

Efectos físicos del envolvente sobre el colapso gravitacional de un núcleo de gas



Guillermo Arreaga-García¹, Silvio Oreste-Topa²,
Brenda Pérez-Rendón¹, Lorenzo Olguín-Ruiz¹

¹Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora,
Apdo. Postal 14, 740, C.P. 83,000, Hermosillo, Sonora, México.

²Escuela de Educación Secundaria Agraria N° 1, Av. Ameghino 1,
090, C. P. 8,160, Tornquist, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: garreaga@cifus.uson.mx

(Recibido el 19 de Septiembre de 2013, aceptado el 28 de Febrero de 2014)

Resumen

Las estrellas aparecen en nubes de gas como resultado final del proceso de colapso gravitacional. En este trabajo de divulgación estudiamos el colapso gravitacional de una nube de gas con geometría esférica, tal que la nube está compuesta por un núcleo más denso y un envolvente que lo rodea. Simulamos numéricamente el colapso de cuatro modelos de nube de acuerdo con varias extensiones radiales del envolvente. Definimos las razones entre las energías térmica y rotacional de la nube con respecto su energía potencial gravitacional, denotadas como α y β , respectivamente. Graficamos la evolución temporal de estos parámetros dinámicos α y β para probar que caracterizan muy bien la evolución física del modelo de nube y que los eventos importantes, como la ocurrencia de fragmentación en la nube, dejan una huella en estos parámetros dinámicos.

Palabras clave: Envolvente, colapso, fragmentación.

Abstract

Stars appear in gas cloud as the final result of the gravitational collapse process. In this divulgation paper we study the gravitational collapse of a spherical cloud model, such that it is composed of a denser core plus a surrounding gas envelope. We numerically simulate the collapse of four cloud models according with several radial envelope gas extensions. We define the ratios of the thermal and rotational energies with respect to the potential gravitational energy, denoted as α and β , respectively. We plot the time evolution of these dynamic parameters α and β to probe that they characterize very well the physical evolution of the cloud model and that important events, as the fragmentation occurrence in the cloud, leave an imprint on these dynamical parameters.

Keywords: Envelope, collapse, fragmentation.

PACS: 01.40.E, 02.70.-c, 04.25.dk

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Por observaciones astronómicas se sabe que las estrellas nacen en enormes nubes de hidrógeno molecular. El proceso de formación de estrellas poco masivas se inicia con la tendencia del gas a concentrarse cada vez más en el centro de la nube, proceso que se conoce en física como “colapso gravitacional” [1, 2]. Otro detalle muy interesante es que los astrónomos han observado que las estrellas recién nacidas casi siempre están agrupadas en pares y en menor proporción en grupos de más de dos miembros de estrellas. Entonces, en el seno de estas nubes gigantes puede haber miles de estrellas jóvenes apareadas en pequeños grupos binarios y múltiples [3].

En este trabajo nos interesa describir algunas características dinámicas del proceso de colapso gravitacional, haciendo énfasis en la ocurrencia de

fragmentación de la nube, tal que el resultado sea la formación de un sistema binario de proto-estrellas.

Definimos una proto-estrella como un estado intermedio en el proceso de colapso gravitacional de la nube; entonces las proto-estrellas son una acumulación de gas muy densa y caliente, que emite radiación infrarroja por el efecto de su alta temperatura, pero que aun no genera luz propia mediante las reacciones termonucleares típicas de una estrella. Por esta razón, las proto-estrellas sólo se pueden ver usando telescopios que captan luz en el infrarrojo. Si miramos con telescopio óptico hacia una nube de gas en donde hubiese proto-estrellas en formación, solo veríamos una mancha negra en el cielo.

Se sabe que la característica de agrupación en pares observado en la formación de estrellas también se observa en proto-estrellas. Así, la formación de proto-estrellas es un fenómeno físico complejo, tal que un estudio realizado de la manera tradicional implicaría prácticamente la

imposibilidad de visualizar los detalles del proceso. Es aquí en donde las simulaciones numéricas se vuelven una herramienta muy útil, por no decir indispensable, para estudiar el proceso de colapso gravitacional de la nube y la formación de proto-estrellas en detalle [4, 5].

Dado que estas nubes están a temperaturas muy bajas, se pueden representar como cúmulos de gas. Las ecuaciones que gobiernan la evolución de este gas auto-gravitante son entonces las ecuaciones hidrodinámicas de Navier-Stokes. Hemos supuesto adicionalmente que la nube está rotación ya que en general las mismas están alojadas en los brazos de galaxias espirales.

La técnica numérica que usamos para integrar estas ecuaciones y simular la evolución de estos modelos de nube es conocida como Smooth Particle Hydrodynamics [6]. Está basada en seguir la evolución de miles de partículas para representar la evolución del gas. De hecho, en cada modelo usamos aquí 10 millones de partículas.

II. LOS MODELOS

Conviene empezar la discusión con un diagrama de cuerpo libre de la nube para mostrar las fuerzas relevantes en el proceso de colapso gravitacional, ver Fig.1. En este proceso compiten varias fuerzas, por un lado, la prominente fuerza de la gravedad debido al peso de la nube, por la cual toda la masa de la nube tiende a concentrarse en el centro geométrico. Por otro lado, la temperatura del gas hace que la presión del mismo se oponga a la concentración gravitacional de la nube; del mismo modo, la rotación de la nube hace que la fuerza centrífuga ejerza una fuerza sobre el gas que tiende a oponerse también a la fuerza de gravedad.

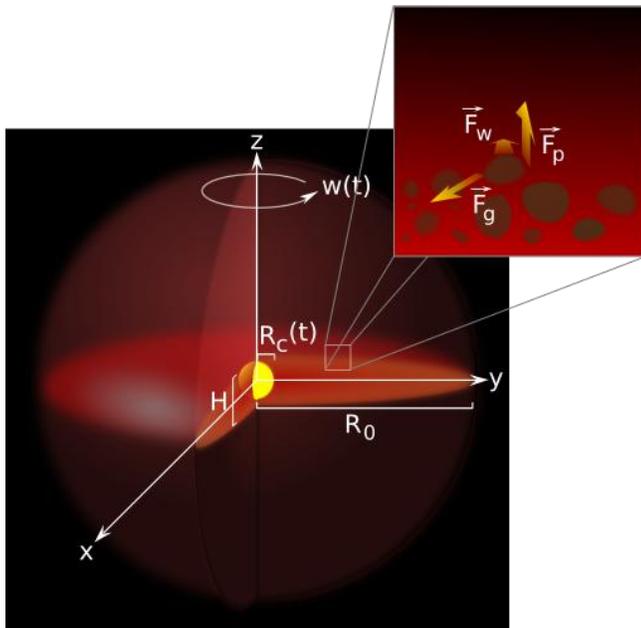


FIGURA 1. Representación esquemática de una nube centralmente condensada y las fuerzas relevantes que actúan.

Nuestro objetivo aquí es estudiar los efectos de la extensión del envoltente sobre el núcleo, cuando toda la nube está en colapso gravitacional. Por lo cual consideramos cuatro modelos de nube etiquetados como A0, A1, A2 y A3, cada uno con diferente extensión radial del envoltente con respecto al radio del núcleo, es decir, $R_0/R_c = 0.5, 1.5, 2.5, 3.7$ respectivamente, en donde R_0 es el radio total de la nube y R_c el radio del núcleo. Ver Fig. 2.

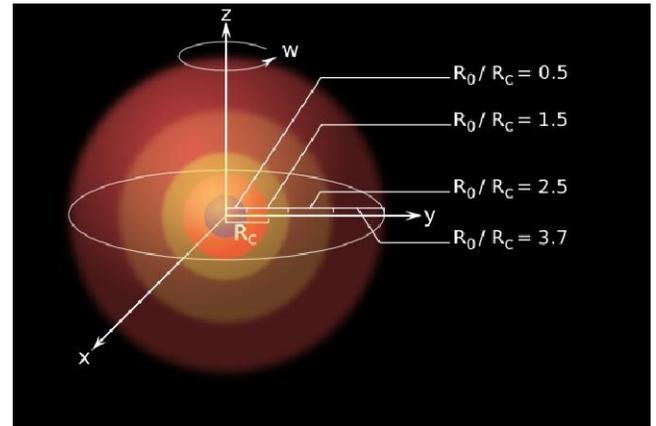


FIGURA 2. Representación esquemática de los modelos indicando la extensión radial del envoltente.

El perfil radial de la densidad para estos 4 modelos se muestra en la Fig. 3. La parte de la curva que se mantiene constante, correspondería al núcleo de la nube, mientras que la parte de la curva que decae correspondería a cada uno de los envoltentes de acuerdo al modelo.

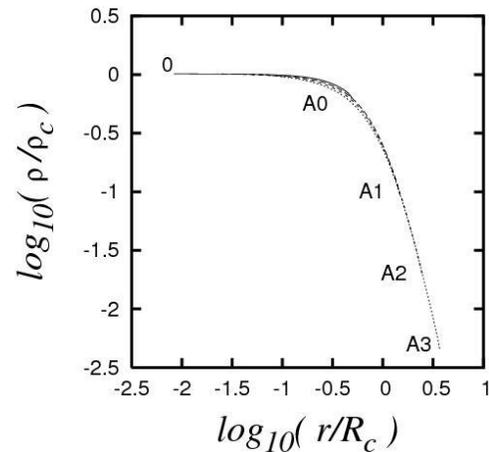


FIGURA 3. Perfil radial de la densidad de la nube. Las letras de cada modelo marcan el final de la curva.

Ahora bien, puesto que la nube se encuentra en la rotación de cuerpo rígido alrededor del eje z, la velocidad inicial de la partícula i está dada por $\vec{v}_i = \vec{\Omega}_0 \times \vec{r}_i = (-\Omega_0 y_i, \Omega_0 x_i, 0)$, en donde Ω_0 es la magnitud de la velocidad angular, que tiene un valor diferente dependiendo del modelo. Otro parámetro

importante en estos modelos es la velocidad del sonido c_0 . Los valores de estos parámetros Ω_0 y c_0 determinan el valor inicial de las razones de energía, las cuales definimos a continuación.

III. LAS ENERGIAS

La energía potencial gravitacional de una nube esférica de masa M y radio R , está dada aproximadamente por

$$E_{grav} \approx -\frac{3}{5} \frac{G M^2}{R}, \quad (1)$$

en donde G es la constante de la gravitación de Newton. Para un gas ideal, el cuadrado de la velocidad del sonido se puede aproximar por la razón entre presión y densidad, esto es,

$$c_0^2 = \frac{P}{\rho}. \quad (2)$$

Además, se puede poner en relación con la temperatura media de la nube mediante

$$c_0^2 = \frac{k T}{\mu}, \quad (3)$$

en donde k es la constante de Boltzmann y μ es el peso molecular del hidrógeno. Así, la energía térmica promedio se puede aproximar mediante

$$E_{term} \approx \frac{3}{2} N k T = \frac{3}{2} M c_0^2. \quad (4)$$

A su vez, la energía de rotación de la nube se puede aproximar mediante

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I \Omega_0^2 \approx \frac{1}{5} M R^2 \Omega_0^2, \quad (5)$$

en donde I es el momento de inercia de la nube.

Las variables dinámicas α y β , con las que esperamos caracterizar la evolución de la nube, se definen entonces como las razones

$$\alpha \equiv \frac{E_{term}}{|E_{grav}|} \text{ y } \beta \equiv \frac{E_{rot}}{|E_{grav}|}. \quad (6)$$

Enfatizamos que todos los modelos de nube tienen inicialmente los mismos valores de las razones α_0 y β_0 . De hecho, en la Tabla I se muestran la velocidad del sonido inicial de c_0 y la velocidad angular inicial Ω_0 tales que cada modelo de nube cumple con los siguientes valores $\alpha_0 = 0.26$ y $\beta_0 = 0.16$. También se muestra el valor de la masa total contenida en la nube y su densidad media, ver asimismo las Figs. 3 y 4.

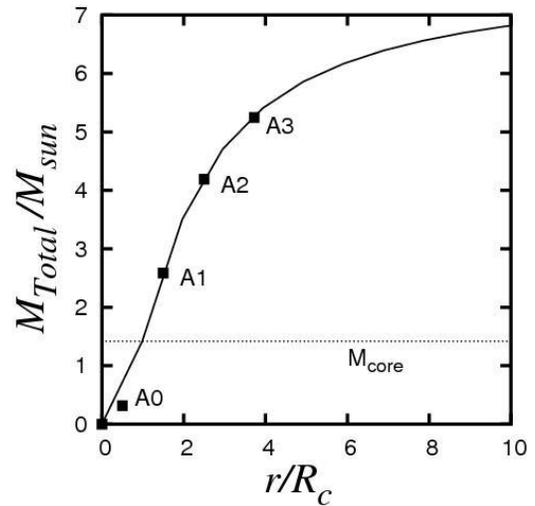


FIGURA 4. Gráfica de la masa acumulada en cada nube. Las letras corresponden a cada modelo.

Enfatizamos que estos valores iniciales α_0 y β_0 se eligieron por dos razones: i) para permitir una comparación de los resultados de los modelos otros autores, ver por ejemplo, [7, 8] y ii) para asegurarnos que la nube entera tiende verdaderamente al colapso gravitacional. Este segundo punto requiere una explicación adicional.

TABLA I. Características de los Modelos.

| Modelos | $\frac{R_0}{R_c}$ | M_0 (gr) | ρ_0 (gr/cm ³) | Ω_0 ($\times 10^{-13}$ rad/seg) | c_0 (cm/seg) |
|---------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|---|----------------|
| A0 | 0.5 | 6.28×10^{32} | 2.23×10^{-18} | 5.80 | 10620.35 |
| A1 | 1.5 | 5.14×10^{33} | 6.95×10^{-19} | 3.90 | 18751.51 |
| A2 | 2.5 | 8.34×10^{33} | 2.43×10^{-19} | 2.95 | 19942.80 |
| A3 | 3.7 | 1.04×10^{34} | 9.22×10^{-20} | 2.22 | 20344.14 |

Existe una relación muy interesante entre las variables dinámicas α y β , la cual mostramos a continuación. Una

medida de la energía cinética total de la nube es la suma de las energías térmica y rotacional. Como hemos dicho, estas

energías se oponen al colapso mientras que la energía potencial lo promueve. Si la nube estuviese en equilibrio termodinámico, entonces la energía potencial gravitacional debería compensar exactamente a la energía cinética total. De acuerdo con el teorema del virial, en este caso de equilibrio tendríamos que se cumple la siguiente relación entre las energías

$$E_{cinetica} = (E_{term} + E_{rot}) = -\frac{E_{pot}}{2}. \quad (7)$$

Ahora bien, si la energía cinética fuese dominante con respecto a la energía potencial, las partículas podrían escapar de la nube por efecto de su rapidez y porque la masa de la nube no sería suficientemente grande para retenerlas enlazadas gravitacionalmente al centro de la nube. Por otro lado, si la energía cinética fuese muy débil comparada con la energía potencial, entonces el colapso gravitacional hacia el centro de la nube sería tan contundente, que no daría tiempo a la nube ni siquiera de fragmentar.

Los enunciados del párrafo anterior se pueden poner en la notación de α y β , tal que para una nube en equilibrio tendríamos que se cumple la relación

$$\alpha + \beta = \frac{1}{2}, \quad (8)$$

y decimos que hay tendencia al colapso si $\alpha + \beta < 1/2$ y no hay tendencia al colapso si $\alpha + \beta > 1/2$. Nuestras condiciones iniciales α_0 y β_0

IV. RESULTADOS

A. La evolución temporal de los modelos

En esta sección vamos a describir la evolución dinámica que se observa en cada modelo, para la cual usamos gráficas de iso-densidad, ver Figs. 5. Estas figuras son mosaicos formados por 4 paneles cada uno; cada panel corresponde a un tiempo de evolución del modelo de nube, tal que el tiempo aumenta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Cada panel muestra –en una misma escala de colores para cada mosaico– la distribución de densidad de la nube tal como se ve desde el eje de rotación (vista superior). Por ejemplo, de acuerdo con la barra de escala de densidad (que aparece en la parte inferior de cada mosaico) el color amarillo indica regiones de la nube con densidades altas; los colores rojo y verde indican regiones con densidades intermedias y por último, el color azul indica regiones de baja densidad en la nube. Las escalas de longitud que aparecen en los ejes de cada gráfica están normalizadas con el radio inicial de la nube y la escala de densidad está normalizada con la densidad inicial de la nube.

Desde un punto de vista dinámico, podemos pensar que los bulbos en color amarillo fuerte que aparecen en la última

figura de cada mosaico, muy probablemente se comportarán de manera muy similar a como lo harían las proto-estrellas reales.

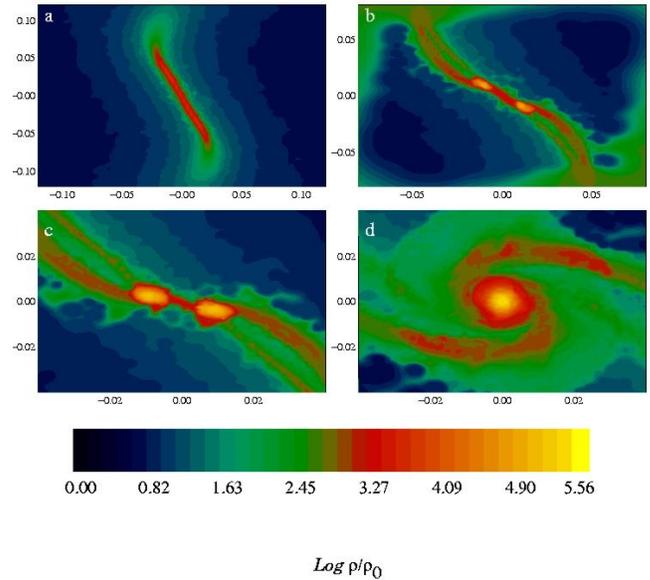


FIGURA 5a. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A0.

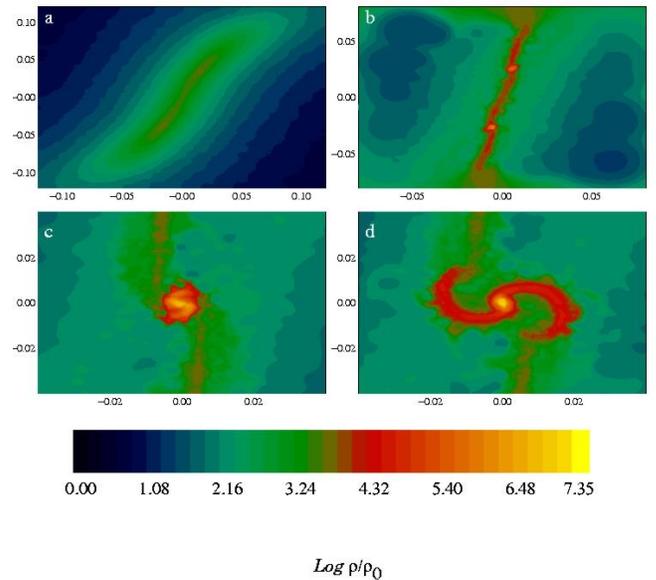


FIGURA 5b. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A1.

Inicialmente la nube es una esfera de gas que rota en torno a un eje. En la medida en que colapsa, se empieza a aplanar extendiéndose a lo largo del ecuador. Es como un disco grueso girando en una mesa. Si uno ve esta rotación desde el eje de rotación, esperaríamos ver cómo se reduce el radio del disco mientras más colapsa. Pero los resultados de la

simulación computacional nos muestran que la contracción de la nube ya aplanada se lleva a cabo de una manera mucho más sorprendente. En efecto, se forma una barra que se alarga y que después recupera su geometría original de disco. Ilustramos este comportamiento en los primeros paneles de las Figs. 5. La región central de cada modelo conduce a resultados diferentes, como puede verse en el cuarto panel de cada una de las Figs. 5.

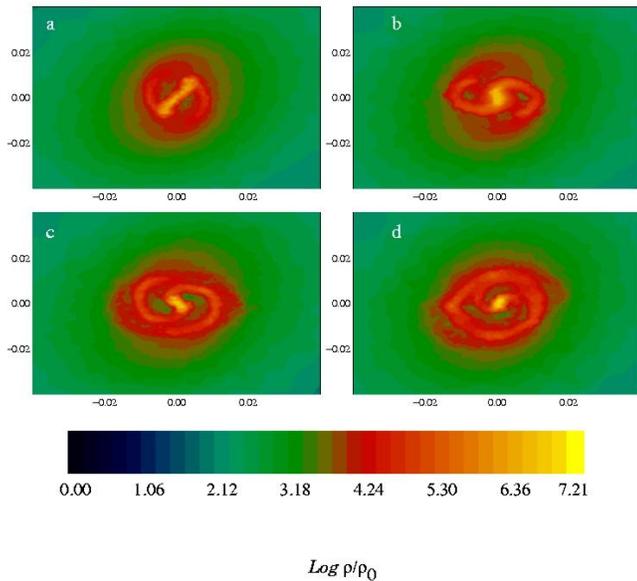


FIGURA 5c. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A2.

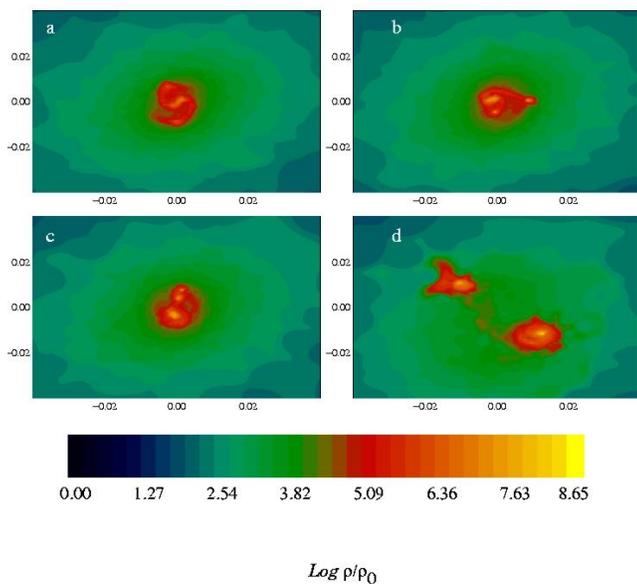


FIGURA 5d. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A3.

B. La evolución de las variables α y β

En la Fig. 6 ilustramos la evolución dinámica de las razones de energía para cada simulación. Intentaremos usar las curvas α vs β para describir la dinámica de la nube. Naturalmente, esperamos que los eventos importantes de cada modelo, como se ven en las Figs. 5, queden también impresos en el comportamiento de sus parámetros α y β .

Notamos de inmediato que las curvas α vs β se comportan algo diferente para cada simulación, lo que nos indica que los resultados de cada modelo son diferentes. Sin embargo, en estos paneles hay claramente características comunes en todas las curvas, de tal forma que se establece una gran similitud entre el par de curvas de los modelos A0 con A1 y entre las curvas de los modelos A2 con A3. Esta asociación en pares de modelos, es obviamente una consecuencia de la similitud en la extensión de envolvente de gas con respecto al núcleo. Vamos entonces a describir las diferentes etapas que se han etiquetado explícitamente sólo en el primer y tercer panel de la Fig. 6.

Hay una primera etapa marcada por las etiquetas 1 y 2, lo que indica que la evolución temprana del colapso en todos los modelos de nubes procede de manera idéntica; en esta primera etapa el α está disminuyendo como consecuencia del incremento sistemático del potencial gravitacional de la nube. En la etapa común 1-2 la parte central de la nube ya ha perdido su simetría esférica inicial para ya que las partículas más densas se han colocado en un disco grueso de aproximadamente un 10% del radio original de la nube.

Describimos ahora las etiquetas 2-3, que corresponden a una segunda etapa en las curvas de evolución α vs β , en la cual que hay un aumento muy pronunciado de los valores α . En esta etapa nuevos cúmulos densos de gas se están empezando a formar, por las siguientes razones.

Cuando un conjunto de partículas comienzan a agruparse por efecto del colapso gravitacional, la densidad de cada partícula aumenta debido a la presencia de muchas partículas acompañantes. La presión de tales partículas aumenta y entonces podemos esperar que el α de la nube también aumente a pesar de que el potencial gravitatorio también está creciendo en magnitud. No importa en que región de la nube se encuentran estas partículas que están formando cúmulos densos, mediante el aumento de α se puede detectar la formación de nuevos cúmulos en cualquier región.

Por ejemplo, notamos que se forman dos pequeños cúmulos densos en cada extremo de la región alargada en forma de filamento en la parte central de la nube. Poco después, estos pequeños cúmulos se conectan mediante un puente de partículas muy bien definido. Para el primer par de modelos A0 y A1, esta etapa 2-3 se ha ilustrado con el segundo y tercer paneles de la Fig. 5a y 5b, respectivamente.

Ahora bien, a medida que la masa del cúmulo central aumenta, la fuerza centrípeta que actúa sobre el gas también debe aumentar para aquellas partículas que se encuentran muy cerca del centro, con un pequeño radio. Esta tercera etapa en las curvas de evolución α vs β , etiquetada como 3-4 en la Fig. 6, queda señalada por un fuerte aumento de la

energía de rotación. Este aumento de β denota la formación de grandes brazos espirales que rodean al cúmulo central en los modelos A0 y A1.

La etapa 3-4 no se produce ni en el modelo A2 ni en A3, tal como se puede observar en la Fig. 6, a pesar del hecho que los brazos espirales están también formados en estos modelos, aunque con una extensión mucho más pequeña que en modelos A0 y A1.

Todavía hay una etapa 4 para el par de modelos A0 y A1, etiquetada por los números 4-5, en la que los valores de α y β disminuyen, indicando que la región central de la nube está perdiendo tanto energía térmica como rotacional. El principal evento dinámico que ocurre en esta etapa es la fusión de los dos cúmulos ya formados en la región central, como se ilustra en el panel inferior derecho de la Fig. 5a para el modelo A0, y en el panel inferior izquierdo de la Fig. 5b para el modelo A1.

Completamos la descripción dinámica de los modelos A0 y A1 notando que hay una última etapa en la curva α vs β después de la etiqueta 5, en la que se observa la formación de cúmulos exteriores que resultan del rompimiento de los brazos espirales.

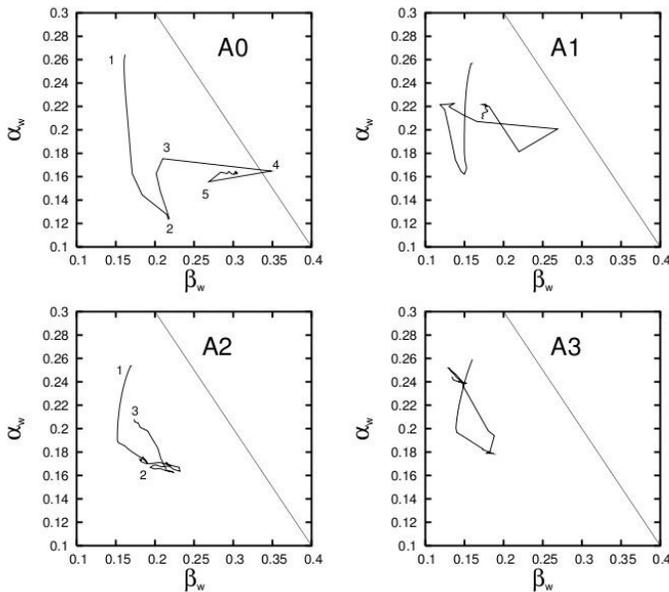


FIGURA 6. Curvas de evolución de las razones de energía definidas en la Sección III. La línea virial definida en la Eq. 8 se muestra como una recta diagonal.

También hay una última etapa para los modelos A2 y A3, que se manifiesta en el comportamiento de zig-zag de la curva α vs β (justo después de la etiqueta 2), en la cual ocurre la fragmentación de la nube mediante pequeños cúmulos que se forman alrededor del cúmulo central. Por ejemplo, en el modelo A2, un anillo de gas que rodea un grupo central formado al final de la primera etapa ahora comienza a fragmentarse, ver Fig. 5c. También se puede reconocer la

ocurrencia de fragmentación en la región central del modelo A3, como se puede ver en el último panel de la Fig. 5d.

C. El desarrollo de brazos espirales

Hay diferencias muy notables en el desarrollo de los brazos espirales para cada modelo, tanto en la extensión como en la fragmentación, como se puede apreciar observando la Fig. 7. Los brazos espirales para el modelo de A0 son largos y masivos. Se forman brazos todavía bien definidos para el modelo A1, pero ahora el movimiento circular de las partículas se distorsiona, que puede ser una señal de próxima fragmentación.

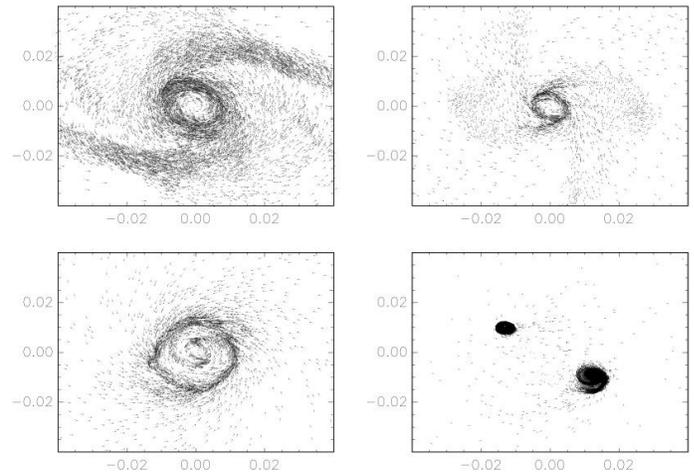


FIGURA 7. Gráficos 2D de la distribución de velocidad para los últimos estados de evolución obtenidos para cada modelo: A0 (panel superior izquierdo); A1 (panel superior derecho); A2 (panel inferior izquierdo); A3 (panel inferior derecho). Los ejes son x/R_c y y/R_c .

Curiosamente, los brazos espirales de los modelos A2 y A3 – que son delgados y cortos, pero todavía bien definidos– son capaces de dar una vuelta completa alrededor del cúmulo central, lo que indica que hay más partículas cayendo en este anillo de gas que se forma a partir de los brazos espirales en lugar del cúmulo central.

V. DISCUSION

La clave para entender el desarrollo de brazos tan diferentes en nuestras simulaciones, es el concepto de energía rotacional del núcleo, como explicamos a continuación. Mencionamos que cada nube fue dotada inicialmente con una misma energía rotacional. También establecimos que cada nube tiene el mismo núcleo central, pero tienen diferente extensión radial del envolvente.

Cuando la nube se pone en rotación de cuerpo rígido, se distribuye la energía rotacional disponible entre el núcleo y el envolvente. Así, un envolvente de mayor extensión va a tomar más energía rotacional y el núcleo quedará con menos

energía rotacional. En la Tabla II, mostramos esta repartición de energía rotacional entre el núcleo y el envolvente, en la que α_c y β_c son las energías térmica y rotacional hasta el radio del núcleo R_c .

Dado que esta energía de rotación del núcleo central es responsable de la extensión alcanzada por los brazos espirales, podemos entender que para las parejas de modelos A0 y A1, la energía de rotación dejada en el núcleo es suficiente para la formación de los brazos espirales, mientras que para los modelos A2 y A3, no es suficiente.

En la tercera columna de la Tabla II reportamos la suma de las razones de energía: Notamos que esta suma siempre queda por debajo de 0.5 para todos los modelos. Como dijimos antes en relación al teorema del virial en la Eq. 8, esta suma nos asegura la tendencia general del núcleo al colapso gravitacional.

TABLA II. Razones de energía calculadas hasta el radio del núcleo.

| Modelos | α_c | β_c | $\alpha_c + \beta_c$ |
|---------|------------|-----------|----------------------|
| A0 | 0.2643 | 0.1618 | 0.4261 |
| A1 | 0.3002 | 0.1114 | 0.4116 |
| A2 | 0.3350 | 0.0657 | 0.4007 |
| A3 | 0.3547 | 0.0374 | 0.3921 |

VI. CONCLUSIONES

Las simulaciones que nosotros hemos mostrado en este trabajo de divulgación fueron diseñadas para estudiar algunas características de la formación de sistemas binarios de proto-estrellas. Por tal motivo, hemos dejado de lado muchos elementos tanto físicos como computacionales que son muy importantes en el área de formación estelar. Sin embargo, con los elementos dinámicos que sí hemos implementado, a saber: densidad centralmente condensada, rotación de cuerpo rígido y perturbaciones iniciales simétricas, hemos podido observar la fragmentación de la

nube original dando lugar a la formación de sistemas múltiples de proto-estrellas en órbita; el desarrollo de los brazos espirales alrededor de las proto-estrellas; diferencias muy notables en tanto en la extensión como en la fragmentación de los brazos espirales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a ACARUS-UNISON por las facilidades prestadas para usar el “cluster mezquite”.

REFERENCIAS

- [1] Bodenheimer, H., *Principles of Star Formation*, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011).
- [2] Stahler, S. and Palla, F., *The Formation of stars*, (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2006).
- [3] Bergin, E.A and Tafalla, M., *Cold Dark Clouds: The initial conditions for star formation*, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **45**, 339-396 (2007).
- [4] Arreaga G, Klapp J. and Gomez F., *The gravitational collapse of Plummer clouds*, Astronomy and Astrophysics **509**, A96 (2010).
- [5] Arreaga, G. y Saucedo, J., *Physical effects of gas envelopes with different extension on the collapse of a gas core*, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica **48**, 61-84 (2012).
- [6] Springel, V., Yhosida, N. and White, S.M., *GADGET: a code for collisionless and gasdynamical cosmological simulations*, New Astronomy **6**, 79-117, (2001).
- [7] Boss, A. P. and Bodenheimer P., *Fragmentation of a rotating protostar*, Astrophysical Journal **234**, 289-295, (1979).
- [8] Bodenheimer, P., Burkert, A., Klein, R. I. and Boss, A. P. *2000 in Protostars and Planets IV*, ed. Mannings, V. G., Boss, A. P. y Russell, S. S., (University of Arizona Press, Tucson, (2000) p. 675-693.