	15.93	1.40	615	31.86	1.24	320	63.73	0.98	182
G5.89F4	7.86	1.45	428	15.72	1.34	218	31.45	1.13	117
G5.89F5	18.89	1.46	1149	37.79	1.36	584	75.58	1.17	310
G5.89F6	16.73	1.46	962	33.47	1.35	490	66.94	1.15	261
G5.89F7	12.28	1.49	1031	24.57	1.42	520	49.15	1.27	268
G5.89F8	13.21	1.50	1279	26.43	1.44	643	52.86	1.31	329
G5.89F9	12.98	1.51	1368	25.97	1.45	688	51.95	1.33	351
G5.89F10	11.98	1.52	1714	23.96	1.48	859	47.92	1.39	434
G5.89F11	8.64	1.53	1379	17.29	1.49	691	34.58	1.41	348
G5.89F12	-6.19	-1.54	-1641	-12.39	-1.52	-821	-24.78	-1.47	-412

De la Tabla 3.4 podemos observar en el caso de los dedos de G5.89 tenemos 12 dedos de CO en nuestra muestra. Para el caso cuando tomamos un tiempo de evolución del evento de 0.6 kyr, el módulo de la velocidad mínima y máxima deproyectadas es de 335 y 1714 km s⁻¹ respectivamente, correspondiendo a un tamaño de 1.10×10^4 y 8.00×10^3 au, y un ángulo de proyección $\theta = 1.25$ y 1.52 rad, respectivamente. Al igual que en el caso de Orión BN/KL, al aumentar el tiempo con el que se calculan las propiedades los grumos tendrán velocidades menores y tamaños calculados mayores. Sin embargo, para los dedos de este objeto las velocidades deproyectadas son mayores, para la misma edad, alcanzando en el caso de t=0.5 kyr, velocidades de hasta ~ 1700 km s⁻¹, es decir, para tener velocidades parecidas en ambos eventos se tiene que la edad de G5.89 debe ser mayor que la de Orión BN/KL.

Al igual que para Orión BN/KL, la velocidad calculada y el ángulo de proyección para diferentes edades de G5.89 se usarán como un límite máximo de la edad en el análisis de la sección 3.4.

3.3. DR21

El flujo explosivo en DR21 esta localizado en Cygnus X a una distancia de 1.36 ± 0.12 kpc, este posee una masa mayor a las 3000 M_☉ y además es altamente energético ($> 10^{48}$ erg).

Al realizar observaciones de este objeto con SMA² con una resolución de $\approx 2''$, se pudo observar que se trataba de una explosión similar a la de la región de Orión BN/KL, aunque al tratarse de un flujo principalmente bipolar, se pueden percibir en el ligeros filamentos de H₂ que están orientados en múltiples direcciones y se pueden rastrear un centro común con una edad cinemática aproximada de ≈ 10000 yr.

Al igual que anteriores objetos, haremos un estudio de frenado de plasmones para cada uno de los dedos observados en este objeto. Un nuevo tiempo dinámico nos ayudará determinar la velocidad inicial y pérdida de masa de los dedos de CO observados en DR21.

²The Submillimeter Array, Maunakea in Hawaii, Observa de 1.545 a 0.735 mm, <https://lweb.cfa.harvard.edu/sma/>

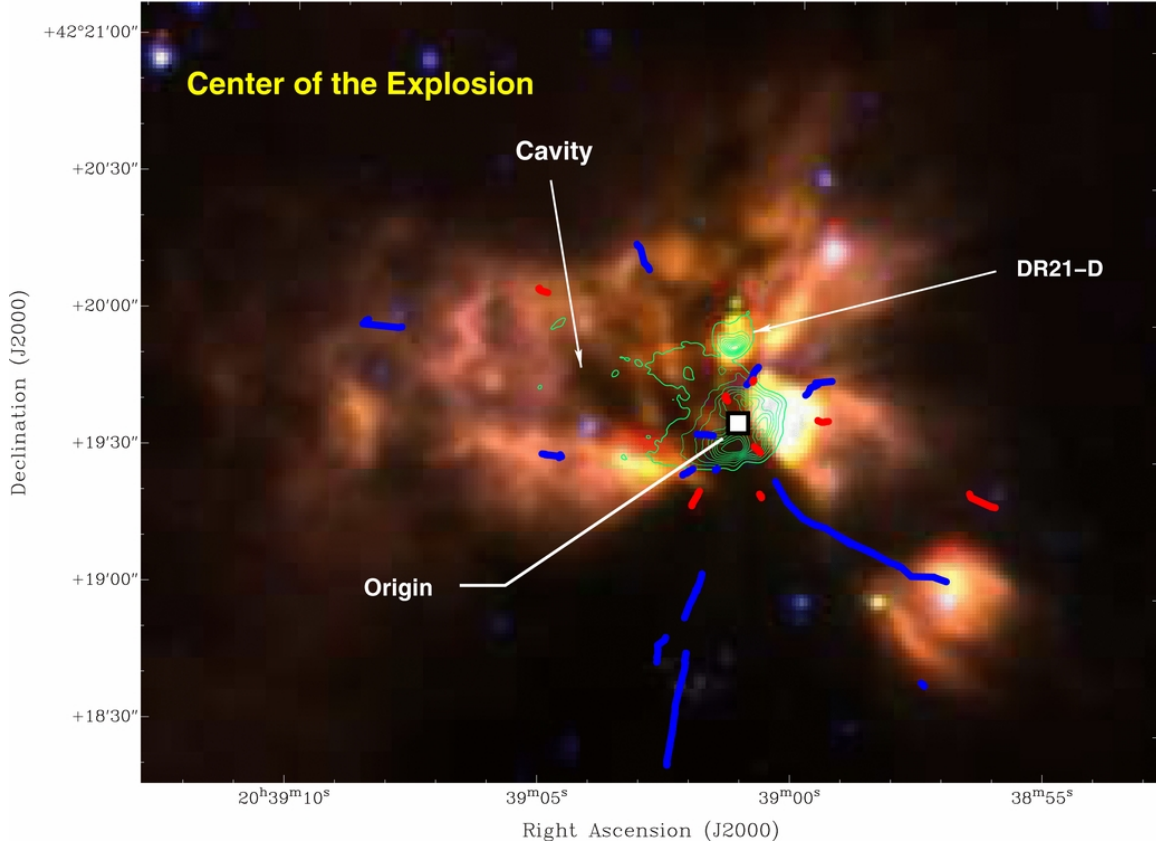


Figura 3.7: Filamentos de CO, con corrimiento al rojo y al azul, en el flujo de DR21 observados con SMA, sobrepuestos en una imagen de Spitzer³ en infrarrojo y una imagen de contorno del VLA⁴ con emisión de 6 cm. En la imagen de Spitzer la composición de color, rojo representa $8.0 \mu\text{m}$, verde $5.8 \mu\text{m}$ y azul $3.6 \mu\text{m}$ de emisión. Los contornos son del 5% al 90% con pasos del 10% hacia el pico de la emisión en centímetros. El máximo de la imagen centimétrica esta en $0.13 \text{ Jy beam}^{-1}$. El centro del flujo explosivo molecular esta marcado con un cuadro blanco. Notemos que este centro coincide con el centro de la de la región HII compacta revelada por el mapa de emisión continua de 6 cm. Adicionalmente, el mapa infrarrojo revela una fuente continua asociada con la región HII llamada DR21-D. El cuadro blanco no coincide con el máximo de emisión a 6.0 cm; sino que esta localizado en medio de la región HII donde no hay detección de emisión (ver Zapata et al., 2013).

3.3.1. Datos observados

Utilizando como referencia las observaciones de Zapata et al., (2013), de la región DR21, que se muestran en las Figs. 3.7 y 3.8, analizaremos el ángulo de proyección y tamaño de los dedos, para lo cual hemos digitalizado los datos de estas figuras usando cuatro mediciones de la parte frontal de los dedos para tener una incertidumbre asociada a nuestros datos. Al igual que en los objetos pasados, hemos identificado utilizando la etiqueta DR21F y un número consecutivo para cada uno de los dedos. y la información de la digitilización se encuentra en la Tabla 3.5.

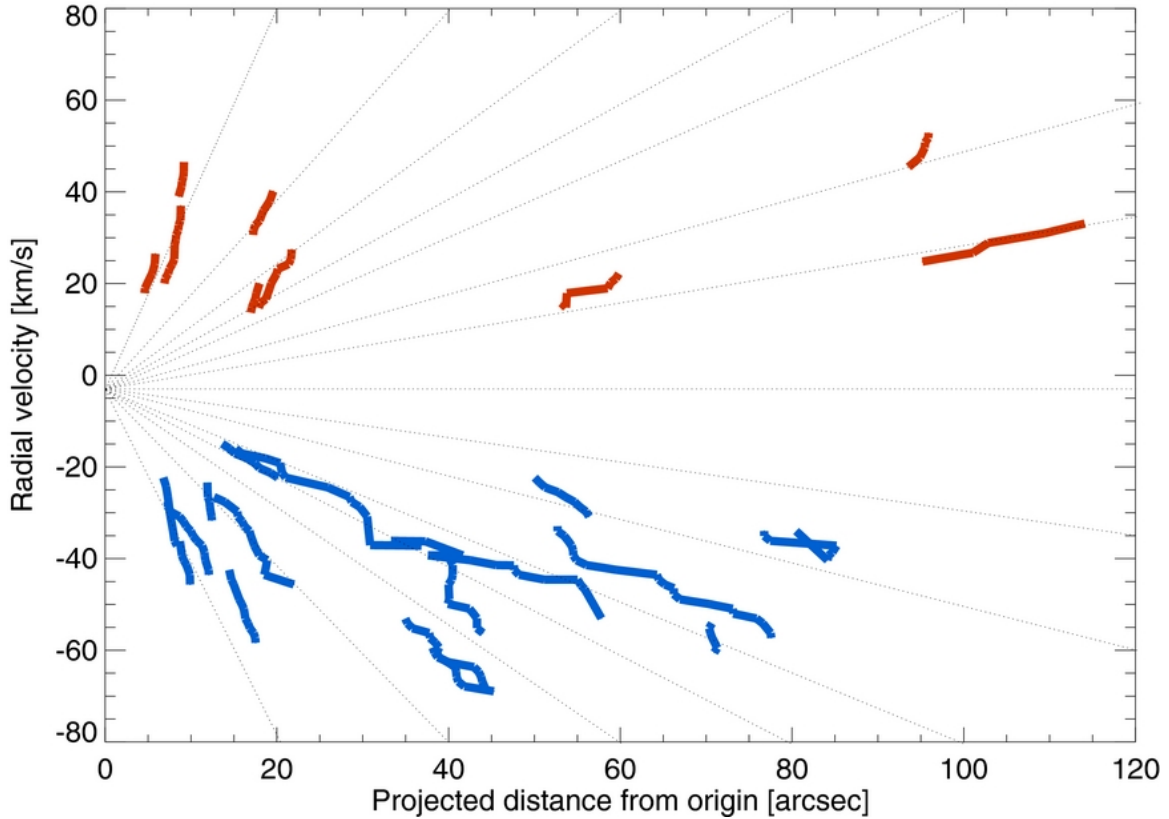


Figura 3.8: Diagrama de posición-velocidad del conjunto de flujos tipo jet de CO: velocidad radial como función de su posición en el cielo y distancia al centro común para cada uno de los filamentos 25 CO(2-1), representando las estructuras con corrimiento al azul en azul y aquellas con corrimiento al rojo en rojo. Casi todos los filamentos parecen empezar de la misma velocidad radial común, aproximadamente -3 km s^{-1} (el círculo negro pequeño). Las líneas negras degradadas empiezan en -3.0 km s^{-1} . Nótese que las velocidades entre -15 y 15 km s^{-1} no pueden ser estudiadas por que el interferómetro no puede registrar correctamente en gas molecular extendido.

Finalmente, los datos de la Tabla 3.5 se presentan en la Fig.3.9, en donde podemos ver que los dedos presentan isotropía con un módulo de velocidad entre 20 y 70 km s^{-1} , distribuidos a una distancia proyectada, de entre 5 y 115 segundos de arco de la fuente que los produjo.

3.3.2. Cálculo de ángulos de proyección

Nuevamente utilizando ANGLES.F90 con los datos de la muestra de dedos de CO se encontraron los ángulos de proyección, tamaño y velocidad para cada uno de los dedos en la muestra de DR21. La Tabla 3.6 muestra los valores deproyectados utilizando la ecuación 3.1, encontramos estructuras con módulo de velocidad máxima de

Tabla 3.5: Datos de posición y velocidad de los grupos de CO de DR21 reportados por Zapata et al., (2013).

ID	Distancia Proyectada ± 0.33 [arcseg]	Velocidad Radial ± 0.72 [km s ⁻¹]
DR21F1	5.89	25.90
DR21F2	9.17	45.93
DR21F3	19.55	39.62
DR21F4	21.75	26.91
DR21F5	59.77	21.70
DR21F6	95.99	52.25
DR21F7	113.79	32.72
DR21F8	85.20	-37.19
DR21F9	56.22	-30.54
DR21F10	77.52	-57.05
DR21F11	57.70	-52.76
DR21F12	43.82	-55.96
DR21F13	45.12	-69.00
DR21F14	17.48	-57.90
DR21F15	21.84	-45.69
DR21F16	9.89	-45.52
DR21F17	12.09	-43.25

~ 70 km s⁻¹ y tamaño de $\sim 100''$.

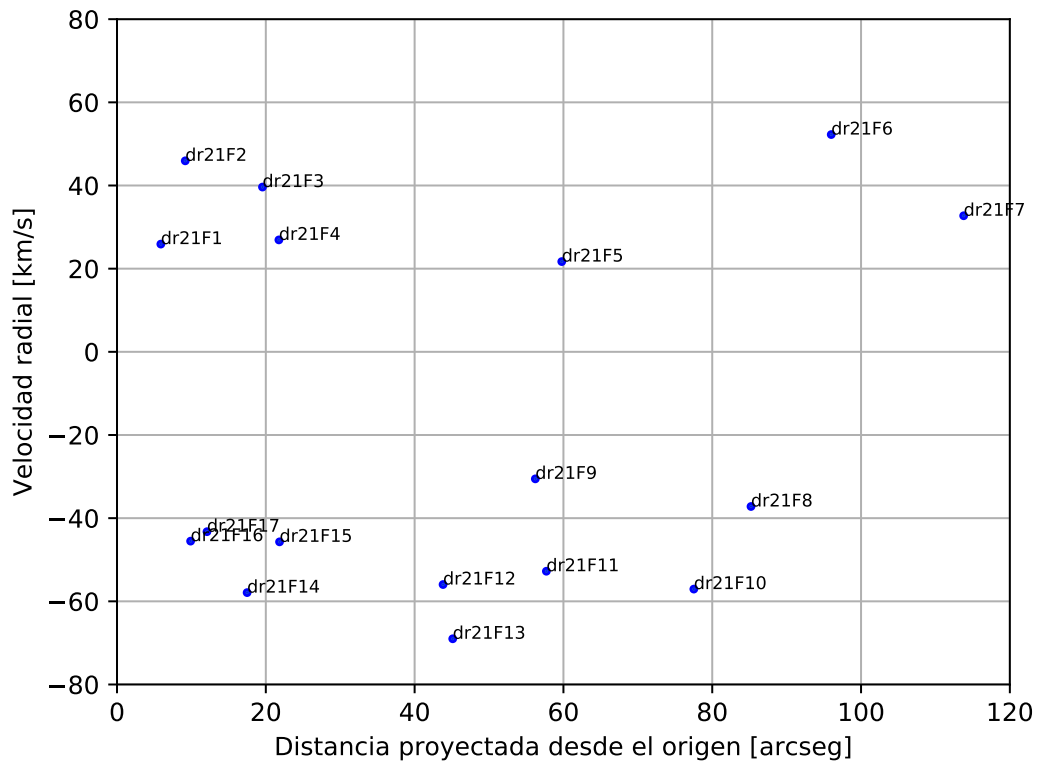


Figura 3.9: Posición contra velocidad de los dedos de la muestra seleccionada de la región DR21 para su estudio, con los datos obtenidos de la Fig. 3.7, que es también, figura 2 Zapata et al., (2009).

Tabla 3.6: Distancia recorrida, ángulos de proyección y velocidad calculada para cada dedo para edades de de 500, 1000 y 2000 yr, para los dedos de DR21.

ID	t=0.5 kyr			t=1 kyr			t=2 kyr		
	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [km s $^{-1}$]	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [km s $^{-1}$]	R $\times 10^{16}$ [cm]	θ [rad]	V [k ms $^{-1}$]
DR21F1	4.08	1.24	80	8.17	0.97	46	16.34	0.63	32
DR21F2	7.24	1.20	127	14.48	0.91	75	28.97	0.57	54
DR21F3	6.24	1.41	256	12.49	1.26	132	24.99	1.01	74
DR21F4	4.24	1.47	282	8.48	1.38	143	16.97	1.20	75
DR21F5	3.42	1.54	773	6.84	1.51	387	13.68	1.45	194
DR21F6	8.23	1.52	1243	16.47	1.48	623	32.95	1.40	314
DR21F7	5.16	1.54	1472	10.32	1.52	736	20.64	1.48	369
DR21F8	-5.86	-1.53	-1103	-11.72	-1.50	-552	-23.45	-1.43	-278
DR21F9	-4.81	-1.52	-728	-9.63	-1.48	-364	-19.26	-1.40	-184
DR21F10	-8.99	-1.51	-1004	-17.99	-1.45	-504	-35.98	-1.34	-257
DR21F11	-8.31	-1.50	-748	-16.63	-1.43	-377	-33.27	-1.29	-193
DR21F12	-8.82	-1.47	-569	-17.64	-1.37	-288	-35.29	-1.19	-152
DR21F13	-10.88	-1.45	-587	-21.76	-1.33	-299	-43.52	-1.12	-161
DR21F14	-9.13	-1.32	-233	-18.26	-1.09	-127	-36.52	-0.77	-80
DR21F15	-7.20	-1.41	-286	-14.41	-1.25	-148	-28.82	-0.99	-84
DR21F16	-7.17	-1.22	-135	-14.35	-0.95	-78	-28.71	-0.61	-55
DR21F17	-6.82	-1.30	-162	-13.64	-1.06	-89	-27.28	-0.73	-58

La Tabla 3.6 muestra el caso de los dedos de DR21, donde tenemos 17 dedos de CO en nuestra muestra. Para el caso cuando tomamos un tiempo de evolución del evento de 0.5 kyr, el módulo de la velocidad mínima y máxima deproyectadas es de 80 y 1472 km s⁻¹, correspondiendo a un tamaño de 2.72×10^3 y 3.44×10^3 au, y un ángulo de proyección $\theta = 1.24$ y 1.54 rad, respectivamente. Al igual que en el caso de Orión BN/KL y G5.89, al aumentar el tiempo con el que se calculan las propiedades los grumos tendrán velocidades menores y tamaños calculados mayores. Sin embargo, para los dedos de este objeto las velocidades deproyectadas son mayores que en el caso de los dedos de Orión BN/KL y menores que para los de G5.89, para la misma edad, alcanzando en el caso de $t=0.5$ kyr, velocidades de hasta ~ 1400 km s⁻¹.

Al igual que para Orión BN/KL y G5.89, la velocidad calculada y el ángulo de proyección para diferentes edades de G5.89 se usarán como un límite máximo de la edad en el análisis de la sección 3.4.

3.4. Análisis

Habiendo obtenido los ángulos de proyección para cada uno de los dedos de CO podemos ver que los resultados para todos los objetos muestran tener una dependencia importante con el tiempo que se haya considerado. Para poder observar mas claramente el comportamiento de los objetos a los diferentes tiempos graficaremos los dedos de las muestras de los tres objetos en una gráfica de ángulo de proyección contra velocidad.

En la Fig. 3.10, que corresponde a una edad de 500 años, podemos observar que las puntas de los dedos se encuentran distribuidos en dos trazos principales que parecen pasar de líneas rectas paralelas al eje x a líneas rectas paralelas al eje y encontramos la mayoría de los valores, de los trazos horizontales, corresponden a dedos de G5.89 y DR21, es decir los grumos de estos dos objetos están distribuidos alrededor de dos ángulos, -85° y 85° . Sin embargo, los datos de Orión BN/KL, se encuentran distribuidos en una línea central ocupando amplio intervalo de ángulos y velocidades entre -300 y 300 km/s.

Para 1000 yr, en la Fig. 3.11, podemos observar que los datos de Orión BN/KL empiezan a dispersarse, perdiendo la estructura que tenían para cuando el tiempo era de 500 yr. Sin embargo, los datos correspondientes a DR21 migran a una posición mas distribuida en múltiples ángulos y velocidades, en tanto los de G5.89 permanecen concentrados y con una distribución principalmente horizontal. Una mejor de distribución de velocidades contra ángulos de proyección, para los datos de DR21 se observa

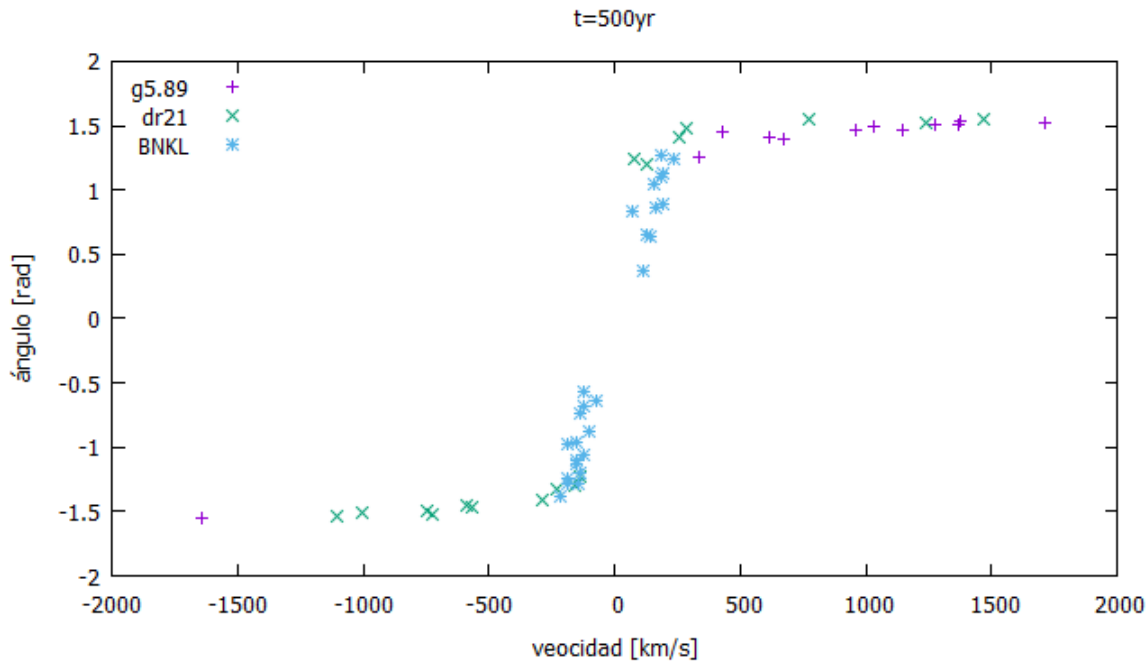


Figura 3.10: Gráfica del ángulo de proyección contra velocidad, para cada uno de los dedos de BN/KL (azul), DR21 (verde) y G5.89 (Morado), considerado un tiempo de vida de 500 yr. Obtenidos con el programa angles.f90 Anexo A1 y con los datos observacionales de Zapata et al., (2009,2019,2020).

cuando se utiliza una edad de 1500 yr (ver Fig. 3.12) donde, para DR21, se muestra una distribución de ángulos de entre 30 a 80° y entre -85 y -60° , con velocidades de entre 100 y 200 y -200 y -150 km/s. Es importante notar que tanto para la edad de 1000 , así como 1500 yr la distribución de velocidades contra el ángulo de proyección de los datos de Orión BN/KL se ven más dispersos y no se sigue una relación suave entre los ángulos de proyección y las velocidades como se observaba para estos datos en la gráfica correspondiente a la edad de 500 yr.

Finalmente a 2000 yr (Fig. 3.13) podemos ver que la distribución de la punta de los dedos de DR21, en la sección positiva se pierde, pero los puntos de G5.89 empiezan a acomodarse en una distribución mucho más suave. Al igual que los datos de DR21, los de Orión BN/KL se encuentran más dispersos. Las velocidades para los dedos de G5.89 se encuentran en un intervalo de módulo de velocidad de entre 150 y 400 km/s y el módulo de los ángulos de proyección entre 30 y 90° .

Este estudio de edades parece sugerirnos que si uno utiliza edades bajas se tendrá un comportamiento asintótico horizontal (en el ángulo de proyección) en una gráfica de velocidades contra ángulos de proyección. Y, a edades altas, se pierde una estructura en la distribución, de modo que puede suponerse que el momento en que los puntos se encuentran distribuidos en líneas verticales, se trata del momento en que

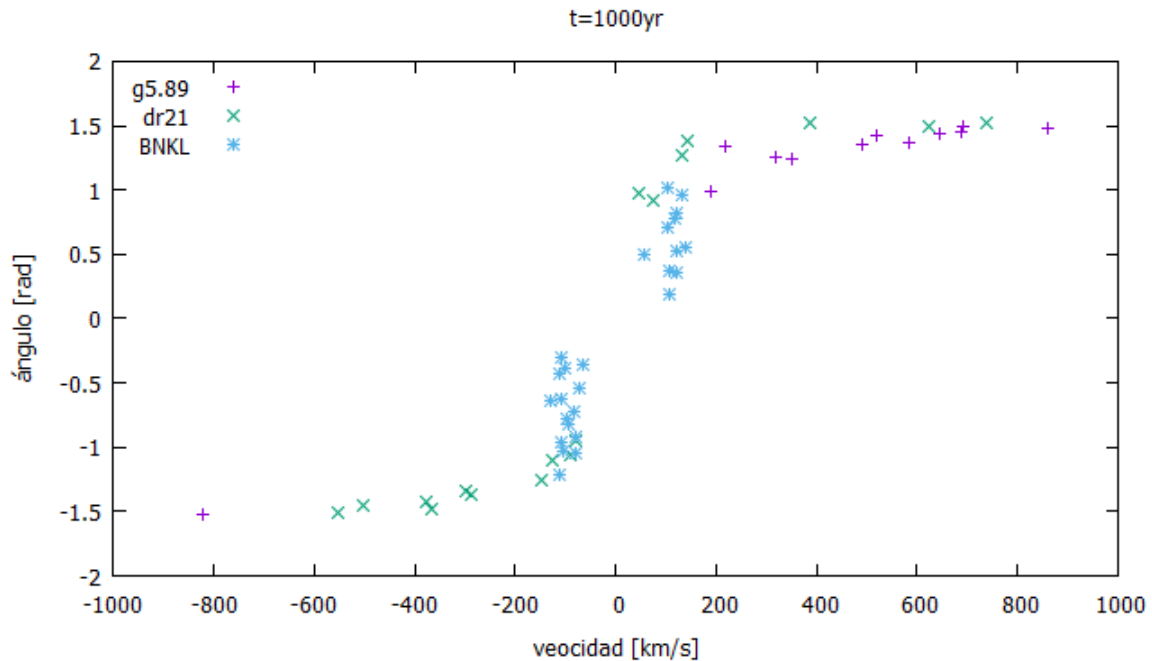


Figura 3.11: Gráfica del ángulo de proyección contra velocidad, para cada uno de los dedos de BN/KL (azul), DR21 (verde) y G5.89 (morado), considerado un tiempo de vida de 1000 yr. Obtenidos con el programa angles.f90 Anexo A1 y con los datos observacionales de Zapata et al., (2009,2019,2020).

el tiempo devuelve las condiciones del objeto observado. Con esto en mente podemos asignar una aproximación de edad a los objetos de modo que tomaremos edades de 500 yr para BN/KL, una edad de 1500 yr para DR21 y una edad de 2000 yr para G5.89.

Otra aproximación puede ser obtenida a través de la edad dinámica del objeto, para aproximar esto tomamos la edad promedio de los dedos observados, retirando algunos dedos que se alejaron mucho de los 45 grados, ya que consideramos que al rededor de este ángulo las componentes de velocidad son cercanas en magnitud y no importa cual de las dos tomemos, por lo que debemos obtener una edad mas precisa. De esta forma obtenemos edades de 530 yr para BN/KL, 645 yr para G5.89 y 4000 yr para DR21.

En el siguiente capítulo, utilizaremos estas tres aproximaciones de tiempos de vida; las reportadas previamente, las obtenidas con gráficas de ángulo y las edades dinámicas promediadas; para calcular las condiciones iniciales de cada objeto con las ecuaciones del modelo del plasmón, probando con que edad se obtienen mejores resultados.

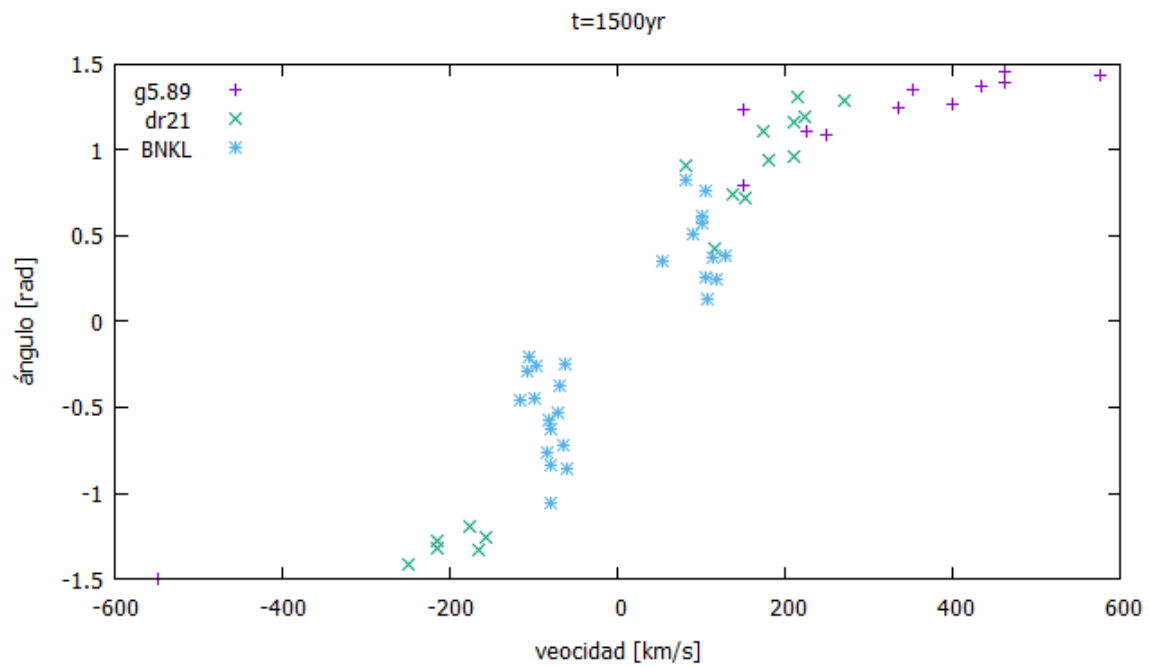


Figura 3.12: Gráfica del ángulo de proyección contra velocidad, para cada uno de los dedos de BN/KL (azul), DR21 (verde) y G5.89 (morado), considerado un tiempo de vida de 1500 yr. Obtenidos con el programa angles.f90 Anexo A1 y con los datos observacionales de Zapata et al., (2009,2019,2020).

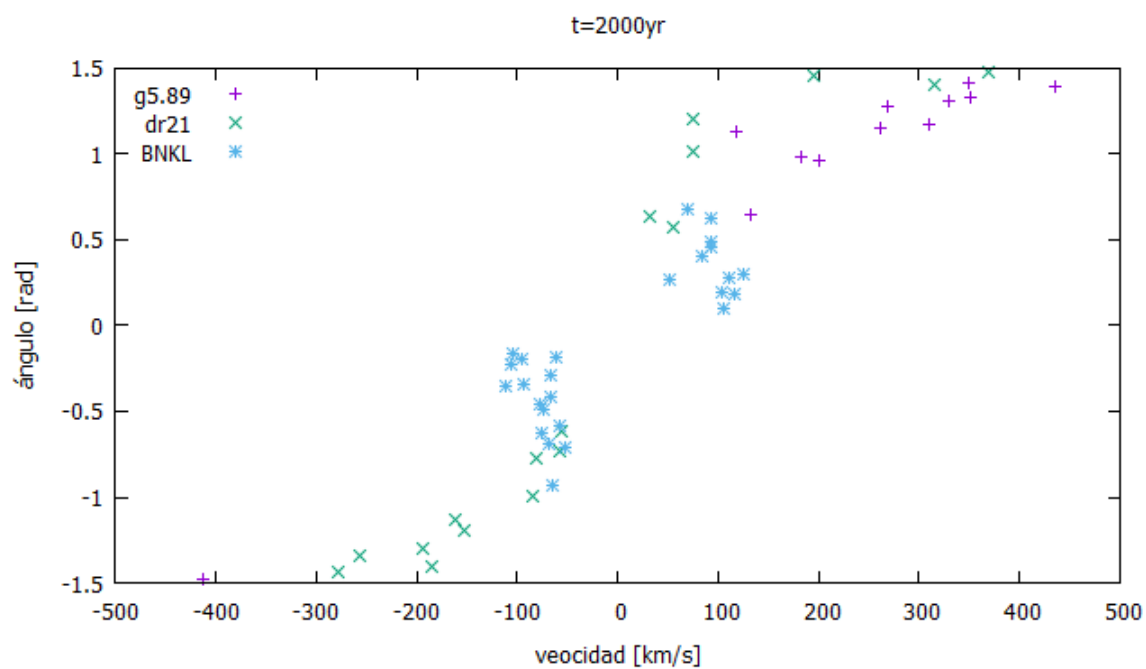


Figura 3.13: Gráfica del ángulo de proyección contra velocidad, para cada uno de los dedos de BN/KL (azul), DR21(verde) y G5.89 (morado). Considerado un tiempo de vida de 2000 yr. Obtenidos con el programa angles.f90 Anexo A1 y con los datos observacionales de Zapata et al., (2009,2019,2020).

4 Condiciones iniciales

En este capítulo se calculan las condiciones iniciales de cada uno de los objetos a partir de las ecuaciones del modelo del plasmón que se presentaron en RO19a y RO19b. Con nuestra aproximación semi-analítica que encuentra las condiciones iniciales de cada una de las regiones analizadas en las que se dan flujos como los observados en las tres regiones.

Para esto se construyó el código numérico, INTTRESM.F90 (véase anexo de Herramientas Numéricas) que estima la edad y posición de los grumos, utilizando como parámetro de entrada el contraste de densidad entre el medio y el grumo, el tamaño del objeto, un valor de velocidad inicial y uno de velocidad instantánea. De esta forma podemos conocer numéricamente la trayectoria de un grumo dadas sus condiciones iniciales.

Sin embargo, estamos interesados en el problema inverso. Suponiendo una edad y dadas unas condiciones actuales, de posición y velocidad, buscaremos el coeficiente de evaporación y la velocidad inicial necesarias para encontrar la edad supuesta y la posición observada. La aproximación semi-analítica que estamos usando resuelve las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10, para múltiples valores del coeficiente de evaporación (α) y múltiples velocidades iniciales buscando la combinación de valores de α y V_0 , tales que coincidan con la edad determinada o propuesta para el objeto y que corresponda con la longitud observada del dedo.

Finalmente, el programa separa en un archivo la combinación del coeficiente de evaporación y V_0 en las que se obtengan tanto edad como radio.

De este modo, con las aproximaciones de edad para cada uno de los eventos obtenidas en el capítulo anterior se corrió el programa INTTRESM.F90, para BN/KL, G5.89 y DR21.

Para analizar los datos obtenidos realizaremos histogramas de ellos buscando que sus resultados parezcan morfológicamente al comportamiento común y que sean consistentes con los modelos de RO19b.

4.1. Orión BN/KL

En el caso de Orión BN/KL se tiene una edad la edad determinada en la literatura de 500 yr y que coincide con nuestros resultados del análisis de los ángulos de proyección en la sección §3.4.

La Fig. 4.1 muestra un ejemplo del procedimiento aplicado para el dedo BNKLF4 donde se pueden ver todas las posibles combinaciones de V_0 y α que reproducen el tamaño observado para BNKLF4 ($=8.04 \times 10^{16}$ cm, ver Tabla 3.1) y las que reproducen la edad del objeto ($=500$ yr), con símbolos, 'x' color verde y '+' color magenta. Nosotros hemos considerado que la combinación de V_0 y α que reproducen las propiedades iniciales de BNKLF4 es la intersección de las líneas, que en este caso es $\alpha = 1.5$ y $V_0=110$ km/s. Si bien es cierto que la convergencia de V_0 y α de esta figura sucede en más de un punto, nosotros hemos tomado el primer punto de convergencia como la combinación de valores que nos ayudarán a reproducir las condiciones iniciales.

Nosotros hemos realizado este mismo procedimiento para obtener la combinación de velocidades iniciales, V_0 y α los 26 dedos de la muestra de Orión BN/KL. Esto lo hemos hecho suponiendo edades del evento explosivo de 400, 500 y 600 yr. Además, como se dijo anteriormente, utilizando las ecuaciones 2.8 2.4 y 2.5, hemos calculado la masa inicial y tamaño final (donde se ha utilizado la edad propuesta) para cada uno de los dedos de la muestra. En la Tabla 4.1 se muestra el parámetro de evaporación, la velocidad inicial, V_0 , masa inicial, M_0 y tamaño de cada dedo para las 3 edades propuestas para Orión BN/KL. Cuando no se encontró convergencia se ha agregado un símbolo de '-' a los datos de condiciones iniciales de la Tabla. Como podemos ver, la edad en la que encontramos más coincidencias, o convergencias, es en 400 yr, donde se han podido encontrar las condiciones iniciales de 20 objetos.

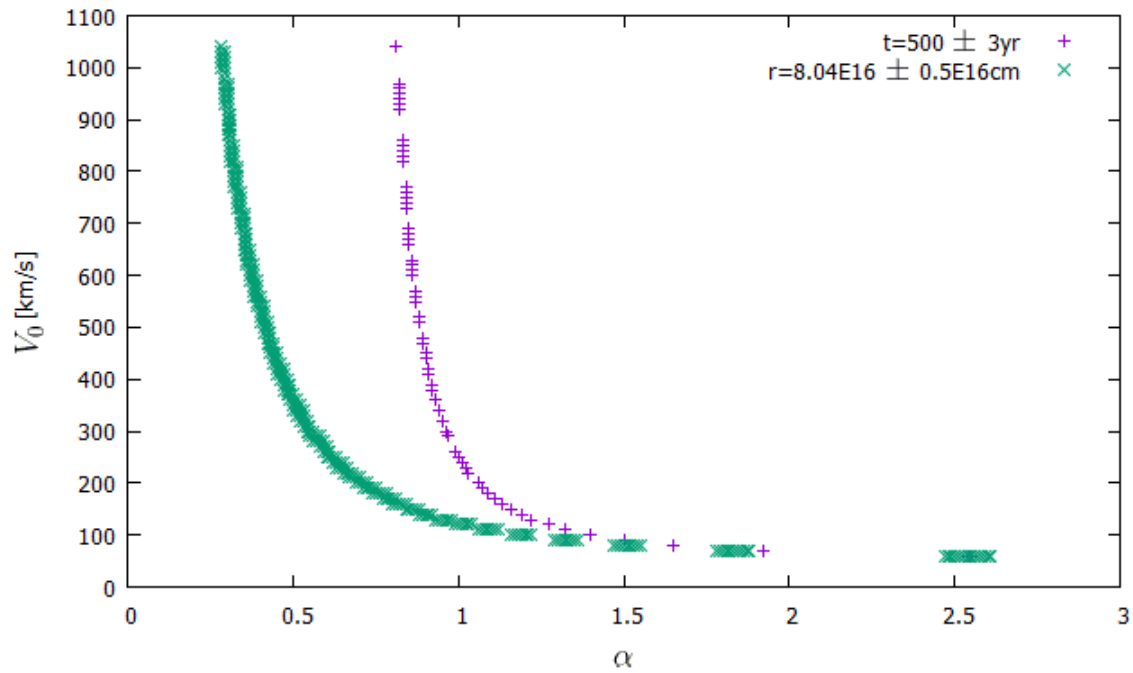


Figura 4.1: V_0 contra α , en la que se muestran en morado los puntos en los que la combinación de α y la velocidad inicial alcanzan el tiempo aproximado del evento, de 500 yr; y en verde se muestran los puntos en que para la combinación de α y velocidad inicial alcanzan el radio observado del dedo de CO. Como resultado del programa inttasm.f90 (Anexo A3) para dedos de la región Orión BN/KL; En este caso la gráfica corresponde a BNKLF4.

Para visualizar de manera general y mas clara estos resultados de nuestra aproximación, hemos realizado histogramas de masa inicial (Fig. 4.2) y velocidad inicial (Fig. 4.3) para todos los dedos que tuvieron convergencia de la muestra de Orión BN/KL. En estos histogramas hemos pintado con color azul los resultados obtenidos para la edad de 400 yr, negro-discontinuo para 500 yr y rojo cuando se usa una edad de 600 yr.

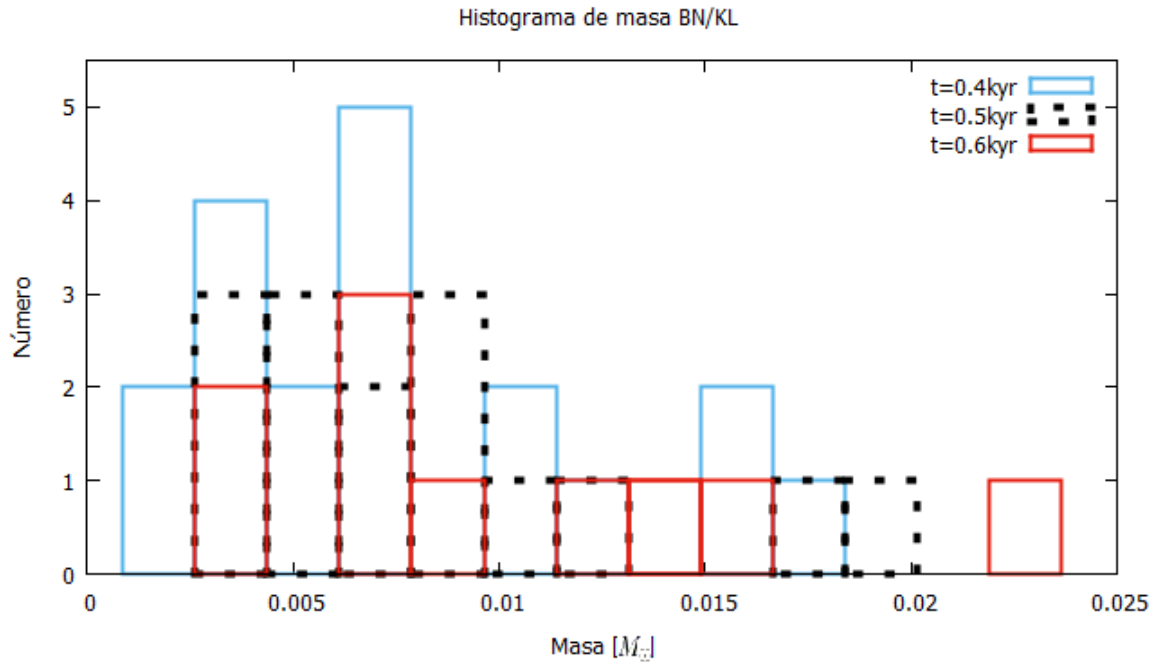


Figura 4.2: Histograma de masa inicial para la muestra de dedos de CO de la región BN/KL, con datos obtenido con el programa intttsm.f90 (Anexo A3), para tiempos de 400,500 y 600 yr, en los cuales se puede observar una distribución similar a la de una función inicial de masa.

En el histograma de masa (Fig. 4.2) podemos ver que se reproduce el comportamiento del histograma de una función inicial de masa, es decir, con una mayor concentración en masas menores y menor concentración conforme aumenta la masa, que es mas notorio para la edad del evento de 400 yr, quizá porque se tienen más objetos con convergencia para esta edad. Sin embargo, es importante notar que los 3 histogramas tienen un máximo en el intervalo de masas de 0.006-0.0075 M_{\odot} , la masa mínima varía para cada una de las edades siendo la mínima en el intervalo de 0.001-0.0025 M_{\odot} . La masa máxima encontrada para el caso en el que la edad propuesta es de 600 yr es en el intervalo de 0.0215-0.023 M_{\odot} . Estos valores corresponden relativamente bien con los encontrados y reportados en RO19b para los dedos de H_2 , en donde el máximo de la masa se encuentra en 0.01 M_{\odot} .

La Fig. 4.3 muestra el histograma de velocidades para las 3 edades propuestas para este objeto. Podemos ver que el resultado a 500 yr reproduce correctamente el

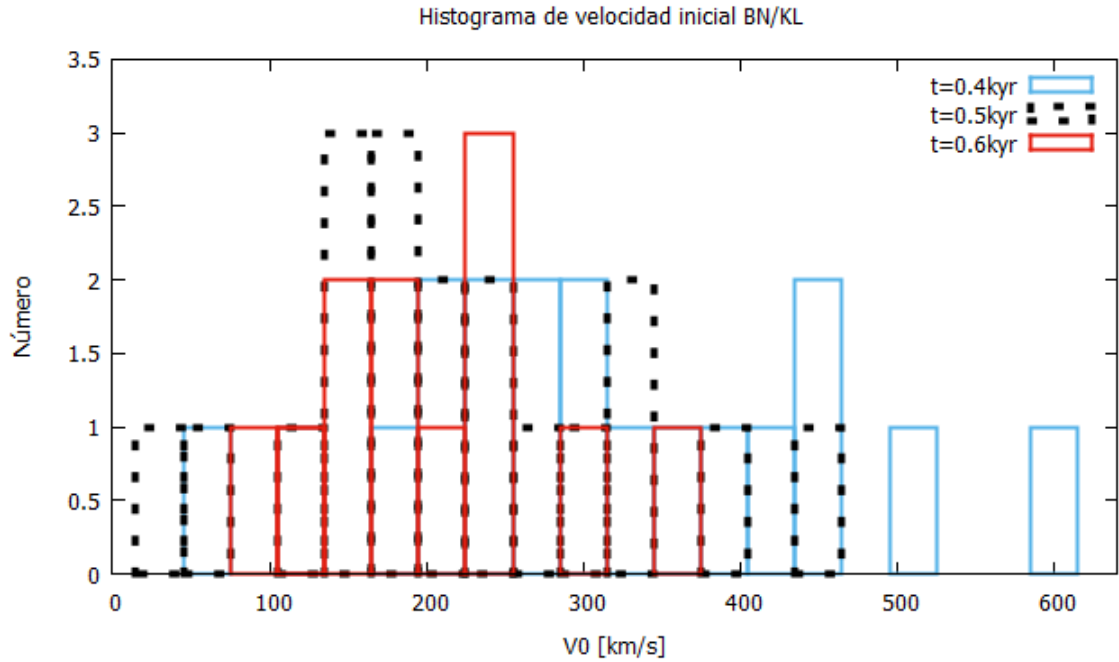


Figura 4.3: Histograma de velocidad inicial para la muestra de dedos de CO de la región BN/KL, con datos obtenidos con el programa `intttsm.f90` (Anexo A3), para tiempos de 400, 500 y 600 yr.

histograma encontrado por Rivera-Ortiz et al, (2019b), teniendo un pico al rededor de 200 km s^{-1} , con una velocidad mínima en el intervalo de 75 a 100 km s^{-1} . La velocidad más alta encontrada para este modelo, de 500 yr, es de aproximadamente 350 km s^{-1} , sin embargo, cuando se usa la edad más chica propuesta podemos encontrar velocidades máximas que alcanzan los 600 km s^{-1} .

Es importante notar que si hay diferencias importantes en los histogramas, o propiedades promedio encontradas para los dedos de Orión obtenidos en este trabajo en donde se han utilizado los dedos de CO, con los reportados por RO19b, donde se usó la información de los dedos de H_2 . Sin embargo, también hay que aclarar que se tiene una muestra estadísticamente mucho más pobre que la que se presentó en RO19b, en donde había 10 veces más dedos. Por lo tanto, nuestros histogramas reflejan, en orden de magnitud, lo que fue encontrado en el artículo de Rivera-Ortiz (2019b) para Orión BN/KL.

Sin embargo, podemos hacer una predicción de la energía cinética para 19 plasmones en la región BN/KL usando de condiciones iniciales que fueron encontradas en esta sección. La energía cinética individual con la que fueron inyectados al medio está dada por $E_i = \frac{1}{2}M_0V_0^2$. De esta forma podemos hacer una predicción sobre la energía total del evento suponiendo que los dedos observados son todos los que han existido. Entonces la energía total del evento explosivo que eyecto estos dedos sería de

$$\Sigma^N E_i \sim 1.15 \times 10^{47} \text{ erg.}$$

4.2. G5.89

Al igual que en el caso de Orión BN/KL, hemos calculado las condiciones de los 12 dedos reportados en la Tabla 3.3. Sin embargo, para el caso de G5.89 tenemos 3 edades posibles, la edad obtenida por el análisis de la sección 3.4, 2000 yr, la edad aproximada del objeto en propuesta en la literatura 1000 yr, y la edad dinámica promedio de todos los dedos que es de 645 yr. También hemos realizado, al igual que en el caso de Orión BN/KL los cálculos de las propiedades iniciales de los grumos usando 3 edades, 500, 600 y 700 yr, es decir cerca del valor promedio de la edad dinámica de los dedos de G5.89.

Un ejemplo se puede observar en la Fig. 4.4, en donde se ve la convergencia de V_0 y α para las propiedades observadas del dedo G5.89F2. Como podemos ver, la edad utilizada en esta gráfica es de 600 yr y la convergencia de las figuras que reproducen edad (símbolos magenta) y los que reproducen tamaño se encuentra en $\alpha = 1.95$ y $V_0 = 170 \text{ km s}^{-1}$.

Hemos corrido el programa con las tres aproximaciones para la edad de la región, así como para la edad reportada en la literatura y la edad encontrada por nuestros modelos de ángulo de proyección (§ 3.4), y encontramos una mayor cantidad de condiciones iniciales cuando se usaban valores cercanos a la edad promedio de 645 yr.

Desafortunadamente para el caso de G5.89, la muestra es mucho menor que en el caso de Orión BN/KL y nosotros hemos buscado la edad que da mayor número de dedos que convergen. Como podemos ver la edad de 500 yr tiene 10 convergencias (de los 12 dedos). La Tabla 4.2 muestra el parámetro de evaporación, velocidad inicial, masa inicial y tamaño para cada dedo para 3 edades, 500, 600 y 700 yr.

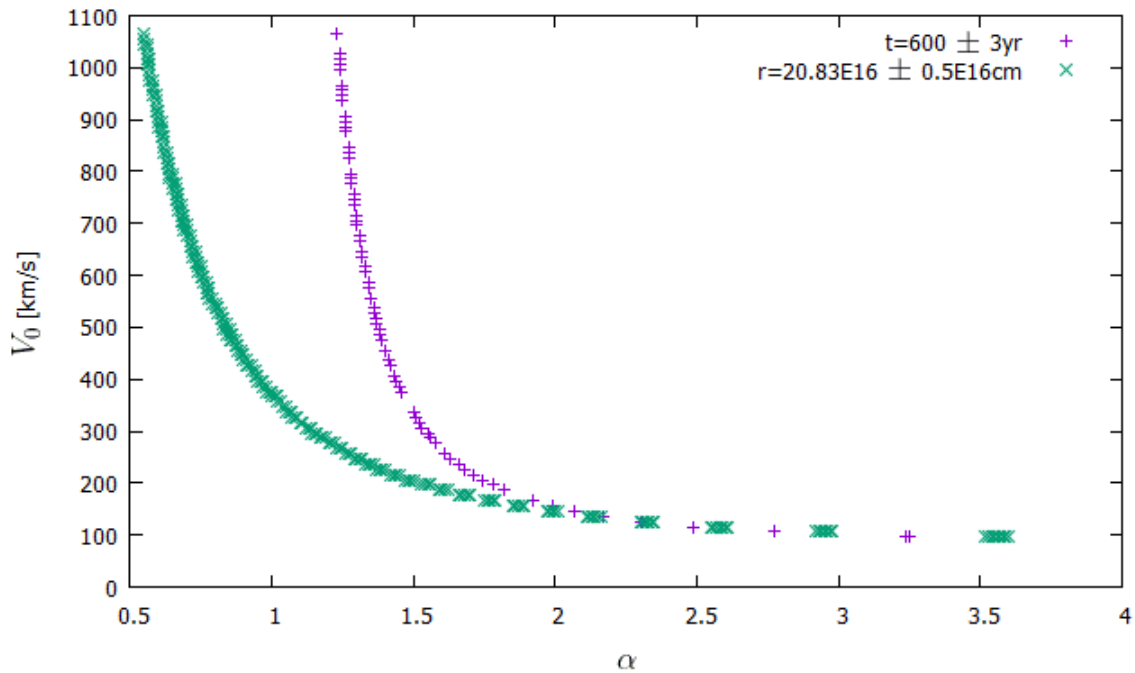


Figura 4.4: V_0 contra α , en la que se muestran en morado los puntos en los que la combinación de α y la velocidad inicial alcanzan el tiempo aproximado del evento, de 600 yr; y en verde se muestran los puntos en que para la combinación de α y velocidad inicial alcanzan el radio observado del dedo de CO. Como resultado del programa INTTESM.F90 (Anexo A3) para dedos de la región G5.89; En este caso la gráfica corresponde a G5.89F2.

Tabla 4.2: Tabla de condiciones iniciales para cada dedo de CO de la muestra de la región G5.89, considerando edades de 400, 500 y 600 yr. Calculadas, a partir de las observaciones reportadas en la Tabla 3.3, con el programa INTTRESM.F90.

ID	t=0.5 kyr				t=0.6 kyr				t=0.7 kyr			
	α	V_0	M_0	r	α	V_0	M_0	r	α	V_0	M_0	r
		[km s ⁻¹]	[M _⊙]	×10 ¹⁶ [cm]		[km s ⁻¹]	[M _⊙]	×10 ¹⁶ [cm]		[km s ⁻¹]	[M _⊙]	×10 ¹⁶ [cm]
G5.89F1	2.83	63.23	0.065	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
G5.89F2	1.75	166.20	0.015	20.5	2.31	126.20	0.027	20.6	-	-	-	-
G5.89F3	1.10	188.61	0.007	19.1	1.30	148.61	0.009	19.3	1.54	118.61	0.012	19.3
G5.89F4	1.25	285.31	0.008	28.0	1.49	215.31	0.010	27.4	1.74	175.31	0.013	27.7
G5.89F5	-	-	-	-	-	-	-	-	1.56	310.99	0.009	42.3
G5.89F6	1.57	629.24	0.009	58.4	1.83	489.24	0.010	57.9	-	-	-	-
G5.89F7	0.79	580.44	0.004	43.1	0.89	470.44	0.004	43.4	-	-	-	-
G5.89F8	0.72	260.02	0.003	21.3	-	-	-	-	0.92	170.02	0.005	21.3
G5.89F9	-	-	-	-	0.94	185.11	0.005	20.4	-	-	-	-
G5.89F10	1.22	282.82	0.007	27.7	-	-	-	-	1.65	182.82	0.012	28.1
G5.89F11	1.70	150.63	0.015	18.8	2.16	120.63	0.024	19.5	3.27	90.63	0.066	19.0
G5.89F12	2.13	289.42	0.016	34.7	2.73	219.42	0.027	34.6	3.49	179.42	0.048	35.1

Para los resultados de nuestra aproximación hemos realizado histogramas de masa inicial (Fig. 4.5) y velocidad inicial (Fig. 4.6) para todos los dedos que tuvieron convergencia de la muestra de G5.89. En estos histogramas hemos pintado con color azul los resultados obtenidos para la edad de 500 yr, negro-discontinuo para 600 yr y rojo cuando se usa una edad de 700 yr. También hemos agregado los resultados que salen del estudio que hicimos para Orión BN/KL en donde se tiene una muestra mucho más grande de dedos.

En el histograma de masa (Fig. 4.5) podemos ver que también se reproduce el comportamiento del histograma de una función inicial de masa, es decir, con una mayor concentración en masas menores y menor concentración conforme aumenta la masa, que es mas notorio para la edad del evento de 500 yr, quizá porque se tienen más objetos con convergencia para esta edad. Sin embargo, es importante notar que los 3 histogramas tienen un máximo en el intervalo de masas de $0.003\text{-}0.013 M_{\odot}$, la masa mínima varía para cada una de las edades siendo la mínima en el intervalo de $0.0015\text{-}0.0055 M_{\odot}$. La masa máxima encontrada para el caso en el que la edad propuesta es de 700 yr es en el intervalo de $0.009\text{-}0.015 M_{\odot}$. Es interesante notar que se encuentran grupos mas masivos en este modelo que en el caso de Orión BN/KL, sin embargo la mayor cantidad de los grupos se pueden ver distribuidos en intervalo de masas parecidos a los de la muestra de Orión.

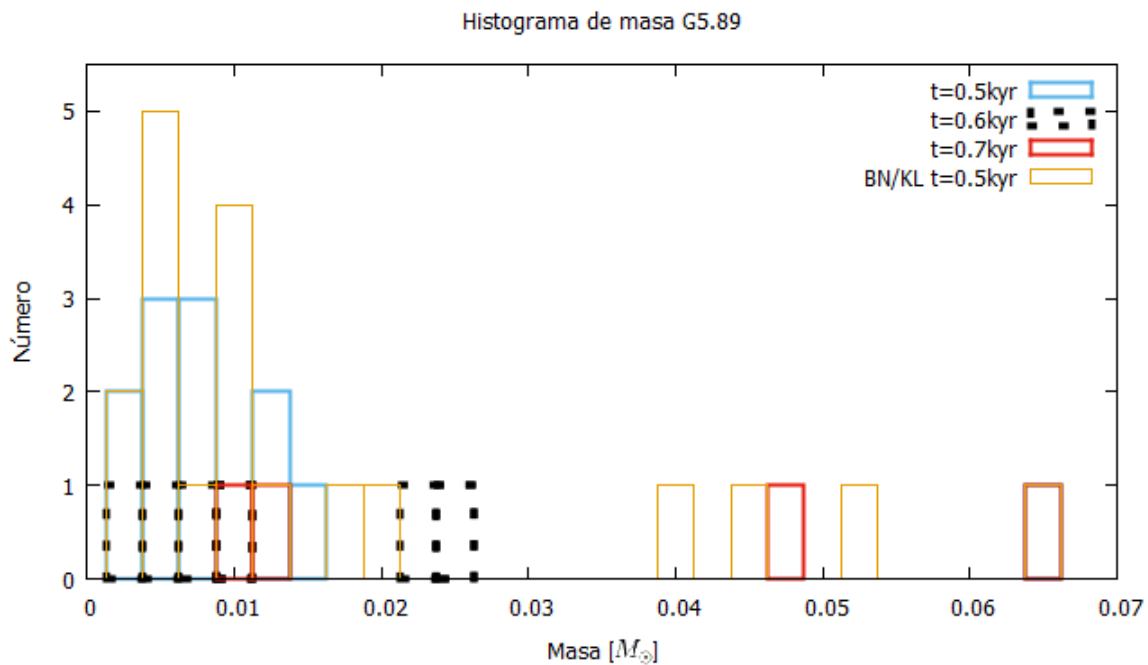


Figura 4.5: Histograma de masa para la muestra de dedos de CO de la región G5.89, con datos obtenido con el programa INTTRESM.F90 (Anexo A3), para tiempos de 500, 600 y 700 años. Además se muestra como referencia el histograma de BN/KL para 500 años.

La Fig. 4.6 muestra el histograma de velocidades para las 3 edades propuestas para este objeto. Podemos ver que el resultado a 500 yr es el que más se parece a la distribución de velocidades encontrada para la muestra de referencia, Orión BN/KL, (Fig. 4.3) teniendo un pico al rededor de 200 km s^{-1} , con un valor máximo global de histograma en el intervalo de velocidades de 100-300 km s^{-1} . Y la velocidad mínima está el intervalo de 63.23 a 90.63 km s^{-1} . La velocidad más alta encontrada para el modelo de 500 yr, es de aproximadamente 600 km s^{-1} , muy parecido a lo que se encontró para la muestra de Orón.

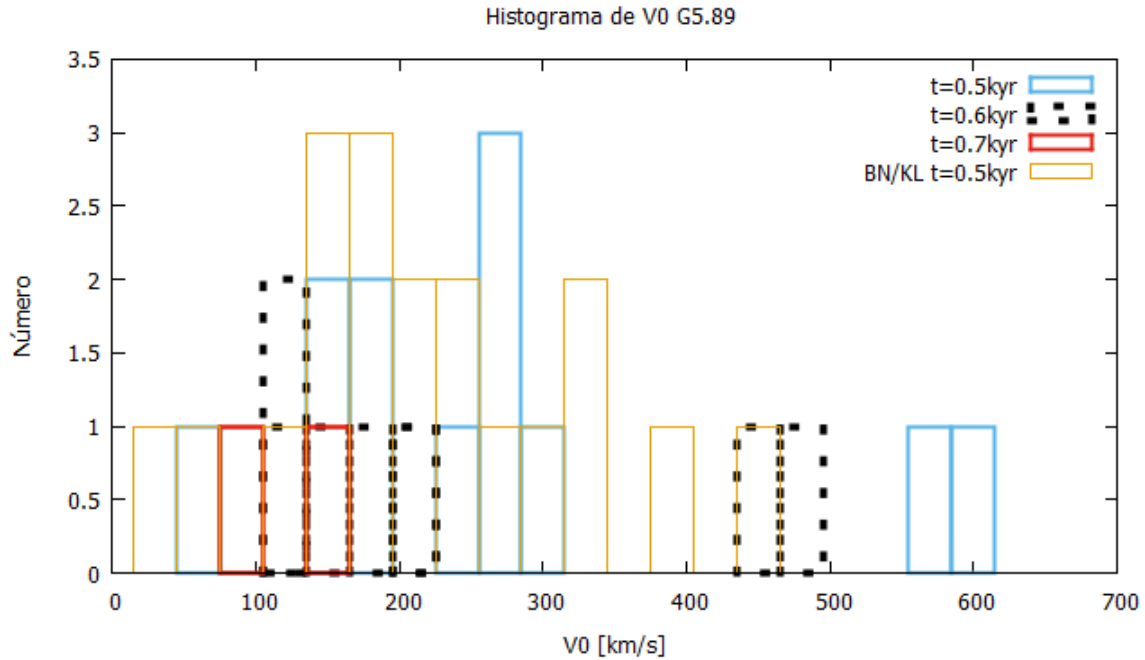


Figura 4.6: Histograma de velocidad inicial para la muestra de dedos de CO de la región G5.89, con datos obtenido con el programa INTTESM.F90 (Anexo A3), para tiempos de 500,600 y 700 años. Además se muestra como referencia el histograma de BN/KL para 500 yr.

Al igual que en de los histogramas de velocidad y masas iniciales de Orión BN/KL, los histogramas fueron hechos con una cantidad muy pequeña de puntos en nuestra muestra y nuestros resultados son estadísticamente muy pobres. Sin embargo, si se puede observar que se tiene una distribución de masa como una función inicial de masa, con mayor cantidad de objetos en masas menores, para la muestra de 500 yr y que la distribución de velocidades presenta un máximo en velocidades parecidas a las que se reportan en Orión BN/KL, de algunos cientos de km s^{-1} , siendo, en definitiva, velocidades de 600 km s^{-1} o más los valores mayores de la velocidad con los que serán eyectados estos objetos debido a su interacción dinámica.

Al igual que en el caso de Orión BN/KL, podemos hacer una predicción de la energía cinética para 8 plasmones en la región G5.89 usando de condiciones iniciales fue

encontradas en esta sección. La energía total sería $\Sigma^N E_i \sim 4.86 \times 10^{46}$ erg, suponiendo que los dedos de los que tenemos condiciones iniciales fueron todos los eyectados en la explosión dinámica en G5.89.

4.3. DR21

Para esta región tenemos 3 edades distinta para probar, edad estimada con los ángulos de proyección §3.4 de 1500 yr, edad estimada por edad dinámica de los dedos que es de 4000 yr y edad propuesta en la literatura 10000 yr (Zapata et al. 2013). Los resultados que encontramos usando estas edades en nuestra muestra de 17 dedos, es poco prometedor , sin embargo la mejor opción resultó ser la edad obtenida con los ángulos de proyección, de 1500 yr. Nuevamente mostramos un ejemplo de la convergencia para un dedo de la muestra de DR21. La Fig. 4.7 muestra la combinación del parámetro de evaporación y velocidad inicial para reproducir la edad de 1500 yr (línea magenta) y el tamaño del dedo DR21F5. Como se puede ver la convergencia se consigue en un solo punto, a diferencia de los objetos anteriores (Fig. 4.1 y 4.4) en donde una vez había convergencia en más de un valor de α . Para este caso particular la convergencia se encuentra en $\alpha = 0.91$ y $V_0=661 \text{ km s}^{-1}$

La lista completa de resultados de para los 17 dedos de la region de DR21 se muestran en la Tabla 4.3. Nosotros hemos corrido modelos para 1400, 1500 y 1600 yr, alrededor de los 1500 yr que nos sugirió el modelo de ángulos de proyección de la sección 3.4 de esta tesis. Como se puede observar la edad de 1500 yr encuentra convergencia en 5 de los 17 dedos de este objeto, haciendo mucho más pobre estadísticamente la muestra que en el caso de las otras dos regiones. Nosotros hemos probado la convergencia de nuestros modelos para las edades de 4000 y 10000 yr, de la edad dinámica promedio y la reportada en la literatura y se encuentra una menor convergencia en los datos que para el caso de los 1500 yr.

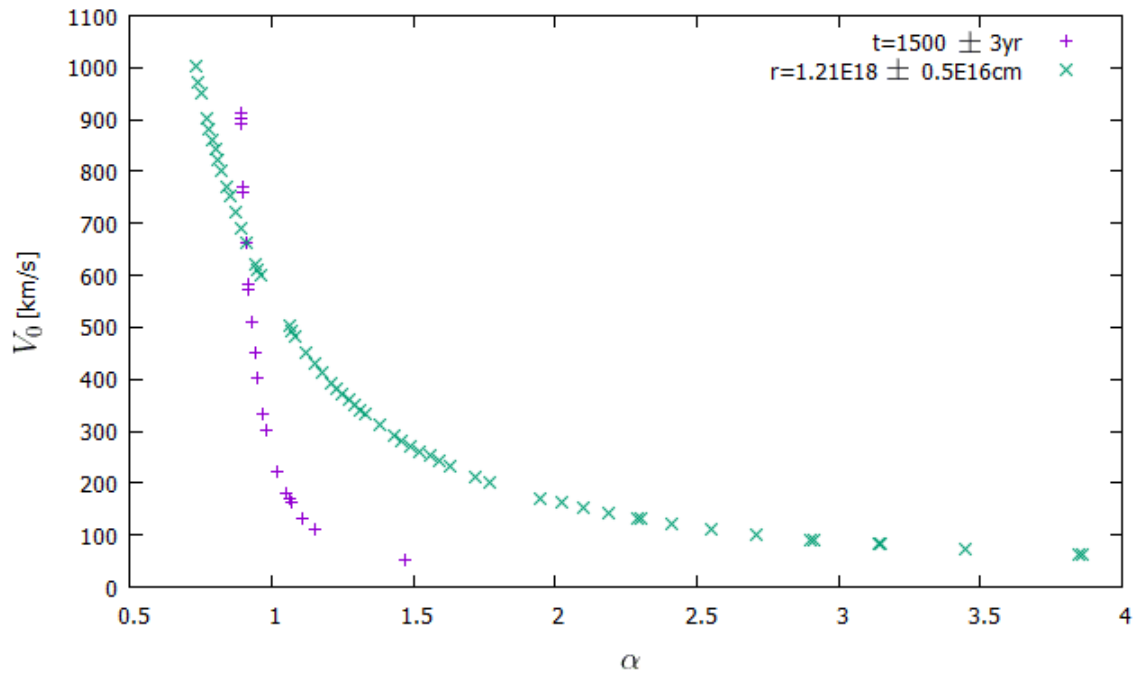


Figura 4.7: V_0 contra α , del dedo DR21F5. En morado se muestran los puntos en los que la combinación de α y la velocidad inicial alcanzan el tiempo aproximado del evento de 1500 yr; y en verde se muestran los puntos en que para la combinación de α y velocidad inicial alcanzan el radio observado del dedo de CO. Como resultado del programa intttesm.f90 (Anexo A3) para dedos de la región Orión BN/KL; En este caso es para el dedo DR21F5.

Tabla 4.3: Tabla de condiciones iniciales para cada dedo de C0 de la muestra de la región DR21, considerando edades de 1400, 1500 y 1600 yr. Calculadas, a partir de las observaciones reportadas en la Tabla 3.5, con el programa INTTESM.F90.

ID	t=1.4 kyr				t=1.5 kyr				t=1.6 kyr			
	α	V_0	M_0	r	α	V_0	M_0	r	α	V_0	M_0	r
		[km s ⁻¹]	[M _⊙]	×10 ¹⁶ [cm]		[km s ⁻¹]	[M _⊙]	×10 ¹⁶ [cm]		[km s ⁻¹]	[M _⊙]	×10 ¹⁶ [cm]
DR21F1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F5	0.87	721.70	0.004	122.	0.91	661.70	0.004	121.	1.15	131.70	0.006	34.9
DR21F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F8	-	-	-	-	-	-	-	-	1.66	167.19	0.010	48.8
DR21F9	-	-	-	-	1.15	570.55	0.006	114.	1.62	100.55	0.011	31.9
DR21F10	-	-	-	-	1.72	717.06	0.008	15.8	-	-	-	-
DR21F11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F12	1.78	385.96	0.009	89.3	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F13	2.11	369.01	0.010	91.3	2.24	339.01	0.011	92.2	-	-	-	-
DR21F14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F15	-	-	-	-	1.98	145.70	0.013	44.2	-	-	-	-
DR21F16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DR21F17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los resultados obtenidos para el caso de la región de DR21 se presentan, también, en un histograma de masa, Fig. 4.8, y de velocidad inicial, Fig 4.9, para las edades de 1400, 1500 y 1600 yr, líneas azul, negra-discontinua y roja, respectivamente y es comparado con el histograma de referencia de 500 yr de Orión BN/KL.

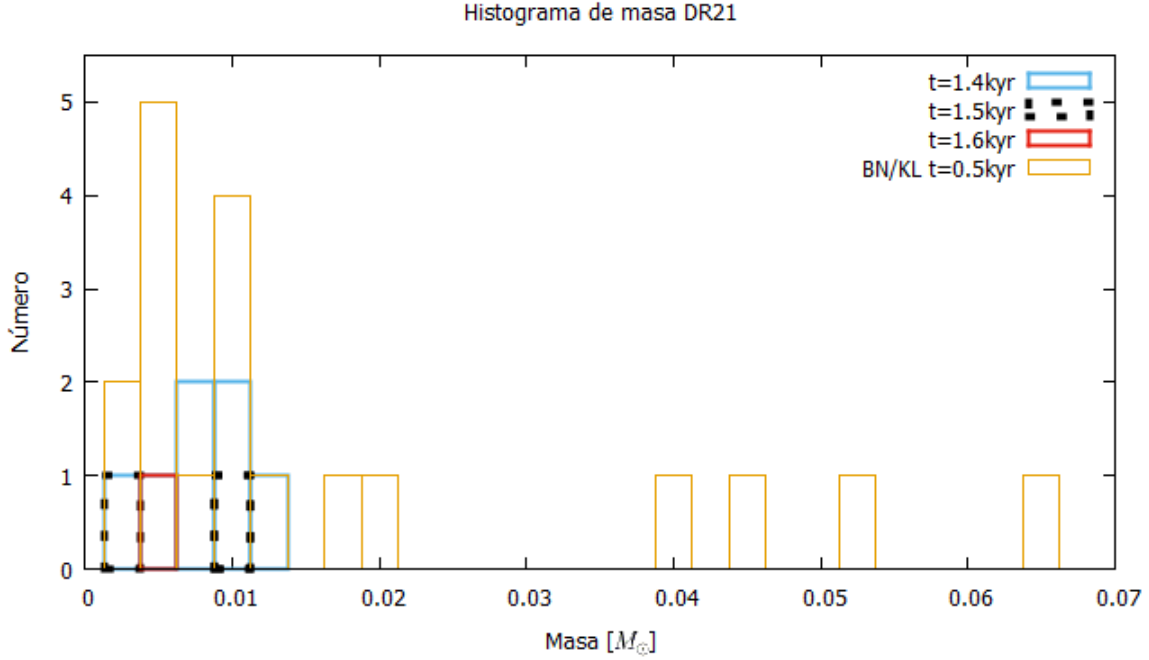


Figura 4.8: Histograma de masa para la muestra de dedos de CO de la región DR21, con datos obtenido con el programa INTTESM.F90 (Anexo A3), para tiempos de 500,600 y 700 yr. Además se muestra como referencia el histograma de BN/KL para 500 años.

Siendo una muestra estadísticamente muy pobre es difícil encontrar similitudes con los dedos obtenidos para los otros dos objetos. Sin embargo, el histograma de masas de este objeto nos muestra que los dedos se encuentran en el intervalo de masas parecidas a las de Orión BN/KL, entre 0.002 y 0.01 M_{\odot} .

La distribución de velocidades es mucho más difícil de analizar, pero se puede ver una tendencia a tener velocidades mayores en el caso de DR21. Sin embargo, un estudio mas detallado será necesario para este objeto.

Al igual que en los otros dos casos, de Orión BN/KL y G5.89, hacemos una predicción de la energía cinética para 5 plasmones en la región DR21 usando las condiciones iniciales de esta sección. La energía total sería $\sum_i^N E_i \sim 9.06 \times 10^{46}$ erg, suponiendo que los dedos de los que tenemos condiciones iniciales fueron todos los eyectados en la explosión dinámica.

De este modo podemos ver que los tres objetos muestran comportamientos simi-

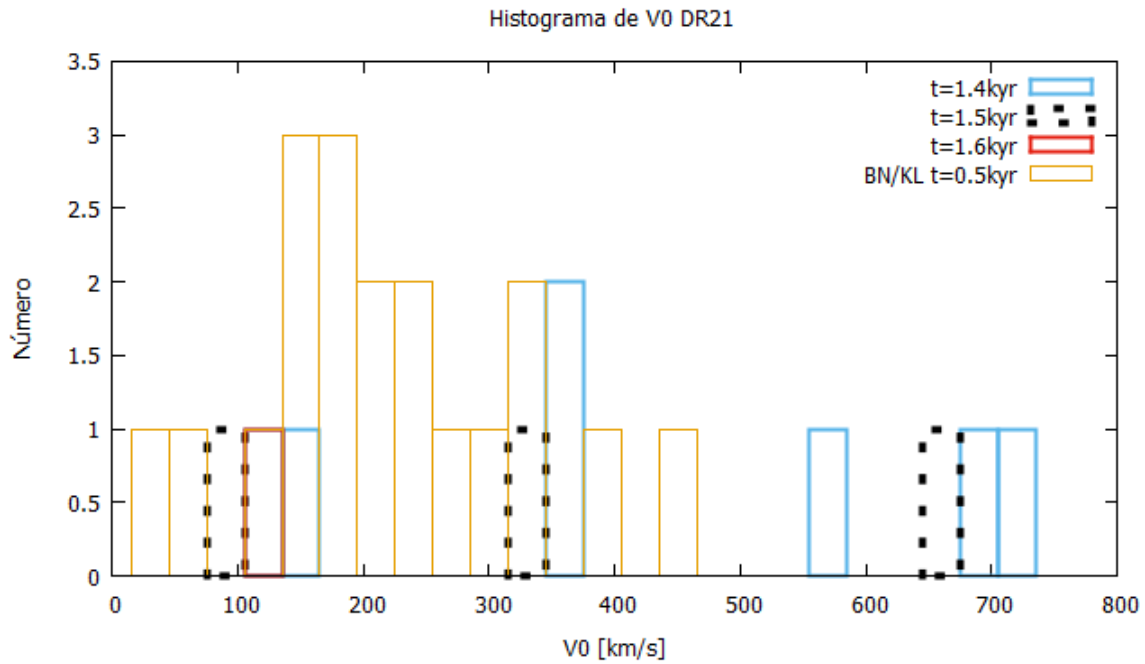


Figura 4.9: Histograma de velocidad inicial para la muestra de dedos de CO de la región DR21, con datos obtenidos con el programa INTTESM.F90 (Anexo A3), para tiempos de 500, 600 y 700 yr. Además se muestra como referencia el histograma de BN/KL para 500 yr.

lares hasta donde la muestra permite ver y son consistentes. Las masas son esperadas pues muestran una cota inferior clara y se agrupan en su mayoría en valores cercanos a esta, de modo que podemos considerar el modelo como una buena primera aproximación para el cálculo de condiciones iniciales en estos flujos, sin embargo es evidente que es necesario tomar una muestra más grande de dedos o completar los datos con un análisis estadístico más avanzado. Además, se necesita complementar el estudio con simulaciones dinámicas.

5 Conclusiones

Los estudios de las regiones de formación estelar masivas muestran flujos explosivos que aun no han sido completamente caracterizados. Uno de los eventos que se cree que podría estar relacionado con este proceso son los flujos como el observado en la región BN/KL de Orión, pero que han sido observados recientemente en otras regiones, G5.89 y DR21; sin embargo, aunque se han formulado múltiples modelos para el origen y evolución de estos objetos, aun deben ser estudiados a mayor profundidad para entender su contribución energética y química al medio interestelar.

Como una continuación del trabajo de Rivera-Ortiz et al., (2019a, b y 2021), acerca del flujo explosivo encontrado en la región de Orión BN/KL, realizamos un estudio para encontrar las condiciones iniciales de otros flujos observados con características similares a los de Orión BN/KL. Sin embargo, dado que estas regiones no cuentan con observaciones en hidrógeno molecular, se planteó usar modelo con las observaciones interferométricas de CO, que resulta ser la segunda molécula mas abundante en estas regiones y es mas claro en las observaciones.

De este modo analizamos las regiones G5.89 y DR21, así como la región de Orión BN/KL. De primera instancia se tomo una muestra de los dedos de cada una de estas regiones, se obtuvo la distancia proyectada y la velocidad radial de cada dedo digitalizando figuras de trabajos hechos por Zapata et al., (2009, 2013, 2020).

Posteriormente se desarrollo el código ANGLES.F90, que se encuentra anexado, con el cual se calcularon los ángulos de proyección el radio y la velocidad de cada dedo. Con estos datos aproximamos la edad de los eventos explosivos. Además se realizaron aproximaciones de la edad con las edades balísticas de los dedos y promediando estas edades para todo el objeto, removiendo de la muestra dedos de la parte central del objeto, pues en estos las componentes de velocidad no nos permitieron obtener edades balísticas correctas para estos dedos.

Se desarrollo además el programa INTTRESM.F90, que se encuentra anexado, con

	BN/KL	G5.89	DR21
Edad [yr]	500	600	1500
$V_{0,min}$ [km s ⁻¹]	59.87	120.63	145.70
$\langle V_0 \rangle$ [km s ⁻¹]	236.58	246.87	486.80
$V_{0,max}$ [km s ⁻¹]	469.3	489.24	717.06
$M_{0,min}$ [M _⊙]	0.004	0.004	0.004
$\langle M_0 \rangle$ [M _⊙]	0.018	0.014	0.0084
$M_{0,max}$ [M _⊙]	0.066	0.027	0.013
Energía [$\times 10^{46}$ erg]	11.5	4.86	9.06

Tabla 5.1: Tabla de condiciones iniciales encontradas con el modelo del plasmón para los tres objetos estudiados.

el cual con un parámetro de tiempo y los datos de observaciones busca las condiciones iniciales adecuadas para que con el modelo del plasmón se reproduzcan las observaciones. Con este programa se buscaron las condiciones para reproducir los valores de las observaciones de los tres objetos estudiados.

De este modo, hemos encontrado condiciones iniciales para la masa, la velocidad inicial y una nueva aproximación para las edades de DR21 y G5.89, los cuales se resumen en la Tabla 5.1, estos resultados señalan a eventos que pueden ser modelados de forma común y con energía con cotas superiores en 11.5×10^{46} erg, en el caso de BN/KL, 4.86×10^{46} erg en el caso de DR21, y 9.06×10^{46} erg para G5.89, pues este será el caso en que toda la energía fuera transformada en energía cinética. Además las edades encontradas apuntan a que los eventos son mas jóvenes de lo que se había estimado anteriormente.

Es importante notar que la energía cinética inicial calculada en este trabajo, en donde utilizamos solo los dedos de CO para todos los objetos, es aproximadamente 5000 veces menor que la energía cinética inicial calculada por Rivera-Ortiz et al., (2019b) en donde se utilizó la información de los dedos de H₂. Ciertamente, los dedos de CO son, en general entre 2 y 3 veces más chicos y menos en cantidad que los dedos de H₂. Este sesgo puede explicar parte de la diferencia entre las energías cinética total calculadas con H₂ y CO requerida para producir la eyección de material que se presenta en Orion BN/KL, G5.89 y DR21. Sin embargo, otra posibilidad para explicar esta diferencia está en la disyuntiva que sigue latente en el estudio de este tipo de objetos, y es el hecho que los dedos de CO pueden o no son parte de los dedos de H₂ y/o viceversa. Si los dedos de CO y H₂ no son parte uno de otro la diferencia de energía puede ser explicada por la diferencia de abundancia, estándar, en el medio interestelar de CO y H₂, en donde la abundancia de CO es aproximadamente 5000 veces menor que la de H₂.

Cabe considerar que las observaciones interferométricas recientes son capaces de

encontrar mas objetos explosivos de forma que pueden encontrarse mas restricciones a su origen. Mientras tanto, como trabajo a futuro, podemos considerar el expandir este estudio a una muestra mayor de dedos en cada objeto para realizar un análisis mas preciso o complementar los datos con un análisis estadístico de completez. Por otro lado, se pueden considerar factores como la densidad del medio, la cual en este trabajo fue considerada con una primera aproximación, pero se debería abordar de forma particular a cada uno de los objetos. Así mismo, se está trabajando en realizar simulaciones de n cuerpos con las cuales podremos comparar los resultados y buscar un ángulo de proyección para todo el objeto, con esta información se plantea la posibilidad de desarrollar un modelo tres dimensional de la región BN/KL.

A Apéndice de herramientas numéricas

En esta sección agregamos una explicación sobre las herramientas numéricas que hemos utilizado. Hemos agregado los códigos utilizados para que puedan ser revisados, y en su caso, duplicados en el futuro, por los lectores de este manuscrito.

A.1. ANGLES.F90

Este programa se realizó para aproximar los ángulos de proyección de cada dedo usando la velocidad proyectada y la distancia al objeto.

Listing A.1: Angles

```
1 program angles
2 implicit none
3 integer i,N
4 real*8 dpa(100),dp(100),vr(100),t,dr(100),a(100),c,q,d,v(100),b,bmax
5 open(1,file="Fig2Zap2020.txt",status="old")
6 open(2,file="g589t25.dat",status="replace")
7 bmax=0
8 c=24*365*3600
9 t=(2500)*c
10 N=12
11 d=3000
12 do i=1,N
13 read(1,*) dpa(i),vr(i)
14 dp(i)=dpa(i)*d
15 dp(i)=dp(i)*1.5*(10**8)
16 dr(i)=t*vr(i)
17 q=dp(i)/dr(i)
18 ! if(q.gt.1)q=1
19 ! write(*,*)i,q
20 a(i)=atan(q)
21 ! if(a(i).lt.0.52)a(i)=0
22 ! if(a(i).gt.1.22)a(i)=0
23 v(i)=vr(i)/cos(a(i))
24 b=v(i)
25 if(b.gt.bmax) bmax=b
26 write(2,*)dr(i),a(i),v(i)
27 end do
28 write(*,*) bmax
29 end
```

A.2. INTTTES.F90

En este programa se resolvieron las ecuaciones del modelo del plasmon presentadas en el marco teórico, a través de un método de integración de sumas ríman.

Listing A.2: intttes.f90

```

33 program intttes
34
35 !calcula integrales
36
37 integer n,i,j, v0i
38 real*8 h,x,ft,tinteg,t0,u,f6, rinteg
39 real v,v0,a,t,r, ep, rcl
40 open(1,file="intttes1.dat",status="replace")
41 open(2,file="inttttestc.dat",status="replace")
42 n=100000
43 ep=30
44 v0=200.
45 rcl=100.
46 a=1
47 t0=233*(a**2/v0)*rcl
48 do j=1,201
49 v=(j-1)*v0/200.
50 x=v/v0
51 h=(1-x)/(1.*n)
52 tinteg=0
53 rinteg=0
54
55 do i=1,n
56 u=i*h+x
57
58 ft=u**(-2./3.)*exp(-(a/3.)*(1-u))
59
60 fr=u**(1./3.)*exp(-(a/3.)*(1-u))
61 tinteg=tinteg+(ft*h)
62 rinteg=rinteg+(fr*h)
63 end do
64
65 t=t0*tinteg !ver ecuacion (\ref{eq:fulltau})
66 r=v0*t0*rinteg*31536000 !ver ecuacion (\ref{eq:r})
67 if(t.le.500+ep)then
68 if(t.ge.500-ep) write(2,*) a,v,t,r
69 end if
70 !write(*,*)"t=",t
71 !write(*,*)"r=",r
72 write(1,*)v,t,r
73 end do
74 end

```

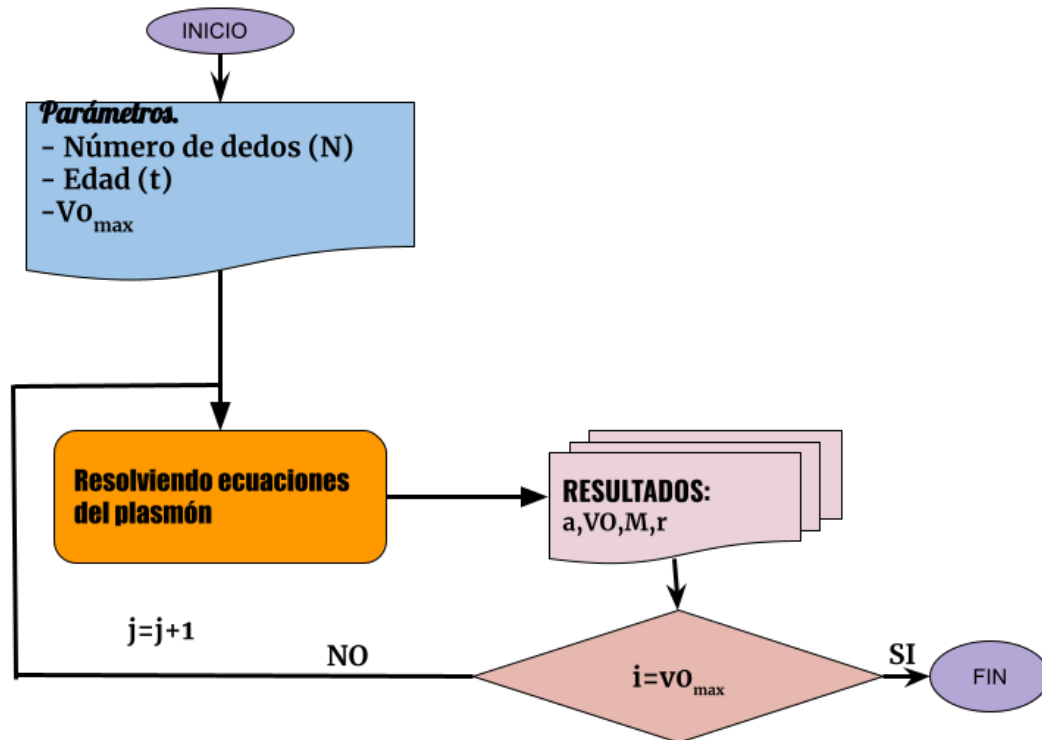


Figura A.1: Diagrama de flujo del programa INTTTES.F90.

A.3. INTTTESM.F90

En este programa se invirtió el modelo a manera de que se pudieran encontrar las condiciones iniciales para encontrar los resultados observados en los objetos de la siguiente manera, estableciendo un parámetro de edad el programa corre las ecuaciones del modelo para un conjunto de velocidades iniciales y un conjunto de alfas, comparando en cada paso los resultados con las observaciones y escribiendo en un archivo aparte los valores de velocidad inicial y alfa para los cuales se parecen los valores a las observaciones.

Listing A.3: intttesm.f90

```

76 program integex
77
78 !calcula las condiciones iniciales de los flujos.
79
80 integer n,i,j, v0i,nv, v0max, k, q,f
81 real*8 h,x,ft,tinteg,t0,u,f6,rinteg,uf,vf,not
82 real v,v0,t,r,ep,rcl,a,epr,ran(100),van(100),d
83 open(1,file="inttttestlav0Bt05.dat",status="replace")
84 open(2,file="inttttestcav0Bt05.dat",status="replace")
85 open(3,file="inttttestcav0rBt05.dat",status="replace")
86 open(4,file="inttttestcav0cBt05.dat",status="replace")
87 open(5,file="BNKLT05.dat",status="old")
88 n=10000
89 f=26
90 ep=3
91 d=385
92 epr=0.5E16
93
94 v0max=1000
95 !nv=((200.*vf)/v0)+1
96 rcl=100.
97 do q=1,f

```

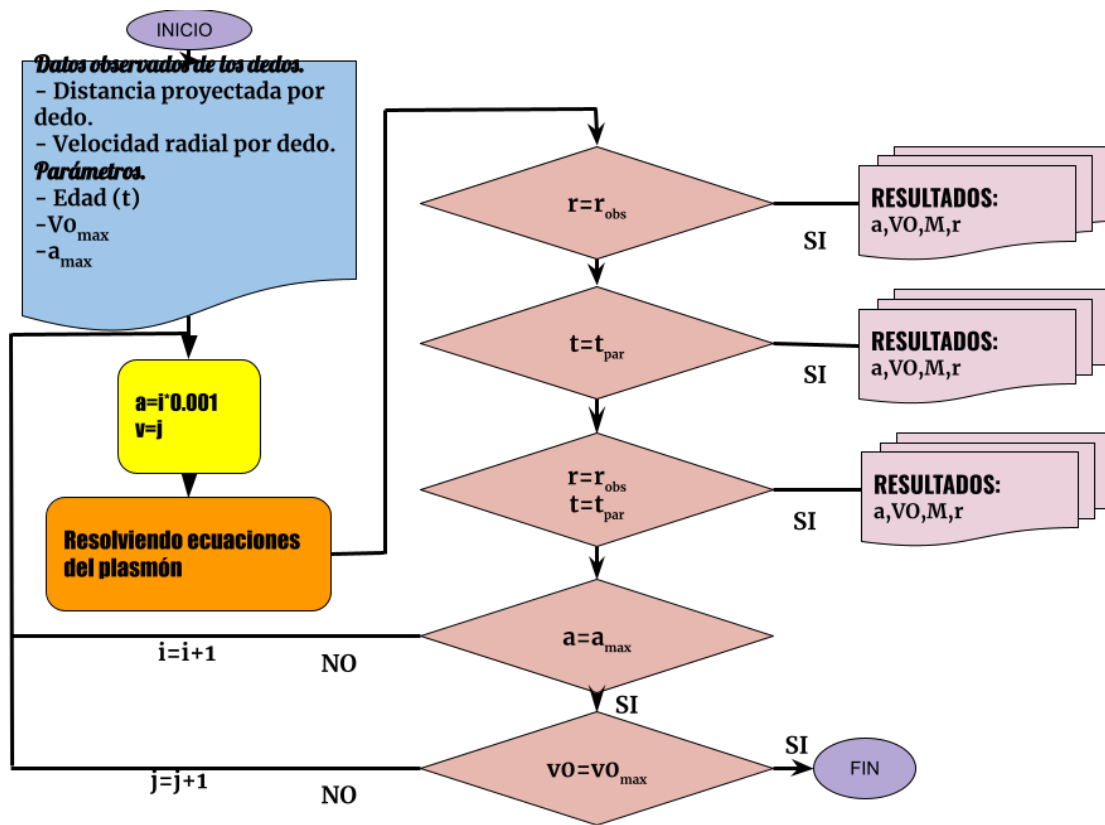



Figura A.2: Diagrama de flujo del programa intesm.f90.

Índice de figuras

1.1. Esquema de la formación estelar (André, 2002).	2
1.2. Esquema de un flujo bipolar molecular.	3
1.3. Imágenes del complejo molecular de Orión	4
1.4. Dedos en Orión BN/KL	6
2.1. Diagrama de evolución del plasmón en el caso de masa constante. . .	13
2.2. Diagrama de plasmón con pérdida de masa.	15
2.3. Tamaño final de un dedo como función del parámetro de evaporación, α .	18
2.4. Tiempo de vida de un dedo como función de parámetro de evaporación, α	19
2.5. Radio final de un dedo como función de la velocidad inicial, V_0	20
2.6. Tiempo de vida de un dedo como función de la velocidad inicial, V_0 . .	21
3.1. Mapa de CO de OMC1 (Bally et al., 2017)	25

3.2. Diagrama posición (proyectada)-velocidad radial de las estructuras tipo jet observado en Orion BN/KL en la línea de CO(2-1)	27
3.3. Identificación de los dedos de Orion BN/KL.	29
3.4. Mapa de velocidades de filamentos explosivos en G5.89-0.39, observados con ALMA en la línea de CO (2-1)	32
3.5. Diagrama posición-velocidad radial de las estructuras en G5.89-0.39 en la línea de CO(2-1)	33
3.6. Velocidad contra posición de los dedos de la muestra de estudio seleccionada de la región G5.89.	35
3.7. Filamentos de CO, observados con SMA, en DR21 sobrepuestos en una imagen infrarroja, observada por Spitzer, y una imagen, en contornos del VLA, de una emisión de 6 cm.	38
3.8. Diagrama de posición-velocidad radial de los filamentos de la región DR21.	39
3.9. Posición contra velocidad de los dedos de la muestra de DR21.	41
3.10. Ángulo de proyección contra velocidad para los dedos de BN/KL, G5.89 y DR21, a $t=500$ yr	44
3.11. Ángulo de proyección contra velocidad para los dedos de BN/KL, G5.89 y DR21, a $t=1000$ yr	45
3.12. Ángulo de proyección contra velocidad para los dedos de BN/KL, G5.89 y DR21, a $t=1500$ yr	46
3.13. Ángulo de proyección contra velocidad para los dedos de BN/KL, G5.89 y DR21, a $t=500$ yr	47
4.1. V_0 contra α , para el dedo BNKLF4	51

4.2. Histograma de masa para la muestra de dedos de CO de la región BN/KL	53
4.3. Histograma de velocidad inicial para la muestra de dedos de CO de la región BN/KL	54
4.4. V_0 contra α para el dedo G5.89F2	57
4.5. Histograma de masa para la muestra de dedos de CO de la región G5.89.	59
4.6. Histograma de velocidad inicial para la muestra de dedos de CO de la región G5.89	60
4.7. V_0 contra α , para el dedo DR21F5	62
4.8. Histograma de masa para la muestra de dedos de CO de la región DR21	64
4.9. Histograma de velocidad inicial para la muestra de dedos de CO de la región DR21	65
A.1. Diagrama de flujo del programa INTTTES.F90.	73
A.2. Diagrama de flujo del programa intesm.f90.	75

Índice de tablas

1.1. Datos generales de Orión BN/KL, G5.89 y DR21	8
3.1. Datos de posición y velocidad de los grumos de CO, en Orion BN/KL, reportados por Zapata et al., (2009).	28
3.2. Tamaño, ángulo de proyección y velocidad, calculada para los dedos de BN/KL	30
3.3. Datos de posición y velocidad de los grumos de CO de G5.89 reportados por Zapata et al., (2020).	34
3.4. Tamaño, ángulo de proyección y velocidad, calculada para los dedos de G5.89	36
3.5. Datos de posición y velocidad de los grumos de CO de DR21 reportados por Zapata et al., (2013).	40
3.6. Tamaño, ángulo de proyección y velocidad, calculada para los dedos de DR21	42
4.1. Tabla de condiciones iniciales para cada dedo de la muestra de la región BN/KL	52
4.2. Tabla de condiciones iniciales para cada dedo de CO de la muestra de la región G5.89	58

4.3. Tabla de condiciones iniciales para cada dedo de C0 de la muestra de la región DR21	63
5.1. Tabla de condiciones iniciales encontradas con el modelo del plasmón para los tres objetos estudiados.	68

Bibliografía

- Allen, D. A., & Burton, M. G. 1993, *Nature*, 363, 54
- André, P. 2002, *EAS Publications Series*, 3, 1.
- Bally, J., Cunningham, N. J., Moeckel, N., Burton, M. G., Smith, N., Frank, A. & Nordlund, A., 2011, *ApJ*, 727, 113.
- Bally, J., 2016, *ARA&A*, 491, 54
- Bally, J., Ginsburg, A., Silvia, D. & Youngblood, A., 2015, *A&A*, 579, 130.
- Bally, J., Ginsburg, A., Arce, H., et al., 2017, *ApJ*, 837, 60.
- Bally, J., Ginsburg, A., Forbrich, J., et al. 2020, , 889, 178.
- Bañó Esplugues, G. 2014, PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España
- Johnstone, D., Boonman, A. M. S., & van Dishoeck, E. F. 2003, , 412, 157. doi:10.1051/0004-6361:20031370
- Becklin, E. E., & Neugebauer, G. 1967, *ApJ*, 147, 799
- Beuther, H., & Nissen, H. D. 2008, *ApJ*, 679, L121
- Canto, J., Espresate, J., Raga, A. C. & D'Alessio, P., 1998, *MNRAS*, 296, 1041.
- Cunningham, N., 2006, "Extended shocks within one kiloparsec: Instrumentation and observations", *PhD*, 80p.
- De Young D. S., Axford W. I., 1967, *Nat*, 216, 129.
- Dempsey, R., Zakamska, N. L., & Owen, J. E. 2020, *MNRAS*, 495, 1172.
- Doeleman, S. S., Lonsdale, C. J., Phillips, R. B., Barvainis, R. E., & Greenhill, L. J. 1998, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 30, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 1362

- Dyson, J. E. & Williams, D. A. 1997, *The physics of the interstellar medium*. Edition: 2nd ed. Publisher: Bristol: Institute of Physics Publishing, 1997. Edited by J. E. Dyson and D. A. Williams. Series: The graduate series in astronomy.
- Haro, G. 1951, *PASP*, 63, 144.
- Herbig, G. H. 1951, *ApJ*, 113, 697.
- Kleinmann, D. E., & Low, F. J. 1967, *ApJl*, 149, L1
- Maddalena, R. J. 1986, Ph.D. Thesis, Columbia University
- Motte, F., Bontemps, S., & Louvet, F. 2018, *ARAA*, 56, 41. doi:10.1146/annurev-astro-091916-055235
- Raga, A., Cabrit, S., Cantó, J. 1995, *MNRAS*, 273, 422.
- Raga, A. C. and Reipurth, B., 2004, *RMxAA*, 15, 40
- Raga, A. C., Cantó, J., Castellanos-Ramírez, A., et al., 2021, *RMAxA* 57, 233.
- Rivera-Ortiz, P., Rodríguez-González, A., Hernández-Martínez, L. & Cantó, J., 2019, *ApJ*, 874, 38.
- Rivera-Ortiz, P. R., Rodríguez-González, A., Hernández-Martínez, L., et al. 2019, , 885, 104.
- Rodríguez, L. F., Poveda, A., Lizano, S. & Allen, C., 2005, *ApJ*, 627, 65.
- Rodríguez, L. F., , Dzib, S.A., Laurent, L., Zapata, L., Gómez, L., Menten, K.M. & Lizano, S., 2017, *ApJ*, 834, 140
- Salas, L., Rosado, M., Cruz-González, I., et al. 1999, , 511, 822.
- Schwartz, P. R., Cheung, A. C., Bologna, J. M., et al. 1977, *ApJ*, 218, 671.
- Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. 1987, *ARAA*, 25, 23.
- Stone, J. M. & Edelman, M. 1995, *ApJ*, 454, 182. doi:10.1086/176476
- Snell, R. L., Scoville, N. Z., Sanders, D. B., & Erickson, N. R. 1984, *ApJ*, 284, 176
- Snell, R. L., Loren, R. B., & Plambeck, R. L. 1980, *ApJl*, 239, L17.
- Zapata, L. A., Schmid-Burgk, J., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F. & Menten, K. M., 2009, *ApJ*, 704, 45.
- Zapata, L. A., Schmid-Burgk, J., & Menten, K. M., 2011, *A&A*, 529, A24
- Zapata, L. A., Schmid-Burgk, J., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F. & Menten, K. M., 2009, *ApJ*, 704, 45.

Zapata, L. A., Schmid-Burgk, J., Muders, D., et al. 2010, *A&A*, 510, A2.

Zapata, L. A., Schmid-Burgk, J., Pérez-Goytia, N., et al. 2013, *ApJl*, 765, L29.

Zapata, L. A., Ho, P. T. P., Fernández-López, M., et al. 2020, *ApJl*, 902, L47

Zinnecker, H. & Yorke, H. W. 2007, *ARAA*, 45, 481.

