

Binaries Statistics

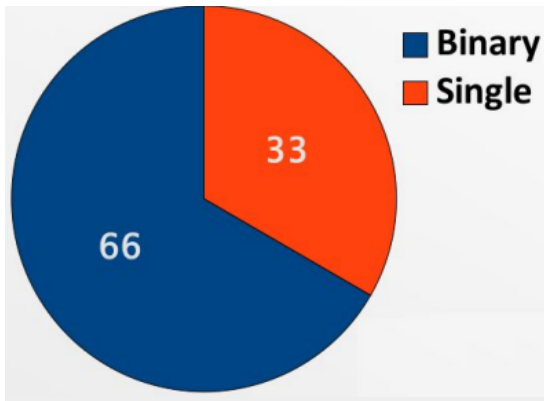
Mauro Jélvez

1. El Problema de la Multiplicidad Estelar

La determinación de la fracción de sistemas estelares múltiples (binarios, ternarios, etc.) frente a los sistemas simples (una única estrella) es un parámetro fundamental en astronomía estelar y galáctica. Este parámetro, conocido como **fracción de multiplicidad**, influye en:

- La evolución estelar (transferencia de masa, explosiones de supernovas, formación de binarias de rayos X).
- La formación de planetas y la estabilidad orbital de los mismos.
- La dinámica de cúmulos estelares.
- Las estimaciones de la masa total (materia bariónica y oscura) de la Galaxia.

El estudio de **Duquennoy & Mayor (1991)** constituye un trabajo de referencia para estrellas de tipo solar en la vecindad del Sol.



1.1. La Muestra de Estudio

Duquennoy & Mayor construyeron una muestra de **1618 estrellas** con los siguientes criterios, diseñados para obtener una muestra lo más **completa y no sesgada** posible:

- **Tipo Espectral:** Análogos solares (aproximadamente de tipo espectral F7 a K0). Esto se debe a que son estrellas abundantes, bien estudiadas y representativas de la población del disco galáctico.
- **Magnitud Apparente:** Estrellas más brillantes que la magnitud 5 ($m_V < 5$). Este límite garantiza que las estrellas son suficientemente brillantes para ser observadas con detalle y minimiza el sesgo de selección (es menos probable que se pasen por alto compañeras tenues en estrellas brillantes que en estrellas débiles).
- **Ubicación:** Vecindad solar (alrededor de 20 pársecs del Sol). Esto permite una detección más sensible de compañeras de baja masa y separaciones pequeñas.

2. Definiciones y Formalismo Estadístico

Es crucial definir con precisión los términos utilizados para evitar ambigüedades en la interpretación de los resultados.

2.1. Definiciones Fundamentales

- **Sistema Estelar:** Conjunto de una o más estrellas ligadas gravitacionalmente.
- **Sistema Simple (Single-Star System):** Un sistema estelar que consiste en una única estrella. $N_{\text{single}} = 825$.
- **Sistema Binario (Binary-Star System):** Un sistema estelar que consiste en dos estrellas orbitando un baricentro común. $N_{\text{binary}} = 793$.
- **Estrella Individual:** Cada componente estelar dentro de un sistema.

2.2. Variables del Problema

Definimos las variables a partir de los datos del estudio:

$$N_{\text{total}} = 1618 \quad (\text{Número total de sistemas examinados})$$

$$N_{\text{single}} = 825 \quad (\text{Número de sistemas simples})$$

$$N_{\text{binary}} = 793 \quad (\text{Número de sistemas binarios})$$

$$N_* = \quad (\text{Número total de estrellas individuales en la muestra})$$

2.3. Cálculo del Número Total de Estrellas

Para encontrar el número total de estrellas en la muestra, debemos contar cada componente estelar.

- Cada sistema simple contribuye con **1** estrella.
- Cada sistema binario contribuye con **2** estrellas.

Por lo tanto, el cálculo es:

$$N_* = (N_{\text{single}} \times 1) + (N_{\text{binary}} \times 2) \quad (1)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_* = (825 \times 1) + (793 \times 2) = 825 + 1586 = 2411 \quad (2)$$

La muestra de 1618 sistemas contiene un total de **2411 estrellas**.

3. Cálculo de las Fracciones

3.1. Fracción de Sistemas Binarios (f_{sist})

Esta es la fracción más directa de obtener a partir de los datos crudos. Representa la probabilidad de que un **sistema** elegido al azar de la muestra sea un sistema binario.

$$f_{\text{sist}} = \frac{\text{Número de sistemas binarios}}{\text{Número total de sistemas}} = \frac{N_{\text{binary}}}{N_{\text{total}}} \quad (3)$$

Sustituyendo los valores:

$$f_{\text{sist}} = \frac{793}{1618} \approx 0.4901 \quad (4)$$

Expresado en porcentaje:

$$f_{\text{sist}} \approx 49,01 \% \quad (5)$$

Interpretación: Aproximadamente el 49% de los **sistemas** estelares de tipo solar en la vecindad solar son binarios. Esto implica que la mayoría (~51 %) son sistemas simples.

3.2. Fracción de Estrellas Binarias (f_*)

Esta fracción es conceptualmente diferente y a menudo más relevante. Responde a la pregunta: *¿Cuál es la probabilidad de que una estrella elegida al azar resida en un sistema binario?* Para una estrella en un sistema simple, esta probabilidad es 0. Para una estrella en un sistema binario, esta probabilidad es 1. Para calcularla, primero debemos encontrar el número de estrellas que pertenecen a sistemas binarios.

$$N_{*,\text{binary}} = N_{\text{binary}} \times 2 = 793 \times 2 = 1586 \quad (6)$$

Ahora, la fracción de estrellas binarias es:

$$f_* = \frac{\text{Número de estrellas en sistemas binarios}}{\text{Número total de estrellas}} = \frac{N_{*,\text{binary}}}{N_*} \quad (7)$$

Sustituyendo los valores:

$$f_* = \frac{1586}{2411} \approx 0.6578 \quad (8)$$

Expresado en porcentaje:

$$f_* \approx 65,78 \% > 66 \% \quad (9)$$

Interpretación: Aproximadamente el 66% de las **estrellas** individuales de tipo solar en la vecindad solar se encuentran en sistemas binarios. Esto significa que, **para una estrella típica, es más probable que forme parte de un sistema binario que de un sistema simple.**

4. Discusión e Implicaciones

4.1. ¿Por qué $f_* > f_{\text{sist}}$?

La discrepancia entre la fracción de sistemas binarios (~49 %) y la fracción de estrellas binarias (~66 %) es fundamental y se explica puramente por la estadística de los sistemas. Los sistemas binarios contienen el doble de estrellas que los sistemas simples. Por lo tanto, aunque numéricamente hay **menos sistemas binarios que simples** (793 vs. 825), el **peso estadístico** de las estrellas que contienen es mayor, dominando el conteo total de estrellas. Este es un resultado contraintuitivo pero matemáticamente inescapable de los datos.

4.2. Limitaciones y Trabajos Posteriores

- **Sesgos de la Muestra:** La muestra se limita a estrellas brillantes ($m_V < 5$) y de tipo solar. La fracción de binarias puede variar con el tipo espectral (e.g., es mayor para estrellas masivas tipo O/B y menor para estrellas de baja masa tipo M).

- **Sensibilidad Observacional:** En 1991, las técnicas para detectar compañeras cercanas (ópticas adaptativas) o de muy baja masa (imageamiento profundo en el infrarrojo) no eran tan avanzadas como hoy. Es probable que el estudio subestimara el número de binarias, especialmente aquellas con grandes diferencias de masa ($q = M_2/M_1 \ll 1$) o separaciones muy pequeñas. Estudios modernos que emplean estas técnicas sugieren que la fracción de multiplicidad para estrellas de tipo solar podría ser incluso mayor, acercándose al ~60 % para sistemas y >75 % para estrellas.
- **Sistemas de Mayor Multiplicidad:** El estudio también encontró sistemas triples y cuádruples. Para un cálculo más completo, estas contribuciones deben ser añadidas a $N_{*,\text{binary}}$ (e.g., un sistema triple aporta 3 estrellas "binarias" en el sentido de que no están solas), lo que incrementaría ligeramente el valor de f_* .

5. Conclusión

El estudio de Duquennoy & Mayor (1991) estableció de manera robusta que la multiplicidad estelar es un fenómeno extremadamente común entre las estrellas de tipo solar. La conclusión clave es que, si bien la mayoría de los **sistemas** son simples, la mayoría de las **estrellas** residen en sistemas binarios o múltiples. Esta distinción es crucial para fields como la planetología (¿es nuestro Sistema Solar, con su estrella simple, la excepción o la regla?) y la astrofísica estelar. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Table 1. Resumen de resultados estadísticos del estudio de Duquennoy & Mayor (1991)

Concepto	Símbolo	Valor	Interpretación
Sistemas Simples	N_{single}	825	
Sistemas Binarios	N_{binary}	793	
Total de Sistemas	N_{total}	1618	
Total de Estrellas	N_*	2411	
Fracción de Sistemas Binarios	f_{sist}	49 %	Minoría de sistemas
Fracción de Estrellas Binarias	f_*	66 %	Mayoría de estrellas

6. El Debate Continuo: Fracciones Binarias Más Allá de las Estrellas de Tipo Solar

6.1. Actualizaciones y Revisiones Modernas

El resultado de Duquennoy & Mayor (1991) de que dos tercios de las estrellas se encuentran en sistemas múltiples se convirtió en un valor de referencia. Sin embargo, la ciencia avanza con mediciones más precisas y muestras más grandes.

6.1.1. El Estudio de Raghavan et al. (2010)

Una actualización fundamental fue realizada por **Raghavan et al. (2010)**. Este estudio:

- **Muestra Ampliada:** Analizó 454 estrellas de tipo solar (FGK) en la vecindad solar (dentro de los 25 pársecs).
- **Técnicas Mejoradas:** Incorporó datos de astrometría (*Hipparcos*), imageamiento directo, astrometría speckle y velocidades radiales, permitiendo una detección más completa de compañeras en un amplio rango de separaciones y razones de masa.

- **Resultado Clave:** Encontró una **fracción de multiplicidad total** (f_{mult}) de:

$$f_{\text{mult}} = \frac{N_{\text{binary}} + N_{\text{triple}} + N_{\text{higher}}}{N_{\text{total}}} \approx 44\% \quad (10)$$

Específicamente para **sistemas binarios** (f_{binary}), la fracción fue de $\sim 36\%$, con sistemas triples (8 %) y cuádruples (2 %) completando el total.

Interpretación: Raghavan et al. encontraron una fracción de sistemas múltiples ligeramente menor a la de Duquennoy & Mayor. Esta diferencia puede deberse a la muestra más amplia y definida de manera diferente, y a correcciones más refinadas de los sesgos observacionales. El consenso moderno se inclina hacia una fracción de multiplicidad para estrellas de tipo solar en el rango de 40 % to 50 % para **sistemas**.

6.2. ¿Son las Estadísticas de Estrellas G Representativas de Todas las Estrellas?

La pregunta central es si la fracción de binarias es universal o depende de parámetros físicos. La evidencia observacional acumulada indica claramente que **no es universal**.

6.2.1. Dependencia con la Masa Estelar (Tipo Espectral)

Numerosos estudios, como el de **Fischer & Marcy (1992)**, han demostrado que la fracción binaria (f_b) es una función fuerte de la masa de la estrella primaria.

Table 2. Tendencia de la Fracción Binaria con el Tipo Espectral (Masa)

Tipo Espectral	Masa Aprox. (M_{\odot})	Fracción Binaria (f_b)
O/B	> 2	\sim Sana et al. (2012) 70–80%
A	$\sim 1.5 - 2$	\sim De Rosa et al. (2014) 50–60%
G (Solar)	$\sim 0.8 - 1.1$	\sim Raghavan et al. (2010) 40–50%
M (Enanas Rojas)	$\sim 0.1 - 0.5$	\sim Duchêne & Kraus (2013) 20–30%

Interpretación de la Tendencia: Existe una correlación positiva clara entre la masa estelar y la fracción de binarias. Las estrellas masivas (O, B, A) tienen una probabilidad significativamente mayor de formarse en sistemas múltiples compared to las estrellas de baja masa (M). Las estrellas de tipo solar (G) se encuentran en un punto intermedio de esta distribución. Por lo tanto, **NO son representativas de "todas las estrellas"**.

6.2.2. Otros Parámetros de Dependencia

La fracción binaria no solo depende de la masa. Los estudios de poblaciones estelares en diferentes entornos revelan que también es función de:

- **Edad:** Algunos estudios sugieren que los sistemas binarios de periodo largo pueden ser disociados por encuentros dinámicos a lo largo de la vida de un cúmulo estelar, lo que podría reducir f_b de manera muy gradual con el tiempo.
- **Metallicidad:** La metalicidad del medio de formación (la abundancia de elementos más pesados que el H y el He) podría influir en la eficiencia de la fragmentación de la nube molecular colapsante, afectando potencialmente a la fracción de binarias. Los resultados observacionales sobre esta correlación no son aún concluyentes.
- **Densidad Estelar del Medio:** Este es un factor crucial. En entornos densos como el núcleo de cúmulos globulares, las interacciones dinámicas entre estrellas pueden destruir sistemas binarios de separación wide o, por el contrario, facilitar la captura y formación de nuevos sistemas. Generalmente, **la fracción binaria es menor en regiones de alta densidad** (e.g., núcleos de cúmulos globulares) compared to la tranquila vecindad solar (campo galáctico).

La fracción binaria real para una población estelar dada debe modelarse como:

$$f_b = F(M_*, \text{edad}, [\text{Fe}/\text{H}], \rho_*) \quad (11)$$

donde M_* es la masa, $[\text{Fe}/\text{H}]$ es la metalicidad, y ρ_* es la densidad estelar local. La forma funcional exacta de F es un área activa de investigación en astrofísica estelar y de formación estelar.

6.3. Conclusión Ampliada

El panorama que emerge de décadas de observaciones es complejo y fascinante:

- El resultado de Duquennoy & Mayor (1991) sentó las bases, pero ha sido refinado. Para estrellas de tipo solar (G), la fracción de **sistemas** múltiples es de aproximadamente 45 %, lo que implica que la fracción de **estrellas** en sistemas múltiples es de aproximadamente 65 %.
- Las estrellas de tipo solar **no son representativas** de toda la población estelar. La probabilidad de que una estrella tenga una compañera binaria aumenta considerablemente con su masa.
- No existe una única "fracción binaria universal". Este parámetro es el resultado de la física de la formación estelar (fragmentación, acreción) y la dinámica posterior (encuentros, disociaciones), y varía sistemáticamente con las propiedades intrínsecas de la estrella (masa, metalicidad) y de su entorno (densidad, edad).

El Sistema Solar, con su estrella simple, es, por tanto, más representativo de la experiencia típica de una estrella de baja masa (enana M), que son las más abundantes en la Galaxia. Sin embargo, desde la perspectiva de una **estrella**, es más común estar en un sistema binario que solo.

6.3.1. Evidencia Observacional de la Dependencia con la Masa

La Tabla 2 resume la tendencia general, y estudios más específicos confirman este patrón de manera contundente en ambos extremos de la escala de masa.

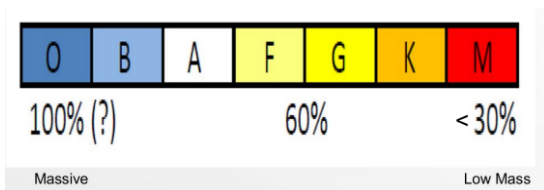
- **Estrellas de Muy Alta Masa (Tipo O):** El estudio de **Sana & Evans (2011)** en la asociación estelar joven Cyg OB2

encontró que una fracción extraordinariamente alta de estas estrellas, $\sim 75\%$, son binarias. Estudios posteriores, como el de **Sana et al. (2012)**, incluso sugieren que **prácticamente todas las estrellas masivas** ($\sim 100\%$) podrían formarse en sistemas múltiples, siendo los sistemas simples una rareza. Las interacciones en estos sistemas binarios masivos (transferencia de masa, fusiones) son cruciales para explicar sus vidas evolutivas y su destino como agujeros negros o estrellas de neutrones.

- **Enanas Ultrafrías (M6 y posteriores):** En el extremo opuesto de baja masa, **Allen (2007)** encontró una fracción binaria significativamente menor para enanas marrones y estrellas de muy baja masa (espectral M6 y más tarde). Su estudio reportó una frecuencia binaria de $20\% \pm 4\%$. Además, estas binarias de muy baja masa tienden a tener separaciones muy pequeñas (< 20 UA) y razones de masa ($q = M_2/M_1$) cercanas a 1 (sistemas "gemelos"), lo que sugiere mecanismos de formación diferentes a los de las estrellas de mayor masa.

6.3.2. Síntesis de la Tendencia Espectral

La figura ?? sintetiza cualitativamente la dependencia de la fracción binaria con el tipo espectral (y por tanto, con la masa). Los datos de Raghavan et al. (2010) para estrellas FGK, combinados con los resultados para estrellas O/B y M, delinean una curva de dependencia clara.



7. La Pregunta Fundamental: ¿Nacen la Mayoría de las Estrellas en Sistemas Múltiples?

Esta pregunta debe responderse de manera matizada, considerando la masa y la definición de "la mayoría".

7.1. Perspectiva desde la Abundancia Estelar

Desde el punto de vista de los **sistemas**, la respuesta es **no**. Las estrellas de baja masa (types K y M) son, con mucho, las más abundantes en la Galaxia (aproximadamente el 70 % de todas las estrellas son enanas M). Dado que estas estrellas tienen una fracción binaria baja ($\sim 20\%$ to 30%), el **sistema estelar típico** en la Galaxia es un sistema simple de baja masa.

7.2. Perspectiva desde la Formación Estelar

Sin embargo, desde el punto de vista de la **física de formación**, la respuesta es más compleja. La alta fracción de binarias entre estrellas masivas sugiere que los mecanismos que favorecen la formación múltiple (como la fragmentación gravitacional de núcleos densos) podrían ser extremadamente eficientes para grandes masas de gas. La pregunta sigue abierta: ¿Es la formación de sistemas múltiples el modo *preferido* de formación estelar a partir del cual los sistemas simples son una excepción (por disociación dinámica o evolución), o es la formación de sistemas simples el caso base?

7.3. Una Respuesta Equilibrada

La respuesta más precisa combina ambas perspectivas:

1. **Para estrellas masivas:** La formación en sistemas múltiples parece ser la regla, no la excepción. **La mayoría de las estrellas masivas nacen en sistemas binarios o múltiples.**
2. **Para estrellas de baja masa:** La formación en sistemas simples parece ser el resultado más común. **La mayoría de las estrellas de baja masa nacen como sistemas simples.**
3. **Globalmente:** Dado que las estrellas de baja masa dominan numéricamente la población galáctica, el **producto neto** del proceso de formación estelar es un mayor número de sistemas simples. Sin embargo, el mecanismo de formación que produce sistemas múltiples es extremadamente importante, especialmente para las estrellas masivas que influyen profundamente en su entorno galáctico.

8. La Paradoja de la Multiplicidad y la Función Inicial de Masa (IMF)

El trabajo de **Lada (2006)** introduce una perspectiva fundamental que a menudo se pasa por alto: para determinar si la *mayoría* de las estrellas son simples o binarias, no basta con conocer las fracciones binarias por tipo espectral; también se debe considerar cuántas estrellas hay de cada tipo.

8.1. El Argumento de Lada (2006)

Lada argumenta que, aunque las estrellas masivas (O, B, A) tienen una probabilidad muy alta de ser binarias, son extremadamente raras compared to las estrellas de baja masa. Por el contrario, las estrellas de tipo espectral M (enanas rojas), que tienen una fracción binaria baja ($f_b^M \sim 25\%$), dominan abrumadoramente la población estelar de la Galaxia.

La Función Inicial de Masa (IMF, por sus siglas en inglés) describe la distribución estadística de masas con las que se forman las estrellas. La IMF de Salpeter (1955) y sus derivadas modernas (e.g., Kroupa 2001, Chabrier 2003) coinciden en que las estrellas de baja masa son mucho más comunes que las masivas.

Lada realizó un cálculo integral simple pero poderoso. Asumiendo:

- Una IMF que refleja la mayor abundancia de estrellas de baja masa.
- Fracciones binarias dependientes de la masa: altas para tipos O/B/A ($f_b^{OBA} \sim 70\%$), intermedias para F/G/K ($f_b^{FGK} \sim 50\%$), y bajas para M ($f_b^M \sim 25\%$).

Calculó el número total de estrellas y el número de estrellas en sistemas binarios en una población sintética representativa de la Galaxia.

8.2. El Resultado Contraintuitivo

El resultado de este cálculo es que, a pesar de la alta frecuencia de binarias entre las estrellas masivas, su contribución al total global es minúscula debido a su escasez. La abrumadora abundancia de enanas M, la mayoría de las cuales son simples, inclina la balanza.

Lada (2006) concluyó que, **en una población representativa de la Galaxia, la mayoría de las estrellas (2/3) son enanas M simples**. Por lo tanto, **la estrella modal (más común) en la Galaxia es una enana M solitaria**.

Esto crea una paradoja interesante:

Aunque la formación de sistemas binarios es un proceso común e importante, el producto estadístico final dominante es la estrella simple.

8.3. Implicaciones de este Resultado

1. **Para el Sistema Solar:** Nuestro Sol (una estrella G simple) no es especial por ser simple. De hecho, es la norma estadística cuando se considera la abrumadora población de enanas M.
2. **Para la Búsqueda de Vida:** Dado que la mayoría de los entornos planetarios potenciales orbitan alrededor de estrellas M simples, comprender la habitabilidad planetaria alrededor de estas estrellas es crucial.
3. **Para la Formación Estelar:** Los modelos de formación estelar deben ser capaces de reproducir no solo la alta fracción de binarias en estrellas masivas, sino también la predominancia de sistemas simples entre las estrellas de baja masa. Esto sugiere que la eficiencia de la fragmentación de una nube molecular podría disminuir con la masa total del núcleo colapsante.

9. Multiplicidad de Alto Orden y el Origen de las Estrellas Simples

La Figura 2 del material proporcionado introduce una taxonomía más detallada de los sistemas múltiples y plantea una pregunta crucial sobre la formación estelar.

9.1. Definiciones Formales de Fracciones de Multiplicidad

La figura establece definiciones cuantitativas precisas para diferentes niveles de multiplicidad:

- **Fracción de Multiplicidad (MF):** La probabilidad de que un sistema tenga al menos una compañera.

$$MF = \frac{N_B + N_T + N_Q + \dots}{N_S + N_B + N_T + N_Q + \dots} \quad (12)$$

donde N_S , N_B , N_T , N_Q representan el número de sistemas Simples, Binarios, Triples y Cuádruples, respectivamente.

- **Fracción de Sistemas de Alto Orden (THF - Triple/High-order Fraction):** La probabilidad de que un sistema tenga al menos dos compañeras (es decir, que sea triple o de orden superior).

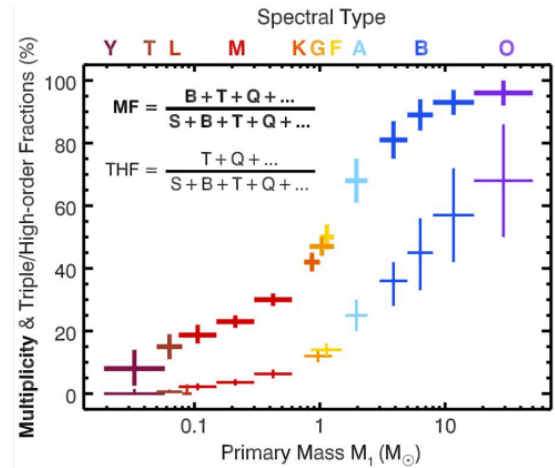
$$THF = \frac{N_T + N_Q + \dots}{N_S + N_B + N_T + N_Q + \dots} \quad (13)$$

Estas definiciones permiten un análisis más matizado que la simple distinción binario/no binario.

9.2. La Dependencia con la Masa de la Multiplicidad de Alto Orden

Los datos observacionales muestran que la THF también sigue una fuerte dependencia con la masa:

- **Estrellas Masivas (O, B):** No solo tienen una MF muy alta (~70-100%), sino que también tienen una THF significativa (~20-40%). Esto significa que es común encontrar sistemas triples, cuádruples o incluso más complejos entre las estrellas masivas.



- **Estrellas de Tipo Solar (F, G, K):** La THF es moderada (~10-15%).
- **Estrellas de Baja Masa (M):** Tanto la MF como la THF son bajas. Los sistemas de alto orden son extremadamente raros entre las enanas M.

Esta tendencia sugiere que los mecanismos de formación que producen sistemas múltiples jerárquicos complejos son mucho más eficientes en el colapso de núcleos masivos.

9.3. La Pregunta Fundamental: ¿Nacieron Simples las Estrellas de Baja Masa?

La pregunta "**Did most single low mass stars born single?**" es uno de los problemas abiertos más importantes en la formación estelar. Existen dos hipótesis principales:

9.3.1. Hipótesis 1: Nacimiento Simple

Las estrellas de baja masa mayormente se forman como sistemas simples. Esto implicaría que la eficiencia de la fragmentación gravitacional durante el colapso de un núcleo de baja masa es inherentemente baja. Los procesos físicos que podrían suprimir la fragmentación en núcleos de baja masa incluyen:

- Menor capacidad de enfriamiento del gas.
- Mayores efectos de disipación turbulenta.
- Una relación masa-tamaño diferente para los núcleos de baja masa que no favorece la inestabilidad dinámica.

9.3.2. Hipótesis 2: Disociación Dinámica

Una fracción significativa de las estrellas de baja masa simples podrían ser el producto de la disociación de sistemas binarios o múltiples primordiales. Los mecanismos de disociación incluyen:

- **Encuentros dinámicos:** En entornos de formación densos (como cúmulos estelares jóvenes), las interacciones gravitatorias entre sistemas pueden desestabilizar y disociar binarias de periodo largo, especialmente aquellas con ligaduras gravitatorias más débiles (mayor separación).
- **Expulsión ejecta:** En sistemas múltiples inestables, la interacción gravitatoria puede expulsar a la estrella de menor masa del sistema a alta velocidad, creando una estrella de campo simple y una binaria más apretada.
- **Pérdida de masa gaseosa:** La expulsión de gas residual de la nube molecular natal puede alterar el potencial gravitatorio, desestabilizando sistemas múltiples ligados débilmente.

9.4. Evidencia y Estado Actual del Debate

Distinguir entre estas hipótesis es observationalmente desafiante porque requiere observar estrellas muy jóvenes (de apenas 1-2 millones de años) en regiones de formación estelar y medir sus propiedades dinámicas.

- **A favor del nacimiento simple:** La baja fracción de binarias entre enanas M de campo es muy similar a la observada en regiones de formación estelar jóvenes y poco densas (asociaciones OB). Esto sugiere que no hay una población grande de binarias primordiales que luego se disocian.
- **A favor de la disociación:** En los núcleos densos de cúmulos jóvenes como el Trapecio en Orión, se observa que la fracción de binarias es ligeramente menor que en regiones menos densas. Esto es consistente con que algunos sistemas wide hayan sido disociados por encuentros dinámicos.

El consenso actual se inclina hacia la **Hipótesis 1 (Nacimiento Simple)** como el escenario dominante para las enanas M. La mayoría de las evidencias sugieren que la baja fracción de multiplicidad es primordial y no el resultado de una disociación posterior a gran escala. Sin embargo, es probable que la disociación dinámica juegue un papel menor en entornos específicos de alta densidad.

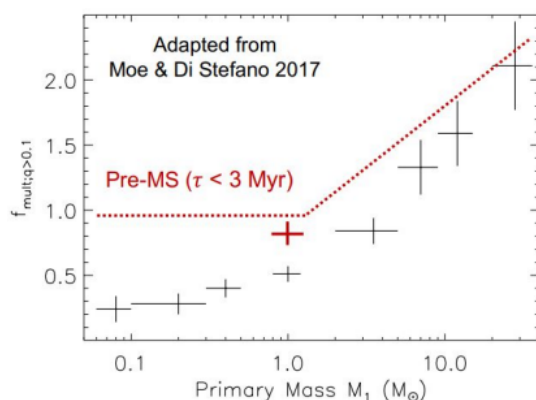
9.5. Implicaciones

La respuesta a esta pregunta tiene implicaciones profundas:

- **Para los modelos de formación estelar:** Los modelos deben reproducir por qué la fragmentación es tan ineficiente para producir compañeras alrededor de estrellas de baja masa.
- **Para la población de planetas:** Si las enanas M nacen mayormente simples, entonces la mayoría de los planetas alrededor de enanas M se forman en entornos tranquilos, sin la influencia gravitatoria perturbadora de una estrella compañera cercana.

9.5.1. El Estudio de Moe & Di Stefano (2017): Evolución Dinámica de Sistemas Binarios

El trabajo de **Moe & Di Stefano (2017)** proporciona un análisis exhaustivo y cuantitativo de cómo la fracción de multiplicidad (f_{mult}) evoluciona desde la fase de pre-secuencia principal (Pre-MS) hasta la secuencia principal cero (ZAMS), y cómo esto depende críticamente de la masa de la estrella primaria (M_1) y de la energía de ligadura del sistema.



Hipótesis Central: Disrupción de Binarias Wide

El estudio sugiere que la **disrupción de binarias wide con menores energías de ligadura** (típicamente aquellas con M_1 pequeña y/o grandes separaciones) es un mecanismo clave que reduce la fracción de multiplicidad observada en la secuencia principal comparado a la fracción primordial en la fase Pre-MS.

Metodología y Definiciones Clave

- **Población Estudiada:** Sistemas con razón de masa $q = M_2/M_1 > 0.1$ y período orbital $\log P(\text{días}) < 8$, que corresponde a separaciones $a < 10,000$ UA. Este corte excluye compañeras muy tenues y separaciones extremadamente grandes donde la ligadura gravitatoria es negligible.
- **Corrección a ZAMS:** El estudio corrige las frecuencias observadas para aislar el efecto de la evolución dinámica, normalizando la multiplicidad a la de estrellas de masa solar ($1M_\odot$) en la ZAMS. Esto permite comparar directamente cómo la disrupción afecta diferencialmente a diferentes masas.
- **Energía de Ligadura:** La energía de ligadura de un sistema binario es $|E| \approx \frac{GM_1M_2}{2a}$. Sistemas con primarias de baja masa (M_1 pequeña) o grandes separaciones (a grande) tienen inherentemente menos energía de ligadura y son más susceptibles a ser disociados por perturbaciones externas.

Resultados y Evidencia de Disrupción Dinámica

La Figura adaptada de Moe & Di Stefano (2017) muestra claramente que:

1. Para estrellas de **alta masa** ($M_1 > 2M_\odot$), la fracción de multiplicidad medida en la ZAMS es muy similar a la fracción primordial en la Pre-MS. Sus sistemas binarios, con altas energías de ligadura, son prácticamente inmunes a la disrupción dinámica.
2. Para estrellas de **baja masa** ($M_1 < 0.5M_\odot$), existe una **diferencia significativa** entre la fracción de multiplicidad en Pre-MS ($\tau < 3$ Myr) y la observada en la ZAMS. Una fracción de sus sistemas binarios, particularmente los más wide y débilmente ligados, se pierden (son disociados) durante los primeros millones de años de vida del cúmulo estelar.

Conclusión del Estudio y Respuesta a la Pregunta

Moe & Di Stefano (2017) concluyen que la disrupción dinámica **sí juega un papel importante** en establecer la baja fracción de multiplicidad que observamos en las enanas M de campo. Su trabajo sugiere que **no todas las estrellas de baja masa simples nacieron simples**.

Una fracción de ellas (quizás del orden del 10-20% según sus modelos) eran originalmente componentes de sistemas binarios wide de baja energía de ligadura que fueron disociados por encuentros dinámicos en el entorno natal denso durante la fase Pre-MS.

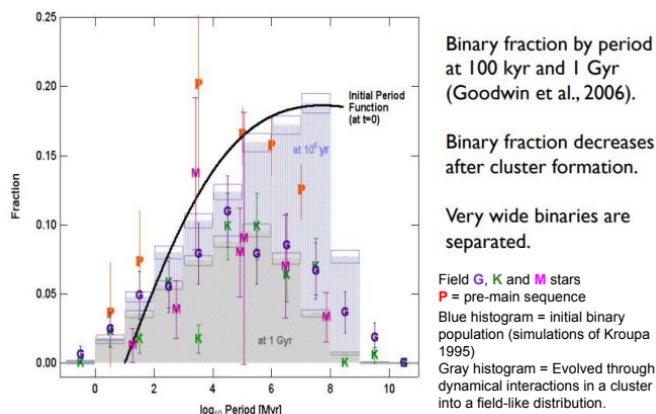
Por lo tanto, la respuesta a la pregunta "**Did most single low mass stars born single?**" se vuelve matizada:

La mayoría (80% o más) de las enanas M simples probablemente sí nacieron simples, pero una minoría significativa son el producto de la disrupción dinámica de binarias primordiales.

Este resultado reconcilia las observaciones en diferentes entornos (regiones de baja vs. alta densidad) y proporciona un marco unificado para entender la estadística de la multiplicidad estelar.

10. Evolución Temporal de la Fracción Binaria: Dependencia con la Edad y el Período

El trabajo de **Goodwin et al. (2006)** y otros introduce una dimensión temporal crítica en el problema de la multiplicidad estelar: la fracción binaria no es estática, sino que evoluciona significativamente con el tiempo, especialmente para ciertos rangos de período orbital.



10.1. La Función de Período Inicial y la Evolución Dinámica

Hay dos distribuciones clave:

- **Función de Período Inicial (a $t = 0$):** La distribución teórica de períodos orbitales (o separaciones) con la que se forman los sistemas binarios. Simulaciones como las de **Kroupa (1995)** sugieren que esta distribución inicial (histograma azul) podría ser universal y cubrir un rango muy amplio de períodos, desde horas hasta millones de años ($> 10^6$ años).
- **Distribución de Campo Evolucionada:** La distribución que se observa en estrellas de campo de edad intermedia (1 Gyr) como nuestro Sol (histograma gris). Esta distribución ha sido modificada por procesos dinámicos que actúan después de la formación.

10.2. Mecanismos de Evolución y Dependencia con el Período

La evolución desde la distribución inicial hasta la observada no es uniforme. Depende críticamente del período orbital P (y por tanto de la separación a y la energía de ligadura).

- **Binarias Cerradas ($P < 10^6$ días, $a < 100$ UA):** Sistemas con alta energía de ligadura. Son prácticamente inmunes a perturbaciones externas dinámicas. Su fracción permanece constante en el tiempo.
- **Binarias Wide ($P > 10^6$ días, $a > 100$ UA):** Sistemas con baja energía de ligadura. Son extremadamente vulnerables. Su fracción **disminuye drásticamente** después de la formación del cúmulo debido a:
 1. **Encuentros dinámicos:** Interacciones gravitatorias con otras estrellas y sistemas en el cúmulo natal denso pueden impartir suficiente energía cinética para disociar la binaria.

2. **Disociación por marea galáctica:** Para las binarias más wide que sobreviven a la fase de cúmulo, el potencial gravitatorio diferencial de la Galaxia (marea galáctica) puede, a lo largo de gigaaños, separarlas gradualmente hasta disociarlas.

La figura de Goodwin et al. (2006) cuantifica esta evolución, mostrando cómo la fracción binaria para períodos largos es alta a los 100 kyr (edad Pre-MS muy joven) pero disminuye notablemente a los 1 Gyr (edad típica de una estrella de campo).

10.3. Implicación Radical: ¿Multiplicidad Inicial del 100%?

El resultado más striking de Goodwin et al. (2006) y estudios similares es la sugerencia de que la **fracción de multiplicidad inicial podría ser tan alta como el 100 %**.

- **Evidencia:** La fracción de binarias wide en regiones de formación estelar muy jóvenes (de apenas 100 kyr) es mucho mayor que la observada en estrellas de campo de tipo G, K y M.
- **Interpretación:** Esto implica que **todas las estrellas podrían formarse inicialmente en sistemas múltiples**. Las estrellas que hoy observamos como simples en el campo galáctico serían en su mayoría el producto de la disociación dinámica de sistemas múltiples primordiales, predominantemente de los componentes wider y menos ligados.

10.4. Síntesis: Unificando los Distintos Escenarios

Este panorama parece contradecir la conclusión de Lada (2006). La resolución de esta aparente paradoja reside en la escala de masa y tiempo:

1. **Estrellas Masivas:** Tienen una fracción de multiplicidad inicial muy alta ($\sim 100\%$) y, debido a sus fuertes ligaduras gravitatorias, la conservan prácticamente intacta. Para ellas, la disociación es negligible.
2. **Estrellas de Baja Masa (Enanas M):** También podrían tener una fracción de multiplicidad inicial alta. **Sin embargo, la abrumadora mayoría de sus sistemas son wide y de muy baja energía de ligadura.** Por lo tanto, experimentan una **pérdida catastrófica** de compañeras debido a disociación dinámica en los primeros 100 Myr de vida. La fracción resultante observada a los 1 Gyr es la baja fracción ($\sim 25\%$) que citan Lada (2006) y Allen (2007).

Por lo tanto, las dos perspectivas pueden ser compatibles:

La mayoría de las estrellas de baja masa podrían nacer en sistemas múltiples, pero la mayoría evolucionan para convertirse en estrellas simples debido a la disociación dinámica de sus compañeras wide.

La pregunta "¿Did most single low mass stars born single?" tendría entonces una respuesta más compleja: "No, la mayoría nacieron en sistemas múltiples, pero la mayoría se convirtieron en simples".

10.5. Conclusión

La dependencia de la fracción binaria con la edad y el período orbital revela que la población estelar es dinámica. La fracción observada en cualquier momento es el resultado de la formación

primordial *modulada* por la evolución dinámica posterior. Comprender esta evolución es esencial para invertir las observaciones actuales y inferir las condiciones iniciales de la formación estelar, el "estado primordial" que los modelos teóricos deben reproducir.

11. Dependencia de la Fracción Binaria con la Metalicidad

La posible correlación entre la fracción binaria (f_b) y la metalicidad (Z) es un área de investigación activa y compleja. Los resultados observacionales, como muestran los datos de la tabla, no son concluyentes y aparentemente son contradictorios.

11.1. Evidencia Observacional: Resultados Inconclusos

La tabla resume estudios clave que investigan esta dependencia para diferentes tipos espectrales:

Table 3. Resumen de estudios sobre la dependencia de la fracción binaria con la metalicidad

Referencia	Tipo Espectral	$\log(Z/Z_\odot)$ mín- imo	Tendencia ($Z \downarrow$)
Carney et al. (2005)	G	-2.4	$\downarrow <130\%$
Gao et al. (2014)	G	-1.5	$\uparrow +50\%$
Hettinger et al. (2015)	F	-1.7	$\downarrow -25\%$
Moe et al. (2013)	B	-0.7	$\downarrow <120\%$
Dunstall et al. (2015)	B	-0.4	$\downarrow <130\%$

Los resultados muestran una falta de consenso claro:

- **Para estrellas de tipo G:** Carney et al. (2005) encuentra una **disminución** de la fracción binaria con menor metalicidad, mientras que Gao et al. (2014) reporta un **aumento**.
- **Para estrellas de tipo F:** Hettinger et al. (2015) encuentra una leve disminución.
- **Para estrellas de tipo B:** Tanto Moe et al. (2013) como Dunstall et al. (2015) encuentran una fuerte disminución.

11.2. Posibles Explicaciones para las Discrepancias

Las variaciones reportadas con Z son pequeñas y podrían deberse a varios efectos de sesgo y confusión, más que a una física subyacente robusta.

11.2.1. Sesgos Observacionales

- **Edad vs. Metalicidad:** Las estrellas de baja metalicidad ($[Fe/H] < -1$) son predominantemente viejas (población del halo galáctico). La edad sistemáticamente mayor introduce sesgos:
 - **Compañeras Enanas Blancas:** En sistemas binarios viejos, la estrella primaria masiva ya ha evolucionado fuera de la secuencia principal, often becoming una enana blanda (WD) tenue y difícil de detectar. Esto puede llevar a una **subestimación** de la fracción binaria real en poblaciones de baja metalicidad.
 - **Disociación Dinámica:** Las estrellas viejas han tenido más tiempo para experimentar encuentros dinámicos que pueden disociar binarias wide, reduciendo f_b artificialmente compared to poblaciones más jóvenes de alta metalicidad.

- **Sensibilidad y Selección:** Los estudios pueden ser sensibles a diferentes rangos de períodos orbitales o razones de masa q . Una correlación espuria podría surgir si la *distribución* de parámetros orbitales (no solo la fracción integrada) depende de Z .

11.2.2. Posibles Efectos Físicos Reales

A pesar de los sesgos, podría existir una dependencia física débil. Los mecanismos propuestos incluyen:

- **Fragmentación y Enfriamiento:** La metalicidad afecta la opacidad y la eficiencia de enfriamiento de una nube molecular en colapso. Un menor enfriamiento a bajas Z podría suprimir levemente la fragmentación y reducir la formación de binarias.
- **Acreción y Migración:** Las propiedades del disco de acreción circundante podrían depender de Z , afectando la migración orbital y la evolución de los sistemas binarios jóvenes.

Sin embargo, estos efectos se predicen que son subdominantes comparados a la dependencia con la masa y los efectos dinámicos.

11.3. Conclusión Actual y Estado del Campo

El consenso actual, reflejado en la nota de la tabla, es que **las variaciones de la fracción binaria con la metalicidad son pequeñas** (generalmente dentro de un factor de ~ 2) y **posiblemente se deben en su mayoría a sesgos de sensibilidad y selección**.

La fuerte dependencia reportada para estrellas B podría ser la más robusta, sugiriendo que la física de formación de binarias masivas podría ser más sensible a las condiciones iniciales del medio (como la metalicidad). No obstante, incluso en este caso, los efectos de sesgo relacionados con la edad y la evolución estelar deben ser cuidadosamente considerados.

En resumen, mientras que la dependencia con la masa es fuerte e inequívoca, y la dependencia con la edad/dinámica es crucial, la dependencia con la metalicidad sigue siendo una señal débil y controvertida en los datos observacionales. Desenredar una posible señal física real de los efectos de sesgo sistemático requiere muestras grandes, homogéneas y cuidadosamente caracterizadas, así como correcciones sofisticadas para los efectos evolutivos y dinámicos.

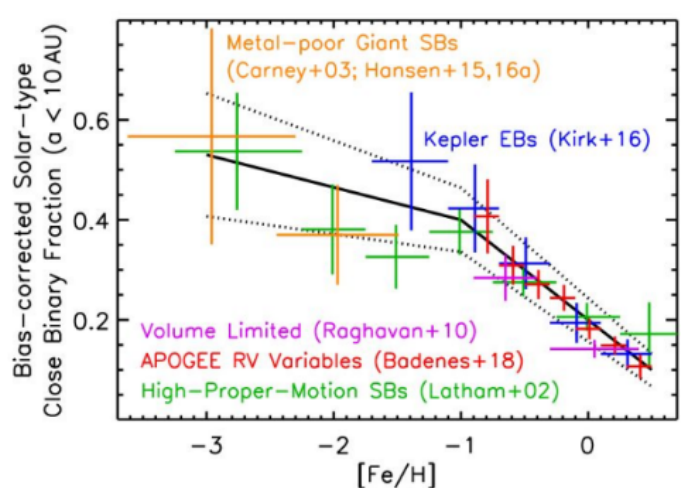
11.3.1. Evidencia Reciente para Binarias Cercanas: Una Señal Fuerte

Trabajos recientes y más especializados, particularmente los de **Badenes et al. (2018)** y **Moe et al. (2019)**, han revelado una dependencia clara y robusta de la fracción binaria con la metalicidad cuando se considera un subconjunto específico de sistemas: **las binarias cercanas**.

El Resultado Clave

Estos estudios encuentran que las estrellas pobres en metales ($[Fe/H] \ll 0$) tienen una fracción de binarias cercanas (con separaciones $a < 10$ AU) que es **2-3 veces mayor** que la de las estrellas ricas en metales. Esta es una correlación fuerte e inversa: **a menor metalicidad, mayor fracción de binarias cercanas**.

La figura proporcionada sintetiza este resultado, mostrando cómo la "Binary Fraction ($a < 10$ AU)" corregida por sesgos se



mantiene aproximadamente constante o incluso disminuye ligeramente para $[Fe/H] > -1$, pero **aumenta dramáticamente** para $[Fe/H] < -1$, según lo indicado por diferentes conjuntos de datos (APOGEE, Kepler, estrellas de alta proper motion).

Posible Explicación Física: "Close binaries get closer?"

El comentario "*Close binaries get closer?*" apunta a una hipótesis física intrigante. La metalicidad podría afectar la **evolución orbital** de los sistemas binarios jóvenes embebidos en sus discos circunestelares.

- **Migración en Disco:** Se cree que las binarias cercanas migran desde separaciones mayores hacia sus órbitas actuales debido a la interacción con un disco de gas circunestelar durante la fase de Pre-MS.
- **Efecto de la Metalicidad:** Un disco con menor metalicidad (y por tanto menor opacidad) podría ser menos eficiente disipando la energía, potencialmente afectando la tasa y eficiencia de esta migración. Esto podría resultar en una población diferente de binarias cercanas para una metalicidad dada.
- **Otra posibilidad:** La eficiencia misma de la formación de binarias cercanas (por fragmentación del disco, por ejemplo) podría depender de las propiedades del gas (temperatura, enfriamiento) que a su vez dependen de la metalicidad.

La hipótesis de trabajo es que los mecanismos de formación y/o migración que producen binarias cercanas son **más eficientes en entornos de baja metalicidad**.

Resolviendo la Apparente Paradoja

¿Cómo reconciliamos este resultado con los estudios anteriores que no encontraban una tendencia clara o encontraban tendencias opuestas?

La clave está en **distinguir entre poblaciones binarias**:

1. **Binarias Wide** ($a > 100$ AU): Su fracción está **dominada por efectos dinámicos** (disociación) que enmascaran cualquier señal primordial. Las estrellas viejas y pobres en metales han perdido la mayoría de sus binarias wide, lo que podría enmascarar o incluso invertir una tendencia primordial.
2. **Binarias Cercanas** ($a < 10$ AU): Son **inmune a la disociación dinámica**. Su fracción observada refleja mucho más

fielmente la fracción primordial. Por lo tanto, en este régimen, una señal primordial de dependencia con la metalicidad puede revelarse con claridad.

Los estudios antiguos a menudo medían la fracción binaria *integrada* sobre todos los separaciones, promediando así la señal fuerte y positiva de las binarias cercanas con la señal negativa (por disociación) de las binarias wide. Esto resultaba en una falta de consenso o tendencias débiles.

Conclusión: Un Cambio de Paradigma

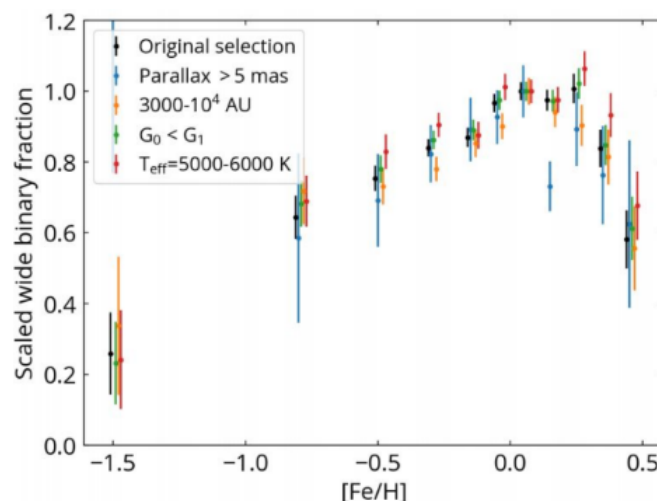
Los estudios recientes y más precisos sugieren que la metalicidad **sí** juega un papel importante en la formación estelar, pero su efecto es **específico del régimen orbital**.

La dependencia con la metalicidad no es un efecto de primer orden global como lo es la dependencia con la masa, sino un efecto de segundo orden que se manifiesta de manera diferente en diferentes poblaciones dinámicas. El resultado es que las estrellas viejas y pobres en metales (población del halo) tienen una **mayor fracción de binarias cercanas** pero una **menor fracción de binarias wide** compared to las estrellas jóvenes y ricas en metales (población del disco).

Este es un ejemplo excelente de cómo avances observacionales (muestras grandes, homogéneas y técnicas de detección específicas) pueden resolver aparentes contradicciones y revelar una física subyacente más rica y compleja.

11.3.2. El Caso de las Binarias Wide: Comportamiento Opuesto

El estudio de **Hwang et al. (2021)** proporciona la pieza final crucial del rompecabezas al demostrar que para las binarias wide, la tendencia con la metalicidad es **opuesta** a la encontrada en las binarias cercanas.



El Resultado Clave

Hwang et al. (2021) encontraron que las estrellas pobres en metales son **menos propensas** a tener compañeras wide (separaciones de 3000 AU a 10 000 AU) compared to las estrellas ricas en metales. Esto completa el panorama dual:

- **Binarias Cercanas** ($a < 10$ AU): Mayor fracción en baja metalicidad (Badenes 2018, Moe 2019)

- **Binarias Wide** ($a > 1000$ AU): Menor fracción en baja metalicidad (Hwang 2021)

Metodología de Hwang et al. (2021)

El estudio utilizó datos de Gaia con criterios de selección precisos:

- **Corte de paralaje:** $\varpi > 5$ mas (distancias < 200 pc), asegurando una muestra de volumen limitado.
- **Rango de separación proyectada:** $3000 \text{ AU} < s < 10\,000 \text{ AU}$, enfocándose específicamente en binarias wide.
- **Corte de temperatura:** $5000 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6000 \text{ K}$ (estrellas de tipo G), controlando por tipo espectral.
- **Corte de magnitud:** $G_{RP,0} < G_{RP,1}$, seleccionando pares con componentes de brillo similar.

Esta selección cuidadosa permitió aislar limpiamente la población de binarias wide genuinas.

Explicación Física: "Wide binaries get unbound?"

El comentario "Wide binaries get unbound?" apunta al mecanicismo físico dominante: la **disociación dinámica**.

Las binarias wide tienen energías de ligadura extremadamente bajas ($|E| \propto 1/a$). Son vulnerables a:

1. **Encuentros dinámicos en cúmulos jóvenes:** Las estrellas pobres en metales son viejas y pasaron sus primeros millones de años en entornos densos donde los encuentros gravitatorios eran frecuentes.
2. **Marea galáctica:** A lo largo de gigaaños, el potencial gravitatorio diferencial de la Galaxia puede separar gradualmente binarias wide.

Las estrellas de baja metalicidad, al ser más viejas, han tenido **más tiempo** para experimentar estos procesos de disociación. Por lo tanto, incluso si su fracción inicial de binarias wide era similar o mayor, la fracción observada hoy es menor debido a las pérdidas acumuladas por disociación.

Síntesis Final: El Cuadro Completo de la Dependencia con la Metalicidad

La aparente contradicción entre los estudios tempranos queda completamente resuelta cuando se separan las poblaciones binarias por su separación orbital:

Table 4. Resumen de la dependencia de la fracción binaria con la metalicidad por régimen orbital

Régimen Orbital	Tendencia (Z ↓)	Mecanismo Dominante
Binarias Cercanas ($a < 10$ AU)	↑ Aumenta	Física de Formación Disociación Dinámica Promedio de efectos opuestos
Binarias Wide ($a > 1000$ AU)	↓ Disminuye	
Fracción Binaria Total (integrada)	~ Constante/Débil	

Esta síntesis explica por qué:

- Los estudios que no separaban por separación (e.g., Carney 2005, Gao 2014) encontraban resultados inconsistentes o débiles: estaban promediando dos señales opuestas.
- Los estudios recientes que se enfocan en regímenes orbitales específicos encuentran señales fuertes y claras.

11.4. Conclusión General sobre Metalicidad

La metalicidad **sí** afecta la estadística de binarias, pero de manera compleja y diferencial:

1. Afecta la **física de formación** de binarias cercanas, siendo más eficiente en entornos de baja metalicidad.
2. La **evolución dinámica** posterior afecta diferencialmente a las binarias wide, siendo más destructiva para poblaciones viejas (de baja metalicidad).
3. El efecto neto en la fracción binaria total es modesto porque estos dos efectos se contrarrestan parcialmente.

Este entendimiento matizado solo ha sido posible gracias a muestras grandes y homogéneas (Gaia, APOGEE, Kepler) y a análisis que consideran explícitamente la dependencia con los parámetros orbitales. Representa un avance significativo en nuestra comprensión de cómo el entorno de formación (metalicidad) y la historia dinámica interactúan para dar forma a la población estelar que observamos hoy.

12. Síntesis y Conclusiones: El Paradigma Actual de la Multiplicidad Estelar

La integración de la evidencia observacional y los modelos teóricos nos permite construir un paradigma coherente sobre la formación y evolución de sistemas estelares múltiples. Las creencias actuales, como se resumen, representan un consenso sofisticado que reconcilia aparentes contradicciones.

12.1. El Paradigma Actual

12.1.1. 1. Nacimiento Múltiple: La Regla General

La evidencia de regiones de formación estelar muy jóvenes (Goodwin et al. 2006, Moe & Di Stefano 2017) sugiere que **la mayoría de las estrellas, si no todas, nacen en sistemas binarios o múltiples**. La fragmentación gravitacional de núcleos densos parece ser un proceso extremadamente eficiente. El estado simple podría ser la excepción primordial, no la regla.

12.1.2. 2. Destino Divergente: El Rol Crítico de la Masa y la Separación

El destino de estos sistemas múltiples primordiales depende críticamente de dos parámetros:

- **Masa de la primaria (M_1):** Determina la energía de ligadura total del sistema ($|E| \propto M_1 M_2 / a$).
- **Separación inicial (a):** Determina la densidad de energía de ligadura.

Sistemas Masivos y/o Cerrados : $|E|$ es GRANDE \rightarrow Supervivencia \rightarrow
Sistemas de Baja Masa y/o Wide : $|E|$ es PEQUEÑA \rightarrow Disociación \rightarrow

Por lo tanto, la baja fracción de multiplicidad observada en enanas M de campo no implica un nacimiento simple, sino una **pérdida dinámica eficiente**.

12.1.3. 3. El Origen de las Binarias Muy Cercanas

Las binarias muy cercanas (con períodos de horas a días) rara vez se forman directamente con tales separaciones. Su origen es doble:

1. **Interacción en sistemas múltiples:** Las interacciones dinámicas en sistemas triples o cuádruples jóvenes pueden llevar a la migración hacia el interior y/o el intercambio de compañeras, produciendo binarias cercanas apretadas.
2. **Evolución binaria:** Procesos post-formación como la **migración en disco** (interacción con el gas circumestelar) y la **evolución de marea** pueden reducir el período orbital de una binaria preexistente.

12.1.4. 4. La Huella de la Metalicidad y la Edad

La metalicidad (Z) y la edad (τ) dejan una huella compleja pero discernible:

- **Edad (τ):** Las poblaciones más viejas (e.g., halo galáctico, de baja Z) han experimentado una mayor disociación dinámica, reduciendo su fracción de binarias wide.
- **Metalicidad (Z):** Tiene un efecto dual revelado por estudios modernos:
 - **Binarias Cercanas:** Mayor fracción a baja Z (Badenes 2018, Moe 2019). Podría reflejar una mayor eficiencia en los mecanismos de formación/migración en entornos de baja metalicidad.
 - **Binarias Wide:** Menor fracción a baja Z (Hwang 2021). Es consecuencia de la mayor edad/disociación de las poblaciones pobres en metales.

12.2. Implicaciones del Paradigma

Este paradigma tiene consecuencias de largo alcance:

- **Para la Formación Planetaria:** La mayoría de los planetas podrían formarse en entornos dinámicamente complejos (sistemas múltiples), lo que afecta la arquitectura y estabilidad de los sistemas planetarios.
- **Para la Evolución Estelar:** La alta fracción de binarias entre estrellas masivas implica que la interacción binaria (transferencia de masa, fusiones) es un canal evolutivo principal, crucial para entender la producción de supernovas, estrellas de neutrones y agujeros negros.
- **Para la Arqueología Galáctica:** Las estadísticas de multiplicidad en diferentes componentes de la Galaxia (disco, halo) no solo trazan la metalicidad, sino también la historia dinámica y de formación de cada población.

12.3. Conclusiones Finales

En respuesta a las preguntas iniciales:

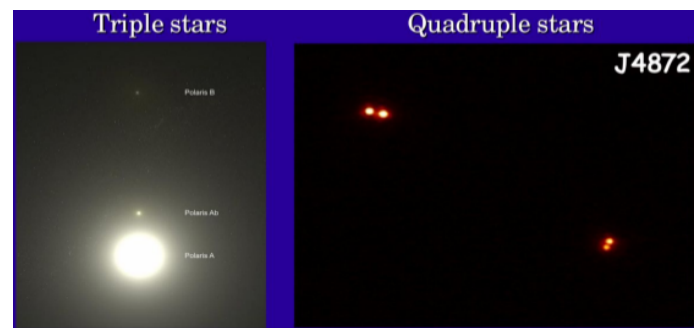
- **¿Son la mayoría de las estrellas simples? Sí,** numéricamente, debido a la abrumadora abundancia de enanas M, cuya fracción de multiplicidad observada es baja (Lada 2006).
- **¿Nacen la mayoría de las estrellas simples? Probablemente no.** La mayoría parecen nacer en sistemas múltiples, pero las de baja masa experimentan una disociación dinámica eficiente que las convierte en simples (Moe & Di Stefano 2017, Goodwin et al. 2006).

- **¿Son las estrellas de tipo solar representativas? No.** La fracción de multiplicidad es una función fuerte de la masa, la metalicidad, la edad y el entorno dinámico. Nuestro Sol es una estrella de masa intermedia en un entorno dinámico tranquilo.

El estudio de la multiplicidad estelar ha evolucionado de contar compañeras a entender un proceso dinámico complejo donde la formación primordial y la evolución secular interactúan para producir la rica diversidad de sistemas que observamos en la Galaxia hoy.

13. Sistemas Múltiples de Alto Orden: La Regla, No la Excepción

El análisis anterior se ha centrado predominantemente en sistemas binarios, pero una fracción significativa de sistemas múltiples son de orden superior (triples, cuádruples, etc.). Como señala la referencia a **Eggleton & Tokovinin (2008)**, ignorar estos sistemas lleva a una imagen incompleta.



13.1. Prevalencia de Sistemas de Alto Orden

- **Entre sistemas múltiples:** Aproximadamente el 25 % de todos los sistemas múltiples de tipo solar son triples o de orden superior. Esto significa que 1 de cada 4 sistemas que no son simples tiene más de dos componentes.
- **Entre binarias cercanas:** La fracción es aún más sorprendente. **Allen et al. (2012)** y **Tokovinin et al. (2006)** encontraron que para binarias con períodos orbitales muy cortos ($P_{\text{orb}} \leq 3$ das), **casi el 100%** tienen al menos un tercer objeto companion. Esta correlación es extremadamente fuerte.
- **Entre binarias wide:** La frecuencia de sistemas triples entre binarias wide (separación $s \geq 1000$ AU) también es alta, como lo demostró **Makarov et al. (2008)**.

13.2. Implicaciones para la Formación de Binarias Cercanas

La fuerte correlación entre binarias muy cercanas y la presencia de un compañero externo sugiere un vínculo causal. El mecanismo físico más aceptado para explicar esto son las **oscilaciones de Kozai-Lidov** acopladas con la fricción de marea.

13.2.1. Mecanismo de Kozai-Lidov con Fricción de Marea (KLCT)

En un sistema triple jerárquico, la perturbación gravitatoria del compañero externo (tercer cuerpo) puede inducir una transferencia cíclica de momento angular entre las órbitas interna y externa. Este fenómeno se conoce como **oscilaciones de Kozai-Lidov**:

- La excentricidad de la órbita interna (la binaria cercana) puede excitarse a valores muy altos ($e \rightarrow 1$) de manera periódica.
- Durante los picos de alta excentricidad, las estrellas de la binaria interna pasan muy cerca durante el periastro.
- Si pasan lo suficientemente cerca, las **fuerzas de marea** pueden disipar energía orbital, "circularizando" la órbita pero a un **semieje mayor mucho menor**.

Este mecanismo de **Kozai-Lidov con Fricción de Marea (KLCT)** es extremadamente eficiente para convertir una binaria de período moderado en una binaria muy cercana (de período corto).

13.2.2. Evidencia Observacional del Mecanismo

La predicción clave del mecanismo KLCT es que **las binarias más cercanas deberían estar casi siempre en sistemas triples**. Esto es exactamente lo que encontraron Allen et al. (2012) y Tokovinin et al. (2006). La presencia del tercer cuerpo es un requisito casi indispensable para la formación de las binarias más extremas.

13.3. Jerarquía y Estabilidad

Los sistemas de alto orden no son caóticos; están organizados de manera **jerárquica**. Esto significa que el sistema puede dividirse en sub-sistemas binarios que orbitan alrededor de su centro de masa común, el cual a su vez orbita con otros sub-sistemas. Por ejemplo:

- Un sistema **triple** consiste típicamente en una binaria cercana y una estrella externa orbitando lejos.
- Un sistema **cuádruple** puede consistir en dos binarias cercanas orbitándose mutuamente (2+2), o una triple con una estrella adicional (3+1).

Esta configuración jerárquica es esencial para la estabilidad dinámica a largo plazo del sistema.

13.4. Conclusión: Importancia de los Sistemas de Alto Orden

Los sistemas de alto orden no son una curiosidad marginal; son:

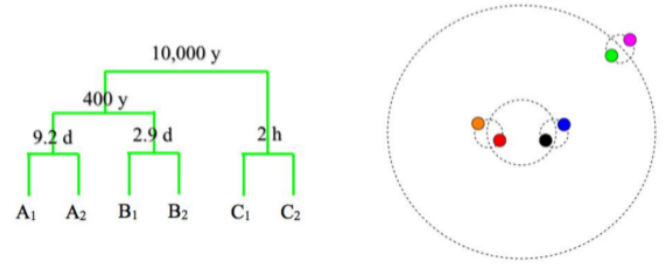
1. **Cuantitativamente importantes:** Constituyen una fracción significativa (~25 %) de todos los sistemas múltiples.
2. **Cualitativamente cruciales:** Juegan un papel fundamental en la formación de las binarias más cercanas a través del mecanismo KLCT. Son, en esencia, los "laboratorios" donde se forjan las binarias de período corto.
3. **Ubicuos en todas las escalas:** Están presentes tanto en configuraciones wide como cercanas, afectando la evolución y el destino de una gran variedad de sistemas.

Por lo tanto, cualquier modelo completo de formación y evolución de binarias debe considerar explícitamente la formación y dinámica de sistemas triples y de orden superior. Ignorarlos significa pasar por alto uno de los mecanismos de formación de binarias cercanas más importantes.

13.4.1. El Principio de Jerarquía: Condición de Estabilidad Dinámica

La figura proporcionada ilustra elegantemente el principio fundamental que gobierna la estabilidad de los sistemas múltiples:

la **jerarquía**. Como estableció **Tokovinin (1997)** y otros, los sistemas múltiples estables siempre están organizados de manera jerárquica.



La Condición de Estabilidad

Para que un sistema múltiple sea dinámicamente estable a largo plazo, debe cumplirse la condición:

$$\frac{P_{\text{long}}}{P_{\text{short}}} \geq 5 \quad (14)$$

donde P_{long} es el período de la órbita exterior y P_{short} es el período de la órbita interior. Esta relación se deriva de criterios de estabilidad dinámica más formales (como el criterio de Mardling) y asegura que las perturbaciones mutuas entre los diferentes niveles orbitales sean lo suficientemente pequeñas como para no desestabilizar el sistema.

Análisis del Sistema Ejemplo

La figura muestra un sistema séxtuple (6 componentes) con una estructura jerárquica profunda. Analicemos sus niveles:

Table 5. Análisis jerárquico del sistema séxtuple de la figura

Nivel	Componentes	Período	Relación $P_{\text{long}}/P_{\text{short}}$
1 (Más interno)	C1 - C2	2 h	-
2	B1 - B2	2.9 d	$\frac{2.9 \text{ d}}{2 \text{ h}} = \frac{69.6 \text{ h}}{2 \text{ h}} \approx 35 \gg 5$
3	A1 - A2	9.2 d	$\frac{9.2 \text{ d}}{2.9 \text{ d}} \approx 3.2$
4	(A1-A2) - (B1-B2)	400 y	$\frac{400 \text{ y}}{9.2 \text{ d}} \approx \frac{146,000 \text{ d}}{9.2 \text{ d}} \approx 15,870 \gg 5$
5 (Más externo)	[(A1-A2)-(B1-B2)] - [C1-C2]	10,000 y	$\frac{10,000 \text{ y}}{400 \text{ y}} = 25 \gg 5$

El sistema cumple abrumadoramente con la condición de jerarquía en casi todos los niveles. La única relación que parece marginal es entre el nivel 2 y 3 ($P_3/P_2 \approx 3.2 < 5$). Esto podría sugerir que:

- El sistema es dinámicamente interesante y potencialmente evoluciona en escalas de tiempo largas.
- Los períodos podrían estar ligeramente ajustados para mayor claridad en la figura.
- Podría existir un mecanismo de estabilización adicional (e.g., resonancias, inclinaciones orbitales).

Implicaciones para la Formación

La prevalencia de estructuras jerárquicas tiene profundas implicaciones para los mecanismos de formación:

1. **Fragmentación Secuencial:** La nube molecular parental podría fragmentarse en múltiples escalas, creando naturalmente una estructura jerárquica.

2. **Captura Dinámica:** En entornos densos, las interacciones dinámicas podrían reorganizar sistemas simples en configuraciones jerárquicas estables, que son los "atractores" dinámicos del problema N-cuerpo.
3. **Migración y Reorganización:** Los discos circumestelares podrían facilitar la migración y el reordenamiento de los componentes hacia configuraciones estables.

La estructura mostrada (A, B, C) es característica de los sistemas de alto orden, donde cada letra representa un subsistema binario en un nivel diferente de la jerarquía.

Importancia Observacional

El principio de jerarquía es una herramienta observacional crucial:

- **Detección:** Sugiere dónde buscar compañeras adicionales (a separaciones mucho mayores).
- **Confirmación:** Una configuración no jerárquica sería dinámicamente inestable, lo que ayuda a descartar falsos positivos o asociaciones ópticas.
- **Modelado:** Simplifica enormemente el modelado dinámico, ya que los sistemas pueden tratarse como una serie de problemas de dos cuerpos acoplados débilmente, en lugar de un problema N-cuerpo complejo.

En resumen, la jerarquía no es solo una curiosidad arquitectónica, sino una **condición necesaria para la supervivencia** de los sistemas múltiples a lo largo de la edad del universo. La figura proporcionada es un ejemplo textbook de este principio fundamental en acción.

13.4.2. Configuraciones Jerárquicas Fundamentales

La figura proporcionada ilustra de manera concisa las tres configuraciones jerárquicas básicas que pueden formar los sistemas múltiples estables. Esta notación es fundamental para describir y clasificar sistemas complejos.



Notación y Configuraciones

1. **Configuración Binaria Simple: $a \rightarrow b$**
El caso más simple. Dos componentes (a y b) orbitando su centro de masa común. Todos los sistemas más complejos se construyen a partir de esta base.
2. **Configuración Triple Jerárquica: $a \rightarrow b, c$**
Un sistema triple donde un componente (a) orbita alrededor del centro de masa de un par cercano ($b-c$). Esta es la configuración más común para sistemas triples. La notación $a \rightarrow b, c$ indica que b y c forman un subsistema binario interno, y a orbita alrededor de este subsistema.

3. **Configuración Cuádruple Jerárquica: $a \rightarrow b, c; b \rightarrow d$**
Un sistema cuádruple con dos niveles de binarias. En este caso:

- Existe un subsistema binario interno $b \rightarrow d$ (muy cercano)
- Existe otro subsistema binario $a \rightarrow c$ (moderadamente separado)
- Estos dos subsistemas binarios orbitan mutuamente entre sí

Esta configuración se describe como "2+2" y es particularmente estable.

El Principio de Tratamiento como Binarias

La frase "*treat as binaries*" es clave para entender la dinámica de estos sistemas. Significa que:

- En la configuración $a \rightarrow b, c$, no resolvemos el movimiento de tres cuerpos simultáneamente. En su lugar:
 1. Resolvemos el problema binario interno $b-c$
 2. Tratamos este par $b-c$ como un solo objeto puntual con la masa total $M_b + M_c$ localizado en su centro de masa
 3. Resolvemos el problema binario externo a vs. ($b-c$)
- En la configuración $a \rightarrow b, c; b \rightarrow d$, aplicamos el mismo principio recursivamente:
 1. Resolvemos el problema binario más interno $b \rightarrow d$
 2. Tratamos este par como un objeto puntual
 3. Resolvemos el siguiente nivel $a \rightarrow c$
 4. Finalmente, tratamos ambos subsistemas como objetos puntuales y resolvemos su órbita mutua

Ventajas de este Enfoque

Este tratamiento jerárquico ofrece varias ventajas cruciales:

- **Estabilidad:** Garantiza que el sistema sea dinámicamente estable a largo plazo, siempre que se cumpla la condición $P_{\text{long}}/P_{\text{short}} \geq 5$.
- **Simplificación Computacional:** Reduce un complejo problema de N-cuerpos a una serie de problemas de 2-cuerpos acoplados débilmente, lo que es computacionalmente manejable.
- **Capacidad de Análisis:** Permite aplicar las bien conocidas leyes de Kepler a cada nivel jerárquico por separado.
- **Predicción de Movimientos:** Facilita la predicción de las posiciones y velocidades de todos los componentes en escalas de tiempo largas.

Implicaciones para la Clasificación Observacional

Esta notación proporciona un lenguaje estandarizado para clasificar sistemas observados:

- Un sistema clasificado como " $a \rightarrow b, c$ " inmediatamente sugiere que debemos buscar:
 - Un par cercano entre b y c (posiblemente espectroscópico)
 - Una compañera wide a orbitando este par
- La notación guía las estrategias observacionales para confirmar la naturaleza física de los sistemas.

Ejemplo en el Contexto de Binarias Cercanas

Retomando el hallazgo de que casi el 100% de las binarias con $P \leq 3$ días tienen un tercer cuerpo, este principio jerárquico sugiere que estas binarias ultra-cercanas probablemente existan en configuraciones del tipo:

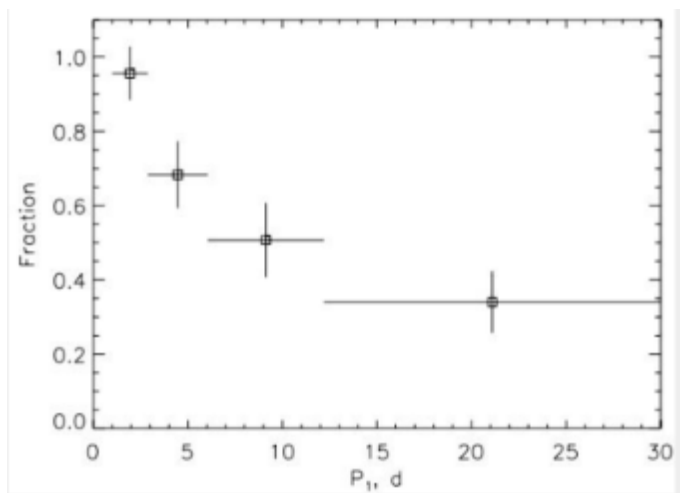
tercer cuerpo \rightarrow binaria cercana

donde el tercer cuerpo actúa como el componente externo (a) y la binaria cercana es el subsistema interno ($b-c$).

En resumen, el principio "*treat as binaries*" no es solo una conveniencia matemática, sino una manifestación de cómo la naturaleza organiza los sistemas múltiples para asegurar su estabilidad a largo plazo. Las configuraciones mostradas en la figura representan los "bloques de construcción fundamentales" de todos los sistemas múltiples estables en el universo.

13.4.3. Evidencia Observacional Contundente: El Vínculo Triple-Binaria Cercana

El trabajo de **Tokovinin et al. (2006)** proporciona la evidencia observacional más sólida que conecta directamente la formación de binarias muy cercanas con la presencia de compañeras terciarias en sistemas triples.



El Resultado Estadístico Clave

El estudio encontró que:

$$f_{\text{tertiary}} = \frac{N(P < 3 \text{ d con compañera terciaria})}{N(P < 3 \text{ d})} = 96\% \quad (15)$$

Es decir, el **96%** de las binarias de tipo solar con períodos orbitales menores a 3 días tienen una compañera terciaria distante. Esta fracción es abrumadora y estadísticamente significativa.

Dependencia con el Período

Además, el estudio encontró que esta fracción **disminuye con el aumento del período orbital**:

- Para binarias con períodos más largos ($P > 30$ das), la fracción de sistemas con compañeras terciarias se reduce significativamente.
- Esta dependencia sugiere un **umbral crítico** en el período (alrededor de 3 das) por debajo del cual el mecanismo de formación que requiere un tercer cuerpo se vuelve dominante.

Implicaciones para los Mecanismos de Formación

Este resultado estadístico tiene implicaciones profundas para los modelos de formación:

1. **Descartando Formación Directa:** La casi universalidad de las compañeras terciarias descarta que las binarias muy cercanas se formen *directamente* con sus separaciones actuales por colapso y fragmentación simple. La probabilidad de que el 96% de los casos sean una coincidencia es negligible.
2. **Apoyando el Mecanismo KLCT:** Corrobora fuertemente el mecanismo de **Kozai-Lidov con Fricción de Marea (KLCT)**. El tercer cuerpo proporciona la perturbación gravitatoria necesaria para excitar la excentricidad y desencadenar la migración tidal.
3. **Sugiriendo una Secuencia Evolutiva:** La dependencia con el período sugiere una secuencia evolutiva:
 - (a) Se forma un sistema triple jerárquico con una binaria de período moderado ($P \sim 10 - 100$ días) y una compañera terciaria.
 - (b) Las oscilaciones de Kozai-Lidov excitan la excentricidad de la binaria interna.
 - (c) La fricción de marea durante los periastrós de alta excentricidad reduce el período orbital.
 - (d) El proceso continúa hasta que la binaria alcanza períodos muy cortos ($P < 3$ d) y se circulariza.

¿Qué pasa con el 4% restante?

El 4% de binarias muy cercanas sin compañera terciaria detectable podría explicarse por:

- **Limitaciones Observacionales:** La compañera terciaria podría ser demasiado tenue, estar en una configuración orbital desfavorable para su detección, o ser una enana marrón o planeta masivo no detectable con las técnicas actuales.
- **Mecanismos Alternativos:** Un pequeño porcentaje podría formarse por otros mecanismos, como:
 - Migración extremadamente eficiente en discos circum-estelares.
 - Interacciones dinámicas en cúmulos muy densos que disocian al tercer cuerpo después de haber cumplido su función.
 - Captura tidal en encuentros estelares muy cercanos (aunque este mecanismo es mucho menos eficiente).

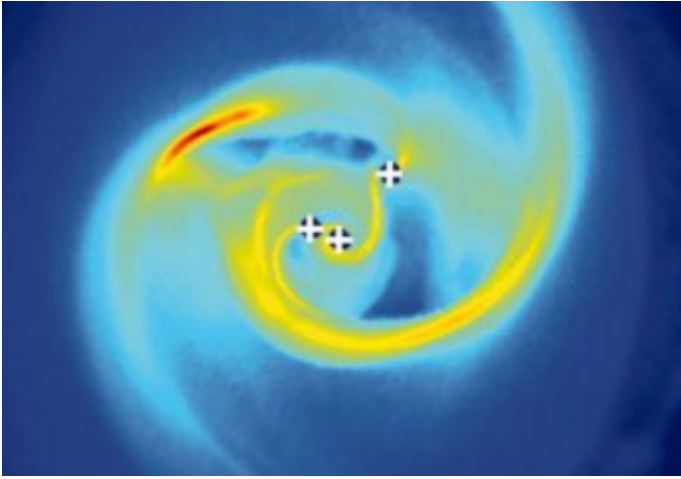
Conclusión: Un Mecanismo Casi Universal

Los resultados de Tokovinin et al. (2006) establecen que la formación de binarias muy cercanas (especialmente con $P < 3$ d) está **intrínsecamente ligada** a la presencia de un tercer cuerpo en el sistema. El mecanismo KLCT no es solo una posibilidad teórica, sino el **mecanismo de formación dominante** para esta población de binarias.

Este hallazgo representa uno de los casos más claros en astrofísica donde las estadísticas observacionales apuntan de manera inequívoca a un único mecanismo físico subyacente, transformando nuestra comprensión de cómo se forman los sistemas binarios más extremos.

13.4.4. Mecanismo Alternativo: Desdoblamiento Dinámico de Tríos Inestables

El artículo de revisión de **Moe & Kratter (2017)** presenta un mecanismo adicional para la formación de binarias cercanas, complementario al mecanismo de Kozai-Lidov.



El Proceso de Desdoblamiento Dinámico

Este mecanismo opera en sistemas triples jóvenes que se forman inicialmente en **configuraciones no jerárquicas** (o marginalmente estables). El proceso consta de varias etapas:

1. **Formación Inicial No Jerárquica:** El sistema triple nace con una configuración donde las separaciones entre los tres componentes son comparables, violando el criterio de jerarquía ($P_{\text{long}}/P_{\text{short}} < 5$). Esto puede ocurrir, por ejemplo, por fragmentación múltiple de un disco protostelar.
2. **Inestabilidad Dinámica:** Un sistema triple no jerárquico es inherentemente inestable en escalas de tiempo dinámicas. La evolución sigue el **teorema de virial** y la búsqueda de un estado de energía mínima.
3. **Expulsión de un Componente:** El sistema se reorganiza violentamente, expulsando (o "desdoblando") el componente con menor energía de ligadura. Las ecuaciones de movimiento se resuelven como:

$$\frac{1}{2}\mu v_{\text{eject}}^2 - \frac{GM_1 M_2}{r} \approx \text{constant} \quad (16)$$

donde μ es la masa reducida del sistema.

4. **Resultado: Binaria Excéntrica:** El resultado típico es una binaria con órbita excéntrica y separación ligeramente reducida, y una tercera estrella expulsada a alta velocidad (estrella runaway).

El Rol Crítico del Gas Primordial

Moe & Kratter (2017) enfatizan que para explicar las binarias **más cercanas** ($P < 10$ das), el desdoblamiento dinámico por sí solo no es suficiente. Se requiere **disipación adicional de energía** mediante interacciones con el gas primordial:

- **Arrastre Gaseoso:** Las estrellas jóvenes embebidas en el disco circumestelar experimentan arrastre aerodinámico, disipando energía orbital.
- **Migración en Disco:** Similar al mecanismo de formación planetaria, las binarias pueden migrar hacia el interior debido a las interacciones torcionales con el disco de gas.
- **Disipación en Periastro:** En binarias excéntricas resultantes de la expulsión, el paso por el periastro ocurre a distancias muy cortas donde:
 - Las fuerzas de marea son extremadamente efectivas para disipar energía.
 - La interacción con el gas residual es máxima.
- **Circularización:** La disipación de energía lleva a la circularización de la órbita pero a un **semieje mayor menor**.

Comparación con el Mecanismo KLCT

Table 6. Comparación entre los mecanismos de formación de binarias cercanas

Desdoblamiento Dinámico + Disipación	Kozai-Lidov + Marea
Configuración inicial: No jerárquica, inestable	Configuración inicial: Jerárquica, estable
Scale de tiempo: Corta ($10^2 - 10^4$ años), violenta	Scale de tiempo: Larga ($10^5 - 10^6$ años), secular
Resultado dinámico: Binaria excéntrica + expulsión	Resultado dinámico: Binaria circularizada cercana
Requiere: Gran cantidad de gas para disipación	Requiere: Tercer cuerpo perturbador
Domina en: Entornos con mucho gas primordial (Pre-MS)	Domina en: Sistemas con terceras compañeras estables

Conclusión: Mecanismos Complementarios

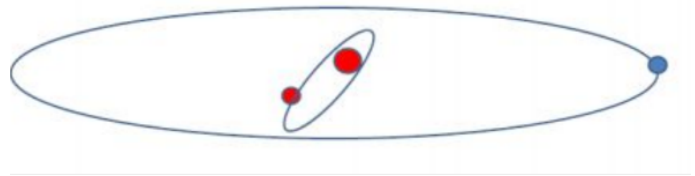
Moe & Kratter (2017) argumentan que ambos mecanismos son importantes y operan en diferentes regímenes:

- El **desdoblamiento dinámico con disipación** domina en las etapas más tempranas (Pre-MS) cuando hay abundante gas primordial para disipar energía eficientemente.
- El **mecanismo KLCT** domina en etapas posteriores, después de que se ha dispersado la mayor parte del gas, pero donde las perturbaciones seculares pueden actuar durante largas escalas de tiempo.

La relativa importancia de cada mecanismo depende de las condiciones iniciales de formación (cantidad de gas, configuración inicial) y puede variar entre diferentes sistemas. Esta visión de múltiples mecanismos proporciona una explicación más completa y matizada para la diversidad de binarias cercanas observadas.

13.4.5. Mecanismo de Kozai-Lidov: El Rol de la Inclinación y la Fricción de Marea

El mecanismo de Kozai-Lidov, mencionado en las referencias de **Kiseleva et al. (1998)** y **Fabrycky & Tremaine (2007)**, opera bajo condiciones específicas en sistemas triples jerárquicos estables.



Condiciones Necesarias para las Oscilaciones de Kozai-Lidov

Para que ocurran oscilaciones de Kozai-Lidov efectivas, el sistema triple debe cumplir dos condiciones críticas:

1. **Jerarquía Estable:** El sistema debe ser jerárquico, cumpliendo con el criterio $P_{\text{long}}/P_{\text{short}} \geq 5$. Esta condición asegura que las perturbaciones sean seculares (promediadas sobre muchas órbitas) en lugar de impulsivas.

2. **Inclinación Mutua No Coplana:** Las órbitas interna y externa **no deben ser coplanares**. Existe un rango crítico de inclinaciones mutuas (i_m) donde el efecto es máximo:

$$39^\circ \lesssim i_m \lesssim 141^\circ \quad (17)$$

Para $i_m \approx 90^\circ$, la excitación de excentricidad es máxima.

Física del Mecanismo: Conservación del Momento Angular

Las oscilaciones de Kozai-Lidov son una consecuencia de la **conservación del momento angular total** del sistema bajo perturbaciones seculares. En la aproximación cuadrupolar (válida para $P_{\text{long}}/P_{\text{short}} \gg 1$), la dinámica se describe por:

- La excentricidad de la órbita interna (e_{in}) y la inclinación mutua (i_m) oscilan anticorrelacionadamente.
- El período de estas oscilaciones seculares es:

$$P_{\text{Kozai}} \sim P_{\text{out}} \left(\frac{M_1 + M_2 + M_3}{M_3} \right) \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)^{1/2} (1 - e_{\text{out}}^2)^{3/2} \quad (18)$$

donde los subíndices "in" y "out" se refieren a las órbitas interna y externa respectivamente.

El Rol de la Fricción de Marea

Las oscilaciones de Kozai-Lidov por sí solas solo redistribuyen energía y momento angular de manera conservativa. Para producir migración orbital, se requiere **fricción de marea**:

1. Durante la fase de máxima excentricidad ($e \rightarrow 1$), las estrellas de la binaria interna pasan extremadamente cerca durante el periastro.
2. A distancias muy cortas, las **fuerzas de marea** disipan energía orbital a través de:
 - Deformación elástica de las estrellas
 - Calentamiento tidal
 - Generación de ondas internas
3. Esta disipación reduce el semieje mayor de la órbita interna según:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{tide}}} a \quad (19)$$

donde T_{tide} es el timescale de disipación tidal.

4. El proceso eventualmente **circulariza** la órbita pero a un **semieje mayor menor**.

Evidencia Observacional del Mecanismo

Las predicciones del mecanismo KLCT coinciden sorprendentemente bien con las observaciones:

- **Correlación triple-binaria cercana:** La casi universal presencia de terceras compañeras en binarias de período muy corto ($P < 3$ d), como encontró Tokovinin et al. (2006).
- **Distribución de excentricidades:** Las binarias con períodos entre 3 d y 30 d muestran una mezcla de órbitas excéntricas y circulares, consistente con diferentes etapas del proceso de circularización tidal.
- **Relación período-radio:** Las binarias completamente circulares muestran una relación clara entre período orbital y radio estelar, indicando que la circularización tidal ha sido efectiva.

Limitaciones y Extensiones del Modelo

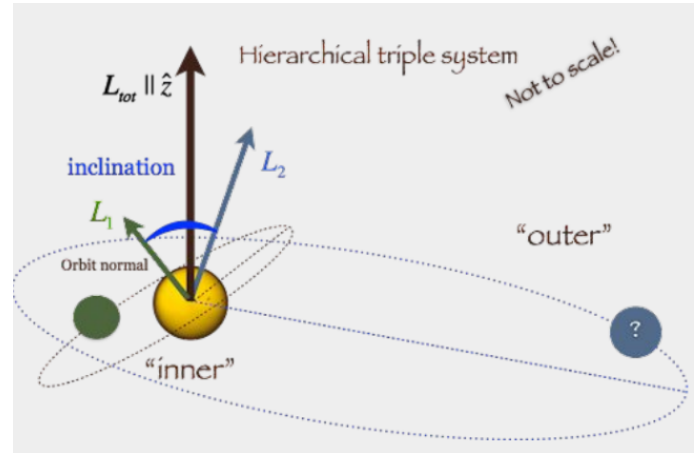
El mecanismo KLCT clásico tiene limitaciones que han llevado a extensiones:

- **Precesión Relativista:** En binarias muy cercanas, la precesión del periastro debido a efectos relativistas generales puede suprimir las oscilaciones de Kozai-Lidov.
- **Precesión Inducida por Disco:** La presencia de discos circumestelares puede también suprimir el mecanismo mediante precesión adicional.
- **Acoplamiento Octupolar:** Para órbitas externas excéntricas, los términos octupolares en la expansión del potencial pueden producir comportamientos caóticos y excitaciones de excentricidad aún mayores.

En resumen, el mecanismo de Kozai-Lidov acoplado con fricción de marea proporciona un marco teórico robusto y elegantemente simple que explica quantitatively las propiedades observadas de las binarias muy cercanas y su fuerte asociación con sistemas triples.

13.4.6. El Mecanismo de Zeipel-Kozai-Lidov: Una Explicación Geométrica

La figura proporcionada ilustra elegantemente la física fundamental detrás de las oscilaciones de Kozai-Lidov (también conocidas como mecanismo de Zeipel-Kozai-Lidov), mostrando el intercambio periódico entre excentricidad e inclinación.



Conservación del Momento Angular y el Teorema de Zeipel

El mecanismo se fundamenta en el **teorema de Zeipel** (1910), que establece que en un sistema jerárquico triple, se conserva aproximadamente la componente del momento angular perpendicular al plano orbital externo.

Definiendo los momentos angulares:

- L_1 : Momento angular de la órbita interna (binaria cercana)
- L_2 : Momento angular de la órbita externa (tercer cuerpo)
- $L = L_1 + L_2$: Momento angular total del sistema

La conservación de L y la naturaleza secular de la perturbación llevan al intercambio característico.

El Intercambio Periódico Excentricidad-Inclinación

El mecanismo opera a través de un ciclo continuo:

1. **Fase de Mínima Excentricidad:** La órbita interna es casi circular ($e \approx 0$), pero tiene alta inclinación con respecto al plano orbital externo.
2. **"Bombeo" de Excentricidad:** La perturbación gravitatoria secular del tercer cuerpo transfiere momento angular de la órbita interna a la externa. Como la magnitud de L_1 está relacionada con la excentricidad por:

$$L_1 \propto \sqrt{1 - e^2} \quad (20)$$

una disminución en L_1 implica un aumento en e .

3. **Fase de Máxima Excentricidad:** La excentricidad alcanza su valor máximo ($e \rightarrow 1$), mientras la inclinación mutua alcanza su mínimo.
4. **Recuperación de Inclinación:** El proceso se revierte, transfiriendo momento angular de regreso a la órbita interna, disminuyendo la excentricidad y aumentando la inclinación.

El período de este ciclo está dado por la ecuación de P_{Kozai} mostrada anteriormente.

Disipación Tidal y Migración Orbital

Como se indica en la figura, durante las fases de alta excentricidad ocurre el proceso clave:

- **Aproximación en Periastro:** Cuando $e \rightarrow 1$, la distancia en el periastro $r_p = a(1 - e)$ se vuelve muy pequeña, incluso para órbitas con semieje mayor moderado.
- **Fricción de Marea Intensa:** A distancias cortas, las fuerzas de marea disipan energía orbital eficientemente a través de:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{tide}}} \frac{GM_1 M_2}{2a} \quad (21)$$

- **Reducción del Semieje Mayor:** La disipación de energía reduce el semieje mayor de la órbita interna ($da/dt < 0$).
- **Circularización:** Simultáneamente, la disipación tidal tiende a circularizar la órbita ($de/dt < 0$).

Destinos Finales del Proceso

El mecanismo puede llevar a dos resultados principales:

1. **Binarias Muy Cercanas:** La migración orbital se detiene cuando la órbita se circulariza completamente, produciendo una binaria cercana que aún conserva su compañera terciaria distante. Esto explica el **96%** de correlación observada.
2. **Fusión Estelar:** En casos extremos, la migración puede continuar hasta que las estrellas se fusionan, produciendo:
 - Estrellas azules rezagadas (blue stragglers)
 - Estrellas de tipo B[e] con envolturas
 - Objetos de tipo Thorne-Żytkow

Importancia del Marco de Referencia Invariable

La figura muestra inteligentemente los vectores de momento angular en el **marco de referencia invariable** (donde L es fijo). En este marco:

- L_1 y L_2 precesan alrededor de L
- El ángulo entre L_1 y L_2 oscila

- La excentricidad e y la inclinación mutua i_m oscilan en oposición de fase

Esta representación geométrica proporciona una intuición física profunda del mecanismo, mostrando que es esencialmente un problema de **precesión acoplada** de momentos angulares.

La charla recomendada de Felipe Lagos probablemente explora aplicaciones modernas y extensiones de este mecanismo clásico a diversos contextos astrofísicos, desde exoplanetas hasta agujeros negros.

14. Consecuencias Astrofísicas de las Fusiones Estelares

Los mecanismos de Kozai-Lidov y desdoblamiento dinámico no solo producen binarias cercanas, sino que en casos extremos pueden llevar a la fusión completa de las estrellas. El resultado de estas fusiones depende críticamente de la fase evolutiva en que ocurren, como destacan **Perets & Fabrycky (2009)** y **Thompson (2011)**.

14.1. Fusión en la Secuencia Principal: Estrellas Azules Rezagadas

Cuando la fusión ocurre mientras ambas estrellas están aún en la secuencia principal (MS), el resultado es una **estrella azul rezagada** (Blue Straggler Star).

Características de las Blue Stragglers

- **Apariencia:** Aparecen más azules y luminosas que las estrellas de la misma edad en el cúmulo, "rezagándose" de la secuencia principal turn-off point.
- **Masa:** Tienen masas superiores al límite de la secuencia principal del cúmulo, typically entre 1.5 y $2M_{\odot}$ en cúmulos viejos.
- **Rotación:** A menudo muestran rotación rápida ($v \sin i > 50$ km/s) debido a la conservación del momento angular durante la fusión.
- **Abundancias Químicas:** Pueden mostrar anomalías en abundancias (e.g., enriquecimiento en litio, depletion de carbono) debido a la mezcla de material durante la fusión.

Mecanismo de Formación

La fusión de dos estrellas de la secuencia principal:

1. Combina sus masas ($M_{\text{final}} \approx M_1 + M_2$)
2. Mezcla hidrógeno fresco del interior hacia las capas externas
3. "Rejuvenece" la estrella resultante, dándole una apariencia más joven que sus compañeras de cúmulo

14.2. Fusión de Restos Compactos: Supernovas y Estallidos de Rayos Gamma

Cuando el sistema binario evoluciona primero hacia restos compactos antes de fusionarse, las consecuencias son mucho más violentas.

Escenario de Doble Enana Blanca

- **Formación:** Ambas estrellas evolucionan por separado a enanas blancas, formando una binaria cercana de doble enana blanca (DWD).

- **Aceleración por Kozai-Lidov:** Una compañera terciaria distante puede excitar la excentricidad de la DWD a través del mecanismo KLCT.
- **Fusión y Destino:** Dependiendo de la masa total:

$$M_{\text{total}} < M_{\text{Chandra}} (\approx 1.4 M_{\odot}) \rightarrow \text{Enana blanda de masa intermedia}$$

$$M_{\text{total}} \geq M_{\text{Chandra}} \rightarrow \text{Supernova Tipo Ia}$$

Escenario de Estrellas de Neutrones/Agujeros Negros

- **Formación:** El sistema evoluciona a una binaria de restos compactos (NS-NS, NS-BH, BH-BH).
- **Aceleración por Kozai-Lidov:** Una tercera compañera acelera la fusión mediante excitación de excentricidad.
- **Destino:** La fusión produce:
 - **Estallido de Rayos Gamma Corto (sGRB):** Si al menos uno de los objetos es una estrella de neutrones
 - **Onda Gravitacional:** Detectable por LIGO/Virgo/KAGRA
 - **Kilonova:** Producción de elementos pesados por proceso-r

14.3. Implicaciones para la Cosmología y la Física Fundamental

Estos canales de fusión tienen implicaciones de gran alcance:

Supernovas Tipo Ia como Candelas Estándar

- Las supernovas Tipo Ia son cruciales para medir distancias cosmológicas y descubrir la aceleración cósmica.
- El canal triple proporciona un mecanismo alternativo para producir SNe Ia, potencialmente afectando las calibraciones de distancias.
- Puede explicar SNe Ia en entornos jóvenes donde el canal de acreción simple es menos probable.

Astronomía de Multi-Mensajeros

- Las fusiones de restos compactos son fuentes de señales de multi-mensajero: ondas gravitacionales + radiación electromagnética.
- El canal triple predice correlaciones entre las propiedades de las fusiones y la presencia de compañeras terciarias.
- Puede afectar las tasas de fusión predichas para experimentos de ondas gravitacionales.

14.4. Conclusión: De la Dinámica Estelar a los Fenómenos Más Energéticos

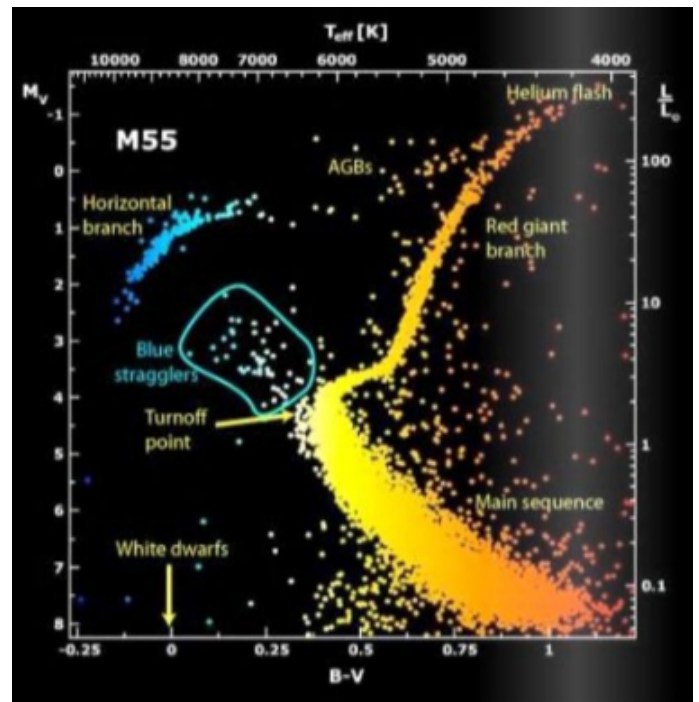
Los mecanismos dinámicos en sistemas triples proporcionan un puente fascinante entre:

Dinámica Estelar → Evolución Estelar → Fenómenos Explosivos

Lo que comienza como una perturbación gravitatoria secular en un sistema triple joven puede culminar, miles de millones de años después, en algunos de los eventos más energéticos del universo. Esta conexión ilustra profundamente cómo procesos dinámicos a escalas astronómicas pueden tener consecuencias en la física fundamental y nuestra comprensión del cosmos.

14.4.1. Ejemplo Observacional: Blue Stragglers en el Cúmulo Globular M55

El diagrama de color-magnitud (CMD) del cúmulo globular M55 proporciona una ilustración clásica de las estrellas azules rezagadas (Blue Stragglers) y su posición anómala.



Análisis del Diagrama de Color-Magnitud

El CMD de M55 muestra varias características clave:

- **Punto de Giro (Turnoff point):** La ubicación donde las estrellas abandonan la secuencia principal, indicando la edad del cúmulo ($\sim 12\text{-}13$ Gyr para M55).
- **Rama Horizontal:** Estrellas de masa similar al Sol en la fase de combustión de helio.
- **Enanas Blancas:** Restos evolutivos de estrellas de baja masa, ubicadas en la parte inferior izquierda.
- **Blue Stragglers:** Estrellas que aparecen **por encima** del punto de giro, en la región donde deberían haber abandonado ya la secuencia principal.

Características de las Blue Stragglers en M55

- **Posición en CMD:** Se encuentran en la secuencia principal pero por encima del turnoff, con $(B - V) \approx 0.25 - 0.5$ y magnitudes más brillantes de lo esperado.
- **Masa Inferida:** Su posición sugiere masas de $\sim 1.0 - 1.2 M_{\odot}$, mientras que las estrellas en el turnoff tienen $\sim 0.8 M_{\odot}$.
- **Edad Aparente:** Parecen ser $\sim 2\text{-}3$ Gyr más jóvenes que el cúmulo, creando la paradoja de estrellas "jóvenes" en un cúmulo viejo.

Mecanismos de Formación de Blue Stragglers

Como se indica, existen dos mecanismos principales para la formación de blue stragglers:

1. Fusión Estelar por Colisión o Merger:

- **Colisiones Directas:** Encuentros aleatorios en regiones densas del cúmulo.
 - **Mecanismo de Kozai-Lidov:** En sistemas triples, las oscilaciones pueden llevar a la fusión de la binaria interna, como discutido anteriormente.
 - **Evidencia para este canal:** Blue stragglers en regiones centrales densas de cúmulos, donde las colisiones son más probables.
2. **Transferencia de Masa en Sistemas Binarios:**
- **Acresción de Masa:** Una estrella gana masa de su compañera, "rejuveneciendo" su apariencia.
 - **Fusión por Contacto:** Las binarias de contacto pueden eventualmente fusionarse.
 - **Evidencia para este canal:** Blue stragglers con compañeras detectables o en regiones menos densas.

El Papel de los Sistemas Triples en la Formación de Blue Stragglers

El mecanismo de Kozai-Lidov en sistemas triples proporciona un canal particularmente elegante para la formación de blue stragglers:

1. Un sistema triple jerárquico con una binaria interna de período moderado.
2. Las oscilaciones de Kozai-Lidov excitan la excentricidad de la binaria interna.
3. Durante los periastrós de alta excentricidad, la disipación tidal reduce el semieje mayor.
4. Eventualmente, las estrellas se fusionan, creando una estrella de mayor masa.
5. La estrella resultante aparece como una blue straggler.

Importancia para la Evolución de Cúmulos

Las blue stragglers son importantes por varias razones:

- **Relojes Dinámicos:** Su distribución espacial y frecuencia trazan la historia dinámica del cúmulo.
- **Pruebas de Mecanismos de Formación:** Diferentes mecanismos dejan distintas huellas observables (e.g., rotación, abundancias químicas).
- **Ventanas a Procesos de Fusión:** Permiten estudiar los resultados de fusiones estelares in situ.

Estudios Modernos de Blue Stragglers

Técnicas modernas permiten distinguir entre los mecanismos de formación:

- **Espectroscopía de Alta Resolución:** Para medir rotación, abundancias químicas, y detectar compañeras.
- **Fotometría de Precisión:** Para detectar variaciones de brillo y binariedades.
- **Observaciones de Hubble:** Para resolver blue stragglers en regiones centrales densas.

El estudio de blue stragglers en cúmulos como M55 continúa proporcionando insights cruciales sobre los procesos dinámicos y de formación estelar en entornos densos, conectando la física de sistemas múltiples con la evolución estelar y de cúmulos.

References

- Perets, H. B., & Fabrycky, D. C. (2009). *On the triple origin of blue stragglers*. The Astrophysical Journal, 697(2), 1048-1056. DOI: [10.1088/0004-637X/697/2/1048](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1048)
- Thompson, T. A. (2011). *Accelerating compact object mergers in triple systems with the Kozai mechanism: a mechanism for 'prompt' Type Ia supernovae and short gamma-ray bursts*. The Astrophysical Journal, 741(2), 82. DOI: [10.1088/0004-637X/741/2/82](https://doi.org/10.1088/0004-637X/741/2/82)
- Kiseleva, L. G., Eggleton, P. P., & Mikkola, S. (1998). *Tidal friction in triple stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 300(1), 292-302. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01907.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01907.x)
- Fabrycky, D. C., & Tremaine, S. (2007). *Shrinking Binary and Planetary Orbits by Kozai Cycles with Tidal Friction*. The Astrophysical Journal, 669(2), 1298-1315. DOI: [10.1086/521702](https://doi.org/10.1086/521702)
- Moe, M., & Kratter, K. M. (2017). *The Close Binary Fraction of Solar-type Stars is Strongly Anti-correlated with Metallicity*. arXiv preprint arXiv:1706.09894. <https://arxiv.org/abs/1706.09894>
- Tokovinin, A. A. (1997). *MSC - a catalogue of physical multiple stars*. Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 124, 75-84. DOI: [10.1051/aas:1997181](https://doi.org/10.1051/aas:1997181)
- Eggleton, P. P., & Tokovinin, A. A. (2008). *A catalogue of multiplicity among bright stellar systems*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 389(2), 869-879. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13596.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13596.x)
- Allen, C., et al. (2012). *The Frequency of Triple Systems among Spectroscopic Binaries*. In *Orbital Couples: Pas de Deux in the Solar System and the Milky Way* (pp. 30-33). Observatoire de Paris.
- Tokovinin, A., et al. (2006). *Tertiary companions to close spectroscopic binaries*. Astronomy & Astrophysics, 446(2), 557-566. DOI: [10.1051/0004-6361:20053732](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053732)
- Makarov, V. V., Zacharias, N., & Hennessy, G. S. (2008). *Common Proper Motion Companions to Nearby Stars: Ages and Evolution*. The Astrophysical Journal, 687(1), 566-578. DOI: [10.1086/591638](https://doi.org/10.1086/591638)
- Hwang, H.-C., et al. (2021). *The wide binary fraction of solar-type stars is strongly anti-correlated with metallicity*. Nature, 591(7850), 390-393. DOI: [10.1038/s41586-021-03309-5](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03309-5)
- Carney, B. W., et al. (2005). *CNO and F abundances in the metal-poor halo binary CS 22876-032*. The Astronomical Journal, 129(1), 188-200. DOI: [10.1086/426327](https://doi.org/10.1086/426327)
- Gao, S., et al. (2014). *The metallicity dependence of the binary fraction*. In *Setting the scene for Gaia and LAMOST* (Eds. S. Feltzing, G. Zhao, N. A. Walton, & P. Whitelock), IAU Symposium, Vol. 298 (pp. 346-347). DOI: [10.1017/S1743921313006861](https://doi.org/10.1017/S1743921313006861)
- Hettinger, T., et al. (2015). *The frequency of binary stars in the Galactic halo*. The Astrophysical Journal, 806(1), L2. DOI: [10.1088/2041-8205/806/1/L2](https://doi.org/10.1088/2041-8205/806/1/L2)
- Moe, M., et al. (2013). *The binary fraction and mass ratio distribution of B-type stars*. In *Massive Stars: From Alpha to Omega* (p. 129).
- Dunstall, P. R., et al. (2015). *The VLT-FLAMES Tarantula Survey. XX. The nature of the X-ray bright emission line star VFTS 399*. Astronomy & Astrophysics, 580, A93. DOI: [10.1051/0004-6361/201525877](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525877)
- Duquenois, A., & Mayor, M. (1991). *Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II - Distribution of the orbital elements in an unbiased sample*. Astronomy & Astrophysics, 248, 485-524.
- Raghavan, D., McAlister, H. A., Henry, T. J., et al. (2010). *A survey of stellar families: multiplicity of solar-type stars*. The Astrophysical Journal Supplement Series, 190(1), 1-42. DOI: [10.1088/0067-0049/190/1/1](https://doi.org/10.1088/0067-0049/190/1/1)
- Fischer, D. A., & Marcy, G. W. (1992). *Multiplicity among M dwarfs*. The Astrophysical Journal, 396, 178-194. DOI: [10.1086/171708](https://doi.org/10.1086/171708)
- Sana, H., de Mink, S. E., de Koter, A., et al. (2012). *Binary interaction dominates the evolution of massive stars*. Science, 337(6093), 444-446. DOI: [10.1126/science.1223344](https://doi.org/10.1126/science.1223344)
- De Rosa, R. J., Patience, J., Wilson, P. A., et al. (2014). *The frequency of planetary companions to M dwarfs*. The Astrophysical Journal, 780(1), 94. DOI: [10.1088/0004-637X/780/1/94](https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/94)
- Duchêne, G., & Kraus, A. (2013). *Stellar multiplicity*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 51, 269-310. DOI: [10.1146/annurev-astro-081710-102602](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102602)
- Allen, P. R. (2007). *The Ultracool Field Dwarf Luminosity Function and Space Density from the Canada-France Brown Dwarf Survey*. The Astrophysical Journal, 668(1), 492-503. DOI: [10.1086/521275](https://doi.org/10.1086/521275)
- Sana, H., & Evans, C. J. (2011). *The multiplicity of massive stars: a high angular resolution survey with Cassini*. In C. Neiner, G. Wade, G. Meynet, & G. Peters (Eds.), *Active OB Stars: Structure, Evolution, Mass Loss, and Critical Limits* (Vol. 272, pp. 474-485). Cambridge University Press. DOI: [10.1017/S1743921311011124](https://doi.org/10.1017/S1743921311011124)
- Lada, C. J. (2006). *The statistic of stellar multiplicity and the IMF: A concise review*. In *IMF@50: The Initial Mass Function 50 Years Later* (Eds. E. Corbelli, F. Palla, & H. Zinnecker), Astrophysics and Space Science Library, Vol. 327 (pp. 3-17). Springer, Dordrecht.

- Salpeter, E. E. (1955). *The luminosity function and stellar evolution*. The Astrophysical Journal, 121, 161. DOI: [10.1086/145971](https://doi.org/10.1086/145971)
- Kroupa, P. (2001). *On the variation of the initial mass function*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 322(2), 231–246. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x)
- Chabrier, G. (2003). *Galactic stellar and substellar initial mass function*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 115(809), 763–795. DOI: [10.1086/376392](https://doi.org/10.1086/376392)
- Moe, M., & Di Stefano, R. (2017). *Mind Your Ps and Qs: The Interrelation between Period (P) and Mass-ratio (Q) Distributions of Binary Stars*. The Astrophysical Journal Supplement Series, 230(2), 15. DOI: [10.3847/1538-4365/aa6fb6](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa6fb6)
- Goodwin, S. P., Kroupa, P., Goodman, A., & Burkert, A. (2006). *The Fragmentation of Cores and the Initial Binary Population*. In *Protostars and Planets V* (Eds. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil), (pp. 133–147). University of Arizona Press, Tucson.
- Kroupa, P. (1995). *Inverse dynamical population synthesis and star formation*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 277(4), 1491–1506. DOI: [10.1093/mnras/277.4.1491](https://doi.org/10.1093/mnras/277.4.1491)
- Badenes, C., et al. (2018). *The APOGEE Spectroscopic Binaries. I. The Incidence of Binaries and the Properties of Double-lined Spectroscopic Binaries in a Large Galactic Sample*. The Astrophysical Journal, 854(2), 147. DOI: [10.3847/1538-4357/aaaab5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaaab5)
- Moe, M., et al. (2019). *A Comparison of the Stellar, CO, and Dust Emission of the Galactic Massive Star-forming Region W49A*. The Astrophysical Journal, 875(1), 61. DOI: [10.3847/1538-4357/ab0d80](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0d80)
- Latham, D. W., et al. (2002). *The HATNET Variability Survey of the Kepler Field*. The Astronomical Journal, 124(2), 1144–1165. DOI: [10.1086/341677](https://doi.org/10.1086/341677)