

# Mecanismos de disolución de cúmulos

Hollman Daniel Quintero Salazar

Septiembre 2022

## Resumen

Los cúmulos globulares se encuentran entre los objetos más antiguos de las galaxias, comprender los detalles de su formación y evolución puede brindar información valiosa sobre la historia temprana de sus galaxias huéspedes. Por otro lado, los cúmulos abiertos, mucho más jóvenes, pequeños y amorfos, son excelentes trazadores de formación estelar temprana y dinámica del disco galáctico. Como cualquier sistema dinámico, los cúmulos estelares están sujetos a cambios evolutivos en su estructura como un todo. Es muy común que estos cambios desemboquen en la disolución del propio cúmulo. Esta disolución ocurre debido a la interacción del cúmulo con su galaxia huésped, o bien, por procesos internos referentes a las propias estrellas que lo forman. El presente reporte presenta un resumen de los mecanismos de disolución internos y externos más importantes.

## 1 Mecanismos internos

Cuando un cúmulo estelar esta en equilibrio gravitatorio se dice que tal sistema esta virializado. La energía cinética promedio de las estrellas es proporcional a la energía potencial promedio del sistema como un todo. Cuanto mayor es la energía cinética de una estrella individual, mayor sera la probabilidad que escape del cúmulo al desvincularse de la ligadura gravitacional. Así pues, es bastante intuitivo pensar que, conforme el cúmulo va perdiendo masa, la ligadura gravitacional es menor y por tanto la energía cinética máxima (asociada a la velocidad de escape) sera menor. Considerando el argumento anterior, se plantea que el cúmulo se ira diluyendo a medida que escapen estrellas de su conjunto (menor la masa, menor la energía de ligadura, menor la velocidad de escape, muchas mas estrellas escapan).

Las estrellas pueden escapar de un cúmulo por dos mecanismos: Un único encuentro cer-

cano con otra estrella puede producir un cambio de velocidad comparable con las velocidades iniciales de las dos estrellas, dejando así a una de las estrellas con una velocidad superior a la del escape local; este proceso se denomina expulsión. Una serie de encuentros más distantes y más débiles puede aumentar gradualmente la energía de una estrella, hasta que un encuentro débil final le da a la estrella una energía ligeramente positiva y se escapa; se denomina a este proceso como evaporación (más gradual) [Binney and Tremaine 2011].

Por otro lado se tiene que, al igual que el cúmulo, las estrellas también evolucionan a través del tiempo. Conforme las estrella envejece y acaba su material fusional, esta puede perder masa debido a vientos estelares, flares, o en casos mas extremos (para el caso de estrellas con mucha masa en fases muy evolucionadas) puede expulsar cantidades proporcionalmente grandes de material estelar en forma de supernova o nebulosa planetaria.

Es importante destacar que estos fenómenos, asociados a la propia evolución de las estrellas, disminuyen la energía de ligadura del cúmulo y contribuyen de sobremanera en la disolución del mismo. Debido a que las supernovas son eventos extremadamente violentos, también existe la posibilidad que el cúmulo se disuelva por el propio desbalance de energía que ocasiona este fenómeno. Es mas común esperar la ocurrencia de este tipo de eventos en cúmulos abiertos y cúmulos globulares pequeños donde la energía de ligadura es relativamente débil.

## 1.1 Evaporación y expulsión

Un sistema estelar típico contiene estrellas con una amplia gama de masas. Por la teoría cinética se sabe que los encuentros tienden a producir equipartición de la energía cinética: en promedio, las partículas con una gran energía cinética  $\frac{1}{2}m \cdot v^2$  pierden energía frente a las partículas con menos energía cinética. De vez en cuando, un encuentro le da a una estrella suficiente energía para escapar del sistema estelar. Por lo tanto, hay una fuga lenta pero irreversible de estrellas del sistema, por lo que los sistemas estelares evolucionan gradualmente hacia un estado final que consta de solo dos estrellas en una órbita kepleriana, y todas las demás escaparon al infinito. La escala de tiempo en la que las estrellas se “evaporan” de esta manera puede relacionarse con la escala de tiempo de relajación.

El tiempo de relajación  $t_{rh}$  se enfoca en el siguiente concepto. Conforme el cúmulo evoluciona a través del tiempo cada estrella se aleja lentamente de su órbita inicial. Como resultado de esta difusión espacio-fase, la entropía del sistema estelar aumenta y su estructura se vuelve menos sensible a sus condiciones iniciales.

Citando a Hénon (1960, 1969), Binney and Tremaine 2011 refieren que la tasa de expulsión para un sistema asilado, adoptando un modelo

de distribución de densidad de Plummer y considerando que todas las estrellas tienen aproximadamente la misma masa, se puede estimar que,

$$\frac{dN}{dt} = -1.05 \times 10^{-3} \frac{N}{t_{rh} \ln(\lambda N)} \quad (1)$$

en donde  $t_{rh}$  representa el tiempo de relajación en la formación del cúmulo. El término  $\ln(\lambda N)$  está presente solo para cancelar la dependencia de  $t_{rh}$  de  $\ln(\lambda N)$ , dado que el logaritmo surge del efecto acumulativo de encuentros distantes, no aparece en la tasa de expulsión, que se debe a encuentros cercanos.

El análisis de la evaporación es un poco más complicado que la expulsión: miríadas de encuentros débiles hacen que la estrella se difunda al azar a través del espacio de fase, y algunas de las estrellas más energéticas vagan hacia la región libre del espacio de fase. La tasa de evaporación está dominada por estrellas en órbitas muy alargadas, que son golpeadas por encuentros a medida que se precipitan a través del denso centro del cúmulo. A medida que la energía de una estrella de este tipo se acerca a la energía de escape, el apocentro crece y el período orbital se alarga, pero el pericentro tiende a permanecer aproximadamente a la misma distancia.

## 1.2 Perdida de masa por evolución estelar

Las estrellas a menudo expulsan masa de sus superficies cerca del final de sus vidas. Si la estrella que pierde masa está ubicada en un cúmulo globular, es probable que el gas expulsado escape del cúmulo, ya sea porque la velocidad de eyección excede la velocidad de escape del cúmulo o porque el gas galáctico barre regularmente el gas interno del cúmulo cuando este pasa a través del disco. Así, la masa del cúmulo disminuye a medida que evolucionan las estrellas [Binney

and Tremaine 2011].

La formación de estrellas suele tener una eficiencia inferior al 40 % y el gas que no se convierte en estrellas se pierde en unos pocos 105 a 106 millones de años debido a los vientos estelares de estrellas masivas o explosiones de supernovas. Las simulaciones de N-cuerpos demuestran que la pérdida del gas primordial puede causar fácilmente que los cúmulos de estrellas pierdan una gran fracción de sus estrellas o se desprendan por completo (Figura 1).

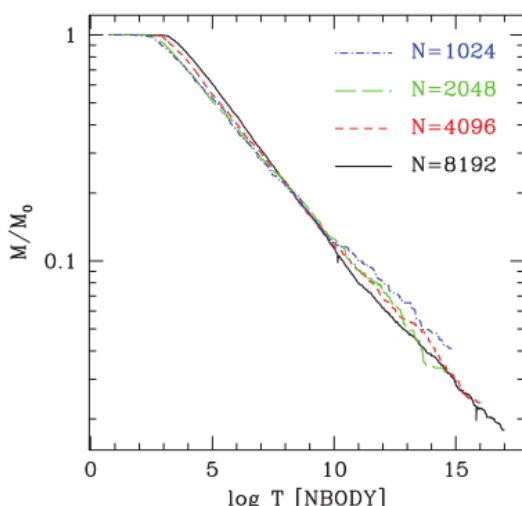


Figura 1: Disolución de cúmulos aislados a partir de diferentes números iniciales de partículas. Fuente: *Baumgardt 2009*

Alrededor del 30% de la masa de un cúmulo estelar se pierde debido a la evolución estelar de las estrellas de unos pocos giga años y la fracción puede ser significativamente mayor para los cúmulos estelares que comienzan con un IMF grande. La pérdida de masa debida a la evolución estelar hace que los cúmulos se expandan y, al mismo tiempo, disminuye el radio de

<sup>1</sup>El efecto de calentamiento o enfriamiento del cúmulo surge de modelar el sistema como una analogía del gas ideal, en donde cada partícula es una estrella. Lo particular de esta derivación es que estos sistemas tienen calor específico negativo (*Negative heat capacity*)

marea. Aunque el efecto es menos fuerte que la pérdida del gas primordial, ya que la pérdida de masa ocurre en una escala de tiempo más larga, las simulaciones de N-cuerpos demuestran que el efecto es lo suficientemente fuerte como para separar los cúmulos de baja concentración rodeados por un campo de marea externo [Baumgardt 2009].

## 2 Mecanismos externos

### 2.1 Choque con el disco y el bulbo

Los cúmulos globulares en las galaxias espirales pasan por el plano del disco dos veces por órbita. A medida que cruzan el plano, el campo gravitacional del disco ejerce una fuerza gravitacional de compresión que se superpone al propio campo gravitatorio del cúmulo, apretando brevemente al cúmulo a lo largo de la normal al plano del disco. La repetición de estos apretones en los pasos sucesivos a través del disco pueden eventualmente romper el cúmulo (lo calientan<sup>1</sup>). Este proceso se conoce como *disk shocking*. Según Binney and Tremaine 2011, el tiempo de interrupción o ruptura por causa de este efecto viene dado por,

$$t_d \simeq \frac{1}{2} T_\psi \frac{|E|}{\Delta E} \quad (2)$$

en donde  $T_\psi$  es el periodo orbital del cúmulo y  $E = \frac{1}{2} GM_c/a$ , esto surge debido a que el potencial es kepleriano en las partes exteriores del cúmulo, donde el efecto del choque con el disco es mucho más fuerte.

También puede ocurrir el proceso de interacción entre el cúmulo y el bulbo, tal fenómeno se conoce como *bulge shocking*. En este caso sucede

que hay un cambio súbito en el campo gravitatorio externo, esto ocurre cuando un cúmulo en una órbita altamente excéntrica se sumerge a través del bulbo de una galaxia espiral o el centro denso de una galaxia elíptica. Los repetitivos encuentros entre el cúmulo y el bulbo agregan energía a las estrellas más externas, haciendo que algunas escapen del cúmulo dirigiendo así la eventual disolución del cúmulo.

## 2.2 Choques con nubes interestelares

Es importante mencionar la interacción que pudieran llegar a tener los cúmulos con nubes interestelares. El proceso es muy similar al *disk shocking*, para el caso particular, debido a que las nubes interestelares son menos masivas que el disco como un todo y tienen efectos gravitacionales más locales, la perturbación que producen en cúmulos estelares está más orientada a cúmulos abiertos o cúmulos globulares pequeños.

## 2.3 Efecto de marea de la galaxia huésped

Un choque de marea (*tidal stripping* o *tidal shock*) sucede cuando un campo gravitacional externo cambia rápidamente y acelera las estrellas en las partes exteriores del cúmulo, lo que lleva a la expansión del cúmulo y al escape de algunos de sus miembros [Binney and Tremaine 2011].

Por otra parte, Baumgardt 2009 expone lo siguiente. Los cúmulos estelares no suelen estar aislados sino que se mueven en el campo gravitatorio de su galaxia huésped. La galaxia puede influir en la evolución de un cúmulo estelar de dos maneras: Un *tidal stripping*, que surge, por ejemplo, si los cúmulos se mueven en órbitas circulares a través de potenciales axisimétricos, esto confina las estrellas del cúmulo en cierto volumen alrededor del centro del cúmulo, fuera del cual las estrellas no están unidas al cúmulo. Esto

evita que los cúmulos se expandan indefinidamente y acelera el escape de las estrellas ya que se reduce la energía necesaria para escapar del cúmulo.

Del mismo modo pueden surgir campos de marea externos variables si los cúmulos se mueven en órbitas elípticas o a través del disco galáctico. En el primer caso, experimentan choques de marea disruptivos ya que las estrellas son aceleradas alejándose del centro del cúmulo, en el segundo, los choques son compresivos. En ambos casos se incrementa la energía interna de los cúmulos (se calientan y es más probable que las estrellas escapen).

## 2.4 Fricción dinámica

El concepto de fricción dinámica se puede enunciar con dos enfoques recíprocos. En primer lugar se tiene en cuenta que el cúmulo (más masivo) se mueve a través de un sistema estelar de estrellas mucho más ligeras.

Así: **1.** El cúmulo produce una región de mayor densidad de estrellas detrás suyo (muy parecida a la estela detrás del movimiento de un barco (ver figura 2)) que a su vez ejerce una atracción gravitacional sobre las estrellas, esto conduce a que el cúmulo se desacelere. **2.** El cúmulo se mueve en el mar de estrellas más ligeras y se produce un intercambio de energía, aumentando la energía de las estrellas más ligeras a expensas del cúmulo, esto provoca una fuerza de arrastre sobre el cúmulo [Aceves and Colosimo 2007]. Esta pérdida de energía estimula la evaporación al igual que conduce al sistema hacia el centro galáctico (cayendo en espiral) produciendo *tidal stripping* y aumentando la probabilidad de *disk shocking* o *bulge shocking*.

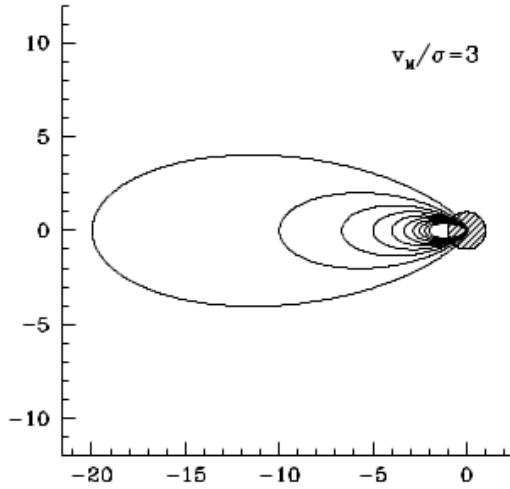
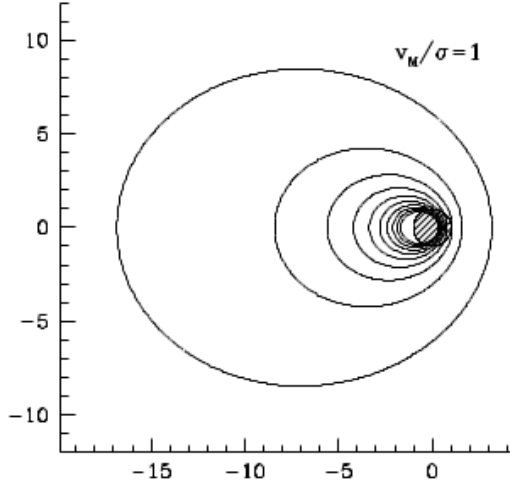


Figura 2: Un cúmulo de masa  $M$  viaja de izquierda a derecha con velocidad  $v$ , a través de una distribución homogénea de estrellas con dispersión espacial  $\sigma$ . La desviación de las estrellas por la masa aumenta la densidad estelar en la zona inferior, y la atracción gravitacional de esta estela en  $M$  conduce a la fricción dinámica. Fuente: *Binney and Tremaine 2011*

Como se observa en la figura 2, se considera que el cúmulo tiene una masa  $M$  mucho mayor

a las estrellas circundantes y una velocidad  $v$ , del mismo modo se asume una distribución maxweliana de las estrellas circundantes con dispersión espacial  $\sigma$ . Bajo estas consideraciones se puede llegar a la formula de Chandrasekhar, esta expresión relaciona el cambio de momento lineal en el cúmulo a través del tiempo (la fuerza resultante es la fricción dinámica). Usando la formula de Chandrasekhar ( y haciendo las restricciones correctas), se puede estimar el tiempo de interacción de la fricción dinámica para un cumulo estelar. Así, para un cumulo de  $M = 2 \times 10^5 M_{\odot}$ , se tiene que ( $r_i$  radio en espiral interna),

$$t_{fric} = 64 \text{Gyr} \frac{\sigma}{200 \text{kms}^{-1}} \left( \frac{r_i}{1 \text{kpc}} \right)^2 \quad (3)$$

## 2.5 Difusión de estrellas de campo

Las estrellas de campo representan un componente de masa significativo tanto en la Vía Láctea como en otras galaxias. Los cúmulos globulares orbitan en este fondo de estrellas de campo y se encuentran con muchas de ellas. Visto desde el marco de reposo de un cúmulo globular, sus estrellas se dispersan y ralentizan colectivamente por fricción dinámica, efecto causado por todas las estrellas de campo que se difunden a través de él. Las estrellas de campo pierden parte de su energía debido a los movimientos aleatorios de las estrellas del cúmulo y calientan el cúmulo. Con el tiempo, este calentamiento contribuye a la disolución del cúmulo.

Según Peng and Weisheit 1992, la perdida media de energía generada por las estrellas de campo a las cúmulos globulares viene dado por,

$$\langle \Delta E \rangle = - \frac{m_f^2}{m_c} \frac{n_c \Lambda}{v} \Delta t \quad (4)$$

donde  $m_f$  y  $m_c$  son la masa de la estrella de campo y la masa de la estrella perteneciente al cúmulo (con la cual ocurre la interacción dinámica),  $v$  es la velocidad de la estrella de campo,  $n_c$  la densidad numérica del cúmulo,  $\Delta t$  el tiempo de interacción entre  $m_f$  y  $m_c$  y  $\Lambda$  un parámetro relacionado al número de estrellas en el cúmulo<sup>2</sup>.

También puede suceder que algunas estrellas de campo penetren dentro del cúmulo, no obstante, si su energía cinética es baja comparada con la fricción dinámica ejercida por las estrellas del propio cúmulo, las estrellas no solo calentarán el sistema sino que además se convertirá en un nuevo miembro del cúmulo. Como es de suponerse, este fenómeno debería ser poco común (dado que las estrellas de campo tienen velocidades muy altas) y dependerá fuertemente de la masa y el radio del cúmulo y la velocidad

de la estrella de campo.

## REFERENCIAS

- Aceves, Héctor and María Colosimo (2007). “An introduction to dynamical friction in stellar systems”. In: *American Journal of Physics* 75.2, pp. 139–147.
- Baumgardt, Holger (2009). “Dissolution of Globular Clusters”. In: *Globular Clusters-Guides to Galaxies*. Springer, pp. 387–394.
- Binney, James and Scott Tremaine (2011). *Galactic dynamics*. Vol. 13. Princeton university press.
- Peng, Wei and Jon C Weisheit (1992). “Field star diffusion in globular clusters”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 258.3, pp. 476–482.

---

<sup>2</sup>Este valor surge de la ecuación de Chandrasekhar para fricción dinámica