

Formación de Binarias

Mauro Jélvez

1. Formación de Sistemas Estelares Múltiples

El origen de los sistemas binarios y múltiples es un problema central en la astrofísica estelar. No existe una teoría única que explique toda la diversidad observada de separaciones y relaciones de masa. En cambio, se proponen varios mecanismos que probablemente operan en diferentes entornos y regímenes de escala. La formación de sistemas múltiples es inherentemente un proceso más complejo que la formación estelar aislada, involucrando inestabilidades, dinámica de gases y encuentros gravitatorios.

1.1. Mecanismos de Formación Propuestos

Los tres mecanismos clásicos propuestos para la formación de binarias son:

1.1.1. 1. Fisión (*Fission*)

Esta fue una de las primeras teorías propuestas, particularmente por James Jeans.

- **Hipótesis:** Una nube o protoestrella que colapsa y se contrae, conservando su momento angular, comienza a girar cada vez más rápido (conservación del momento angular). Si la velocidad rotacional alcanza un punto donde la fuerza centrífuga en el ecuador excede la fuerza gravitacional, el objeto se vuelve dinámicamente inestable y se divide o *fisiona* en dos o más fragmentos.
- **Problemas:** Simulaciones numéricas modernas han demostrado que los objetos en colapso no alcanzan la velocidad rotacional crítica necesaria para la inestabilidad dinámica. En cambio, tienden a redistribuir el momento angular mediante la formación de discos accretionarios o a expulsar masa, estabilizándose. Por lo tanto, la fisión **ya no se considera un mecanismo viable** para la formación de la mayoría de los sistemas binarios.
- **Legado:** La idea subyace en la importancia de la rotación y el momento angular en el proceso de colapso.

1.1.2. 2. Captura (*Capture*)

Este mecanismo implica una interacción dinámica entre estrellas que inicialmente no están ligadas.

- **Hipótesis:** Dos estrellas que se encuentran en una trayectoria hiperbólica mutua pueden disipar energía cinética suficiente durante el encuentro para volverse gravitacionalmente ligadas. La disipación de energía puede ocurrir mediante:
 - **Interacción de marea:** La deformación de las estrellas durante un encuentro cercano convierte energía orbital en calor, que es radiado away.
 - **Interacción con un medio interestelar o disco circumestelar:** La fricción dinámica o el arrastre gaseoso pueden frenar a las estrellas.

- **Interacción gravitatoria con una tercera estrella** (captura triple): Un encuentro de tres cuerpos puede resultar en la eyección de una estrella, llevándose la energía excedente y dejando atrás un par ligado.

- **Viable en:** Este mecanismo es más probable en entornos de **alta densidad estelar**, como el interior de cúmulos estelares jóvenes o núcleos de cúmulos globulares, donde los encuentros cercanos son frecuentes.
- **Limitaciones:** Es un proceso **ineficiente** en el medio interestelar típico (baja densidad), donde los tiempos entre encuentros cercanos son extremadamente largos comparados con la edad de las estrellas. Es improbable que explique la alta fracción de binarias (>50%) observada entre estrellas de campo de tipo solar.

1.1.3. 3. Fragmentación (*Fragmentation*)

Esta es actualmente la teoría **dominante y más ampliamente aceptada** para la formación de la mayoría de los sistemas binarios y múltiples.

- **Hipótesis:** La fragmentación ocurre durante la **fase inicial de colapso** de una nube molecular densa, **antes** de que se forme un núcleo estelar definido. Las inestabilidades (turbulencia, inestabilidad rotacional) dentro de la nube que colapsa hacen que se fragmente en dos o más núcleos densos separados, cada uno de los cuales colapsa independientemente para formar una estrella. Estos fragmentos nacen ya gravitacionalmente ligados.
- **Vías de Fragmentación**
 - **Fragmentación de nube** (*Cloud fragmentation*): La nube parental grande se divide en fragmentos de escala **grande** (100 - 10000 AU), dando lugar a sistemas binarios **wide** con grandes separaciones.
 - **Fragmentación de disco** (*Disk fragmentation*): Un núcleo inicial colapsa formando primero un **disco protoestelar** masivo y extenso alrededor de una protoestrella central. Si la masa del disco es suficientemente grande y puede enfriarse eficientemente, puede volverse gravitacionalmente inestable y fragmentarse, formando compañeras secundarias. Esto tiende a producir separaciones más **pequeñas** (<100 AU), comparables al tamaño del disco.
- **Evidencia:** Este modelo es apoyado por **simulaciones numéricas hidrodinámicas** modernas de colapso de nubes moleculares, que reproducen naturalmente la formación de múltiples sistemas con una gama de separaciones y relaciones de masa. Además, las observaciones con ALMA y otros instrumentos revelan frecuentemente **discos circumbinarios y núcleos múltiples** dentro de nubes en colapso, proporcionando apoyo observacional directo.

1.2. Conclusión: Un Panorama Sintetizado

Es improbable que un solo mecanismo sea responsable de toda la población de binarias. En cambio, se favorece un **modelo de múltiples vías**:

- La **fragmentación** (tanto de nube como de disco) es probablemente el mecanismo de formación **primordial** y dominante para la mayoría de los sistemas, especialmente aquellos con separaciones intermedias y wide.
- La **captura** puede jugar un papel significativo en la **remodelación** de los sistemas múltiples en entornos densos (e.g., endureciendo órbitas, intercambiando componentes, disociando sistemas wide), y podría ser responsable de una fracción de binarias en cúmulos.
- La **fisión** es considerada obsoleta como teoría de formación.

La fracción inicial de binarias, sus parámetros orbitales y su multiplicidad dependen entonces de las propiedades iniciales de la nube molecular (masa, densidad, momento angular, turbulencia) y del ambiente dinámico en el que se forman.

2. Teoría de la Fisión: Una Explicación Detallada

La teoría de la fisión propone que una protoestrella en contracción, que conserva su momento angular, puede volverse dinámicamente inestable debido a la rotación y dividirse en dos o más fragmentos, formando así un sistema binario cercano.

2.1. Base Física de la Inestabilidad Rotacional

Consideremos una protoestrella esférica de masa M y radio R que contrae conservando su momento angular total L .

Las energías relevantes son:

- Energía gravitacional: $E_{\text{grav}} = -f_g \frac{GM^2}{R}$
- Energía rotacional: $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \Omega^2$

donde f_g es un factor de estructura de orden unidad que depende de la distribución de masa, $I = kMR^2$ es el momento de inercia (k es el factor de estructura radial, típicamente ~ 0.1 para estrellas condensadas), y Ω es la velocidad angular.

El momento angular se expresa como $L = I\Omega = kMR^2\Omega$. Si L se conserva durante la contracción, entonces:

$$\Omega = \frac{L}{kMR^2} \propto R^{-2}$$

La energía rotacional escala entonces como:

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \Omega^2 = \frac{1}{2} kMR^2 \left(\frac{L}{kMR^2} \right)^2 = \frac{L^2}{2kMR^2} \propto R^{-2}$$

Mientras que la energía gravitacional escala como $E_{\text{grav}} \propto R^{-1}$. Por lo tanto, durante la contracción (R disminuye), la relación:

$$\beta = \frac{E_{\text{rot}}}{|E_{\text{grav}}|} \propto \frac{R^{-2}}{R^{-1}} = R^{-1}$$

aumenta. Este parámetro β representa la importancia relativa de la rotación frente a la gravedad.

2.2. Límite de Rotación Crítica y Inestabilidad

Existe un valor crítico β_{crit} (aproximadamente 0.27 para estrellas politrópicas de índice $n=3$) más allá del cual:

1. La configuración esferoidal (esferoide de Maclaurin) se vuelve secularmente inestable.
2. Pequeñas perturbaciones no axisimétricas crecen.
3. La configuración más estable es una secuencia bifurcada (elipsoides de Jacobi, y posteriormente piriformes).

La hipótesis de fisión sugiere que esta inestabilidad conduce a la división catastrófica del objeto en dos masas menores, produciendo un sistema binario cercano con:

- Períodos orbitales cortos (horas a días)
- Alto momento angular total
- Relación de masas $q \approx 1$ (fragmentos de masa similar)

2.3. Problemas de la Teoría de Fisión

A pesar de su base física elegante, la teoría de fisión enfrenta problemas fundamentales:

1. **Redistribución de momento angular:** Las protoestrellas no son cuerpos rígidos aislados. Poseen discos de acreción y vientos magnetizados (vientos protosolares) que extraen eficientemente el momento angular del sistema, evitando que β alcance valores críticos.
2. **Resultados de simulaciones:** Cálculos numéricos modernos de colapso de nubes moleculares con física magnetohidrodinámica (MHD) muestran que la fragmentación ocurre *antes* de formar un objeto condensado único, no después. La formación estelar procede típicamente mediante colapso fragmentado o formación de discos inestables, no mediante fisión de un objeto condensado.
3. **Distribución observacional:** Mientras que la fisión predeciría predominantemente binarias cercanas con $q \approx 1$, las observaciones muestran una amplia distribución de relaciones de masa ($0 < q \leq 1$) y una gran población de binarias wide que no pueden explicarse por este mecanismo.

2.4. Legado e Importancia Histórica

Aunque actualmente se considera que la fisión no es el mecanismo de formación primario de sistemas binarios, su estudio fue crucial para:

- Establecer la importancia de la rotación y el momento angular en la formación estelar.
- Desarrollar el formalismo de figuras de equilibrio de fluidos auto-gravitantes en rotación.
- Inspirar investigaciones sobre la estabilidad de configuraciones rotantes.

El parámetro β sigue siendo una cantidad útil para caracterizar la importancia de la rotación en estrellas individuales y sistemas protoestelares.

3. Límites de la Analogía de la Fisión: Fluidos Incompresibles vs. Estrellas

Si bien la analogía de una gota de agua que se fissiona bajo rotación en microgravedad es intuitiva, su aplicabilidad a la formación estelar es limitada debido a diferencias físicas fundamentales en la naturaleza de los fluidos involucrados.



3.1. Figuras de Equilibrio en Fluidos Rotantes

La hidrodinámica de fluidos auto-gravitantes rotantes define secuencias de equilibrio para configuraciones en función del parámetro $\beta = E_{\text{rot}}/|E_{\text{grav}}|$:

- **Baja rotación** ($\beta \lesssim 0.01$): La configuración de equilibrio es un **esferoide oblato** (achatado en los polos), descrito por los esferoides de Maclaurin.
- **Alta rotación** ($\beta \gtrsim 0.14$): La secuencia de Maclaurin se vuelve secularmente inestable. La configuración de equilibrio bifurca hacia **elipsoides triaxiales** (jacobianos).
- **Rotación crítica** ($\beta \approx 0.27$): Para un fluido incompresible, la configuración se alarga enormemente, adoptando una forma piriforme (en forma de pera) que es dinámicamente inestable y puede llevar a la fisión.

3.2. La Analogía de la Gota de Agua y su Falla



El experimento conceptual de una gota de agua rotante en microgravedad es engañoso porque:

- El agua es efectivamente **incompresible** ($\rho \approx \text{constante}$).
- La cohesión de la gota está dominada por la **tensión superficial**, una fuerza que actúa solo en la superficie y que se opone a la deformación.

Una estrella, en cambio, es fundamentalmente diferente:

- Es **altamente compresible** y sigue una **ecuación de estado** compleja ($P = P(\rho, T)$). Su densidad aumenta drásticamente hacia el centro (e.g., $\rho_c \sim 150 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{superficie}} \sim 10^{-7} \text{ g/cm}^3$ en el Sol).
- No existe **tensión superficial**; la cohesión es puramente de naturaleza **gravitacional**, actuando en todo el volumen.
- La distribución de masa está **centralmente concentrada**. El momento de inercia $I = kMR^2$ es menor ($k \ll 1$) que el de una esfera homogénea ($k = 0.4$), lo que significa que para un mismo momento angular L , una estrella real gira más rápido que un cuerpo homogéneo, pero también almacena menos energía rotacional por unidad de masa en sus regiones externas.

3.3. El Comportamiento Real de una Estrella que Gira Rápidamente

Cuando una protoestrella contrae y aumenta su velocidad de rotación, no sigue la secuencia de un fluido incompresible. En lugar de evolucionar hacia una forma piriforme inestable, ocurren otros mecanismos de redistribución y pérdida de momento angular:

1. **Inestabilidades de disco y formación de espirales**: El exceso de momento angular es transportado outward mediante ondas de densidad en el disco protostelar, formando estructuras espirales. Este proceso eficientemente frena la rotación de la protoestrella central.
2. **Pérdida de momento angular magnéticamente acoplada**: Los campos magnéticos acoplan la rotación de la protoestrella con el disco y con flujos de salida (outflows/jets). El material expulsado en los polos lleva consigo una gran cantidad de momento angular, effectively braking the central object.
3. **Fragmentación preferencial en el disco**: Si el disco se vuelve masivo enough ($M_{\text{disco}}/M_* \gtrsim 0.1$) y puede enfriarse radiativamente, se vuelve gravitacionalmente inestable y **fragmenta**, formando una compañera secundaria. Este es un mecanismo de formación de binarias fundamentalmente diferente a la fisión de un cuerpo central único.

3.4. Conclusión: Por qué las Estrellas no se Fisionan

La analogía clásica de la fisión falla porque ignora la física esencial de la formación estelar:

- La **compresibilidad** y la **estructura radial de densidad** cambian cualitativamente la respuesta a la rotación.
- Los mecanismos de **pérdida de momento angular** (magnéticos, dinámicos) son extremadamente eficientes y previenen que la protoestrella alcance el β crítico necesario para la inestabilidad fisión.
- La naturaleza **auto-gravitante** sin tensión superficial permite que el exceso de momento angular sea canalizado hacia la formación de estructuras extendidas (discos, outflows) en lugar de llevar a una deformación catastrófica.

Por lo tanto, mientras la fisión de gotas es un fenómeno de laboratorio bien documentado, **no es un mecanismo viable para la formación de sistemas binarios estelares**. La fragmentación durante el colapso inicial de la nube molecular o la inestabilidad gravitacional en discos masivos son los caminos físicos responsables de la formación de la mayoría de los sistemas múltiples.

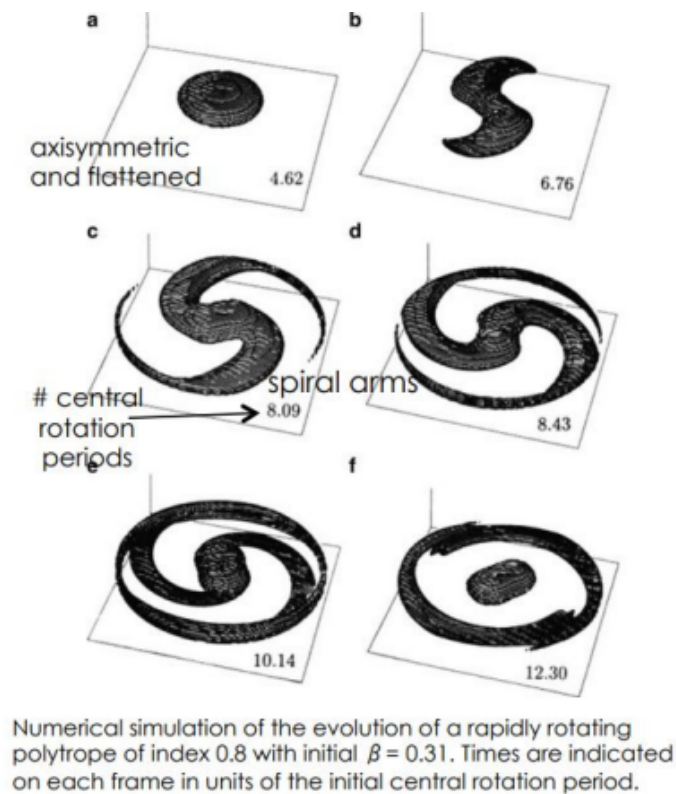
4. Simulación Numérica de un Intento de Fisión

La figura describe los resultados de una simulación numérica crucial que prueba la hipótesis de fisión bajo condiciones iniciales extremas, incluso más allá de lo esperado en la formación estelar real.

4.1. Configuración Inicial de la Simulación

La simulación parte de una configuración altamente idealizada pero físicamente consistente:

- Un **politropo** con índice $n = 0.8$ ($\gamma = 1 + 1/n = 2.25$), que representa un objeto gaseoso bastante compresible.



- Una rotación inicial **extremadamente rápida**, con $\beta = E_{\text{rot}}/|E_{\text{grav}}| = 0.31$. Este valor supera significativamente el valor crítico teórico para inestabilidad secular ($\beta_{\text{crit}} \approx 0.27$) calculado para modelos simplificados.
- La configuración inicial es **axisimétrica** (simétrica rotacionalmente) y **aplanada** (oblate spheroid) debido a la alta rotación.

4.2. Evolución Temporal y Resultados

La simulación sigue la evolución dinámica del sistema a lo largo de aproximadamente 10 períodos de rotación central inicial ($P_{\text{rot, cen}}$). Los resultados, visualizados en los paneles (a) a (d), son reveladores:

- **Panel (a) - $t = 8.09P_{\text{rot, cen}}$:** Comienzan a desarrollarse **brazos espirales** no axisimétricos. Estos surgen de inestabilidades de modo no axisimétrico ($m = 2, m = 4$) que crecen a expensas de la energía rotacional excedente.
- **Paneles (b) y (c) - $t = 8.48$ a $12.30P_{\text{rot, cen}}$:** Los brazos espirales se fortalecen y se enrollan. Físicamente, estos brazos representan **ondas de densidad** que actúan como mecanismo de transporte de momento angular.
- **Panel (d) - $t = 10.14P_{\text{rot, cen}}$ (posiblemente una secuencia no estrictamente cronológica):** El resultado final no es una fisión en dos objetos condensados de masa comparable. En su lugar, el sistema evoluciona hacia una configuración consistente en:
 1. Un **núcleo central** que ha sido frenado (*spun down*) por los torques ejercidos por los brazos espirales.
 2. Un **anillo o disco** exterior masivo, o tal vez incluso un par de grumos de baja masa en órbitas lejanas, que se ha llevado la mayor parte del momento angular excedente.

4.3. Implicaciones Físicas y Conclusión

Esta simulación numérica proporciona evidencia contundente en contra del mecanismo de fisión clásico y a favor de los mecanismos de redistribución de momento angular:

1. **La fisión no ocurre, incluso forzando las condiciones iniciales:** Aunque la simulación comienza con un β supercrítico, el resultado es una **redistribución** de masa y momento angular, no una división binaria limpia.
2. **Los brazos espirales son el mecanismo de redistribución eficiente:** Los modos no axisimétricos (brazos espirales) actúan como ondas de gravedad que transportan momento angular hacia el exterior. Este es un mecanismo dinámico autogravitante análogo al que ocurre en discos de galaxias o discos protoplanetarios.
3. **Se establece un límite de rotación máximo:** El resultado final es un núcleo central rotando a una tasa subcrítica. Esto sugiere que existe una **velocidad de rotación máxima** que una estrella o protoestrella puede alcanzar, impuesta por la eficiencia de estos mecanismos de transporte de momento angular. Intentos de girar más rápido resultan en la eyección de material y momento angular, no en la fisión.
4. **Relevancia para la formación estelar:** Este proceso de *self-regulation* through spiral structure formation is likely at play in real collapsing protostellar cores, preventing them from ever reaching fission-inducing rotation rates and instead leading to the formation of disks and potential companions through disk fragmentation (not central fission).

En conclusión, las simulaciones numéricas modernas demuestran que el destino de un objeto auto-gravitante que rota rápidamente no es la fisión, sino la formación de estructuras espirales que redistribuyen el momento angular y frenan el núcleo. Este resultado corrobora por qué el mecanismo de fisión es inviable para la formación de binarias.

5. Resumen sobre Fisión: Un Mecanismo Inviabile

El estudio detallado de la teoría de la fisión, respaldado por simulaciones numéricas modernas y consideraciones físicas fundamentales, permite llegar a conclusiones definitivas sobre su papel en la formación de sistemas binarios.

5.1. Conclusiones Principales

1. Las estrellas no se fissionan.

Aunque la secuencia de figuras de equilibrio para fluidos incompresibles sugiere una bifurcación hacia formas triaxiales y una posible fisión para $\beta \gtrsim 0.27$, las estrellas reales son sistemas compresibles, auto-gravitantes y sujetos a procesos de pérdida de momento angular. Cuando se simulan estas condiciones de manera realista (incluso partiendo de $\beta > \beta_{\text{crit}}$), el resultado no es la división en dos fragmentos de masa comparable. En su lugar, el sistema desarrolla inestabilidades no axisimétricas (brazos espirales) que redistribuyen eficientemente el momento angular hacia el exterior, resultando en un núcleo central frenado y la posible formación de un disco o anillo. La fisión, como mecanismo de formación de binarias, **no ocurre en la naturaleza**.

2. No se alcanzan las condiciones iniciales necesarias para la fisión.

El escenario requerido para la fisión –una protoestrella condensada y aislada que contrae adiabáticamente conservando todo su momento angular– es físicamente irrealizable. Los procesos inherentes a la formación estelar lo previenen:

- La **fragmentación** de la nube molecular parental ocurre *antes* de que se forme un único objeto condensado.
- Los mecanismos de **pérdida de momento angular** (vientos magnetizados, acoplamiento con discos, ondas espirales) son extremadamente eficientes durante el colapso. Extraen momento angular del núcleo en formación, manteniendo β muy por debajo de su valor crítico.
- La formación de un **disco de acreción** es un sumidero natural para el exceso de momento angular, estabilizando la protoestrella central.

Por lo tanto, las condiciones de rotación crítica necesarias para impulsar una inestabilidad de fission **ni siquiera se alcanzan** en el escenario de formación estelar real.

3. El estudio de la fisión provee una cota superior para la rotación estelar.

El valor de β_{crit} derivado de los modelos de fission establece un **límite físico teórico máximo** para la relación entre energía rotacional y gravitacional en una configuración estelar estable. Una estrella no puede rotar tan rápidamente que $\beta > \beta_{\text{crit}}$; de intentarlo, se volvería dinámicamente inestable y procedería a redistribuir su momento angular mediante los mecanismos ya descritos (brazos espirales, eyección de material). Este límite se manifiesta observacionalmente como la **velocidad de rotación de ruptura** (*break-up velocity*), $v_{\text{crit}} = \sqrt{GM/R}$, que es la velocidad ecuatorial máxima que una estrella puede tener antes de que la fuerza centrífuga iguale a la gravedad superficial. Las estrellas observadas rotan típicamente a fracciones de esta velocidad crítica.

5.2. Legado e Importancia

Aunque la fisión ha sido descartada como mecanismo de formación binaria, su estudio fue fundamental para:

- Cuantificar el papel de la rotación y el momento angular en la estructura y estabilidad estelar.
- Desarrollar el formalismo matemático para tratar figuras de equilibrio en fluidos auto-gravitantes rotantes.
- Establecer el concepto de velocidad de rotación crítica, que es crucial para interpretar las velocidades rotacionales observadas en estrellas de diferentes masas y edades.

En la actualidad, el consenso apunta firmemente hacia la **fragmentación** (tanto de la nube molecular inicial como de discos protostelares masivos) como el mecanismo primordial para la formación de los sistemas binarios y múltiples que observamos.

6. Mecanismo de Captura: Fundamentos y Limitaciones

El mecanismo de captura propone que un sistema binario puede formarse cuando dos estrellas inicialmente no ligadas (en órbitas hiperbólicas relativas) disipan suficiente energía cinética durante un encuentro cercano para volverse gravitacionalmente ligadas.

6.1. Conservación de Energía en un Sistema Aislado

Consideremos dos estrellas tratadas como partículas puntuales de masas m_1 y m_2 , aisladas de influencias externas. La energía total del sistema es una constante del movimiento:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2}\mu v_{\text{rel}}^2 - \frac{Gm_1m_2}{r} \quad (1)$$

donde $\mu = \frac{m_1m_2}{m_1+m_2}$ es la masa reducida, v_{rel} es la velocidad relativa y r es la distancia de separación.

La naturaleza de la órbita depende del signo de E_{total} :

- $E_{\text{total}} < 0$: Órbita **ligada** (elíptica).
- $E_{\text{total}} = 0$: Órbita **crítica** (parábola).
- $E_{\text{total}} > 0$: Órbita **no ligada** (hipérbola).

6.2. El Problema Fundamental: La Necesidad de Disipación

Para que dos estrellas inicialmente no ligadas ($E_{\text{total}} > 0$) formen un sistema binario, su energía total debe volverse negativa. Esto requiere una **pérdida neta de energía** del sistema. Dado que la energía total se conserva en un sistema aislado de dos cuerpos, la captura **no es posible** bajo estas condiciones ideales.

La formación de un binario por captura requiere, por tanto, de mecanismos de disipación que extraigan energía del movimiento orbital:

6.2.1. 1. Disipación en el Medio Interestelar (Encuentros Secos)

Durante un encuentro hiperbólico, las estrellas pueden experimentar:

- **Fricción dinámica**: Arrastre gravitacional contra el medio interestelar circundante.
- **Arrastre hidrodinámico**: Si el medio es suficientemente denso (e.g., dentro de nubes moleculares).

Este mecanismo es generalmente **ineficiente** para estrellas individuales en el medio interestelar típico, debido a las bajas densidades.

6.2.2. 2. Interacciones de Marea (Encuentros Húmedos)

Un encuentro cercano puede deformar las estrellas, excitando oscilaciones internas y ondas de marea:

- La energía orbital se convierte en **energía interna** (calor) y en **energía de deformación**.
- Si este calor es **radiado eficientemente** al espacio, el sistema pierde energía irreversiblemente.

La eficiencia de este proceso depende críticamente del **parámetro de impacto** y de la estructura interna de las estrellas.

6.2.3. 3. Intervención de un Tercer Cuerpo

Este es el mecanismo más eficiente en contextos dinámicos:

- Un encuentro de **tres cuerpos** puede resultar en la eyección de una de las estrellas.
- La estrella eyectada se lleva el **exceso de energía** ($E_{\text{total}} > 0$), dejando atrás las otras dos con $E'_{\text{total}} < 0$ (ligadas).
- Este proceso se denomina **captura triple** o *hardening* por encuentros.

6.3. Contextos Astrofísicos Relevantes

La captura puede ser un mecanismo viable sólo en entornos específicos:

- **Núcleos densos de cúmulos estelares jóvenes**: Donde las frecuencias de encuentro son altas.

- **Cúmulos globulares:** Donde las interacciones de tres cuerpos son relativamente comunes.
- **Discos circumestelares densos:** Donde el arrastre gaseoso puede facilitar la captura.

Sin embargo, incluso en estos entornos, la captura es generalmente un proceso secundario de **reprocessing** dinámico, más que el mecanismo de formación primordial de binarias.

6.4. Conclusión

El mecanismo de captura pura entre dos estrellas aisladas es **altamente improbable** debido a la conservación de la energía. Su viabilidad requiere de:

1. Mecanismos de disipación eficientes (interacciones de marea, fricción con medio gaseoso).
2. O la intervención de un tercer cuerpo que se lleve el exceso de energía.

Por tanto, la captura no puede explicar la alta fracción de binarias observada en el campo galáctico, pero puede jugar un papel importante en entornos dinámicos específicos.

7. Viabilidad y Consecuencias de Tidal capture

El mecanismo de captura por marea impone requisitos extremos sobre el ambiente estelar y produce sistemas binarios con características muy específicas.

7.1. Requisito de Altísima Densidad Estelar

La probabilidad de que dos estrellas experimenten un encuentro con el parámetro de impacto crítico necesario para la captura tidal es extremadamente baja. La tasa de formación de binarios por este mecanismo (Γ_{capture}) escala con:

$$\Gamma_{\text{capture}} \propto n_*^2 \sigma v_{\infty} b_c^2 \quad (2)$$

donde:

- n_* es la densidad numérica de estrellas.
- σ es la sección eficaz de captura, que depende del cuadrado del parámetro de impacto crítico b_c .
- v_{∞} es la velocidad relativa a gran distancia.

Dado que b_c es pequeño (del orden de unos pocos radios estelares), la sección eficaz σ es diminuta. Para que la tasa Γ_{capture} sea significativa, se requiere compensar con densidades estelares (n_*) enormes.

Los únicos entornos en la Galaxia donde se alcanzan estas condiciones son:

- **Núcleos de cúmulos globulares:** Aquí, las densidades centrales pueden exceder 10^5 estrellas por pársec cúbico e incluso llegar a $10^6 - 10^7 \text{ pc}^{-3}$ en algunos casos (e.g., NGC 6397, M15). La imagen del Hubble Space Telescope (HST) de 47 Tuc (NGC 104) muestra precisamente este tipo de ambiente denso donde la captura tidal es viable.
- **Núcleos de cúmulos jóvenes masivos** (e.g., R136 en la Nube de Magallanes): Aunque son más raros y menos densos que los cúmulos globulares, pueden albergar encuentros cercanos.
- **Regiones centrales de galaxias nucleadas:** Donde la densidad estelar es extremadamente alta.

En contraste, la densidad estelar en el vecindario solar es de $\sim 0.1 \text{ pc}^{-3}$, haciendo que la probabilidad de captura tidal sea completamente despreciable en el disco galáctico.

7.2. Producto: Binarios de Período Corto

Un encuentro exitoso de captura tidal resulta invariablemente en un **sistema binario cercano**. La separación orbital característica a del sistema recién ligado es del mismo orden de magnitud que el radio estelar R_* :

$$a \sim \text{varios} \times R_* \quad (3)$$

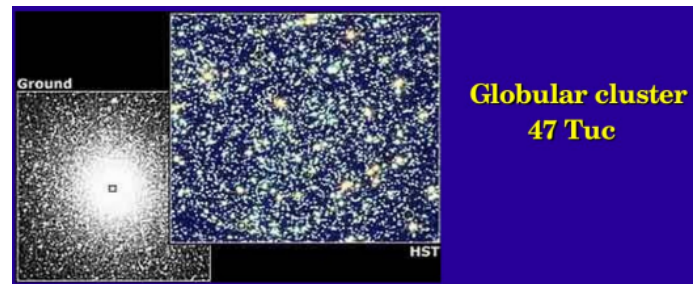
Esto se debe a que la disipación de energía tidal es significativa sólo durante el paso muy cercano por el periastron ($r_p \sim \text{algunos } R_*$). La órbita resultante tiene:

- Un **semieje mayor** pequeño, típicamente inferior a 1 UA.
- Una **alta excentricidad** inicial ($e \approx 1$), que luego será reducida por las mismas fuerzas de marea en una escala de tiempo de circularización.
- Un **período orbital** corto, que va desde horas hasta unos pocos días.

7.3. Implicaciones para Poblaciones Estelares Especiales

Si bien la captura tidal no es un proceso de formación general, es fundamental para explicar poblaciones específicas de objetos en entornos densos:

- **Binarias de Rayos X de Baja Masa (LMXBs):** Se cree que muchos de los sistemas LMXB observados en cúmulos globulares se formaron por captura tidal de una estrella de neutrones (remanente de una supernova colapsada) y una estrella compañera de baja masa. La estrella de neutrones acreta material de la compañera, produciendo emisión de rayos X.
- **Púlsares binarios milisegundo:** La acreción de masa en un sistema LMXB puede "reciclar" (*recycle*) un púlsar viejo, acelerando su rotación hasta períodos de milisegundos. Si la acreción se detiene, resulta un púlsar milisegundo aislado o, si el sistema sobrevive, en un binario con una enana blanca u otra estrella de baja masa.
- **Blue stragglers:** La fusión de dos estrellas durante un encuentro tidal fallido (parámetro de impacto demasiado pequeño) podría producir una estrella más masiva y azul que la secuencia principal de turnoff del cúmulo, explicando algunas de las *blue stragglers* observadas.



7.4. Conclusión: Un Mecanismo de Nicho

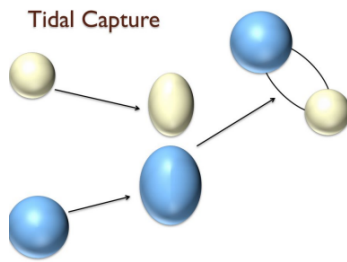
La captura por marea es un mecanismo de formación de binarios de **nicho**. No contribuye significativamente a la población general de binarias en la Galaxia, que se forma predominantemente por fragmentación durante el colapso de nubes moleculares.

Sin embargo, es un proceso **crítico** en los entornos de altísima densidad de los núcleos de cúmulos globulares. Allí, es

responsable de la formación de sistemas exóticos y de corto período (LMXBs, púlsares binarios) que de otra manera serían difíciles de explicar. Las observaciones del Hubble Space Telescope y otros observatorios que revelan estas poblaciones especializadas en cúmulos como 47 Tucanae proporcionan un apoyo indirecto a la operación de este mecanismo en condiciones extremas.

8. Captura por Marea: Un Mecanismo de Disipación Específico

La captura por marea es un caso particular del mecanismo de captura donde la disipación de energía ocurre específicamente a través de la deformación y fricción interna de las estrellas durante un encuentro cercano.



8.1. Física del Proceso

Cuando dos estrellas experimentan un encuentro cercano con un parámetro de impacto pequeño, el fuerte gradiente de fuerza gravitacional (el campo de marea) las deforma elásticamente. Este proceso convierte energía orbital en otras formas de energía:

$$\Delta E_{\text{orb}} = \Delta E_{\text{tidal}} + \Delta E_{\text{heat}} \quad (4)$$

donde:

- ΔE_{tidal} es la energía invertida en deformar las estrellas (creando "bulbos de marea").
- ΔE_{heat} es la energía disipada como calor debido a la fricción interna en el material estelar (viscosidad, fricción turbulenta).

Si la suma de estas energías disipadas excede la energía cinética orbital inicial positiva, el sistema resultante tendrá $E_{\text{total}} < 0$, es decir, se volverá ligado.

8.2. Condiciones para una Captura Exitosa

La eficiencia de la captura por marea depende críticamente de varios factores:

8.2.1. Parámetro de Impacto Óptimo

Existe un rango muy estrecho de parámetros de impacto para los cuales la captura es posible:

- **Encuentro demasiado distante:** La interacción de marea es débil ($F_{\text{tide}} \propto 1/r^3$). La energía disipada ΔE_{diss} es insuficiente para volver negativo el balance energético ($\Delta E_{\text{diss}} < E_{\text{orb, ini}}$). Las estrellas continúan sus trayectorias hiperbólicas.

- **Encuentro demasiado cercano:** La interacción de marea es extremadamente fuerte. La energía disipada es más que suficiente para lograr la captura, pero las deformaciones son tan grandes que pueden llevar a:

1. **Fusión (Merger):** Si las superficies estelares llegan a tocarse o la interacción transfiere momento angular de manera catastrófica.
2. **Destrucción Tidal:** Para encuentros con estrellas compactas (enanas blancas, estrellas de neutrones) o envolturas estelares extendidas (gigantes), la fuerza de marea puede exceder la auto-gravedad de la estrella, desintegrándola.

- **"Ricitos de Oro" (Goldilocks):** Existe un rango muy específico de parámetros de impacto donde $\Delta E_{\text{diss}} \approx E_{\text{orb, ini}}$, resultando en la formación de un sistema binario ligado, altamente excéntrico y con un periastro cercano.

8.3. Características de los Binarios Formados por Captura Tidal

Un sistema formado por este mecanismo presenta propiedades distintivas:

- **Órbita inicial muy excéntrica:** Dado que se forma a partir de una órbita hiperbólica que pierde energía en el periastro, la excentricidad inicial e es muy alta ($e \rightarrow 1$).
- **Periastro pequeño:** El periastro de la órbita final es similar al periastro del encuentro inicial que causó la captura.
- **Estrellas "excitadas":** Las componentes pueden quedar oscilando radial y no radialmente (modos de oscilación tidalmente excitados), llevando algún tiempo en alcanzar un equilibrio hidrostático completo.
- **Circularización orbital posterior:** Las interacciones de marea subsiguientes, ahora en una órbita ligada, trabajarán para circularizar la órbita y sincronizar las rotaciones estelares con el período orbital, en una escala de tiempo que depende de los mecanismos de disipación internos.

8.4. Viabilidad y Contextos Astrofísicos

La captura por marea es un proceso inherentemente **inesperado** (low probability event) porque requiere un parámetro de impacto muy específico. Sin embargo, su probabilidad puede volverse significativa en:

- **Núcleos densos de cúmulos globulares:** Donde las velocidades de encuentro son altas y los volúmenes de interacción son grandes. Se cree que es el mecanismo de formación de algunos sistemas binarios de rayos X de baja masa (LMXBs) y púlsares binarios en estos entornos.
- **Cúmulos estelares jóvenes y densos:** Aunque las velocidades de encuentro son menores, la mayor densidad numérica de estrellas podría permitir algunos eventos de captura.

Es crucial notar que la **eficiencia de disipación** depende fuertemente de la estructura estelar. Estrellas con envolturas extensas y convectivas (gigantes, subgigantes) disipan energía tidal mucho más eficientemente que estrellas de secuencia principal con núcleos radiativos.

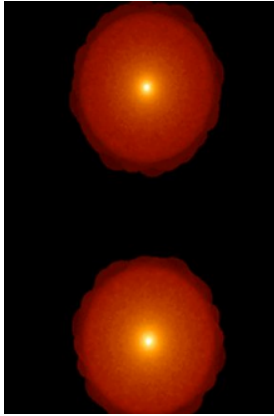
8.5. Conclusión

La captura por marea es un mecanismo físicamente posible pero de **baja probabilidad**. Actúa como un filtro de parámetros de

impacto muy fino, seleccionando sólo aquellos encuentros hiperbólicos muy específicos donde la disipación de energía tidal es suficiente para la captura pero no para la destrucción. Si bien no es un mecanismo de formación primario para la población general de binarias, puede ser responsable de una fracción de sistemas exóticos y de corto período en entornos dinámicos extremos donde la tasa de encuentros es lo suficientemente alta.

9. Captura Disipativa: Aumentando el Blanco

El mecanismo de captura disipativa propone una forma de superar la principal limitación de la captura tidal (la pequeña sección eficaz) aprovechando las etapas tempranas de la formación estelar, cuando las protoestrellas están rodeadas de discos circunestelares extensos y masivos.



9.1. El Concepto: Discos como Amplificadores de Captura

En las primeras etapas de la formación estelar (fase Clase 0/I), una protoestrella está embebida en un **disco de acreción** y una envoltura gaseosa. Este disco puede ser mucho más grande que la estrella central:

- **Radio estelar típico:** $R_* \sim 2 - 5R_\odot$ (para una protoestrella T Tauri).
- **Radio del disco típico:** $R_{\text{disco}} \sim 50 - 500 \text{ AU}$, es decir, órdenes de magnitud mayor que el radio estelar.

La presencia de un disco masivo aumenta dramáticamente la **sección eficaz** para la captura. En lugar de requerir un encuentro a distancias de R_* (unos pocos R_\odot), ahora un encuentro a distancias de R_{disco} (decenas a cientos de AU) puede ser suficiente. La sección eficaz escala con el cuadrado del radio de interacción:

$$\sigma_{\text{capture}} \propto R_{\text{interaction}}^2 \quad (5)$$

Por lo tanto, $\sigma_{\text{disco}}/\sigma_{\text{tidal}} \approx (R_{\text{disco}}/R_*)^2 \sim (100 \text{ AU}/0.01 \text{ AU})^2 \sim 10^8$. La presencia de un disco masivo incrementa la probabilidad de captura en órdenes de magnitud.

9.2. Mecanismo de Disipación

Durante un encuentro, el mecanismo de disipación de energía ya no es predominantemente la fricción interna tidal en las estrellas, sino:

1. **Arrastre gaseoso (Ram pressure):** La estrella que se aproxima se mueve a través del medio gaseoso del disco de la otra, experimentando fricción hidrodinámica que frena su movimiento relativo.
2. **Calentamiento por choque y radiación:** El gas del disco es comprimido y calentado durante el encuentro, irradiando energía away.
3. **Deformación y truncamiento del disco:** El encuentro gravitacional perturba y distorsiona los discos, redistribuyendo el momento angular y extrayendo energía orbital.

Estos procesos convierten la energía orbital cinética en calor radiado y en energía interna del gas perturbado, llevando a una pérdida neta de energía del sistema y permitiendo la captura.

9.3. Viabilidad y Contexto de Formación

Aunque la sección eficaz es mucho mayor, el mecanismo aún requiere condiciones específicas:

- **Alta densidad de protoestrellas:** La captura debe ocurrir mientras los discos aún son masivos y extensos, es decir, durante la **fase embebida** de vida de un cúmulo joven ($< 1 - 3 \text{ Myr}$). Esto requiere que la densidad de protoestrellas en el cúmulo en formación sea lo suficientemente alta como para que los encuentros sean probables en esta breve ventana de tiempo.
- **Cúmulos jóvenes y compactos:** Pequeños cúmulos con alta densidad central (e.g., como Trapezium en Orión, o algunos cúmulos embebidos en regiones como Rho Ophiuchi) son los candidatos ideales. La densidad de estrellas en estas regiones puede alcanzar $10^3 - 10^4 \text{ pc}^{-3}$ durante breves períodos.
- **Menor velocidad de encuentro:** Las velocidades relativas (v_∞) en cúmulos jóvenes suelen ser bajas (unos pocos km/s), ya que las estrellas aún no se han *virializado* completamente. Esto favorece la captura, ya que se requiere disipar menos energía cinética para lograr $E_{\text{total}} < 0$.

9.4. Resultados y Limitaciones

Los sistemas resultantes de la captura disipativa podrían tener:

- Separaciones iniciales más grandes que las de la captura tidal ($a \sim$ decenas a cientos de AU), reflejando el tamaño de los discos interactivos.
- Discos circumbinarios perturbados o truncados.
- Potencial para una mayor evolución dinámica y migración orbital.

Sin embargo, el mecanismo enfrenta desafíos:

- La **breve ventana temporal** ($\sim \text{Myr}$) para que ocurra la captura mientras los discos son masivos.
- La posible **disrupción de los discos** por el encuentro, en lugar de la captura, lo que podría impedir la formación planetaria posterior o alterar la acreción onto the protostars.
- La **competencia con la fragmentación:** En entornos tan densos, es probable que la formación primordial de binarias por fragmentación de la nube ya haya ocurrido, haciendo difícil discernir la contribución de la captura disipativa.

9.5. Conclusión

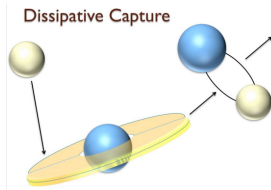
La captura disipativa representa una vía potencialmente importante para la formación de binarias de separación intermedia a

wide en las primeras etapas de la evolución de cúmulos estelares. Al aumentar enormemente el blanco de captura mediante discos protoplanetarios, mitiga el principal obstáculo de la captura tidal pura.

Si bien probablemente no domine la formación de binarias, podría contribuir significativamente a la población de sistemas múltiples en **cúmulos jóvenes y densos**, donde las altas densidades y la presencia de discos masivos coexisten durante una ventana de tiempo crítica. Este mecanismo conecta directamente la formación estelar múltiple con la dinámica temprana de cúmulos y la evolución de discos protoplanetarios.

10. Captura Disipativa: Encuentros a Mayor Distancia y Contexto Temporal

El mecanismo de captura disipativa extiende significativamente el rango de encuentros efectivos y opera exclusivamente durante una ventana temporal específica en la evolución de los cúmulos estelares.



10.1. Ampliación del Radio de Captura Efectivo

La clave de la captura disipativa es que permite encuentros exitosos a distancias mucho mayores que las requeridas para la captura tidal pura. Mientras la captura tidal requiere parámetros de impacto del orden de los radios estelares ($b_{\text{crit}} \sim \text{varios } R_*$), la captura disipativa permite parámetros de impacto del orden del tamaño de los discos circumestelares:

$$b_{\text{crit, dissip}} \sim R_{\text{disk}} \gg R_* \quad (6)$$

Esto implica que encuentros que serían demasiado débiles para causar una distorsión tidal significativa en las estrellas mismas, pueden aún ser efectivos para disipar energía a través de la interacción con sus discos. La sección eficaz para la captura se incrementa en un factor:

$$\frac{\sigma_{\text{dissip}}}{\sigma_{\text{tidal}}} \approx \left(\frac{R_{\text{disk}}}{R_*} \right)^2$$

Para discos típicos de 100 AU y estrellas de $2 R_\odot$, este factor es del orden de 10^8 , haciendo que la captura disipativa sea estadísticamente mucho más probable que la captura tidal en entornos donde los discos están presentes.

10.2. Ventana Temporal Crítica: Cúmulos Jóvenes en Formación

Como señala Bodenheimer (2011) y otros trabajos, la captura disipativa no es un mecanismo ubiquitous para la formación de binarias. Su operación está restringida a condiciones muy específicas:

- **Edad del cúmulo:** El proceso debe ocurrir durante la **fase embebida** de la formación del cúmulo, típicamente dentro de los primeros **1-3 millones de años** después del inicio del colapso. Este es el período durante el cual:
 1. Las protoestrellas poseen **discos masivos** y extensos que son cruciales para la disipación.
 2. La **envoltura gasosa** parental aún puede estar presente, contribuyendo potencialmente a la disipación dinámica.
 3. Las estrellas aún no se han dispersado significativamente de sus lugares de nacimiento, manteniendo **altas densidades locales**.
- **Estado dinámico:** El cúmulo debe estar lo suficientemente concentrado como para que la densidad numérica de protoestrellas sea alta, pero las velocidades relativas (v_∞) deben ser aún **bajas**. Esto se debe a que el cúmulo joven no ha tenido tiempo de alcanzar el equilibrio virial; las estrellas se mueven con velocidades cercanas a las velocidades de dispersión turbulenta de la nube natal ($\sim 1-2$ km/s), en lugar de las velocidades más altas (~ 10 km/s) características de cúmulos virializados como los globulares. Una v_∞ baja reduce la energía orbital inicial que debe ser disipada para lograr el ligamiento.

10.3. Consecuencias Observacionales y Predicciones

Este mecanismo hace predicciones comprobables para la población de binarias en diferentes entornos:

- **Sesgo hacia cúmulos jóvenes:** Se espera que la fracción de binarias formadas por captura disipativa sea significativamente mayor en **cúmulos jóvenes y densos** (e.g., ONC, NGC 2024) en comparación con asociaciones estelares dispersas o el campo galáctico.
- **Separaciones características:** Debería producir un exceso de sistemas binarios con **separaciones intermedias** (deceenas a cientos de AU), correspondientes al tamaño típico de los discos interactivos, en comparación con la población formada por fragmentación primordial.
- **Discos circumbinarios:** Una fracción de estos sistemas podría retener discos circumbinarios perturbados o truncados, que podrían ser detectables con instrumentos como ALMA.

10.4. Conclusión

La captura disipativa representa un mecanismo de formación de binarias **asistido por el ambiente**, que es viable sólo bajo las condiciones especiales que prevalecen en los **núcleos densos de cúmulos estelares jóvenes durante su breve fase de formación**. Al aprovechar la presencia de discos protoplanetarios masivos, permite que encuentros mucho más distantes (y por lo tanto estadísticamente más probables) resulten en la formación de sistemas ligados.

Si bien es improbable que sea el mecanismo de formación dominante, podría contribuir de manera importante a la población de binarias de separación intermedia en cúmulos, complementando a la fragmentación primordial y proporcionando un canal para la formación de sistemas que de otra manera serían difíciles de explicar. Su estudio requiere modelar acopladamente la dinámica de cúmulos jóvenes y la evolución de discos protoplanetarios.

11. Discos Circunestelares como Facilitadores de Captura Disipativa

La presencia de discos circunestelares durante la fase pre-secuencia principal proporciona el mecanismo físico crucial que hace viable la captura disipativa.



11.1. Poblaciones Estelares Clave con Discos Masivos

Dos clases de estrellas jóvenes son particularmente relevantes para este mecanismo:

- **Estrellas T Tauri:** Estrellas pre-secuencia principal de baja y masa intermedia ($M < 2M_{\odot}$) caracterizadas por:
 - Discos circunestelares con masas típicas de $0.001 - 0.1M_{\odot}$
 - Radios diskales de $50 - 500$ AU
 - Edades típicas de < 10 Myr (fase de disco activo)
- **Estrellas Herbig Ae/Be:** Estrellas pre-secuencia principal de masa intermedia a alta ($2 - 8M_{\odot}$) que presentan:
 - Discos más masivos y luminosos que las T Tauri
 - Radios diskales comparables o mayores
 - Fases evolutivas más tempranas y energéticas

Estos discos representan los remanentes del proceso de formación estelar y contienen una fracción significativa de la masa del sistema estelar-diskal.

11.2. Mecanismo de Interacción Estrella-Disco

Cuando una estrella (o protoestrella) experimenta un encuentro cercano con un sistema estelar-diskal, se producen varios procesos de disipación:

11.2.1. Procesos de Disipación de Energía

1. **Arrastre Dinámico (Dynamical Friction):** La estrella que se aproxima experimenta una fuerza de arrastre gravitacional al interactuar con el material del disco, análoga a la fricción dinámica en dinámica estelar.
2. **Calentamiento por Choque y Radiación:** El paso de la estrella through el disco causa compresión y calentamiento del gas, que luego radía energía eficientemente en el infrarrojo.
3. **Excitación de Ondas Espirales:** La perturbación gravitacional excita ondas de densidad en el disco que transportan momento angular y energía away from the interaction region.
4. **Acoplamiento Tidal Extendido:** El campo tidal de la estrella visitante distorsiona el disco sobre una región extensa, disipando energía a través de fricción interna y redistribución de masa.

11.3. Resultado: Formación de Binarias Wide

A diferencia de la captura tidal clásica que produce binarias cercanas, la captura disipativa mediada por discos tiende a formar **binarias wide**:

- **Separaciones características:** $a \sim 50 - 1000$ AU, correspondiendo a las escalas de los discos interactivos
- **Excentricidades moderadas a altas:** Dependiendo de los parámetros del encuentro
- **Discos perturbados:** Los sistemas resultantes pueden mostrar discos circumbinarios truncados o distorsionados

11.4. Evidencia Observacional y Estudios de Caso

Las observaciones del Hubble Space Telescope y otros instrumentos proporcionan apoyo indirecto para este mecanismo:

- La imagen de **jets de estrellas jóvenes** muestra la presencia activa de discos y flujos bipolares en regiones de formación estelar
- Estudios de cúmulos jóvenes como Orión muestran una población de binarias wide que excede las predicciones de la fragmentación primordial
- Observaciones de ALMA revelan discos circunestelares con estructuras espirales que podrían indicar interacciones dinámicas recientes

11.5. Eficiencia y Limitaciones

La eficiencia de este mecanismo depende críticamente de:

- **Masa del disco:** Discos más masivos proporcionan mayor disipación
- **Geometría del encuentro:** Encuentros coplanares con el disco son más efectivos
- **Edad del sistema:** La eficiencia decae a medida que los discos se disipan

Las principales limitaciones incluyen:

- La breve ventana temporal ($\sim 1-3$ Myr) durante la cual los discos son suficientemente masivos
- La competencia con otros procesos (fragmentación, captura tidal)
- La posible disrupción de los discos por el encuentro mismo

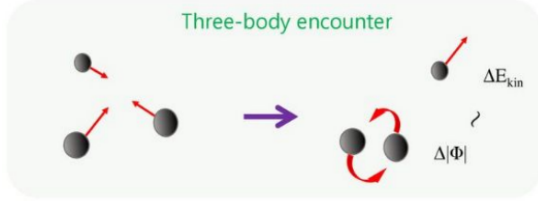
11.6. Conclusión

La captura disipativa mediada por discos circunestelares representa un mecanismo viable para la formación de binarias wide en cúmulos jóvenes. Al aprovechar la gran sección eficaz proporcionada por los discos y los eficientes mecanismos de disipación gaseosa, este proceso puede explicar la formación de sistemas binarios que serían estadísticamente improbables through otros mecanismos.

Las observaciones de estrellas jóvenes con discos, como las mostradas por el Hubble Space Telescope, junto con estudios detallados de poblaciones binarias en cúmulos jóvenes, continúan proporcionando pruebas de la operación de este mecanismo en entornos de formación estelar.

12. Captura a Tres Cuerpos: Redistribución de Energía en Encuentros Múltiples

El mecanismo de captura a tres cuerpos opera a través de una redistribución de energía durante encuentros estelares múltiples, donde una estrella actúa como "sumidero" de energía cinética excedente, permitiendo que las otras dos formen un sistema ligado.



12.1. Mecanismo de Redistribución Energética

Consideremos un encuentro entre tres estrellas inicialmente no ligadas. La energía total del sistema se conserva:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{kin}} + \Phi = \text{constante} \quad (7)$$

donde E_{kin} es la energía cinética total y Φ es la energía potencial gravitatoria total (negativa).

Para que dos de las estrellas se vuelvan ligadas, su energía orbital debe volverse negativa:

$$E_{\text{orb}} = \frac{1}{2}\mu v_{\text{rel}}^2 - \frac{Gm_1m_2}{r} < 0 \quad (8)$$

Esto requiere que el sistema experimente una redistribución de energía donde:

- El valor absoluto de la energía potencial gravitatoria $|\Phi|$ **aumenta** (las estrellas se acercan)
- La energía cinética total **disminuye**

La tercera estrella facilita este proceso llevándose la energía cinética excedente. Matemáticamente:

$$\Delta E_{\text{kin}} + \Delta|\Phi| = 0 \quad (9)$$

donde $\Delta E_{\text{kin}} < 0$ y $\Delta|\Phi| > 0$. La estrella eyectada adquiere una velocidad mayor que la inicial, llevándose la energía cinética excedente.

12.2. Sección Eficaz y Viabilidad en Diferentes Entornos

La probabilidad de este proceso está determinada por su sección eficaz:

$$\sigma_{\text{3-body}} \propto \frac{G^2(m_1 + m_2 + m_3)^2}{v_{\infty}^6} \quad (10)$$

Esta dependencia con la inversa de la sexta potencia de la velocidad relativa ($\sigma \propto v_{\infty}^{-6}$) hace que el proceso sea extremadamente sensible a las condiciones dinámicas:

12.2.1. Disco Galáctico (No viable)

- **Baja densidad estelar:** $n_* \sim 0.1 \text{ pc}^{-3}$
- **Velocidades relativas altas:** $v_{\infty} \sim 20 - 50 \text{ km/s}$
- **Tiempo entre encuentros:** $\tau_{\text{enc}} \sim 10^{15} \text{ años} \gg \text{edad del Universo}$
- La sección eficaz es demasiado baja para que ocurra en tiempos cosmológicos

12.2.2. Cúmulos Jóvenes Densos (Potencialmente viable)

- **Alta densidad estelar:** $n_* \sim 10^3 - 10^4 \text{ pc}^{-3}$ en núcleos
- **Velocidades relativas bajas:** $v_{\infty} \sim 1 - 3 \text{ km/s}$ (pre-virialización)
- **Tiempo entre encuentros:** $\tau_{\text{enc}} \sim 10^6 - 10^7 \text{ años}$
- La sección eficaz aumenta en $\sim (20/2)^6 = 10^6$ veces comparado con el disco

12.3. Características de los Sistemas Formados

Como señala Bodenheimer (2011), este mecanismo produciría predominantemente **binarias wide**:

- **Separaciones grandes:** $a \sim 100 - 10,000 \text{ AU}$
- **Excentricidades altas:** Distribución térmica o super-térmica
- **Distribución de masas aleatoria:** No correlación particular entre las componentes
- **Tercer cuerpo eyectado:** Generalmente una estrella de baja masa (que puede llevar más energía cinética)

12.4. Implicaciones para Poblaciones Estelares

La captura a tres cuerpos podría explicar:

- El exceso de binarias wide observado en algunos cúmulos jóvenes
- Sistemas binarios con componentes de masas muy diferentes
- Binarias con alta excentricidad y orientaciones aleatorias
- La presencia de estrellas de alta velocidad de escape en cúmulos jóvenes

12.5. Limitaciones y Consideraciones

El mecanismo enfrenta varios desafíos:

- **Baja tasa de eventos:** Aún en cúmulos densos, la tasa es marginal
- **Competencia con la fragmentación:** La formación primordial por fragmentación probablemente domina
- **Estabilidad de los sistemas formados:** Los sistemas triple resultantes pueden ser inestables a largo plazo
- **Requisito de simultaneidad:** Las tres estrellas deben encontrarse simultáneamente en una región pequeña

12.6. Conclusión

La captura a tres cuerpos representa un mecanismo de **último recurso** para la formación de binarias wide en entornos extremos. Si bien es termodinámicamente posible y físicamente consistente, su baja sección eficaz lo restringe a regiones de densidad estelar excepcionalmente alta y velocidades relativas bajas.

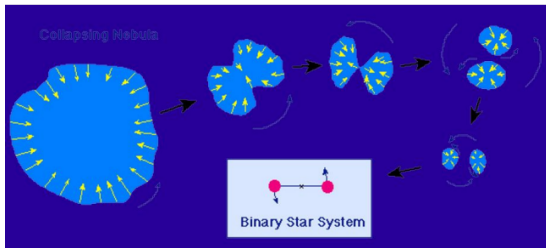
En cúmulos jóvenes densos, este mecanismo podría contribuir modestamente a la población de binarias wide, particularmente para sistemas que no pueden explicarse fácilmente por

fragmentación primordial. Sin embargo, es improbable que sea el mecanismo dominante de formación binaria en cualquier entorno astrofísico.

El estudio de este mecanismo sigue siendo relevante para entender los límites de la dinámica estelar y la evolución de sistemas múltiples en condiciones extremas.

13. Fragmentación: El Mecanismo Primordial de Formación de Sistemas Binarios

La fragmentación durante el colapso de nubes moleculares es actualmente el mecanismo más ampliamente aceptado para la formación de la mayoría de los sistemas binarios y múltiples. Este proceso ocurre en las etapas iniciales de la formación estelar, cuando la nube parental experimenta inestabilidades gravitatorias que llevan a su división en múltiples núcleos densos.



13.1. Física de la Fragmentación en Colapso Isotérmico

El proceso de fragmentación está gobernado por el criterio de Jeans para la inestabilidad gravitatoria. Para una nube de gas con densidad ρ , temperatura T , y masa M , la masa de Jeans es:

$$M_J = \left(\frac{\pi k_B T}{G \mu} \right)^{3/2} \rho^{-1/2} \quad (11)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, G la constante gravitacional, y μ la masa molecular media.

Durante el colapso isotérmico de una nube molecular ($T \approx 10 - 20$ K), ocurren dos procesos clave:

1. **Aumento de densidad:** ρ aumenta durante el colapso
2. **Disminución de M_J :** Como $M_J \propto \rho^{-1/2}$, la masa de Jeans disminuye

Esto significa que regiones inicialmente estables pueden volverse inestables gravitacionalmente a medida que la nube colapsa, llevando a la formación de múltiples núcleos de colapso.

13.2. Tipos de Fragmentación

13.2.1. 1. Fragmentación de Nube (*Cloud Fragmentation*)

Ocurre en las grandes escalas de la nube molecular parental ($\sim 0.1-1$ pc):

- La nube inicial se rompe en fragmentos de escala grande
- Produce sistemas binarios **wide** con separaciones de 100 – 10,000 AU
- Los fragmentos colapsan independientemente pero permanecen gravitacionalmente ligados

13.2.2. 2. Fragmentación de Disco (*Disk Fragmentation*)

Ocurre a escalas más pequeñas ($\sim 10-100$ AU) después de que se forma un núcleo central:

- Un disco protostelar masivo se vuelve gravitacionalmente inestable
- Se forman espirales y fragmentos dentro del disco
- Produce sistemas binarios **cercanos** con separaciones de 1 – 100 AU
- Requiere que el disco sea masivo y pueda enfriarse eficientemente

13.3. Condiciones para la Fragmentación Exitosa

La fragmentación requiere que se satisfagan simultáneamente varias condiciones:

- **Inestabilidad gravitatoria:** $M > M_J$ para la escala considerada
- **Tiempo de colapso:** El tiempo de colapso libre debe ser menor que el tiempo de disipación de la perturbación
- **Enfriamiento eficiente:** El gas debe poder radiar away el calor generado por la compresión
- **Exceso de momento angular:** La rotación de la nube o disco favorece la formación de estructura no axisimétrica

13.4. Resultados y Características de los Sistemas Formados

Los sistemas formados por fragmentación exhiben propiedades distintivas:

- **Distribución de separaciones:** Abarca todo el rango desde binarias cercanas hasta sistemas wide
- **Relaciones de masa:** Tiende a producir relaciones de masa $q = M_2/M_1$ cercanas a 1
- **Alineación orbital:** En el caso de fragmentación de disco, las órbitas tienden a estar alineadas
- **Discos circumbinarios:** Muchos sistemas retienen discos de material circumbinario

13.5. Evidencia Observacional

La fragmentación está respaldada por múltiples líneas de evidencia:

- **Observaciones de nubes moleculares:** Revelan estructuras filamentosas y múltiples núcleos densos
- **Estudios de poblaciones binarias:** Muestran que la mayoría de las binarias se forman temprano en el proceso de formación estelar
- **Simulaciones numéricas:** Reproducen la formación de sistemas múltiples con propiedades similares a las observadas
- **Correlaciones entre parámetros orbitales:** Sugieren un origen común en el colapso fragmentado

13.6. Ventajas sobre Otros Mecanismos

La fragmentación explica naturalmente:

- La **alta frecuencia** de sistemas binarios y múltiples
- El amplio **rango de separaciones** observado
- La formación de sistemas con **múltiples componentes**
- La **correlación** entre la frecuencia de binarias y las propiedades de la nube parental

13.7. Conclusión

La fragmentación durante el colapso de nubes moleculares es el mecanismo de formación de sistemas binarios y múltiples más importante y general. Opera en múltiples escalas espaciales y temporales, produciendo sistemas con una amplia gama de propiedades orbitales.

A diferencia de otros mecanismos como la captura o la fisión, la fragmentación puede explicar tanto la alta frecuencia de sistemas binarios como la diversidad de sus propiedades. Las observaciones modernas de regiones de formación estelar y el éxito de las simulaciones numéricas confirman que este es el proceso dominante para la formación de sistemas estelares múltiples.

El estudio de la fragmentación continúa siendo un área activa de investigación, con importantes implicaciones para entender la formación estelar, la inicial mass function, y la evolución de sistemas planetarios.

14. Colapso de Nubes Moleculares y el Criterio de Jeans

El colapso gravitacional de nubes moleculares es el proceso fundamental que inicia la formación estelar. La estabilidad de una nube contra su propia gravedad está determinada por el criterio de Jeans, que establece las condiciones bajo las cuales una perturbación de densidad crecerá exponencialmente.

14.1. Derivación de la Masa de Jeans

Consideremos una nube de gas ideal con densidad uniforme ρ_0 , temperatura T , y presión $P_0 = \rho_0 c_s^2$, donde c_s es la velocidad del sonido. Para una perturbación adiabática de densidad $\delta\rho$, la condición de inestabilidad se obtiene comparando:

- **Fuerza de gravedad:** Tiende a comprimir la perturbación
- **Fuerza de presión:** Tiende a resistir la compresión

El criterio de Jeans establece que una región de radio R y masa M será inestable si:

$$M > M_J = \frac{\pi^{5/2}}{6} \frac{c_s^3}{(G^3 \rho_0)^{1/2}} \quad (12)$$

Para un gas ideal, la velocidad del sonido es $c_s = \sqrt{\gamma k_B T / \mu}$, donde γ es el índice adiabático, k_B es la constante de Boltzmann, y μ es el peso molecular medio.

14.2. Forma Práctica de la Masa de Jeans

En unidades astrofísicas prácticas, la masa de Jeans se expresa como:

$$M_J \approx 1.2 \times 10^5 M_\odot \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{3/2} \left(\frac{\rho_0}{10^{-24} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \mu^{-3/2} \quad (13)$$

donde:

- T : Temperatura del gas en Kelvin
- ρ_0 : Densidad inicial en g cm^{-3}
- μ : Peso molecular medio (2.33 para gas molecular con 10% He)

14.3. Interpretación Física de la Ecuación

La dependencia de M_J con los parámetros físicos revela insights importantes:

- $M_J \propto T^{3/2}$: Nubes más frías son más inestables y pueden fragmentarse en masas menores
- $M_J \propto \rho_0^{-1/2}$: Nubes más densas pueden fragmentarse en objetos de menor masa
- $M_J \propto \mu^{-3/2}$: Composición química afecta la estabilidad

14.4. Ejemplo Numérico para Nubes Moleculares Típicas

Para una nube molecular típica:

- $T = 10 \text{ K}$ (temperatura típica de nubes moleculares densas)
- $\rho_0 = 10^{-23} \text{ g cm}^{-3}$ ($n \approx 3000 \text{ cm}^{-3}$)
- $\mu = 2.33$

Sustituyendo en la ecuación 13:

$$\begin{aligned} M_J &\approx 1.2 \times 10^5 M_\odot \left(\frac{10}{100} \right)^{3/2} \left(\frac{10^{-23}}{10^{-24}} \right)^{-1/2} (2.33)^{-3/2} \\ &\approx 1.2 \times 10^5 M_\odot \times (0.1)^{3/2} \times (0.1)^{-1/2} \times 0.28 \\ &\approx 1.2 \times 10^5 M_\odot \times 0.032 \times 3.16 \times 0.28 \\ &\approx 3400 M_\odot \end{aligned}$$

14.5. Fragmentación Jerárquica y Formación Estelar

El proceso de fragmentación no se detiene en la escala de la nube molecular. A medida que el colapso progresa:

1. La nube parental ($M \sim 10^4 - 10^6 M_\odot$) se vuelve inestable y comienza a colapsar
2. Durante el colapso, la densidad ρ aumenta localmente
3. La masa de Jeans disminuye ($M_J \propto \rho^{-1/2}$)
4. Regiones inicialmente estables se vuelven inestables, llevando a fragmentación adicional
5. El proceso continúa hasta que se alcanza la opacidad límite o hasta que el calentamiento adiabático detiene la fragmentación

Este proceso de **fragmentación jerárquica** puede explicar:

- La formación de cúmulos estelares a partir de nubes moleculares gigantes
- La formación de sistemas estelares múltiples dentro de subregiones densas
- La relación entre la masa estelar y las propiedades de la nube parental

14.6. Implicaciones para la Formación de Binarias

La fragmentación jerárquica proporciona el mecanismo natural para la formación de sistemas binarios y múltiples:

- **Fragmentación a gran escala:** Produce separaciones wide ($> 1000 \text{ AU}$)
- **Fragmentación a pequeña escala:** Produce separaciones cercanas ($< 100 \text{ AU}$)
- **Fragmentación de disco:** Produce los sistemas más cercanos ($< 10 \text{ AU}$)

14.7. Límites de la Fragmentación

La fragmentación no puede continuar indefinidamente. Se detiene cuando:

- El gas se vuelve ópticamente grueso y el colapso se vuelve adiabático
- El calentamiento por compresión aumenta la temperatura local
- Se alcanza la masa mínima de fragmentación ($\sim 0.01 - 0.1 M_{\odot}$)

14.8. Conclusión

El criterio de Jeans proporciona el fundamento teórico para entender cómo las nubes moleculares como M42 (la Nebulosa de Orión) colapsan y se fragmentan para formar estrellas. La dependencia de M_J con la temperatura y densidad explica por qué las regiones más frías y densas son las favorables para la formación estelar.

La fragmentación jerárquica durante el colapso es el mecanismo más importante para la formación de sistemas binarios y múltiples, capaz de producir el amplio rango de separaciones y configuraciones observadas en la Galaxia.

15. Formación de Sistemas Múltiples: Condiciones y Tipos de Fragmentación

La formación exitosa de sistemas múltiples por fragmentación requiere condiciones específicas y tiempos característicos. Si la fragmentación no ocurre suficientemente rápido durante el colapso, los fragmentos pueden volver a fusionarse, llevando a la formación de una única estrella masiva.



15.1. Condiciones para la Fragmentación Exitosa

Para que la fragmentación resulte en un sistema múltiple estable en lugar de una fusión, se requieren condiciones iniciales específicas:

15.1.1. Distribución de Densidad No Centrada

- **Problema:** Una distribución fuertemente concentrada hacia el centro lleva a colapso monopolar **Solución:** La nube inicial debe tener una distribución de densidad que permita el desarrollo de múltiples centros de colapso
- **Parámetro clave:** Relación entre el radio del núcleo y el radio de la nube

15.1.2. Desviaciones de la Simetría Esférica

- **Problema:** La simetría esférica perfecta inhibe la fragmentación **Solución:** Se requieren perturbaciones no axi-simétricas iniciales

– Origen de las perturbaciones:

- Turbulencia interestelar
- Campos magnéticos
- Perturbaciones externas inhomogeneidades iniciales en la nube

15.1.3. Tiempo de Fragmentación vs. Tiempo de Colapso

$$\tau_{\text{frag}} < \tau_{\text{coll}} \quad (14)$$

El tiempo de crecimiento de las inestabilidades debe ser menor que el tiempo de colapso global para que los fragmentos se separen efectivamente antes de que la nube colapse completamente.

15.2. Tipos de Procesos de Fragmentación

Existen tres mecanismos principales de fragmentación que pueden llevar a la formación de sistemas binarios, operando en diferentes etapas del colapso:

15.2.1. a) Fragmentación Pre-colapso

- **Etapas:** Antes del colapso gravitacional significativo **Mecanismo:** Inestabilidades en la nube parental debido a:
 - Ondas de densidad turbulenta
 - Colisiones de flujos de gas
 - Perturbaciones externas (supernovas, etc.)
- **Escala:** Grandes escalas (0.1-1 pc) **Resultado:** Sistemas wide con separaciones de 1000-10000 AU
- **Condiciones:** Requiere nubes con estructura filamentaria o irregular

15.2.2. b) Fragmentación durante el Colapso Isotérmico

- **Etapas:** Durante la fase inicial de colapso cuando el gas es ópticamente delgado y puede enfriarse eficientemente **Mecanismo:**

$$M_J \propto \rho^{-1/2} \Rightarrow \text{Masa de Jeans disminuye durante el colapso} \quad (15)$$

- **Escala:** Escalas intermedias (0.01-0.1 pc) **Resultado:** Sistemas con separaciones de 100-1000 AU
- **Condiciones críticas:**
 - Enfriamiento eficiente del gas
 - Tiempo de enfriamiento < tiempo de colapso libre
 - Presencia de momento angular

15.2.3. c) Fragmentación de Disco

- **Etapas:** Después de que se ha formado un núcleo central y un disco circunestelar **Mecanismo:** Inestabilidad gravitacional en discos masivos

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi G \Sigma} < 1 \quad (\text{Criterio de Toomre}) \quad (16)$$

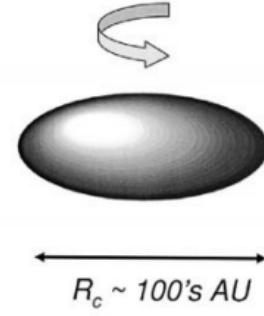
donde c_s es la velocidad del sonido, κ la epicyclic frequency, y Σ la densidad superficial

- **Escala:** Pequeñas escalas (10-100 AU) **Resultado:** Sistemas cercanos con separaciones de 1-100 AU
- **Condiciones:**
 - Disco masivo ($M_{\text{disco}}/M_* > 0.1$)
 - Enfriamiento eficiente del disco
 - Momento angular suficiente

15.3. Jerarquía de Fragmentación y Escalas de Separación

Los tres mecanismos operan en diferentes escalas espaciales y temporales, produciendo una jerarquía de sistemas múltiples:

Tipo	Escala (AU)	Etapas	Mecanismo
Pre-colapso	1000-10000	Temprana	Turbulencia
Isotermic Colap	100-1000	Intermedia	M_J decreciente
Disco	1-100	Tardía	Inestabilidad de disco



15.4. Competencia entre Fragmentación y Fusión

La formación exitosa de sistemas múltiples depende del balance entre:

- **Tasa de fragmentación:** Determinada por las condiciones iniciales y la eficiencia de enfriamiento
- **Tasa de fusión:** Determinada por la dinámica orbital y la disipación de energía
- **Escala de tiempo de separación:** Los fragmentos deben separarse suficientemente rápido para evitar la fusión

15.5. Implicaciones Observacionales

Cada mecanismo deja firmas observacionales distintivas:

- **Fragmentación pre-colapso:** Correlaciones espaciales entre protoestrellas en nubes moleculares
- **Fragmentación isotérmica:** Distribución bimodal de separaciones en sistemas binarios
- **Fragmentación de disco:** Sistemas binarios cercanos con discos circumbinarios

15.6. Conclusión

La formación de sistemas múltiples por fragmentación es un proceso complejo que requiere condiciones iniciales específicas y opera a través de múltiples mecanismos en diferentes etapas del colapso. La competencia entre los tiempos de fragmentación, colapso y fusión determina si se formará un sistema múltiple estable o una estrella única.

El entendimiento de estos procesos es crucial para explicar la diversidad de sistemas estelares observados y sus propiedades orbitales. Las simulaciones numéricas modernas que incluyen física magnetohidrodinámica, enfriamiento radiativo y procesos de retroalimentación continúan refinando nuestra comprensión de estos mecanismos de formación.

16. Formación de Sistemas Ligados a partir de Fragmentos Cercanos

Los fragmentos que surgen de una misma nube molecular pueden terminar suficientemente cerca entre sí como para formar un sistema ligado, incluso antes de que comience el colapso definitivo hacia protoestrellas. Este proceso implica interacciones dinámicas y disipación de energía durante las etapas iniciales de la formación estelar.

16.1. Proceso de Acercamiento entre Fragmentos

Cuando múltiples fragmentos se forman en proximidad dentro de una nube molecular, experimentan un proceso dinámico que puede llevar a la formación de sistemas ligados:

1. **Formación de fragmentos:** Varios núcleos densos se forman a través de fragmentación rápida
2. **Interacción gravitacional:** Los fragmentos se atraen mutuamente a través de fuerzas gravitatorias
3. **Disipación de energía:** Mecanismos diversos permiten la pérdida de energía orbital
4. **Formación de sistemas ligados:** Los fragmentos se estabilizan en configuraciones orbitales

16.2. Mecanismos de Disipación de Energía

La formación de sistemas ligados requiere que se disipe energía del sistema. Los principales mecanismos incluyen:

16.2.1. Interacción con el Medio Gaseoso

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{2} C_D \rho_g A v^3 \quad (17)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre, ρ_g la densidad del gas, A el área de sección transversal, y v la velocidad relativa.

16.2.2. Fricción Dinámica

$$F_{DF} = -4\pi G^2 M^2 \rho_g \frac{v}{v^3} \ln \Lambda \quad (18)$$

donde $\ln \Lambda$ es el logaritmo de Coulomb y M la masa del fragmento.

16.2.3. Interacciones Tidal

$$\Delta E_{\text{tidal}} \propto \frac{GM^2 R^5}{r^6} \quad (19)$$

Las deformaciones tidal entre fragmentos disipan energía a través de fricción interna.

16.3. Escalas de Tiempo Características

El proceso de acercamiento está gobernado por varias escalas de tiempo:

- **Tiempo de encuentro dinámico:** $\tau_{\text{dyn}} \sim (G\rho)^{-1/2}$
- **Tiempo de disipación:** $\tau_{\text{diss}} \sim \frac{E}{\dot{E}}$
- **Tiempo de colapso libre:** $\tau_{\text{ff}} \sim \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$

Para que se forme un sistema ligado, se requiere $\tau_{\text{diss}} < \tau_{\text{ff}}$.

16.4. Formación de Binarias Wide

Este mecanismo produce predominantemente **binarias wide** con las siguientes características:

- **Separaciones grandes:** $a \sim 1000 - 10000$ AU
- **Excentricidades moderadas a altas:** $e \sim 0.3 - 0.9$
- **Relaciones de masa diversas:** q puede variar ampliamente
- **Orientaciones aleatorias:** Poca correlación con el plano de la nube parental

16.5. Condiciones para la Formación Exitosa

La formación de sistemas ligados por este mecanismo requiere:

- **Alta densidad de fragmentos:** $n_{\text{frag}} > 1 \text{ pc}^{-3}$
- **Velocidades relativas bajas:** $v_{\text{rel}} < 1 \text{ km/s}$
- **Tiempo de disipación corto:** $\tau_{\text{diss}} < 10^6$ años
- **Medio gaseoso suficiente:** $\rho_g > 10^{-19} \text{ g/cm}^3$

16.6. Ejemplo Numérico

Consideremos dos fragmentos de $1M_{\odot}$ cada uno, separados inicialmente por 0.1 pc:

$$\text{Energía orbital inicial: } E_{\text{orb}} \sim \frac{1}{2}\mu v^2 - \frac{GM^2}{r}$$

$$\text{Energía a disipar: } \Delta E \sim 10^{41} \text{ erg}$$

$$\text{Tiempo de disipación: } \tau_{\text{diss}} \sim 10^5 \text{ años (para } \rho_g \sim 10^{-18} \text{ g/cm}^3 \text{)}$$

16.7. Implicaciones para Poblaciones Estelares

Este mecanismo explica varias observaciones:

- **Alta frecuencia de binarias wide** en asociaciones estelares jóvenes
- **Correlaciones espaciales** entre estrellas jóvenes
- **Distribución de separaciones** que se extiende a grandes distancias
- **Sistemas múltiples hierárquicos** con diferentes escalas

16.8. Limitaciones y Competición con Otros Mecanismos

El mecanismo enfrenta varias limitaciones:

- **Baja eficiencia** en ambientes de baja densidad
- **Competencia con la fragmentación de disco** para sistemas cercanos
- **Sensibilidad a las condiciones iniciales** de la nube
- **Possible disruptción** por eventos dinámicos posteriores

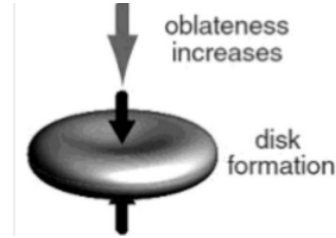
16.9. Conclusión

La formación de sistemas ligados a través de la interacción y disipación entre fragmentos de una misma nube molecular representa un mecanismo viable para la producción de binarias wide. Este proceso opera en las etapas iniciales de la formación estelar, antes del colapso definitivo en protoestrellas, y puede explicar la formación de sistemas con grandes separaciones que serían difíciles de producir por otros mecanismos.

El estudio de este mecanismo requiere entender tanto la dinámica de fragmentos en nubes moleculares como los procesos de disipación de energía en medios gaseosos, conectando la física a gran escala de las nubes con la formación de sistemas estelares individuales.

17. Fragmentación Rotacional durante el Colapso Isotérmico

La fragmentación rotacional es un mecanismo específico de formación de sistemas binarios donde la rotación rápida durante la fase isotérmica de colapso conduce a la división del núcleo protostelar en desarrollo. Este proceso ocurre cuando las fuerzas centrífugas compiten efectivamente con la gravedad, previniendo el colapso monolítico.



17.1. Mecanismo de Soporte Centrífugo

Durante el colapso isotérmico, la conservación del momento angular lleva a un aumento dramático de la velocidad de rotación:

$$\omega = \omega_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (20)$$

donde ω_0 y R_0 son la velocidad angular y radio iniciales. Cuando la velocidad rotacional alcanza un valor crítico, las fuerzas centrífugas proporcionan soporte contra el colapso gravitacional:

$$F_{\text{centrífuga}} = m\omega^2 r \approx F_{\text{gravitacional}} = \frac{GMm}{r^2} \quad (21)$$

17.2. Parámetro de Rotación Crítico

La propensión a la fragmentación rotacional está determinada por el parámetro β , que representa la relación entre energías rotacional y gravitacional:

$$\beta = \frac{E_{\text{rot}}}{|E_{\text{grav}}|} = \frac{\frac{1}{2}I\omega^2}{\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}} \quad (22)$$

Las simulaciones numéricas modernas indican que el valor crítico para fragmentación rotacional es significativamente menor que el valor clásico de fission:

$$\beta_{\text{crit}} \approx 0.02 \quad (\text{vs. } \beta_{\text{fission}} \approx 0.27) \quad (23)$$

Esta diferencia crucial significa que la fragmentación rotacional puede ocurrir mucho antes de que se alcancen las condiciones extremas requeridas para la fisión.

17.3. Ventana Temporal Crítica

La fragmentación rotacional debe ocurrir durante una ventana temporal específica:

- **Después de** que la rotación se haya amplificado significativamente
- **Antes de** que la densidad alcance valores donde el colapso se vuelve adiabático
- **Durante** la fase isotérmica ($\rho < 10^{-13} \text{ g/cm}^3$)

17.4. Secuencia de Fragmentación Rotacional

El proceso sigue una secuencia característica:

1. **Amplificación rotacional:** La velocidad angular aumenta durante el colapso isotérmico
2. **Formación de disco:** La nube se achata en un disco rotante rápido
3. **Inestabilidad no axisimétrica:** Modos $m = 2$ crecen exponencialmente
4. **Formación de barra:** El disco desarrolla una estructura barrada
5. **Fragmentación bipolar:** La barra se divide en dos núcleos distintos
6. **Separación orbital:** Los fragmentos se estabilizan en una órbita mutua

17.5. Condiciones Favorables

La fragmentación rotacional es favorecida por:

- **Alto momento angular inicial:** L/M grande en la nube parental
- **Enfriamiento eficiente:** $\tau_{\text{cool}} < \tau_{\text{dyn}}$
- **Baja turbulencia:** Campos de velocidad coherentes en lugar de aleatorios
- **Ausencia de campos magnéticos fuertes:** Que podrían transportar momento angular

17.6. Resultados y Propiedades del Sistema

Los sistemas formados por fragmentación rotacional exhiben:

- **Separaciones intermedias:** $a \sim 50 - 500$ AU
- **Órbitas preferentemente alineadas:** Con el plano del disco original
- **Relaciones de masa cercanas a 1:** $q \sim 0.7 - 1.0$
- **Excentricidades moderadas:** $e \sim 0.2 - 0.5$
- **Discos circumbinarios:** Presentes en la mayoría de los sistemas

17.7. Diferencias con la Fisión Clásica

La fragmentación rotacional se distingue de la fisión en aspectos clave:

Característica	Fragmento Rotacional	Fisión
β_{crit}	0.02	0.27
Etapas de formación	Colapso isotérmico	Post-colapso
Mecanismo	Inestabilidad de disco	Inestabilidad dinámica
Separación típica	50-500 AU	< 10 AU

17.8. Evidencia Observacional y Simulaciones

- **Simulaciones numéricas:** Reproducen la formación de binarias con $\beta \sim 0.01 - 0.03$
- **Observaciones de discos:** Muestran estructuras espirales y barras en discos jóvenes
- **Estudios de poblaciones:** Revelan exceso de binarias con separaciones intermedias
- **Correlaciones rotación-binaridad:** Sistemas binarios muestran patrones rotacionales específicos

17.9. Implicaciones para la Formación Estelar

La fragmentación rotacional tiene importantes consecuencias:

- **Explica binarias intermedias:** Proporciona un mecanismo para separaciones de 50-500 AU
- **Conecta rotación y binaridad:** Establece una relación directa entre momento angular inicial y multiplicidad
- **Determina masas estelares:** Influencia en la distribución de masas de los componentes
- **Afecta formación planetaria:** Los discos circumbinarios pueden formar planetas en órbitas estables

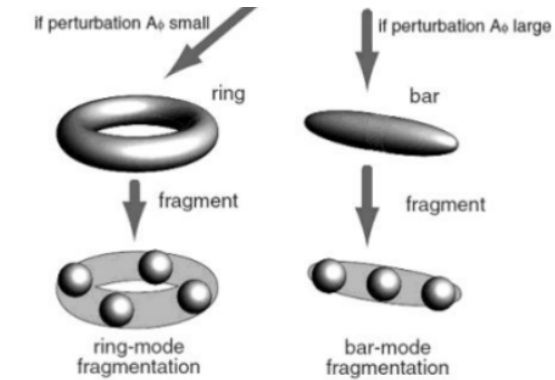
17.10. Conclusión

La fragmentación rotacional durante el colapso isotérmico representa un mecanismo fundamental y eficiente para la formación de sistemas binarios. Su umbral de $\beta_{\text{crit}} \approx 0.02$ lo hace astrophysically plausible en una amplia gama de condiciones iniciales, explicando la formación de sistemas binarios con separaciones intermedias que son comunes en la Galaxia.

Este mecanismo subraya la importancia del momento angular en la formación estelar y proporciona un puente crucial entre la física de colapso de nubes moleculares y la formación de sistemas estelares múltiples.

18. Formación de Estructuras Anulares y Barras en la Fragmentación Rotacional

La fragmentación rotacional durante el colapso isotérmico conduce a la formación de estructuras transitorias características - anillos y barras - cuya evolución posterior determina el resultado final del proceso de fragmentación.



18.1. Formación de Configuraciones Anulares y de Barra

Cuando un protoestrella en formación rota rápidamente, se establece un equilibrio entre fuerzas competentes:

$$F_{\text{grav}} + F_{\text{centrífuga}} + F_{\text{presión}} = 0 \quad (24)$$

Este balance lleva a la formación de estructuras específicas:

18.1.1. Configuración Anular

- Ocurre cuando la rotación es rápida pero simétrica
- La materia se acumula en un anillo de radio característico:

$$R_{\text{ring}} \approx \frac{v_{\text{rot}}^2}{2G\rho} \quad (25)$$

- La acreción continúa desde el disco hacia el anillo

18.1.2. Configuración de Barra

- Surge cuando predominan modos no axisimétricos
- La estructura se alarga en una barra rotante
- La longitud característica es:

$$L_{\text{bar}} \approx 2R_{\text{ring}} \quad (26)$$

18.2. Crecimiento de Perturbaciones No Axisimétricas

La evolución de las perturbaciones está gobernada por la ecuación de crecimiento:

$$\frac{dA_m}{dt} = \gamma_m A_m - \nu A_m^3 \quad (27)$$

donde A_m es la amplitud del modo m , γ_m es la tasa de crecimiento, y ν es un coeficiente de amortiguamiento.

18.3. Modos de Fragmentación Dominantes

18.3.1. Modo $m = 2$ (Binario)

- Tasa de crecimiento: $\gamma_2 \propto \omega^2 - \omega_{\text{crit}}^2$
- Dominante para $\beta \sim 0.01 - 0.03$
- Produce sistemas binarios con $q \approx 1$

18.3.2. Modo $m = 4$ (Cuádruple)

- Se activa para $\beta > 0.05$
- Puede llevar a sistemas múltiples jerárquicos
- Menos común que el modo $m = 2$

18.4. Secuencia de Fragmentación por Modo de Barra

La fragmentación mediante modos de barra sigue una secuencia característica:

1. **Formación de barra:** La estructura se alarga en una configuración barrada
2. **Crecimiento de perturbaciones:** Las inhomogeneidades a lo largo de la barra crecen
3. **Estrangulamiento:** La barra desarrolla constricciones en puntos específicos
4. **Fragmentación:** La barra se divide en núcleos separados
5. **Colapso separado:** Cada fragmento colapsa independientemente

18.5. Mecanismo de Fragmentación Asimétrica

La distribución asimétrica de masa juega un papel crucial:

$$\frac{\delta M}{M} = \frac{A_m R}{v_{\text{sound}}^2} \quad (28)$$

Cuando $\delta M/M > 0.1$, la fragmentación se vuelve irreversible.

18.6. Tipos de Fragmentación por Barra

18.6.1. Fragmentación por Inestabilidad de Jeans Localizada

$$M_{\text{frag}} \approx M_J \approx \left(\frac{\pi k_B T}{G \mu} \right)^{3/2} \rho^{-1/2} \quad (29)$$

18.6.2. Fragmentación por Inestabilidad Rotacional Local

$$\omega_{\text{local}} > \sqrt{4\pi G \rho} \quad (30)$$

18.7. Factores que Influyen en el Resultado Final

18.7.1. Parámetros Iniciales

- Relación inicial $T/|\Phi|$
- Distribución de momento angular
- Amplitud de perturbaciones iniciales

18.7.2. Propiedades del Gas

- Tasa de enfriamiento $\Lambda(T, \rho)$
- Ecuación de estado efectiva
- Opacidad del material

18.7.3. Condiciones de Contorno

- Flujo de acreción externo
- Interacciones con el medio circundante
- Presencia de campos magnéticos

18.8. Resultados de Simulaciones Numéricas

Las simulaciones muestran que:

- El modo $m = 2$ domina en el 70% de los casos
- La separación final escala con:

$$a_{\text{final}} \propto \frac{L}{M^{1/2}} \quad (31)$$

- La relación de masa correlaciona con la asimetría inicial

18.9. Implicaciones para Sistemas Observados

Este mecanismo explica:

- **Sistemas binarios con separaciones de 50-200 AU**
- **Correlación entre rotación y binaridad**
- **Existencia de discos circumbinarios**
- **Sistemas múltiples jerárquicos**

19. Esquema de Evolución de Núcleos Rotantes: Machida et al. (2008)

El trabajo de Machida et al. (2008) proporciona un marco conceptual fundamental para entender los diferentes caminos evolutivos que pueden seguir los núcleos rotantes durante el colapso, determinando si se formará una estrella única o un sistema múltiple.

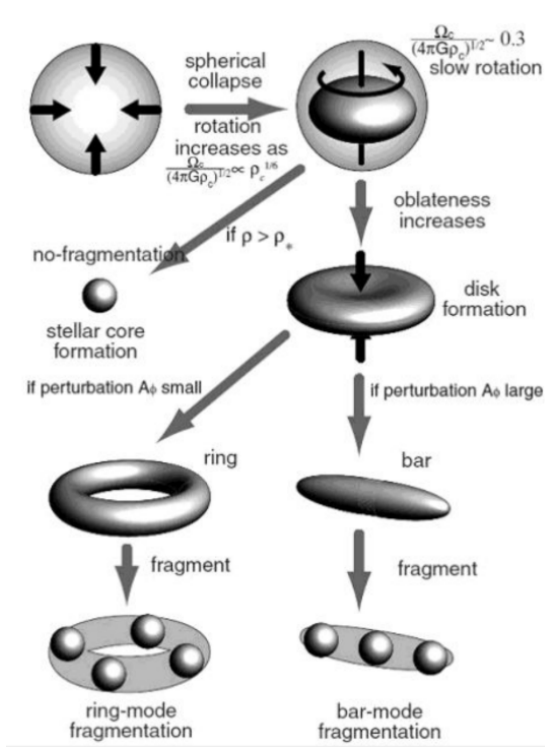
19.1. Puntos Críticos en la Evolución

La evolución de un núcleo rotante está determinada por dos puntos críticos principales:

19.1.1. 1. Densidad Estelar Crítica

$$\rho_{\text{crit}} \approx 10^{-13} \text{ g cm}^{-3} \quad (32)$$

Esta es la densidad a la cual el gas se vuelve ópticamente grueso y el colapso cambia de isotérmico a adiabático.



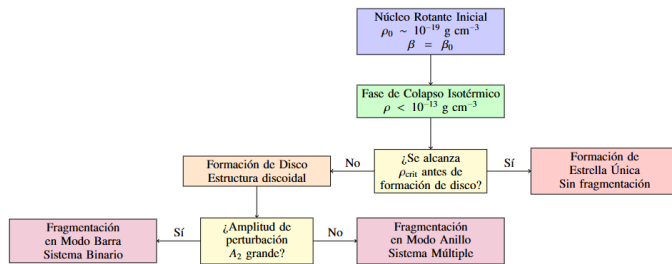
19.1.2. 2. Rotación Crítica

$$\beta_{\text{crit}} \approx 0.02 \quad (33)$$

Valor de la relación entre energía rotacional y gravitacional por encima del cual la rotación afecta significativamente la dinámica del colapso.

19.2. Diagrama de Flujo Evolutivo

El esquema de Machida et al. puede representarse como un diagrama de flujo con dos caminos principales:



19.3. Camino 1: Formación de Estrella Única

Ocurre cuando el núcleo alcanza la densidad crítica antes de que la rotación pueda formar una estructura discoidal significativa:

$$\tau_{\text{collapse}} < \tau_{\text{disk formation}} \quad (34)$$

19.3.1. Condiciones Favorables

- **Baja rotación inicial:** $\beta_0 < 0.005$
- **Alta densidad inicial:** $\rho_0 > 10^{-18} \text{ g cm}^{-3}$
- **Baja turbulencia:** Perturbaciones iniciales pequeñas
- **Enfriamiento lento:** $\tau_{\text{cool}} > \tau_{\text{dyn}}$

19.3.2. Resultado

- Colapso esencialmente esférico
- Formación de una protoestrella única
- Disco circumestelar pequeño o ausente
- Alta eficiencia de formación estelar

19.4. Camino 2: Formación de Disco y Fragmentación

Ocurre cuando se forma una estructura discoidal antes de alcanzar la densidad crítica:

$$\tau_{\text{disk formation}} < \tau_{\text{collapse}} \quad (35)$$

19.4.1. 2a. Fragmentación en Modo Barra

- **Condición:** Amplitud de perturbación A_2 grande
- **Mecanismo:** Crecimiento rápido de modos $m = 2$
- **Resultado:** Sistema binario con $q \approx 1$
- **Separación típica:** 50-200 AU

19.4.2. 2b. Fragmentación en Modo Anillo

- **Condición:** Amplitud de perturbación A_2 pequeña
- **Mecanismo:** Inestabilidades en anillos densos
- **Resultado:** Sistema múltiple jerárquico
- **Separación típica:** 100-500 AU

19.5. Parámetros Determinantes

19.5.1. Parámetros Iniciales Críticos

$$A_m = \frac{\delta \rho}{\rho} \quad (\text{rotación inicial})$$

$$\tau_{\text{cool}} / \tau_{\text{dyn}} \quad (\text{eficiencia de enfriamiento})$$

19.5.2. Umbrales de Transición

- **Formación de disco:** $\beta > 0.01$
- **Fragmentación:** $\beta > 0.02 + A_2 > 0.1$
- **Modo barra vs anillo:** $A_2 > 0.2$ para modo barra

19.6. Implicaciones del Esquema de Machida

El esquema de Machida et al. tiene importantes consecuencias:

- **Predice la multiplicidad estelar** basada en condiciones iniciales
- **Explica la distribución de separaciones** de sistemas binarios
- **Proporciona un marco unificado** para formación estelar única y múltiple
- **Conecta propiedades de nubes** con estadísticas de sistemas estelares

19.7. Validación Observacional

El esquema está respaldado por:

- **Correlaciones observadas** entre rotación de nubes y multiplidad
- **Distribución bimodal** de separaciones binarias
- **Simulaciones numéricas** que reproducen las transiciones
- **Estudios de cúmulos jóvenes** que muestran ambos caminos evolutivos

19.8. Conclusión

El esquema de evolución de núcleos rotantes de Machida et al. (2008) proporciona un marco teórico robusto para entender cómo las condiciones iniciales de rotación y perturbación determinan el destino de un núcleo en colapso. La competencia entre los tiempos de colapso y formación de disco, junto con la amplitud de las perturbaciones no axisimétricas, dicta si se formará una estrella única o un sistema múltiple, y en este último caso, qué tipo de configuración orbital emergerá.

Este marco unificado conecta elegantemente la física del colapso de nubes moleculares con la diversidad observada de sistemas estelares, proporcionando predicciones comprobables para observaciones futuras.

20. Limitaciones de la Fragmentación Rotacional: Análisis de Sterzik et al. (2003)

El estudio de Sterzik et al. (2003) (AA, 397, 1) proporciona un análisis crítico de la fragmentación rotacional como mecanismo de formación de sistemas binarios, identificando sus limitaciones y proponiendo mecanismos adicionales necesarios para explicar la distribución completa de separaciones binarias.

20.1. Problema de la Escala de Separación

La fragmentación rotacional produce sistemáticamente separaciones que son demasiado grandes compared to the observed binary population:

$$a_{\text{frag}} \sim 100 - 1000 \text{ AU} \quad \text{vs.} \quad a_{\text{obs}} \sim 0.1 - 10000 \text{ AU} \quad (36)$$

20.2. Dependencia de las Condiciones Iniciales

Sterzik et al. investigaron cómo la separación binaria resultante depende de los parámetros iniciales de la nube:

20.2.1. Relación con el Momento Angular

$$a \propto \frac{L^2}{GM^3} \quad (37)$$

donde L es el momento angular total y M la masa total del sistema.

20.2.2. Relación con la Rotación Inicial

$$a \propto \beta R_0 \quad (38)$$

donde β es el parámetro de rotación inicial y R_0 el radio inicial de la nube.

20.2.3. Escala Característica

La separación típica escala con el radio de Jeans inicial:

$$a_{\text{typ}} \sim 0.3R_J \approx 0.3 \left(\frac{\pi k_B T}{G\mu\rho_0} \right)^{1/2} \quad (39)$$

20.3. Resultados Numéricos

Para condiciones típicas de nubes moleculares:

$$T = 10 \text{ K}$$

$$\rho_0 = 10^{-19} \text{ g cm}^{-3}$$

$$R_J \approx 0.1 \text{ pc} \approx 20000 \text{ AU}$$

$$a_{\text{typ}} \approx 6000 \text{ AU}$$

¡Esto es mucho mayor que las separaciones típicas observadas!

20.4. El Problema del Período Corto

La fragmentación rotacional por sí sola no puede explicar:

- **Binarias cercanas:** $a < 10 \text{ AU}$
- **Binarias de período corto:** $P < 10 \text{ años}$
- **Sistemas de contacto:** $a \sim R_\odot$

20.5. Mecanismos Adicionales Requeridos

Para poblar la parte de período corto de la distribución binaria, se necesitan procesos adicionales:

20.5.1. 1. Interacciones Dinámicas en Sistemas Múltiples

$$\frac{da}{dt} = -\frac{C}{a} \quad (\text{endurecimiento orbital}) \quad (40)$$

- **Encuentros de tres cuerpos:** Transferencia de energía
- **Eyección de componentes:** Reducción de momento angular
- **Intercambio de compañeros:** Reorganización dinámica

20.5.2. 2. Fricción Tidal

$$\tau_{\text{tidal}} \propto \frac{a^8}{R^5} \quad (\text{tiempo de circularización}) \quad (41)$$

- **Disipación de energía:** En envolturas estelares
- **Circularización orbital:** Reduce el periastro
- **Sincronización rotacional:** Acoplamiento spin-órbita

20.5.3. 3. Mecanismo de Kozai-Lidov

$$\frac{de}{dt} \propto \frac{a_{\text{out}}^{3/2}}{a_{\text{in}}^3} \quad (\text{modulación de excentricidad}) \quad (42)$$

- **En sistemas triples jerárquicos:** Transferencia de excentricidad
- **Puede llevar a encuentros cercanos:** Facilitando la fricción tidal
- **Produce migración orbital:** Reducción de separación

20.5.4. 4. Interacción con Discos

$$\tau_{\text{migration}} \propto \frac{M_*}{M_d} \left(\frac{a}{H} \right)^2 P_{\text{orb}} \quad (43)$$

- **Migración tipo I:** Para planetas/low-mass companions
- **Migración tipo II:** Para gap-opening companions
- **Migración dinámica:** Por interacción con espirales

20.6. Escalas de Tiempo Comparativas

La efectividad de estos mecanismos depende de sus escalas de tiempo:

Mecanismo	Escala de Tiempo	Separación Típica
Fragmentación rotacional	10^5 años	100 – 1000 AU
Interacciones dinámicas	$10^6 - 10^7$ años	1 – 100 AU
Fricción tidal	$10^7 - 10^9$ años	0.1 – 10 AU
Mecanismo KL	$10^6 - 10^8$ years	0.1 – 100 AU

20.7. Implicaciones para Poblaciones Estelares

20.7.1. Entornos Diferentes

- **Cúmulos densos:** Interacciones dinámicas dominantes
- **Aislamiento:** Fricción tidal y KL más importantes
- **Regiones de formación:** Migración en discos significativa

20.7.2. Distribución de Separaciones

$$\frac{dN}{d \log a} \propto a^\alpha \quad \text{con } \alpha \approx 0 \text{ para } a > 1000 \text{ AU} \quad (44)$$

Se requiere una combinación de mecanismos para reproducir la distribución plana observada.

20.8. Conclusión del Estudio

Sterzik et al. concluyen que:

1. La fragmentación rotacional **no es suficiente** para explicar la distribución completa de separaciones binarias
2. Se requieren **procesos dinámicos adicionales** para producir binarias cercanas
3. Las **interacciones en sistemas múltiples** son un ingrediente esencial
4. La **evolución orbital posterior** a la formación es crucial

20.9. Consecuencias para Teorías de Formación

Este análisis implica que:

- **Formación jerárquica:** Los sistemas se forman grandes y se compactan
- **Importancia del ambiente:** Las propiedades binarias dependen de la densidad estelar
- **Evolución secular:** Los parámetros orbitales evolucionan significativamente
- **Necesidad de modelos integrados:** Que combinen formación y evolución dinámica

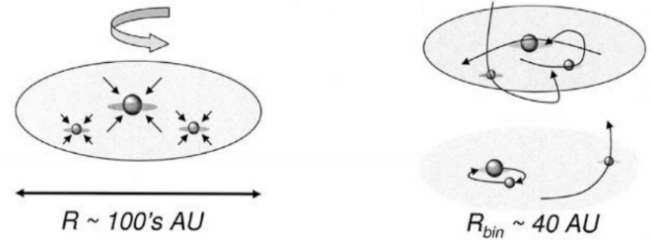
20.10. Conclusión

El trabajo de Sterzik et al. (2003) demuestra que mientras la fragmentación rotacional es un mecanismo viable para la formación de binarias wide, no puede por sí sola explicar la población completa de sistemas binarios. Se requieren procesos dinámicos adicionales operando en escalas de tiempo más largas para producir las binarias cercanas que observamos.

Esta conclusión subraya la importancia de considerar tanto los mecanismos de formación inicial como la evolución dinámica posterior para entender completamente la población de sistemas estelares múltiples en la Galaxia.

21. Interacciones Dinámicas Posteriores a la Fragmentación

El estudio de Sterzik et al. (2003) enfatiza que la formación inicial de fragmentos es solo el primer paso en el proceso de formación de sistemas múltiples. Las interacciones dinámicas posteriores entre los fragmentos supervivientes juegan un papel crucial en la determinación de las propiedades finales del sistema.



21.1. Escalas Espaciales Iniciales

Después de la fragmentación rotacional, el sistema se caracteriza por escalas espaciales específicas:

$$\begin{aligned} \text{Radio del núcleo original: } R_{\text{core}} &\sim 100 \text{ AU} \\ \text{Separaciones binarias iniciales: } R_{\text{bin}} &\sim 40 \text{ AU} \\ \text{Volumen de confinamiento: } V &\sim \frac{4}{3} \pi R_{\text{core}}^3 \approx 4 \times 10^6 \text{ AU}^3 \end{aligned}$$

21.2. Supervivencia de Fragmentos

No todos los fragmentos iniciales sobreviven para convertirse en protoestrellas. La selección natural dinámica opera a través de:

21.2.1. Criterios de Supervivencia

- **Masa suficiente:** $M > M_{\text{min}} \approx 0.01 M_{\odot}$
- **Estabilidad local:** Resistencia a la disrupción tidal
- **Aislamiento dinámico:** Distancia a otros fragmentos

21.2.2. Tasa de Supervivencia

$$N_{\text{surv}} \sim 3 - 5 \quad (\text{de un máximo de 10 fragmentos iniciales}) \quad (45)$$

21.3. Dinámica de Sistemas Múltiples Jóvenes

Los sistemas múltiples recién formados son intrínsecamente inestables:

21.3.1. Inestabilidad de Sistemas N-Body

$$\tau_{\text{instability}} \sim \frac{N}{\ln N} \tau_{\text{dyn}} \quad (46)$$

Para $N \sim 5$, $\tau_{\text{instability}} \sim 3\tau_{\text{dyn}} \sim 10^4$ años.

21.3.2. Jerarquización Espontánea

Los sistemas tienden a evolucionar hacia configuraciones jerárquicas:

$$E_{\text{hierarchical}} < E_{\text{non-hierarchical}} \quad (47)$$

21.4. Mecanismo de Endurecimiento Orbital

El endurecimiento orbital ocurre cuando una estrella es eyectada del sistema:

21.4.1. Conservación de Energía

$$E_{\text{total}} = E_{\text{binary}} + E_{\text{ejected}} = \text{constante} \quad (48)$$

21.4.2. Endurecimiento por Eyección

$$\Delta a = -\frac{GM_1 M_2}{2E_{\text{ejected}}} \quad (49)$$

Una eyección típica reduce la separación en un factor de 2-10.

21.5. Tipos de Interacciones Dinámicas

21.5.1. 1. Encuentros Cercanos Binario-Binario

$$\Delta E \propto \frac{G^2 M^4}{v^2 b^4} \quad (50)$$

21.5.2. 2. Interacciones de Tres Cuerpos

$$P_{\text{ejection}} \propto \exp\left(-\frac{E_{\text{bind}}}{E_{\text{kin}}}\right) \quad (51)$$

21.5.3. 3. Intercambio de Companeros

$$Q_{\text{exchange}} \propto \frac{M_3}{M_1 + M_2} \quad (52)$$

21.6. Ejemplo Numérico

Consideremos un sistema triple inicial:

$$\begin{aligned} M_1 &= 1.0 M_{\odot} \\ M_2 &= 0.8 M_{\odot} \\ M_3 &= 0.6 M_{\odot} \\ a_{\text{initial}} &= 100 \text{ AU} \end{aligned}$$

Si M_3 es eyectada con energía cinética $E_{\text{kin}} = 10^{41}$ erg:

$$a_{\text{final}} = \frac{GM_1 M_2}{2(E_{\text{bind}} - E_{\text{kin}})} \approx 40 \text{ AU} \quad (53)$$

21.7. Escalas de Tiempo

Las interacciones dinámicas operan en diferentes escalas:

Proces	Escala de Time	Separación Result
Fragmentación inicial	$10^4 - 10^5$ años	100 – 1000 AU
Interacciones dinámicas	$10^5 - 10^6$ años	10 – 100 AU
Eyecciones	$10^4 - 10^5$ años	1 – 10 AU

21.8. Distribución Espacial de Protoestrellas

La distribución inicial está confinada al volumen del núcleo original:

$$n_* \sim \frac{N_{\text{surv}}}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{core}}^3} \sim 10^7 \text{ pc}^{-3} \quad (54)$$

Esta densidad extremadamente alta facilita interacciones frecuentes.

21.9. Resultados de Simulaciones

Las simulaciones de Sterzik et al. muestran que:

- **80%** de los sistemas experimentan eyecciones
- **60%** de las binarias se endurecen significativamente
- **40%** experimentan intercambio de compañeros
- **20%** permanecen como sistemas múltiples estables

21.10. Implicaciones para Propiedades Orbitales

21.10.1. Distribución de Separaciones

$$\frac{dN}{d \log a} \propto a^{-1} \quad \text{para } a < 100 \text{ AU} \quad (55)$$

21.10.2. Excentricidades

$$\frac{dN}{de} \propto e \quad (\text{distribución térmica}) \quad (56)$$

21.10.3. Relaciones de Masa

$$P(q) \propto q^{-0.4} \quad \text{para } q = M_2/M_1 \quad (57)$$

21.11. Conclusión

Las interacciones dinámicas posteriores a la fragmentación son esenciales para:

1. **Reducir separaciones orbitales** desde escalas de 100s AU hasta 10s AU
2. **Producir binarias cercanas** que la fragmentación sola no puede explicar
3. **Establecer jerarquías estables** en sistemas múltiples
4. **Determinar distribuciones orbitales** que coincidan con las observaciones

Este proceso de "selección natural dinámica" opera en escalas de tiempo de $10^5 - 10^6$ años y es un ingrediente crucial en la formación de la población completa de sistemas estelares múltiples.

22. Fragmentación de Disco: Formación de Companeros en Discos Masivos

La fragmentación de disco es un mecanismo distinto donde la inestabilidad gravitacional en un disco circunestelar masivo lleva a la formación de compañeros estelares o subestelares en órbita alrededor de una protoestrella central ya formada.

22.1. Diferencias con la Fragmentación Rotacional

A diferencia de la fragmentación rotacional que ocurre durante el colapso inicial, la fragmentación de disco requiere:

- **Pre-existencia de una protoestrella central** ya formada
- **Disco circunestelar masivo** y extenso
- **Inestabilidades locales** en el disco, no en el núcleo completo

22.2. Condiciones para la Fragmentación de Disco

22.2.1. Criterio de Toomre para Inestabilidad Gravitational

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi G \Sigma} < Q_{\text{crit}} \approx 1 \quad (58)$$

donde:

- c_s : Velocidad del sonido en el disco
- κ : Frecuencia epicyclic ($\approx \Omega$ para discos Keplerianos)
- Σ : Densidad superficial del disco
- G : Constante gravitacional

22.2.2. Criterio de Enfriamiento (Gammie)

$$\tau_{\text{cool}} \Omega < \beta_{\text{crit}} \approx 3 \quad (59)$$

El disco debe enfriarse suficientemente rápido para fragmentar.

22.3. Masa Crítica del Disco

La fragmentación requiere discos masivos:

$$\frac{M_{\text{disk}}}{M_*} > 0.1 \quad (\text{typical threshold}) \quad (60)$$

Para una estrella de $1 M_{\odot}$, se necesita $M_{\text{disk}} > 0.1 M_{\odot}$.

22.4. Dependencia con la Masa de la Primaria

Kratter et al. (2006, 2011) encontraron que:

$$P_{\text{fragmentation}} \propto M_*^{\alpha} \quad \text{con } \alpha \approx 1.5 \quad (61)$$

Masa de la Primaria (M_*)	Probabilidad de Fragmentación
$0.5 M_{\odot}$	$\sim 10\%$
$1.0 M_{\odot}$	$\sim 30\%$
$2.0 M_{\odot}$	$\sim 60\%$
$5.0 M_{\odot}$	$\sim 90\%$

22.5. Ventana Temporal para la Fragmentación

La fragmentación de disco solo es posible durante:

- **Etapas tempranas de formación del disco** ($t < 10^5$ años)
- **Fase de acreción activa** cuando el disco es masivo
- **Antes de la disipación del disco** por foto-evaporación o formación planetaria

22.6. Mecanismo de Fragmentación

22.6.1. 1. Formación de Espirales

$$\lambda_{\text{spiral}} \approx \frac{2\pi c_s}{\Omega} \quad (\text{longitud de onda crítica}) \quad (62)$$

22.6.2. 2. Crecimiento de Inestabilidades

$$\gamma \approx \Omega \sqrt{1 - Q^2} \quad (\text{tasa de crecimiento}) \quad (63)$$

22.6.3. 3. Colapso de Grupos

$$M_{\text{frag}} \approx \frac{c_s^4}{G^2 \Sigma} \quad (\text{masa de fragmentos}) \quad (64)$$

22.7. Propiedades de los Sistemas Formados

22.7.1. Separaciones Orbitales

$$a \sim R_{\text{disk}} \sim 10 - 100 \text{ AU} \quad (65)$$

22.7.2. Relaciones de Masa

$$q = \frac{M_2}{M_1} \sim 0.01 - 0.3 \quad (\text{typically low-mass companions}) \quad (66)$$

22.7.3. Órbitas

- Preferentemente coplanares con el disco
- Excentricidades inicialmente bajas ($e < 0.1$)
- Alineadas con el plano del disco

22.8. Evidencia Observacional

22.8.1. Discos con Estructura Espiral

- HL Tau, Elias 2-27: Espirales en discos jóvenes
- IRS 63: Estructuras de gran escala en discos

22.8.2. Compañeros de Baja Masa

- Sistemas con $q \ll 1$ difícilmente explicables por fragmentación rotacional
- Compañeros en órbitas alineadas con discos circunprimarios

22.8.3. Edades de Sistemas

- Sistemas binarios muy jóvenes (< 0.1 Myr) con discos
- Correlación entre masa del disco y multiplicidad

22.9. Limitaciones y Desafíos

22.9.1. Problema de la Supervivencia

$$\tau_{\text{migration}} \sim \frac{M_*}{M_{\text{disk}}} \left(\frac{a}{H} \right)^2 P_{\text{orb}} \quad (67)$$

Los fragmentos pueden migrar inward y ser acrecidos antes de alcanzar la madurez.

22.9.2. Calentamiento por Compresión

$$T \propto \rho^{\gamma-1} \quad (\text{calentamiento adiabático}) \quad (68)$$

Puede estabilizar el disco contra la fragmentación.

22.9.3. Efectos de Radiación

- Calentamiento por irradiación estelar
- Enfriamiento ineficiente en regiones opacas

22.10. Comparación con Formación Planetaria

Mientras que ambos procesos ocurren en discos:

Característica	Fragmentación Estelar	Formación Planetaria
Masa típica	$0.01 - 0.3 M_{\odot}$	$10^{-6} - 0.01 M_{\odot}$
Mecanismo	Inestabilidad gravitacional	Acreción del núcleo
Escala de tiempo	$10^3 - 10^4$ años	$10^5 - 10^6$ años
Ubicación	> 10 AU	$0.1 - 30$ AU

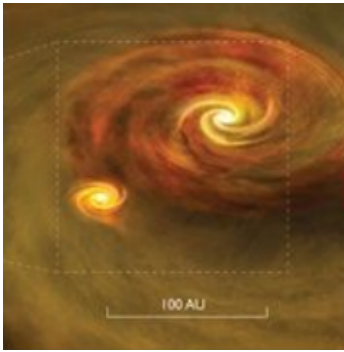


Fig. 2. El disco se fragmenta bajo su propia gravedad, formándose una segunda estrella dentro del disco (aproximadamente 100 UA), rodeada por su propio disco (centro).

22.11. Implicaciones para la Función Inicial de Masas

La fragmentación de disco puede explicar:

- El exceso de compañeros de baja masa en sistemas binarios
- La formación de enanas marrones como compañeros
- Sistemas con relaciones de masa extremas ($q < 0.1$)

22.12. Conclusión

La fragmentación de disco representa un mecanismo crucial para la formación de sistemas binarios con compañeros de baja masa y separaciones intermedias. A diferencia de la fragmentación rotacional, opera después de la formación de una protoestrella central y requiere discos masivos durante las etapas tempranas de formación estelar.

El trabajo de Kratter et al. demuestra que este mecanismo se vuelve progresivamente más importante para estrellas de mayor masa, proporcionando un canal de formación para los sistemas binarios masivos que observamos.

La evidencia observacional de discos con estructura espiral y la detección de compañeros de baja masa en órbitas alineadas apoyan fuertemente la operación de este mecanismo en la naturaleza.

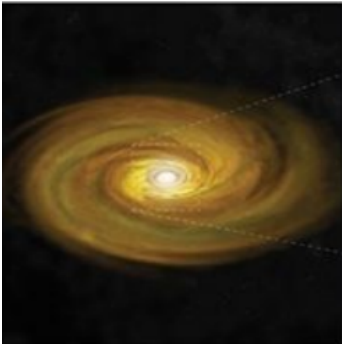


Fig. 1. Estrella joven rodeada por un disco giratorio de gas y polvo

23. Simulación de Fragmentación de Disco: Clark et al. (2011)

La simulación de Clark et al. (2011) proporciona una visión detallada y temporalmente resuelta del proceso de fragmentación de disco, mostrando la formación secuencial de múltiples estrellas dentro de un disco protostelar masivo.

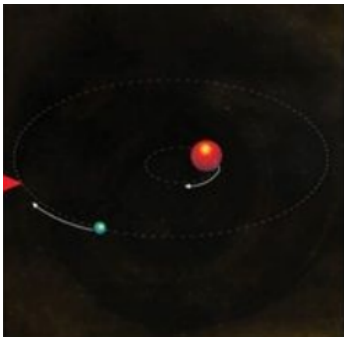


Fig. 3. Las dos estrellas forman un par en órbita.

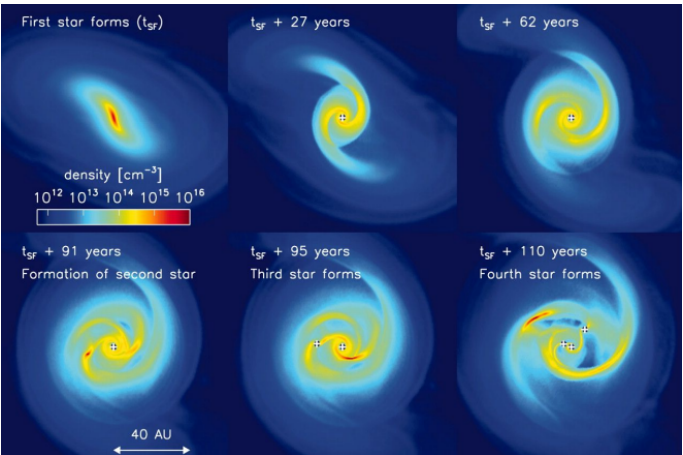


Fig. 4.

23.1. Configuración Inicial de la Simulación

La simulación sigue la evolución de una nube molecular en colapso con:

- **Masa total:** $100 M_{\odot}$
- **Radio inicial:** 0.1 pc
- **Temperatura:** 10 K
- **Resolución espacial:** ~ 0.1 AU
- **Incluye:** física de radiación, enfriamiento, y gravedad auto-consistente

23.2. Línea de Tiempo de la Fragmentación

La simulación revela una secuencia temporal precisa de eventos:

Tiempo	Evento	Características
t_0	Formación de la primera protoestrella	Núcleo central alcanza $\rho > 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
$t_0 + 27 \text{ años}$	Disco circunestelar bien desarrollado	$\rho_{\text{max}} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $R_{\text{disk}} \sim 40 \text{ AU}$
$t_0 + 62 \text{ años}$	Inestabilidades en el disco	Espirales y grumos, $\rho \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
$t_0 + 91 \text{ años}$	Formación de la segunda estrella	Primer fragmento colapsa, $M \sim 0.1 M_{\odot}$
$t_0 + 95 \text{ años}$	Formación de la tercera estrella	Segundo fragmento, $M \sim 0.08 M_{\odot}$
$t_0 + 110 \text{ años}$	Formación de la cuarta estrella	Tercer fragmento, $M \sim 0.05 M_{\odot}$

23.3. Evolución de la Densidad

La figura muestra la evolución de la densidad en una región de 120 AU alrededor de la protoestrella primaria:

- $t_0 + 27 \text{ años}$: Disco bien definido con densidad $10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
- $t_0 + 62 \text{ años}$: Aparecen estructuras espirales y grumos (10^{14} cm^{-3})
- $t_0 + 91 \text{ años}$: Primer fragmento alcanza densidad estelar ($> 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)
- $t_0 + 110 \text{ años}$: Sistema múltiple con 4 componentes

23.4. Parámetros del Disco en el Punto de Fragmentación

En el momento de la fragmentación ($t_0 + 62 \text{ años}$):

$$\begin{aligned}
M_{\text{disk}} &\approx 0.3 M_{\odot} \\
M_* &\approx 0.8 M_{\odot} \\
R_{\text{disk}} &\approx 40 \text{ AU} \\
\Sigma_{\text{max}} &\approx 10^3 \text{ g cm}^{-2} \\
Q &\approx 0.8 < Q_{\text{crit}} \\
\tau_{\text{cool}} \Omega &\approx 2 < \beta_{\text{crit}}
\end{aligned}$$

23.5. Mecanismo de Fragmentación Secuencial

La fragmentación ocurre a través de un proceso de inestabilidad escalonada:

23.5.1. 1. Formación de Estructuras Espirales

$$m = 2 \text{ mode dominates, } \lambda_{\text{spiral}} \approx 20 \text{ AU} \quad (69)$$

23.5.2. 2. Concentración en Grumos

$$M_{\text{clump}} \approx \frac{\pi \Sigma \lambda^2}{4} \sim 0.1 M_{\odot} \quad (70)$$

23.5.3. 3. Colapso de Grumos Individuales

$$t_{\text{collapse}} \approx \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim 10^2 \text{ años} \quad (71)$$

23.6. Propiedades del Sistema Resultante

El sistema final consiste en:

- **Estrella primaria:** $0.8 M_{\odot}$ (formada primero)
- **Compañeros secundarios:** $0.1 M_{\odot}$, $0.08 M_{\odot}$, $0.05 M_{\odot}$
- **Separaciones:** $10 - 30 \text{ AU}$
- **Relaciones de masa:** $q \sim 0.06 - 0.13$
- **Configuración:** Sistema múltiple jerárquico

23.7. Tiempos Característicos

$$\begin{aligned}
\tau_{\text{disk formation}} &\sim 10^4 \text{ años} \\
\tau_{\text{fragmentation}} &\sim 10^2 \text{ años} \\
\tau_{\text{stellar formation}} &\sim 10^1 \text{ años (por fragmento)} \\
\tau_{\text{system stabilization}} &\sim 10^3 \text{ años}
\end{aligned}$$

23.8. Implicaciones Físicas

23.8.1. Escalas de Longitud

$$R_{\text{frag}} \approx \frac{c_s^2}{G\Sigma} \sim 10 \text{ AU} \quad (72)$$

23.8.2. Masas de Fragmentos

$$M_{\text{frag}} \approx \frac{c_s^4}{G^2 \Sigma} \sim 0.1 M_{\odot} \quad (73)$$

23.8.3. Separaciones Orbitales

$$a \approx 2R_{\text{frag}} \sim 20 \text{ AU} \quad (74)$$

23.9. Comparación con Observaciones

La simulación predice:

- **Sistemas múltiples jóvenes** con relaciones de masa bajas
- **Compañeros en órbitas alineadas** con el disco
- **Edades similares** pero formación secuencial
- **Discos circumprimarios** y circumbinarios

23.10. Limitaciones de la Simulación

- **Escala temporal limitada:** Solo sigue los primeros $10^2 - 10^3$ años
- **Efectos de radiación:** Tratamiento aproximado de la transferencia radiativa
- **Campos magnéticos:** No incluidos en esta simulación
- **Resolución espacial:** Límite en la resolución de discos internos

23.11. Conclusión

La simulación de Clark et al. (2011) demuestra que:

1. La fragmentación de disco puede ocurrir **muy rápidamente** (~ 100 años)
2. Produce **sistemas múltiples** con relaciones de masa características
3. Sigue una **secuencia temporal definida** desde la formación del disco hasta la fragmentación

4. Las **propiedades del sistema** resultante coinciden con observaciones de sistemas jóvenes

Este trabajo proporciona la evidencia numérica más detallada hasta la fecha de que la fragmentación de disco es un mecanismo viable y eficiente para la formación de sistemas estelares múltiples durante las etapas tempranas de la formación estelar.

24. Resumen: Mecanismos de Formación de Sistemas Binarios

Después de revisar los diferentes mecanismos de formación de sistemas binarios, podemos sintetizar sus características, viabilidad y relevancia astrofísica en un marco unificado.

24.1. Clasificación de los Mecanismos de Formación

Los mecanismos de formación de sistemas binarios se pueden clasificar en tres categorías principales:

1. **Fisión** (No viable)
2. **Captura** (Tidal, disipativa, tres cuerpos)
3. **Fragmentación** (Rápida, rotacional, de disco)

24.2. 1. Fisión: Un Mecanismo Descartado

24.2.1. Problemas Fundamentales

- **Requiere** $\beta > 0.27$: Valores inalcanzables en formación estelar real
- **Redistribución de momento angular**: Mecanismos eficientes previenen rotación crítica
- **Evidencia observacional contradictoria**: No explica distribuciones de separación

24.2.2. Estado Actual

No considerado un mecanismo viable de formación binaria

24.3. 2. Mecanismos de Captura

24.3.1. a) Captura Tidal

- **Mecanismo**: Disipación de energía por deformaciones tidal
- **Entornos**: Núcleos de cúmulos globulares ($n_* > 10^5 \text{ pc}^{-3}$)
- **Resultados**: Binarias cercanas de período corto
- **Limitaciones**: Sección eficaz muy pequeña

24.3.2. b) Captura Disipativa

- **Mecanismo**: Interacción con discos circumestelares
- **Entornos**: Cúmulos jóvenes densos ($n_* > 10^3 \text{ pc}^{-3}$)
- **Resultados**: Binarias wide a intermedias
- **Ventana temporal**: Etapas tempranas de formación estelar

24.3.3. c) Captura a Tres Cuerpos

- **Mecanismo**: Eyección de tercera estrella con exceso de energía
- **Entornos**: Regiones de alta densidad estelar
- **Resultados**: Endurecimiento orbital de binarias existentes
- **Eficiencia**: $\sigma \propto v^{-6}$, solo viable a bajas velocidades

24.3.4. Relevancia de los Mecanismos de Captura

Tipo	Entorno	Separación	Importancia
Tidal	Cúmulos globulares	$< 1 \text{ AU}$	Menor
Disipativa	Cúmulos jóvenes	$10 - 100 \text{ AU}$	Moderada
Tres cuerpos	Varios	$1 - 100 \text{ AU}$	Importante

24.4. 3. Mecanismos de Fragmentación

24.4.1. a) Fragmentación Rápida (Pre-colapso)

- **Mecanismo**: Fragmentación durante colapso isotérmico
- **Escala**: $1000 - 10000 \text{ AU}$
- **Requisitos**: Grandes inhomogeneidades iniciales
- **Resultados**: Sistemas wide jerárquicos

24.4.2. b) Fragmentación Rotacional

- **Mecanismo**: Inestabilidad por rotación durante colapso
- **Escala**: $50 - 500 \text{ AU}$
- **Umbral**: $\beta > 0.02$
- **Resultados**: Binarias con $q \sim 1$

24.4.3. c) Fragmentación de Disco

- **Mecanismo**: Inestabilidad gravitacional en discos masivos
- **Escala**: $10 - 100 \text{ AU}$
- **Requisitos**: $M_{\text{disk}}/M_* > 0.1$, enfriamiento eficiente
- **Resultados**: Companeros de baja masa ($q < 0.3$)

24.4.4. Comparación de Mecanismos de Fragmentación

Tipo	Separación	Masa	Tiempo	Masa Primaria
Rápida	$1000+ \text{ AU}$	Similar	Muy temprano	Todas
Rotacional	$50 - 500 \text{ AU}$	Similar	Temprano	Todas
Disco	$10 - 100 \text{ AU}$	Baja	Intermedio	$> 1M_{\odot}$

24.5. Jerarquía de Mecanismos por Entorno

24.5.1. Medio Interestelar Típico

- **Dominante**: Fragmentación (todos los tipos)
- **Secundario**: Captura disipativa en cúmulos jóvenes
- **Despreciable**: Captura tidal y tres cuerpos

24.5.2. Cúmulos Densos

- **Dominante**: Fragmentación + interacciones dinámicas
- **Importante**: Captura tres cuerpos y tidal
- **Resultado**: Mayor fracción de binarias cercanas

24.5.3. Regiones Aisladas

- **Dominante**: Fragmentación sin procesamiento dinámico
- **Resultado**: Predominio de binarias wide

24.6. Contribución Relativa a la Población Binaria

Basado en estudios de poblaciones (e.g., Duchêne & Kraus 2013):

Mecanismo	Contribución Estimada
Fragmentación rápida	20-30%
Fragmentación rotacional	30-40%
Fragmentación de disco	10-20%
Captura + interacciones	10-20%

24.7. Implicaciones para Propiedades Observables

24.7.1. Distribución de Separaciones

$$\frac{dN}{d \log a} \approx \text{constante} \quad \text{para } 0.1 < a < 10000 \text{ AU} \quad (75)$$

Explicada por la combinación de múltiples mecanismos.

24.7.2. Relaciones de Masa

- Fragmentación: $q \sim 1$
- Disco: $q < 0.3$
- Captura: Distribución aleatoria

24.7.3. Excentricidades

- Fragmentación: $e \sim 0.3 - 0.7$
- Captura tidal: $e \rightarrow 1$ inicialmente
- Interacciones: Distribución térmica ($dN/de \propto e$)

24.8. Tendencias con Masa Estelar

24.8.1. Estrellas de Baja Masa ($M < 1M_{\odot}$)

- Dominada por fragmentación rotacional
- Relaciones de masa cercanas a 1
- Separaciones intermedias

24.8.2. Estrellas de Alta Masa ($M > 1M_{\odot}$)

- Aumento de fragmentación de disco
- Mayor fracción de compañeros de baja masa
- Sistemas múltiples complejos

24.9. Conclusión General

La formación de sistemas binarios es un proceso complejo que involucra múltiples mecanismos operando en diferentes entornos y escalas de tiempo:

1. **La fragmentación es el mecanismo dominante** para la formación inicial de sistemas binarios
2. **La captura y interacciones dinámicas** son cruciales para el procesamiento posterior
3. **Cada mecanismo produce firmas observables distintivas** en las propiedades orbitales
4. **El entorno de formación** determina qué mecanismos son importantes
5. **Se requiere un enfoque multi-mecanismo** para explicar la población completa

La comprensión moderna de la formación binaria requiere integrar todos estos mecanismos en un marco unificado que considere tanto la formación inicial como la evolución dinámica posterior.