



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

EVOLUCIÓN DEL MOMENTO ANGULAR ESPECÍFICO
DURANTE EL COLAPSO Y FRAGMENTACIÓN DE
NUBES MOLECULARES

P R O Y E C T O
D O C T O R A L

PRESENTA

GRISelda ARROYO CHÁVEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. ENRIQUE CRISTIÁN VÁZQUEZ SEMADENI,
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO. ABRIL 2021

1. Introducción

Las nubes moleculares son regiones frías y densas en el medio interestelar de las galaxias, en las que ocurre la formación de estrellas. Determinando el estado y procesos físicos a las que están sujetas, es posible dar una explicación a las características particulares del proceso de la formación estelar, tales como su rapidez (o tasa, en adelante TFE) y su eficiencia (EFE, la fracción de la masa del gas que se alcanza a convertir en estrellas).

Algunas características relevantes de las nubes moleculares es que son estructuras jerárquicas, y poseen un amplio rango de tamaños, densidades y masas, partiendo de las nubes moleculares gigantes con tamaños de decenas de pársecs, masas del orden de $10^4 - 10^6 M_{\odot}$, densidades de algunos cientos de partículas por cm^3 y dispersiones de velocidad supersónicas, de algunos km s^{-1} , hasta núcleos densos con tamaños de fracciones de pársecs, masas $\sim 1 M_{\odot}$, densidades mayores a 10^4 cm^{-3} y dispersiones de velocidad subsónicas, $\lesssim 0.2 \text{ km s}^{-1}$ (ver p. ej. Mac Low and Klessen, 2004). Además, como su nombre lo indica, están compuestas principalmente de hidrógeno en estado molecular (H_2) (Ferrière, 2001), formado en regiones suficientemente densas para ser ópticamente gruesas a la radiación ultravioleta fotodisociante. Sin embargo, debido a que el H_2 no se excita en las condiciones de las nubes moleculares, para estudiarlas usualmente se recurre a otras moléculas trazadoras del gas denso, como lo son el CO (y sus isótopos), H^{13}CO^+ , NH_3 , N_2H^+ , entre otras.

El interés particular sobre las nubes moleculares reside en el proceso de formación estelar, para el que se han propuesto diferentes teorías. Aunque las dispersiones de velocidad supersónicas de las nubes moleculares fueron inicialmente interpretadas como contracción gravitacional (Goldreich and Kwan, 1974), esta interpretación fue pronto desechada sobre los argumentos de que en ese caso, la TFE debería ser mucho mayor a la observada (Zuckerman and Palmer, 1974), de modo que la interpretación predominante actualmente es el llamado modelo gravoturbulento (ver p. ej. Mac Low and Klessen, 2004), en el que dicha dispersión de velocidad constituye turbulencia supersónica, cuya presión balancea la autogravedad de las nubes y las mantiene en equilibrio hidrostático. Sin embargo, el enfoque adoptado en este proyecto cuestiona los principios del modelo gravoturbulento, resaltando el dominio de la fuerza gravitacional, y proponiendo un estado de contracción gravitacional que inicia a gran escala y tiene carácter jerárquico (Vázquez-Semadeni et al., 2019). En el modelo de colapso jerárquico global (GHC, por sus siglas en inglés) supone la conformación de una cascada de masa y energía de escalas grandes a pequeñas, impulsada por la misma autogravedad de la nube. Los flujos de material a gran escala se dirigen hacia los mínimos de potencial también a gran escala — que usualmente tienen forma de filamentos, ya que el colapso de estructuras no esféricamente simétricas procede primeramente en una dirección preferencial, formando sábanas, y posteriormente formando filamentos (Lin et al., 1965)—, mientras los flujos de pequeña escala (dentro de los filamentos) se dirigen a los mínimos de potencial locales, lo que pone en evidencia el carácter jerárquico del proceso de fragmentación. A medida que el colapso global incrementa la densidad promedio de la nube, la masa de Jeans disminuye, permitiendo que fluctuaciones de densidad turbulentas cada vez de menor masa se vuelvan gravitacionalmente inestables, e inicien su propio proceso de colapso.

Cabe mencionar que las nubes moleculares también pueden ser caracterizadas por las relaciones de escalamiento que presentan, como lo son las relaciones dispersión de velocidades-tamaño y densidad promedio-tamaño de Larson (1981), o su generalización, que toma en cuenta la no constancia de la densidad columnar de las nubes (Heyer et al., 2009; Ballesteros-Paredes et al., 2011).

2. Presentación del problema

Sin embargo, una característica de las nubes moleculares sobre la que es necesario profundizar bajo el modelo GHC, es el momento angular. Desde los años 70s, se han observado gradientes de velocidad en nubes moleculares gigantes, mismos que se han interpretado como evidencia de rotación en las nubes (Belloche, 2013). Estudiar la evolución del momento angular a medida que la nube se contrae, permitirá conocer el mecanismo por el que éste se transporta y redistribuye dentro de la nube, de tal forma que se recuperen los valores del momento angular observados en los núcleos densos de las nubes y los objetos protoestelares y sus discos.

Tras la detección de gradientes de velocidad en nubes moleculares, Fleck and Clark (1981) y Goldsmith and Arquilla (1985) midieron la velocidad angular (Ω) en sus muestras de nubes, encontrando que el momento angular específico o momento angular (J) por unidad de masa, $j = J/M$, decrecía con el radio como $\sim R^{1.4}$, i.e. $\Omega \propto R^{-1.6}$. Estos trabajos serían evidencia de lo que ahora conocemos como "Problema del momento angular"(AMP, por sus siglas en inglés), que previamente había sido descrito por Spitzer (1978) y después retomado por Bodenheimer (1995). El AMP es entendido como la aparente pérdida de momento angular específico a medida que las nubes se contraen, de manera tal que la discrepancia entre el momento angular específico de un núcleo denso ($10^{21} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$) y una estrella T-Tauri ($5 \times 10^{17} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$) es de alrededor de cuatro órdenes de magnitud (Catalano and Stauffer, 1991). De las observaciones se acepta que el momento angular específico escala con el radio como $j \sim R^{1.5}$ (Goodman et al., 1993) (ver figura 1). Goodman et al. (1993) propusieron que el origen de este escalamiento puede deberse a la relación dispersión de velocidades-tamaño de las nubes, si el valor del cociente de energía rotacional a gravitacional (β) se mantiene aproximadamente constante (ver p. ej. Xu et al., 2020).

Fleck and Clark (1981) interpretaron la relación $j - R$ como el resultado de las propiedades turbulentas del medio interestelar, donde una cascada turbulenta desde escalas grandes era mantenida por los movimientos de cizalla originados por la rotación diferencial de la Galaxia. Por su parte, Goldsmith and Arquilla (1985) propusieron que esta relación era evidencia de la redistribución del momento angular en los movimientos orbitales de los fragmentos durante la contracción y fragmentación de las nubes. Así mismo, algunos de los modelos de formación estelar han propuesto una solución para el AMP, como lo es el frenado magnético en el modelo de soporte magnético (ver, p. ejm., el resumen de Bodenheimer, 1995), o torcas gravitacionales en el modelo de soporte turbulento (Jappsen and Klessen, 2004).

En años más recientes, el estudio de momento angular en nubes moleculares se ha centrado en escalas desde núcleos densos hasta discos de acreción. Trabajos como los de Pineda et al. (2019) y Gaudel et al. (2020) sobre fuentes que contienen objetos estelares jóvenes, muestran en conjunto que el perfil radial de momento angular específico en escalas de $\sim 10^2 - 10^4$ AU tienen dos aparentes regimenes distintos de comportamiento: uno en el que el momento angular específico disminuye con el radio como $j \propto R^{-1.6}$ hasta escalas de ~ 1600 AU, y otro en el que j tiende a ser constante hasta escalas de ~ 50 AU.

Recientemente, en la tesis de maestría Arroyo-Chávez (2020, en lo sucesivo, A20) se investigó la evolución del momento angular específico en muestras de unos cuantos grumos dentro de una nube molecular en una simulación numérica SPH de la formación y evolución de nubes dentro del medio neutro difuso. Para entender el mecanismo que produce la aparente pérdida de momento angular observada en regiones de tamaños progresivamente menores, se definieron grumos a un cierto tiempo t_0 como conjuntos conexos de partículas y se siguió su evolución tanto hacia el pasado ($t < t_0$) como hacia el futuro ($t > t_0$), realizando el seguimiento ya como conjuntos lagrangianos de partículas SPH (es decir, siempre el mismo conjunto de partículas), o de nuevo como conjuntos conexos de partículas por encima de un cierto umbral de modo que las partículas

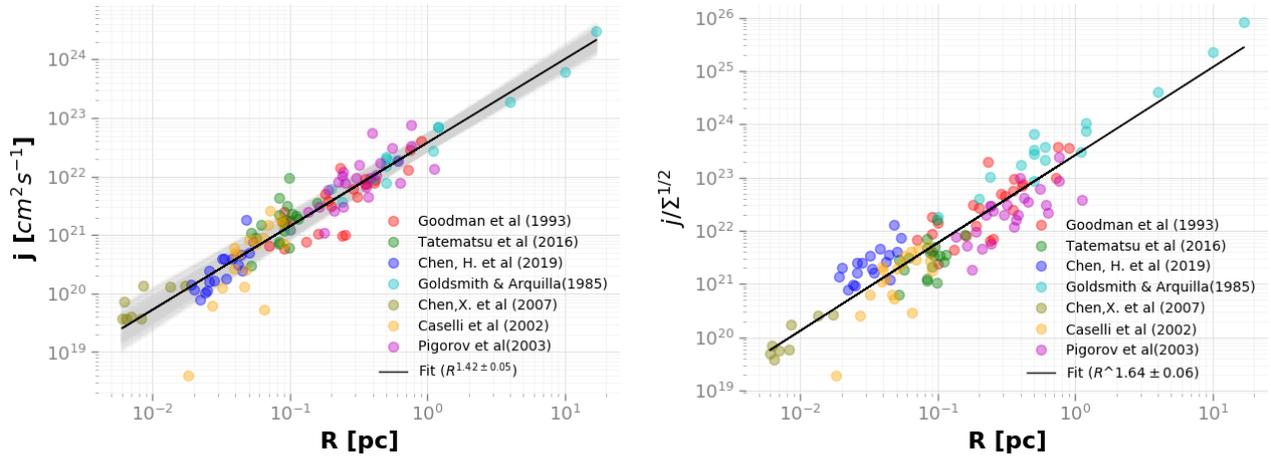


Figura 1: Izquierda: relación $j - R$ para la muestra observacional completa. Derecha: relación $j/\Sigma^{1/2} - R$ para la misma muestra. (Arroyo-Chávez & Vázquez-Semadeni 2021 in prep).

constituyentes del grupo pueden cambiar con el tiempo.

De este análisis se encontró que la evolución de j para grupos definidos como conjuntos lagrangianos de partículas y seguidos hacia el pasado presenta dos periodos: uno temprano, en el que los grupos evolucionan a lo largo de la pendiente observada en el diagrama $j-R$, y otro tardío, en el que evolucionan a $j \sim \text{cte}$. Por otro lado, en seguimientos hacia el futuro se encontró que, pese a las altas densidades que poseen algunos grupos, se puede ver que no toda la estructura permanece ligada. Algunas regiones particulares del grupo colapsan y forman *sinks* (partículas estelares) mientras que otras se dispersan. El resultado anterior sugiere que la relación $j-R$ observada no es más que el resultado de que grupos y núcleos de mayor densidad y menor tamaño presentan menores valores de j porque son precisamente aquellos que, por haber perdido momento angular intercambiándolo con su entorno, pueden caer más profundo en el pozo de potencial de la estructura, haciéndose más densos. Además, suponiendo que la fragmentación y posterior colapso deben ser tales que en todo momento β se mantenga aproximadamente constante, de acuerdo con el esquema de GHC, en el que la energía gravitacional es la fuente de las demás energías (cinética turbulenta, de rotación y magnética), fue posible extender la relación clásica entre j y R , sustituyéndola por la predicción de que $j \propto \Sigma^{1/2} R^{3/2}$ (ver panel derecho de la Fig. 1).

A raíz de los resultados anteriores, surgen también nuevas preguntas qué responder, tanto para complementar el trabajo realizado hasta ahora como para verificar la aplicabilidad de estos mismos resultados en nuevos casos. Los principales puntos a tratar se enlistan a continuación.

- *Verificación estadística de los resultados puntuales de A20.* El análisis presentado en A20 consistió esencialmente en un caso de estudio de unos cuantos grupos seleccionados al azar en la simulación, solamente satisfaciendo ciertos criterios de realismo. Sin embargo, es necesario determinar si el comportamiento observado en esos casos particulares es representativo de la mayoría de los grupos en la simulación, por lo que se construirá una muestra estadísticamente significativa de grupos para poblar los diagramas de j vs R (o j/Σ vs R), reduciendo la dispersión, así como verificar la universalidad del mecanismo evolutivo observado.
- *Caso magnético.* Debido a que el frenado magnético aún es considerado como una de las resoluciones más probables del AMP, es necesario abordar el caso magnético y corroborar

si tanto el régimen de pérdida de momento angular específico como el de evolución a $j \sim$ cte. se mantienen.

- *Importancia relativa de la autogravedad en la generación del escalamiento de la relación j - R .* La explicación propuesta por A20 al AMP es que todas las escalas de tamaño en las nubes moleculares están dominadas por su autogravedad, de la cual se alimentan sus energías turbulenta y rotacional, pero el intercambio de momento angular por torcas hidrodinámicas entre parcelas de gas contiguas permite que las que lo pierden se contraigan gravitacionalmente. De esta manera, la fragmentación está controlada por la autogravedad. Se propone realizar un estudio de la relación $j - \Sigma - R$ para casos en los que la gravedad tome una importancia relativa diferente en la evolución de las nubes y fragmentos, a fin de determinar su impacto en la recuperación de esta relación. Se espera que en los casos en los que la gravedad no domine, no se recuperará la relación $j - R$ o $j - \Sigma - R$ típicas.
- *Comparación con observaciones.* Uno de los principales resultados de A20 es la propuesta de generalización de la relación $j \propto R^{-1/2}$ a una nueva relación de la forma $j \propto (\Sigma R)^{1/2}$. Es por lo tanto necesario ahora verificar esta relación en datos observacionales. Para esto se debe considerar que, ya que ahora entra en juego la densidad columnar, se necesitan muestras observacionales con un amplio rango dinámico en Σ , con el fin de determinar la importancia de este nuevo factor con respecto a la relación $j - R$ típica.
- *Cota a la eficiencia de formación estelar.* Retomando uno de los resultados mencionados anteriormente, se tiene que los grumos, aún siendo definidos con umbrales de densidad elevados, no colapsan monolíticamente, sino que una parte de ellos colapsa y se vuelve más densa, mientras que la otra parte se dispersa y baja su densidad. Esto, sumado a la hipótesis de que en todo momento hay una equipartición entre las energía rotacional y gravitacional, sugiere la posibilidad de establecer una cota superior a la eficiencia de formación estelar, en la que tanto el intercambio de masa como de momento angular con los alrededores determinen el porcentaje de masa de un fragmento que es posible depositar en estrellas.

3. Objetivos

Una vez que se han planteado las problemáticas por resolver tras el estudio llevado a cabo en A20, las metas a alcanzar para la continuación de este proyecto durante el doctorado son:

1. Realizar un estudio similar al de A20 con muestras de grumos estadísticamente significativas para establecer la relación $j - \Sigma - R$ con suficiente precisión, así como para corroborar la tendencia general de las nubes y grumos a fragmentarse siguiendo la redistribución de momento angular en su interior.
2. Generar un modelo analítico para la estimación de la cota superior a la eficiencia de formación estelar suponiendo que todas las estructuras están dominadas por gravedad y tienen un cociente de energía rotacional a gravitacional (β) aproximadamente constante.
3. Determinar la relación j - R en simulaciones numéricas SPH sin autogravedad para constreñir el mecanismo de transferencia de momento angular y si en este caso se mantiene la relación observada, así como validar la suposición de la constancia de β en ausencia de autogravedad, a fin de verificar si la energía gravitacional es la fuente de la energía rotacional.

4. Abordar el caso magnético mediante simulaciones numéricas magnetohidrodinámicas de tipo SPH, las cuales permitirán el rastreo de partículas individuales que conforman a los grupos, y trazar la evolución y redistribución del momento angular específico en presencia de campo magnético.
5. Comparar las muestras numéricas de grupos y nubes con muestras observacionales que posean un amplio rango dinámico en densidad columnar, a fin de poner a prueba la generalización propuesta por AV20 a la relación j - R .

4. Metodología

4.1. Aumento del número de casos estudiados para la evolución de los grupos - Nuevos resultados

Una limitación del estudio realizado en la tesis de maestría es que solamente se rastreó un grupo lagrangiano hacia el futuro y el comportamiento observado constituye uno de los resultados principales de la tesis. Por ello es importante seguir al menos unos grupos más para determinar si este comportamiento es característico de los grupos o no. Para este fin se considerarán múltiples salidas de la simulación, escogiendo en cada una aquellos grupos que se encuentran cercanos a la formación de sinks.

A la fecha, la muestra numérica ha sido considerablemente aumentada como sigue:

- Cuatro nuevos conjuntos lagrangianos rastreados hacia el futuro sumados al grupo que se tenía previamente. De igual forma, estos grupos fueron definidos y rastreados a partir de tres tiempos diferentes de la simulación. En cuatro de estos grupos se aprecia el mismo comportamiento: las partículas externas se dispersan y bajan su densidad llevándose momento angular, mientras una región interna colapsa. El quinto representa un ejemplo de un grupo transiente, puesto que, pese a estar definido a una densidad de 10^3 cm^{-3} , no se encuentra ligado gravitacionalmente y se dispersa en los siguientes 2.7 Myr.
- Un nuevo grupo (con oportunidad de incrementar la muestra si el tiempo lo permite) rastreado hacia el futuro por umbral de densidad, sumado al grupo que se tenía previamente. Ambos grupos tienden a incrementar tanto su radio como su momento angular específico, oscilando alrededor de la línea que ajusta a las observaciones en la relación j - R .
- Sumado a esto, también se definió una nueva muestra de 529 grupos nuevos utilizando cuatro tiempos diferentes de la simulación. La muestra previa contenía únicamente 80 grupos definidos a un solo tiempo. Esto permitirá reducir la incertidumbre en la determinación de la pendiente de la muestra en el diagrama j - R .

Esta muestra más completa ya ha sido incluida en el artículo en preparación (Arroyo-Chávez & Vázquez-Semadeni (2021; en lo sucesivo, AV21), que incluye los resultados de A20 aumentados con estos nuevo datos, una base de datos observacionales aumentada y discusión adicional sobre el mecanismo responsable de la constancia de β .

4.2. Cota a la eficiencia de formación estelar - Resultado preliminar

Durante el primer semestre de doctorado, se exploró una forma de calcular analíticamente una cota superior a la eficiencia de formación estelar a partir del requerimiento de que un grupo, para vencer su soporte rotacional y contrarse gravitacionalmente, debe transferir una cierta

cantidad de momento angular a sus parcelas vecinas, y con ello, una fracción de su masa. Para este fin, se retomó la relación obtenida en A20 para la pérdida de momento angular específico como función tanto del radio como de la densidad columnar. Esta expresión tiene la forma

$$j = (2\pi pq\beta G)^{1/2} \Sigma^{1/2} R^{3/2}, \quad (1)$$

donde p y q son factores geométricos, y β , el cociente de energía rotacional a gravitacional, es aproximadamente constante. Ahora bien, la fracción de la masa de una nube que puede colapsar, es aquella que pierde momento angular, de manera que la “eficiencia” del paso de una densidad a otra mayor, definida como la fracción de la masa de un grumo que puede alcanzar esa densidad final, puede quedar determinada por la condición de que la cantidad de momento angular transferida permita al grumo contraído mantener β constante.

Considerando a una nube madre de masa M_p que contiene a su vez un fragmento de masa M_f , las masas que satisfacen la ecuación (1) son respectivamente

$$M_p = \frac{j_p^2}{2pq\beta GR_p}; \quad (2)$$

$$M_f = \frac{j_f^2}{2pq\beta GR_f}. \quad (3)$$

Al dividir las ecuaciones (2) y (3) escribiendo los radios tanto de la nube madre como del fragmento en términos de sus densidades, y definiendo a la eficiencia como $\epsilon = M_f/M_p$, obtenemos

$$\epsilon \equiv \frac{M_{\rho_2}}{M_{\rho_1}} = \left(\frac{j_f}{j_p} \right)^{3/2} \delta^{1/4}, \quad (4)$$

donde $\delta = \rho_f/\rho_p$, es el contraste en densidades entre la nube madre y el fragmento. Este resultado muestra que existe una familia de configuraciones posibles que el fragmento puede adoptar para satisfacer la ecuación (1) (AV21). Cabe resaltar que únicamente ha sido tomando en cuenta el momento angular asociado a la rotación de las estructuras sobre sí mismas, por lo que resta aún considerar al momento angular orbital entre fragmentos y estudiar si en ese caso se obtiene una cota más dura para la eficiencia. Actualmente ya se está trabajando sobre este último punto.

4.3. Determinación del papel de la autogravedad en la propiedad $\beta \approx \text{cte.}$

Tanto observacionalmente como en la simulación numérica de AV21, la propiedad de los grumos de tener $\beta \approx \text{cte.}$ es fundamental para la aparición de la relación j - Σ - R , por lo que es importante determinar el origen de la constancia de β , y si es una manifestación de que la energía gravitacional es la fuente de las demás energías en los grumos. Para investigar esta posibilidad, se realizarán nuevas simulaciones numéricas con el código PHANTOM (Price et al., 2018) análogas a la estudiada en AV21, pero sin auto-gravedad, a fin de determinar si se conservan tanto la propiedad de $\beta \approx \text{cte.}$ como el escalamiento j - Σ - R , o si adoptan formas nuevas en ausencia de auto-gravedad. El código PHANTOM sustituirá al código GADGET-2 en las nuevas simulaciones, pues permitirá pasar de manera natural al caso magnético como se explica en la siguiente sección. A esta fecha, el código PHANTOM se encuentra en proceso de instalación y compilación en dos clusters del IRyA.

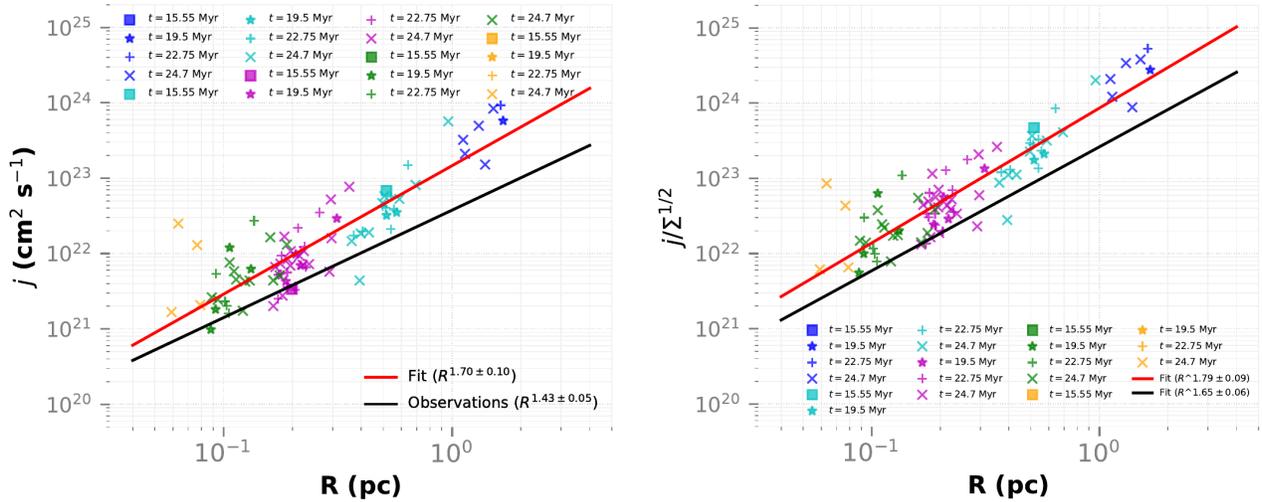


Figura 2: Izquierda: relación j - R para la muestra numérica considerando únicamente aquellos grupos con densidad columnar $> 10^2 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$. Derecha: relación $j/\Sigma^{1/2}$ - R para la misma muestra numérica. La línea roja representa el ajuste a los datos, mientras que la línea negra representa el ajuste a las observaciones del panel izquierdo de la Fig. 1. El código de color corresponden a la densidad umbral utilizada para definir a los grupos: $n_{th} = 10^3$ (azul), 3×10^3 (cian), 10^4 (magenta), 3×10^4 (verde), and 10^5 cm^{-3} (amarillo). Los símbolos representan diferentes tiempos de definición. (AV21)

4.4. Caso magnético

Para mantener la posibilidad de rastrear individualmente a los grupos, es necesario el uso de simulaciones SPH que permitan la incorporación de campo magnético. El código a utilizar para esta parte del proyecto será el código PHANTOM. PHANTOM es un código libre y paralelo de hidrodinámica y magnetohidrodinámica de partículas suavizadas (SPH). Con este código se llevará a cabo un estudio similar al realizado en AV21, realizando un conjunto de simulaciones en las que se varíe la intensidad del campo magnético, y en las que las partículas que componen a cada grupo serán rastreadas tanto al pasado como hacia el futuro para estudiar la evolución del momento angular específico, y posibles variaciones con respecto al caso no magnético.

4.5. Comparación con observaciones - Nuevos resultados

La comparación con las observaciones se hará primeramente con la muestra de Chen et al. (2019a), cuyas propiedades rotacionales fueron estudiadas después en Chen et al. (2019b). La muestra consiste en 18 estructuras densas coherentes que estos autores interpretan como estructuras gravitacionalmente no ligadas y confinadas por presión, a las que nombraron “droplets” (y “candidatos a droplets”) debido a que poseen tamaños y masas pequeñas (una media de ~ 0.04 pc de radio y masas de $\sim 0.4 M_{\odot}$) (aunque Gómez et al. (2021) sugieren que pueden constituir los picos de densidad no auto-gravitantes en proceso de compresión por la caída del material externo a ellos en proceso de colapso.)

Después del análisis de esta muestra, a la fecha se han incorporado datos de otros 6 muestreos observacionales realizados con diferentes trazadores. La muestra completa se presenta en el panel derecho de la Fig. 1:

- Goldsmith and Arquilla (1985)
- Chen et al. (2007)
- Goodman et al. (1993)
- Caselli et al. (2002)

■ Pirogov et al. (2003)

■ Tatematsu et al. (2016)

Tanto la muestra completa, como los datos de cada muestreo por separado, fueron graficados sobre el diagrama j - R . Adicionalmente, se calculó la densidad columnar de cada grumo mediante una aproximación esférica con la relación $\Sigma = M/\pi R^2$, para posteriormente graficarlo sobre el diagrama $j/\Sigma^{1/2}$ - R .

La muestra observacional refleja una menor dispersión sobre los diagramas j - R y $j/\Sigma^{1/2}$ - R (con valores del coeficiente de determinación $\mathcal{R}^2 = 0.90$ y $\mathcal{R}^2 = 0.56$ respectivamente) que la muestra numérica ya ampliada de acuerdo a la sección 4.1 (con valores $\mathcal{R}^2 = 0.33$ y $\mathcal{R}^2 = 0.40$ respectivamente). Sin embargo, esto puede atribuirse a que la muestra numérica contiene grumos de densidades columnares a partir de $10 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$, en los que la turbulencia puede ser predominante, mientras que la muestra observacional comienza a partir de $\sim 100 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$, por lo que se espera que la gravedad sea predominante (Camacho et al., 2016). Al únicamente considerar aquellos grumos con densidades columnares $> 10^2 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ en la muestra numérica, la dispersión de los datos se reduce considerablemente (ver Fig. 2), teniendo un valor del coeficiente de determinación $\mathcal{R}^2 = 0.57$ en la relación j - R , y $\mathcal{R}^2 = 0.65$ en la relación $j/\Sigma^{1/2}$ - R (AV21).

Por otro lado, también se graficó β vs R en ambas muestras: numérica y observacional, y al graficar cada muestra por separado sobre este mismo diagrama, se encuentra que seis de las siete muestras observacionales son consistentes con $\beta \sim \text{cte}$ (AV21).

5. Posible índice de la Tesis

1. Resumen

2. Introducción y antecedentes

2.1 Características rotacionales de las nubes moleculares

2.2. Modelo gravoturbulento y modelo GHC

2.3. Problema del momento angular

3. Descripción general de la metodología

3.1. Generación de muestras numéricas y comparación con muestras observacionales

3.2. Simulaciones numéricas

3.2.1. Caso sin autogravedad

3.2.2. Caso magnético

4. Artículos publicados

4.1. AV21, con el siguiente índice completado hasta el momento:

Introduction

The observed j - R scaling

Numerical data

The simulation

Clump definition

The numerical clump sample

Size estimation

Calculation of the specific angular momentum

Intrinsic specific angular momentum dissipation

Results

Specific angular momentum at fixed times

Specific angular momentum evolution of

Lagrangianly-followed clumps

Specific angular momentum evolution of a clump defined as a connected object above a density threshold

Discussion

Interpreting the results

Testing the AM transfer mechanism

A model for the approximate constancy of β and the dependence of j on R

Testing the dependence of j on Σ

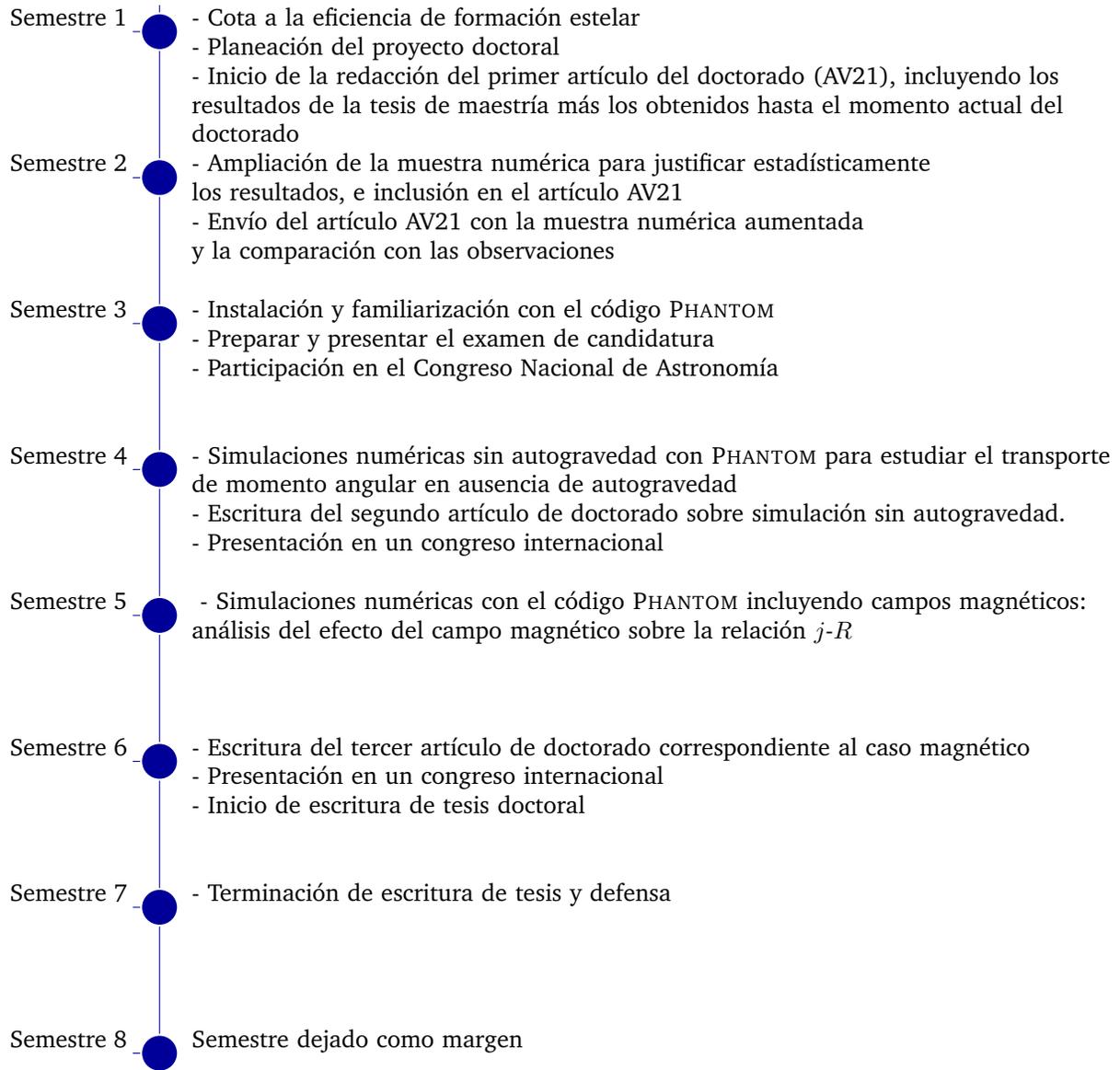
Conclusions

4.2. Caso sin autogravedad.

4.3. Caso magnético.

5. Conclusiones generales

6. Cronograma



A esto se podrían agregar otros congresos o estancias según se considere necesario, y sujeto a los cambios de la situación actual referentes a la pandemia.

Referencias

- Arroyo-Chávez, G. (2020). Evolución del momento angular específico durante el colapso y fragmentación de nubes moleculares. Tesis de maestría, IRyA UNAM.
- Ballesteros-Paredes, J., Hartmann, L. W., Vázquez-Semadeni, E., Heitsch, F., and Zamora-Avilés, M. A. (2011). Gravity or turbulence? Velocity dispersion-size relation. , 411(1):65–70.
- Belloche, A. (2013). Observation of rotation in star forming regions: clouds, cores, disks, and jets. In Hennebelle, P. and Charbonnel, C., editors, *EAS Publications Series*, volume 62 of *EAS Publications Series*, pages 25–66.

- Bodenheimer, P. (1995). Angular Momentum Evolution of Young Stars and Disks. , 33:199–238.
- Camacho, V., Vázquez-Semadeni, E., Ballesteros-Paredes, J., Gómez, G. C., Fall, S. M., and Mata-Chávez, M. D. (2016). Energy Budget of Forming Clumps in Numerical Simulations of Collapsing Clouds. , 833(1):113.
- Caselli, P., Benson, P. J., Myers, P. C., and Tafalla, M. (2002). Dense Cores in Dark Clouds. XIV. N_2H^+ (1-0) Maps of Dense Cloud Cores. , 572(1):238–263.
- Catalano, S. and Stauffer, J. R. (1991). *Angular momentum evolution of young stars / edited by S. Catalano and J.R. Stauffer*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht ; Boston.
- Chen, H. H.-H., Pineda, J. E., Goodman, A. A., Burkert, A., Offner, S. S. R., Friesen, R. K., Myers, P. C., Alves, F., Arce, H. G., Caselli, P., Chacón-Tanarro, A., Chen, M. C.-Y., Di Francesco, J., Ginsburg, A., Keown, J., Kirk, H., Martin, P. G., Matzner, C., Punanova, A., Redaelli, E., Rosolowsky, E., Scibelli, S., Seo, Y., Shirley, Y., Singh, A., and GAS Collaboration (2019a). Droplets. I. Pressure-dominated Coherent Structures in L1688 and B18. , 877(2):93.
- Chen, H. H.-H., Pineda, J. E., Offner, S. S. R., Goodman, A. A., Burkert, A., Friesen, R. K., Rosolowsky, E., Scibelli, S., and Shirley, Y. (2019b). Droplets. II. Internal Velocity Structures and Potential Rotational Motions in Pressure-dominated Coherent Structures. , 886(2):119.
- Chen, X., Launhardt, R., and Henning, T. (2007). OVRO N_2H^+ Observations of Class 0 Protostars: Constraints on the Formation of Binary Stars. , 669(2):1058–1071.
- Ferrière, K. M. (2001). The interstellar environment of our galaxy. *Reviews of Modern Physics*, 73(4):1031–1066.
- Fleck, R. C., J. and Clark, F. O. (1981). A turbulent origin for the rotation of molecular clouds. , 245:898–902.
- Gaudel, M., Maury, A. J., Belloche, A., Maret, S., André, P., Hennebelle, P., Galametz, M., Testi, L., Cabrit, S., Palmeirim, P., Ladjelate, B., Codella, C., and Podio, L. (2020). Angular momentum profiles of Class 0 protostellar envelopes. , 637:A92.
- Goldreich, P. and Kwan, J. (1974). Molecular Clouds. , 189:441–454.
- Goldsmith, P. F. and Arquilla, R. (1985). Rotation in dark clouds. In Black, D. C. and Matthews, M. S., editors, *Protostars and Planets II*, pages 137–149.
- Gómez, G. C., Vázquez-Semadeni, E., and Palau, A. (2021). Density profile evolution during prestellar core collapse: collapse starts at the large scale. , 502(4):4963–4971.
- Goodman, A. A., Benson, P. J., Fuller, G. A., and Myers, P. C. (1993). Dense Cores in Dark Clouds. VIII. Velocity Gradients. , 406:528.
- Heyer, M., Krawczyk, C., Duval, J., and Jackson, J. M. (2009). Re-Examining Larson’s Scaling Relationships in Galactic Molecular Clouds. , 699(2):1092–1103.
- Jappsen, A. K. and Klessen, R. S. (2004). Protostellar angular momentum evolution during gravoturbulent fragmentation. , 423:1–12.
- Larson, R. B. (1981). Turbulence and star formation in molecular clouds. , 194:809–826.
- Lin, C. C., Mestel, L., and Shu, F. H. (1965). The Gravitational Collapse of a Uniform Spheroid. , 142:1431.
- Mac Low, M.-M. and Klessen, R. S. (2004). Control of star formation by supersonic turbulence. *Reviews of Modern Physics*, 76(1):125–194.
- Pineda, J. E., Zhao, B., Schmiedeke, A., Segura-Cox, D. M., Caselli, P., Myers, P. C., Tobin, J. J., and Dunham, M. (2019). The Specific Angular Momentum Radial Profile in Dense Cores: Improved Initial Conditions for Disk Formation. , 882(2):103.
- Pirogov, L., Zinchenko, I., Caselli, P., Johansson, L. E. B., and Myers, P. C. (2003). N_2H^+ (1-0) survey of massive molecular cloud cores. , 405:639–654.
- Price, D. J., Wurster, J., Tricco, T. S., Nixon, C., Toupin, S., Pettitt, A., Chan, C., Mentiplay, D., Laibe, G., Glover, S., Dobbs, C., Nealon, R., Liptai, D., Worpel, H., Bonnerot, C., Dipierro, G., Ballabio, G., Ragusa, E., Federrath, C., Iaconi, R., Reichardt, T., Forgan, D., Hutchison, M., Constantino, T., Ayliffe, B., Hirsh, K., and Lodato, G. (2018). Phantom: A Smoothed Particle Hydrodynamics and Magnetohydrodynamics Code for Astrophysics. , 35:e031.
- Spitzer, L. (1978). *Physical processes in the interstellar medium*.
- Tatematsu, K., Ohashi, S., Sanhueza, P., Nguyen Luong, Q., Umemoto, T., and Mizuno, N. (2016). Angular momentum of the N_2H^+ cores in the Orion A cloud. , 68(2):24.
- Vázquez-Semadeni, E., Palau, A., Ballesteros-Paredes, J., Gómez, G. C., and Zamora-Avilés, M. (2019). Global hierarchical collapse in molecular clouds. Towards a comprehensive scenario. , 490(3):3061–3097.
- Xu, X., Li, D., Dai, Y. S., Goldsmith, P. F., and Fuller, G. A. (2020). Rotation of Two Micron All Sky Survey Clumps in Molecular Clouds. , 898(2):122.
- Zuckerman, B. and Palmer, P. (1974). Radio radiation from interstellar molecules. , 12:279–313.