

Finding Streaming Motions in Ultra Compact Dwarfs as a Probe of Star Cluster Merging Scenario

B. A. CARLOS¹

¹Universidad del Bío-Bío, Concepción (e-mail: carlos.bustos2401@alumnos.ubiobio.cl)

RESUMEN El origen de las enanas ultra compactas (UCDs) se mantiene aún en debate por la comunidad científica. Se ha propuesto que estas corresponden a remanentes de galaxias enanas nucleadas que se desprendieron de sus estrellas exteriores por colisiones gravitacionales. Por otra parte, se sostiene que las UCDs son el resultado de la fusión de diversos cúmulos estelares, en el que los remanentes de los grupos de estrellas conservarán su movimiento como velocidades coherentes internas durante un tiempo. Con el objetivo de establecer parámetros observacionales que validen el escenario de formación de UCDs por fusión de cúmulos globulares, se realizaron simulaciones computacionales de evolución de estas fusiones. De esta forma, el posterior análisis del movimiento de flujo reveló el tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes. Para esto, se utilizó el software de simulaciones gravitacionales **Superbox**, junto con el software de análisis de velocidades y química **Beacon**, para determinar el tiempo de disolución de las velocidades coherentes. Estas simulaciones se realizaron con un modelo de Plummer que emplea tres radios diferentes: $R_{pl,CC,1} = 0.05kpc$, $R_{pl,CC,2} = 0.1kpc$ y $R_{pl,CC,3} = 0.2kpc$. Con esto, se generaron tres complejos de cúmulos estelares que evolucionaban en el tiempo. El tiempo de supervivencia de los patrones de velocidades coherentes fue de $5 - 25Myr$ para el sistema 1, $35 - 50Myr$ para el sistema 2 y $116 - 164Myr$ para el sistema 3. Esto implica que debido a la corta duración del movimiento de flujo de UCDs, en el escenario de formación por fusión de cúmulos estelares, se vuelve difícil verificar este proceso de forma observacional.

PALABRAS-CLAVE

I. INTRODUCCIÓN

Las galaxias enanas ultra compactas (UCDs) son sistemas estelares con una masa dinámica entre 10^6 y $10^8 M_{\odot}$ ([1]) y radios proyectados de media-luz $10 \leq r_H \leq 75pc$ ([2], [3]) en las que sus estrellas se encuentran ligadas gravitacionalmente. Fueron consideradas como un sistema independiente por [4] tras observaciones del cúmulo de Fornax alrededor de la galaxia NGC 1399, y posteriormente fueron clasificadas como un nuevo tipo de galaxia enana por [5].

Estos sistemas poseen magnitudes absolutas en el rango de $-13.5 \lesssim M_B \lesssim 11.5$ para la banda azul (B-band) y $-14 \lesssim M_V \lesssim -12$ para la banda visible (V-band) ([5]; [2]). Además, se caracterizan por poseer una alta relación masa-luz en la banda visible $M/L_V \approx 3 - 5 M_{\odot}/L_{\odot,V}$ ([1], [6]). Finalmente, los UCDs presentan altos tiempos de relajación t_{rel} , estos tiempos son del orden de la edad del universo y corresponden a valores entre los tiempos de relajación de los cúmulos de estrellas (GC) y de las galaxias, esto es $t_{GC} < t_{UCD} < t_{gal}$ ([7]).

Debido a estas características, el origen y la naturaleza de las UCDs siguen siendo temas de debate en la comunidad científica. Por un lado se plantea que estas son el núcleo remanente de galaxias enanas nucleadas (dE,N) que perdieron parte de sus estrellas debido a colisiones gravitacionales ([8]). A pesar de que una galaxia enana posee un $r_H \sim 1kpc$, se proponen procesos violentos, como la interacción con el agujero negro (BH) M87 en el cúmulo de Virgo, en que estas galaxias pueden disolverse y su núcleo sobrevivir adquiriendo propiedades similares a los GC en luminosidad y tamaño ([9]).

Esto es apoyado por la detección de materia oscura (DM) y BHs en algunos UCDs, e.g el caso de UCD3 en el cúmulo de Fornax. Este UCD es el más brillante detectado a la fecha, con una masa dinámica de $3.5 \times 10^6 M_{\odot}$, cuya dinámica está bien caracterizada por perfiles de DM y por la presencia de un agujero negro supermasivo (SMBH) ([10]). En este, la relación masa-luz es mucho más baja que en otros UCDs y se ha detectado pequeños montones de materia oscura ([11]). De igual forma, SMBHs con una masa mayor a 1 millón de masas solares han sido detectados en otros UCDs ([10]).

Sin embargo, la falta de observaciones que muestren estados intermedios entre galaxias nucleadas y UCDs debilita este posible escenario.

Por otra parte, el modelo de formación de UCDs a través de fusión de cúmulos estelares también parece predecir correctamente las características de estos cuerpos. En este escenario, el UCD corresponde a la fusión de diversos supercúmulos estelares ricos en cúmulos de estrellas masivas jóvenes (YMCs) que pueden formarse en colisiones de galaxias ricas en gas ([12]). Por ende, el UCD es una extensión de los GCs y comparte la mayoría de sus propiedades. En esta línea, [13] obtuvo que, al comparar los modelos analíticos con las observaciones de los UCDs, no se puede establecer que posean halos de DM con masas viriales mayores a $10^6 M_{\odot}$. De la misma forma, [14] demostró que, mediante aproximaciones de Monte Carlo para investigar la composición dinámica de modelos con masa estelar y DM, la cantidad de DM para representar UCDs como NGC 2419 es menor al 6% de la masa total.

Se ha demostrado que el escenario de fusión de cúmulos estelares puede explicar objetos más grandes, como las galaxias enanas elípticas, UCDs y cúmulos extendidos ([15], [16]), lo que abre un nuevo canal de formación para sistemas masivos. Además, se sabe que las zonas que forman este tipo de agrupaciones de complejos de cúmulos (CCs) son típicas y se localizan en las partes perturbadas de discos. Ejemplos de estos sistemas son los nudos en la Galaxia de Antenas ([17]; [18]), los CCs en el estallido estelar NGC 7673 ([19]), M82 ([20]), Arp24 ([21]), la Galaxia Cabeza de Pájaro NGC 6745 ([22]), NGC 6946 ([23]), el Quienteto de Stephan ([24]) y NGC 922 ([25]). Todo esto, y los valores de masa-luminosa cercana a los UCDs, nos indican un prometedor camino para explicar el origen y naturaleza de estos cuerpos.

En este trabajo se busca identificar parámetros observacionales que validen el escenario de formación de UCDs por fusión de GCs. Para ello, se utiliza el **tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes** de los cúmulos progenitores como parámetro principal a caracterizar. Este tiempo corresponde al tiempo que tardan las estrellas en perder la coherencia asociada al cúmulo progenitor.

Con este objetivo, se realizan simulaciones numéricas de dinámica gravitacional para modelar la evolución de complejos de GC con un total de tres millones de partículas distribuidas con diferentes configuraciones iniciales. Estas simulaciones son posteriormente analizadas buscando los patrones de coherencia en las velocidades y posiciones de las partículas.

El siguiente artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen las simulaciones numéricas y los modelos iniciales utilizados. En la Sección 3 se presentan la metodología para identificar y cuantificar las velocidades coherentes remanentes de los cúmulos progenitores. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos para los tiempos de supervivencia del movimiento de flujo en los distintos modelos simulados. En la Sección 5 se discuten las

implicancias de estos resultados para el escenario de formación de UCDs por fusión de cúmulos globulares, junto con su relación con estudios observacionales previos. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones principales de este estudio.

II. SIMULACIONES

En este capítulo se describen las simulaciones realizadas para estimar el tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes de los UCDs. Se detalla el software empleado, los parámetros utilizados y la configuración inicial tanto del cúmulo globular (GC) como del complejo de cúmulos.

A. SISTEMA FÍSICO

Las simulaciones modelan la evolución de un conjunto de GCs ligados gravitacionalmente en un sistema dinámico llamado complejo de cúmulos (CC). Al inicio, todas las estrellas de un GC permanecen ligadas entre sí, lo que implica que las velocidades de cada estrella individual son similares a la velocidad del centro de masa de dicho cúmulo. Al avanzar el tiempo de evolución del sistema, los cúmulos se disuelven gradualmente, lo que da paso a estructuras mas compactas y densas.

De este proceso de fusión surge un UCD, en el que aún se presentan patrones cinemáticos remanentes de las velocidades originales de los cúmulos progenitores. Estas velocidades coherentes internas (Streaming motions) corresponden al principal trazador de la historia de la fusión del sistema. Sin embargo, estos patrones son temporales y su tiempo de duración depende de las condiciones iniciales del sistema.

El sistema posee una interacción puramente autogravitante y está compuesto por partículas estelares que evolucionan bajo la gravedad newtoniana. No se incluye gas ni otros mecanismos disipativos, de modo que la dinámica está determinada únicamente por las interacciones gravitatorias entre las partículas.

Para modelar tanto los cúmulos globulares individuales como el complejo de cúmulos, se utiliza una distribución de Plummer ([26]). Esta elección permite representar de manera realista la densidad estelar decreciente desde el centro hacia la periferia de cada cúmulo (Ver figura 1), lo que permite que las condiciones iniciales del sistema reflejen perfiles de densidad consistentes con cúmulos observados.

El objetivo de las simulaciones es determinar y caracterizar el tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes bajo distintas condiciones iniciales. Este tiempo constituye un parámetro observacional clave, ya que permite discriminar entre los diferentes escenarios propuestos para la formación de las UCDs y aportar evidencia que favorezca uno u otro mecanismo.

B. SOFTWARE

Para las simulaciones, se utilizó el software de interacciones gravitacionales **Superbox** desarrollado por [27]. Este es un código malla-partícula escrito en Fortran 77 que corresponde

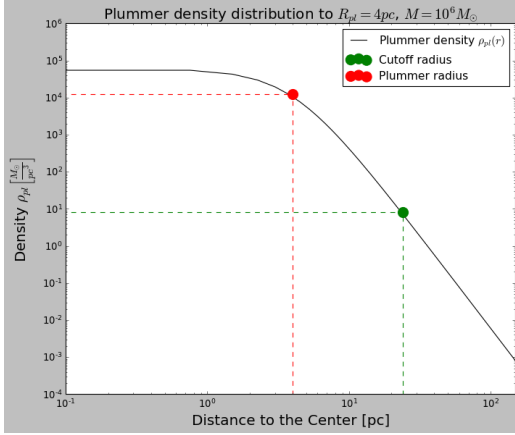


FIGURE 1. Perfil de densidad de un cúmulo modelado con una distribución de Plummer. La densidad decrece desde el centro hacia la periferia lo que refleja las propiedades típicas de los cúmulos globulares observados.

a sub-arreglos concéntricos y comóviles de alta resolución.

Superbox utiliza un método Particle-Mesh (PM) en el que las partículas depositan su masa en una grilla mediante el esquema Nearest-Grid-Point (NGP). La densidad resultante $\rho(\mathbf{x})$ se usa para resolver la ecuación de Poisson,

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho,$$

mediante una Transformada Rápida de Fourier (FFT), lo que permite obtener el potencial y posteriormente las fuerzas gravitacionales como

$$\mathbf{F} = -\nabla \Phi.$$

Finalmente, la fuerza es integrada en la velocidad y el movimiento mediante el esquema Leapfrog (kick-drift-kick). Este esquema preserva las propiedades hamiltonianas y conserva la energía mecánica del sistema. El esquema leapfrog kick-drift-kick usado es:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) &= \mathbf{v}(t) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{a}(\mathbf{x}(t)), \\ \mathbf{x}(t + \Delta t) &= \mathbf{x}(t) + \Delta t \mathbf{v}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right), \\ \mathbf{v}(t + \Delta t) &= \mathbf{v}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{a}(\mathbf{x}(t + \Delta t)), \end{aligned}$$

donde $\mathbf{x}$, $\mathbf{v}$ y $\mathbf{a}$ denotan posición, velocidad y aceleración, respectivamente, y Δt es el paso temporal.

Para cada objeto simulado, **Superbox** emplea cinco mallas con tres niveles de resolución diferentes, gracias al principio de superposición del potencial (Ver figura 2). Las mallas son:

- **Malla 1:** de alta resolución, centrada en el núcleo, con un tamaño de $2R_{\text{core}}$. Almacena todas las partículas con $r \leq R_{\text{core}}$.
- **Malla 2:** de resolución intermedia, del tamaño $2R_{\text{out}}$. Contiene las mismas partículas de la malla 1.
- **Malla 3:** igual tamaño y resolución que la malla 2, pero almacena únicamente partículas con $R_{\text{core}} < r \leq R_{\text{out}}$.

- **Malla 4:** cubre todo el volumen de la simulación, con el menor nivel de resolución ($2R_{\text{system}}$). Incluye partículas con $r \leq R_{\text{out}}$.
- **Malla 5:** con el mismo alcance y resolución que la malla 4, almacena las partículas que escapan, es decir, aquellas con $r > R_{\text{out}}$.

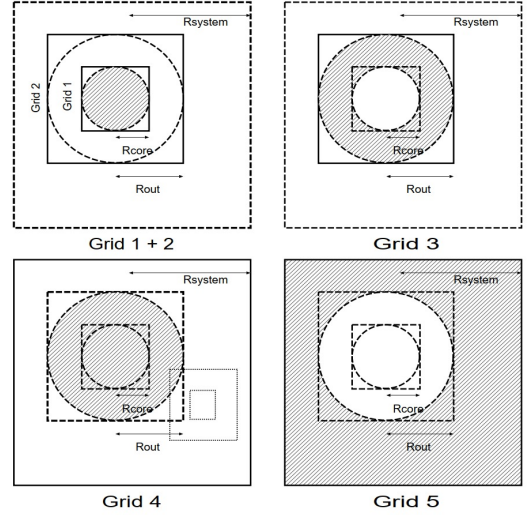


FIGURE 2. Esquema de las cinco mallas utilizadas por **Superbox**. Las líneas continuas destacan la malla activa en cada panel, mientras que las áreas sombreadas indican las regiones donde se contabilizan las partículas ([27]).

Para validar la eficiencia y precisión de los cálculos, se realizó un test con un cúmulo globular mediante Superbox. La evolución de la energía del sistema (Ver figura 3) presenta la forma esperada para un esquema Leapfrog de integración. Esta indica una variación inicial seguido de una estabilidad que perdura en el tiempo.

Dada la gran cantidad de partículas involucradas en las simulaciones, Superbox resulta especialmente adecuado: su esquema Particle-Mesh permite calcular el potencial y las fuerzas de manera altamente eficiente y una precisión suficiente para sistemas colisionless. La combinación de mallas jerárquicas y resolución adaptada a las regiones densas

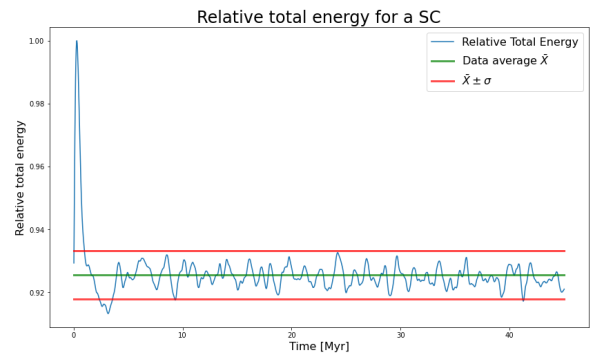


FIGURE 3. Evolución de la energía total de un cúmulo globular de 100 000 estrellas distribuido según Plummer, simulado por Superbox con un esquema Leapfrog. La conservación de energía evidencia la estabilidad y precisión del método.

reduce significativamente el costo computacional, lo que lo convierte en una herramienta óptima para este tipo de modelos.

C. PARÁMETROS INICIALES Y COMPUTACIONALES

Para los parámetros de un cúmulo estelar (SC) simple, se consideró valores similares a los de cúmulos globulares mencionados en la literatura. El radio del núcleo (R_{core}), externo (R_{out}) y del sistema (R_{system}) determinan la resolución espacial y el tamaño del dominio de la simulación, mientras que el radio de Plummer y el radio de corte (R_{pl} , R_{Cutoff}) definen la distribución inicial de las estrellas.

El número de partículas (n) se seleccionó para mantener un balance entre resolución y eficiencia computacional, mientras que la masa total (m_T) se eligió en función de las propiedades observadas de los cúmulos globulares. El resumen de los parámetros utilizados se puede ver en la Tabla 1.

Parámetro	Variable	Valor
Radio del núcleo	R_{core}	0.025 kpc
Radio externo	R_{out}	0.25 kpc
Radio del sistema	R_{system}	2.5 kpc
Radio de Plummer	R_{pl}	0.004 kpc
Radio de corte	R_{Cutoff}	0.024 kpc
Número de partículas	n	1×10^5
Masa total	m_T	$1 \times 10^6 M_{\odot}$

TABLE 1. Parámetros iniciales y computacionales para la simulación de cúmulos estelares. Las variables se muestran en su notación original en inglés para mantener consistencia con la literatura y las figuras.

Para formar el complejo de cúmulos (CC), se generaron 30 copias del SC individual descrito anteriormente, estas son distribuidas dentro de un volumen mayor de acuerdo con una distribución de Plummer. Cada conjunto de simulaciones del CC varía en su radio de Plummer y radio de corte, mientras que el número total de partículas y la masa total se mantienen constantes. Las condiciones de integración y los pasos de tiempo se ajustaron para mantener la estabilidad numérica del sistema durante la evolución. Los parámetros específicos utilizados en cada conjunto de simulaciones del CC se resumen en la Tabla 2.

	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3
Número de partículas (N)	3×10^6	3×10^6	3×10^6
Masa total (M_T)	$3 \times 10^7 M_{\odot}$	$3 \times 10^7 M_{\odot}$	$3 \times 10^7 M_{\odot}$
Radio de Plummer ($R_{pl,CC}$)	0.05 kpc	0.1 kpc	0.2 kpc
Radio de corte ($R_{cut,CC}$)	0.25 kpc	0.5 kpc	1.25 kpc
Pasos de integración (I_{steps})	20000	20000	20000
Paso de tiempo (t_{steps})	0.025 Myr	0.025 Myr	0.025 Myr
Pasos guardados (I_{steps})	4000	4000	4000

TABLE 2. Parámetros utilizados para la simulación del complejo de cúmulos estelares. Las variables se mantienen en su notación original para consistencia con la literatura.

Cada conjunto de simulaciones se repitió 3 veces, con velocidades iniciales tomadas del centro de masa de cada cúmulo. La evolución se realiza utilizando **Superbox** con resolución 64 y se emplea un integrador Leapfrog con un

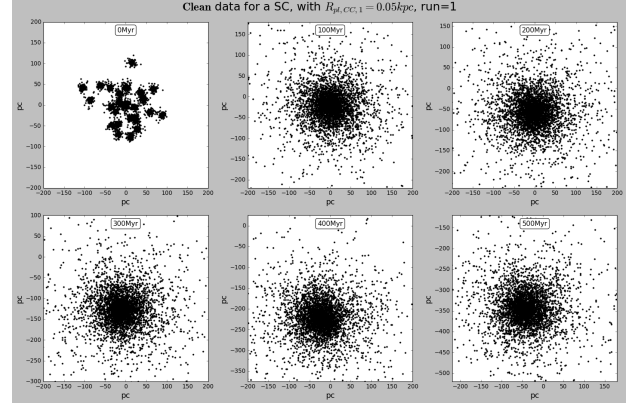


FIGURE 4. Evolución temporal de la distribución espacial de un conjunto de partículas pertenecientes a un cúmulo estelar (SC) dentro del complejo de cúmulos (CC), simulado con Superbox. Se muestran capturas a 0, 100, 200, 300, 400 y 500 Myr obtenidas mediante un integrador Leapfrog con resolución 64, paso temporal de 0.025 Myr y radio de Plummer 0.05 kpc. Cada panel ilustra la dispersión progresiva del SC y su mezcla dinámica dentro del potencial global. Las posiciones de las partículas fueron registradas cada 4000 pasos de integración (100 Myr), permitiendo el análisis detallado de la evolución estructural del sistema.

paso de tiempo de 0.025 Myr. Las posiciones y velocidades de las partículas se almacenan en snapshots que permiten el posterior análisis de las velocidades coherentes (Ver figura 4).

Cada simulación modela hasta 20000 pasos de integración, equivalentes a 500 Myr de evolución física, y toma aproximadamente 8 días de cálculo en el computador Sherlock de la Universidad de Concepción mediante el uso de sus múltiples núcleos para ejecutar varias simulaciones en paralelo. Se verifica la estabilidad energética del sistema durante la evolución, esto asegura que los resultados sean físicamente consistentes.

D. LIMPIEZA DE LAS SIMULACIONES

Para el posterior análisis de la supervivencia de las velocidades coherentes, se realizó un borrado de los cúmulos aún no disueltos en el UCD. Para esto se utilizó un código en **python**, el que detectaba concentraciones de partículas mayores al 5% de cantidad inicial cuyo radio fuese similar al R_{pl} del SC y las eliminaba de los datos (ver figura 5). Esto se realizó debido a que la presencia de fuertes correlaciones de velocidades supervivientes de los cúmulos no disueltos nublaría la búsqueda de los patrones coherentes.

E. REFINAMIENTO TEMPORAL

Luego del análisis inicial de las simulaciones de baja resolución temporal, se identificaron los intervalos en los que los SC presentaban la pérdida total de sus velocidades coherentes debido a las interacciones gravitacionales. Con el fin de determinar con mayor precisión el momento en que ocurre este proceso, se realizó una segunda ronda de simulaciones con un refinamiento temporal más alto.

La primera ronda consistió en simulaciones desde 0 a 500 Myr, con pasos de tiempo de 0.025 Myr y guardado de

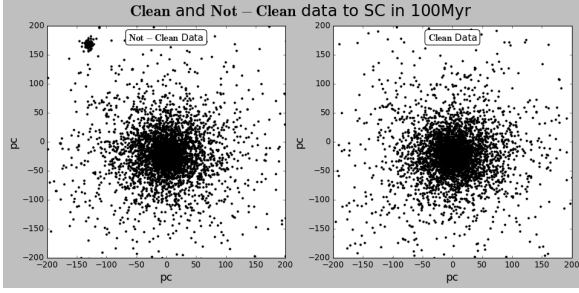


FIGURE 5. Comparación entre los datos sin limpiar y los datos limpios para un cúmulo estelar (SC) a 100 Myr. El panel izquierdo muestra la presencia de un SC aún no disuelto, identificado como una concentración de partículas cuyo tamaño es comparable al radio de Plummer inicial del SC. El panel derecho muestra los datos tras aplicar el procedimiento de limpieza, en el cual se eliminaron automáticamente estas concentraciones para evitar que sus correlaciones de velocidad sobrevivientes afectaran el análisis de coherencia cinemática.

datos cada 4000 pasos. Estas simulaciones permiten obtener una visión global de la evolución, pero solo permiten acotar el intervalo temporal donde ocurre la disolución con una precisión de ~ 100 Myr. La Tabla 3 resume sus parámetros.

TABLE 3. Parámetros de la primera ronda de simulaciones.

R_{pl} (kpc)	t_{step} (Myr)	Guardado	Pasos totales	Desde	Hasta
0.05	0.025	4000	20000	0	500
				Myr	Myr
0.10	0.025	4000	20000	0	500
				Myr	Myr
0.20	0.025	4000	20000	0	500
				Myr	Myr

A partir de estos resultados se identificaron los intervalos específicos donde cada SC aún estaba presente en un snapshot pero ya no lo estaba en la siguiente. Para caracterizar con mayor precisión el momento exacto de disolución, se realizaron simulaciones adicionales restringidas a esos intervalos, pero con un paso temporal menor y con mayor frecuencia de guardado de datos. Los parámetros de estas simulaciones refinadas se muestran en la Tabla 4.

TABLE 4. Parámetros de la segunda ronda de simulaciones refinadas.

R_{pl} (kpc)	t_{step} (Myr)	Intervalo (pasos)	N_{step}	t_{ini} (Myr)	t_{fin} (Myr)
0.05	0.010	500	20000	5	95
0.10	0.010	500	20000	5	95
0.20	0.032	500	20000	116	196

Este procedimiento permitió determinar el tiempo de disolución de los SC con una resolución de 5–10 Myr, mejorando significativamente la precisión respecto de la ronda inicial y permitiendo un análisis detallado de la desaparición de las velocidades coherentes.

III. ANÁLISIS

En este capítulo se describen los análisis realizados para las simulaciones previamente descritas en cada una de las snapshots obtenidas. Esto se realiza con el objetivo de obtener el tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes.

A. SOFTWARE

Para el análisis, se utilizó el software de análisis de patrones de velocidades, posiciones y química **Beacon** desarrollado por [28]. Beacon es una herramienta de software, desarrollada en python, cuyo objetivo es detectar patrones quimio-cinemáticos (especialmente de rotación) en poblaciones estelares resueltas.

Este software busca grupos coherentes de estrellas que compartan química y cinemática para luego analizar si esos grupos presentan patrones dinámicos organizados, como por ejemplo la rotación. Esto también funciona con simulaciones que no contemplan química, considerando esta con un valor constante.

Cada estrella se representa en un espacio multidimensional de la forma:

$$s_i = (x_i, y_i, v_{LOS,i}, [Fe/H]_i),$$

donde x_i y y_i corresponden coordenadas físicas proyectadas (RA/DEC) o coordenadas de la simulación, V_{LOS} es la velocidad en la línea de visión y $[Fe/H]$ la metalicidad.

Los agrupamientos quimio-cinemáticos son concebidos por la agrupación de pares coherentes. Estos pares corresponden a grupos pequeños de estrellas con metalicidad y velocidad similares, y separaciones espaciales razonables. Para esto se utiliza la métrica de similitud:

$$D_{ij} = w_v |v_i - v_j| + w_{FeH} |FeH_i - FeH_j| + w_r r_{ij},$$

donde w son los pesos y r_{ij} es la separación proyectada entre dos partículas.

Una vez identificados los grupos, Beacon evalúa la velocidad en función del ángulo polar respecto al centro del sistema

$$v_{LOS}(\theta) \sim V_{rot} \sin(\theta - \theta_0).$$

Finalmente, Beacon realiza un protocolo de validación de falsos positivos. Primero compara la señal obtenida con patrones en catálogos randomizados, luego destruye la correlación velocidad-posición pero mantiene los errores y al final estima la significancia del patrón detectado.

Esto convierte a BEACON en una herramienta especialmente adecuada para el análisis de simulaciones, ya que permite identificar subpoblaciones estelares quimio-cinemáticamente coherentes de manera controlada, sin imponer simetrías globales ni ejes de rotación, y facilitando la detección de patrones dinámicos débiles que podrían quedar ocultos en el análisis global del sistema, patrones que se esperan de la evolución del CC.

B. PARÁMETROS DEL ANÁLISIS

Para cada snapshot, las posiciones estelares fueron recenradas utilizando el centro de masa del sistema. La velocidad en la línea de visión fue definida como la componente z del vector velocidad, perpendicular al plano de la galaxia simulada. Tanto las posiciones como las velocidades fueron analizadas en un sistema de coordenadas cartesianas, consistente con el formato de salida de las simulaciones. No

se utilizó información de tipo WCS, dado que los datos corresponden a un sistema de referencia abstracto.

El parámetro de sensibilidad de BEACON fue fijado en 0.85 con el fin de resaltar señales dinámicas coherentes por sobre el ruido. Las coordenadas espaciales y la velocidad recibieron peso máximo en el proceso de agrupamiento, mientras que la metalicidad no fue considerada en la métrica. El tamaño mínimo de grupo (MCS) fue variado entre 5 y 100 en pasos de 5, permitiendo estudiar la dependencia del número de corrientes detectadas con este parámetro.

El análisis fue realizado sobre un total de nueve simulaciones, correspondientes a tres valores distintos del radio de Plummer del complejo estelar. Cada simulación fue analizada en múltiples snapshots temporales, resultando en un total de 2340 ejecuciones de BEACON, lo que permite una caracterización estadística robusta de las subestructuras cinemáticas detectadas.

C. FORMAS DE LAS CURVAS OBTENIDAS

La Fig. 6 muestra la dependencia normalizada del número de grupos detectados por BEACON en función del tamaño mínimo de grupo (MCS). Para valores pequeños de MCS, el algoritmo identifica un gran número de agrupaciones, las que están dominadas principalmente por coincidencias aleatorias en las velocidades estelares. Este comportamiento es esperado, ya que al permitir grupos muy pequeños aumenta significativamente la probabilidad de detectar estructuras espurias generadas por ruido estadístico.

A medida que el valor de MCS aumenta, la contribución de estos grupos aleatorios disminuye rápidamente, dando lugar a una caída pronunciada en el número de detecciones. Este régimen está representado por la curva roja, la que caracteriza el nivel de ruido del método y define la contribución puramente aleatoria al número de grupos encontrados.

La curva azul incluye, además del componente asociado al ruido, un leve exceso en el número de grupos detectados para valores intermedios de MCS. Este exceso es interpretado como la presencia de subestructuras quimio-cinémicamente coherentes con significado físico, formadas como consecuencia de la fusión de cúmulos estelares. Para valores grandes de MCS, este exceso desaparece, lo que indica que los grupos físicamente relevantes no alcanzan tamaños suficientemente grandes como para ser detectados bajo criterios más restrictivos.

IV. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de las simulaciones mediante la herramienta BEACON. Para cada snapshot temporal y para cada valor del tamaño mínimo de grupo (MCS), se registró el número de agrupaciones detectadas (# Streams). Estos valores fueron posteriormente analizados en función del tiempo, del radio de Plummer del complejo de cúmulos ($R_{pl,CC}$) y del tipo de conjunto de datos considerado.

Los resultados se presentan principalmente a través de gráficas de # Streams en función de MCS, las cuales per-

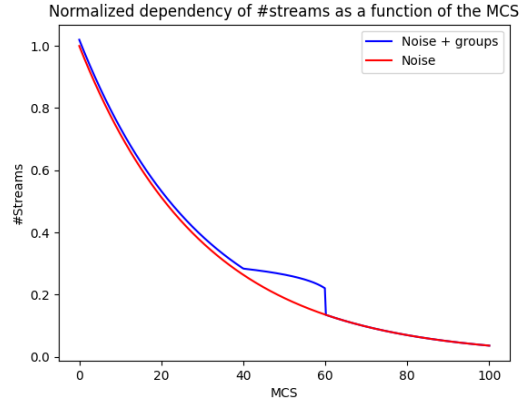


FIGURE 6. Dependencia normalizada del número de grupos detectados en función del tamaño mínimo asociado a dichos grupos. La curva roja representa la contribución del ruido o de agrupaciones aleatorias en las velocidades estelares, mientras que la curva azul incluye este componente de ruido junto con un leve incremento asociado a la presencia de grupos físicamente significativos formados a partir de la fusión de cúmulos.

miten caracterizar la presencia y evolución de agrupaciones quimio-cinémicamente coherentes. En todos los casos, los análisis se realizaron de forma independiente para cada una de las tres simulaciones asociadas a un mismo conjunto, con el fin de evaluar la robustez de los resultados frente a variaciones en las condiciones iniciales.

En primer lugar, se analiza la evolución global del sistema a lo largo de todo el intervalo temporal considerado (0–500 Myr), con el objetivo de identificar tendencias generales en la detección de subestructuras. Posteriormente, se presenta un análisis temporal más detallado, enfocado en los intervalos donde las velocidades coherentes muestran una mayor persistencia. Finalmente, se incluye una síntesis de los tiempos característicos de supervivencia obtenidos para cada configuración.

V. RESULTADOS PARA EL CONJUNTO CLEAN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del conjunto de datos *clean*, el cual corresponde a los datos una vez eliminadas las estrellas pertenecientes a cúmulos supervivientes. Un cúmulo se considera superviviente si conserva más del 25% de sus estrellas iniciales. Este procedimiento permite aislar las posibles subestructuras formadas por estrellas previamente disueltas.

En las Figuras 7–9 se muestra la evolución del número de agrupaciones detectadas en función de MCS para los tres valores del radio de Plummer del complejo de cúmulos, considerando snapshots distribuidas entre 0 y 500 Myr. Estas figuras permiten identificar el comportamiento global del sistema y la desaparición progresiva de las subestructuras coherentes a tiempos tardíos.

Para valores pequeños de MCS se observa un gran número de agrupaciones, dominadas por coincidencias aleatorias en velocidad. A medida que MCS aumenta, estas detecciones disminuyen rápidamente, dando lugar a un de-

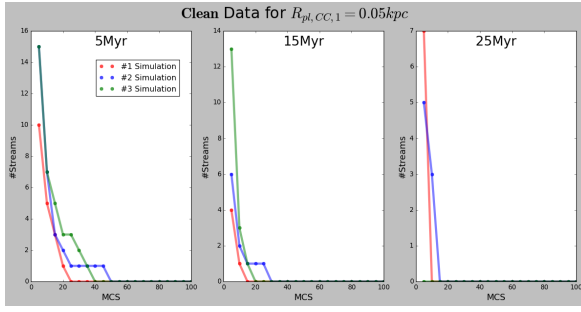


FIGURE 7. Evolución del número de agrupaciones detectadas en función de MCS para $R_{pl,CC} = 0.05$ kpc, en el que se considera snapshots entre 0 y 500 Myr.

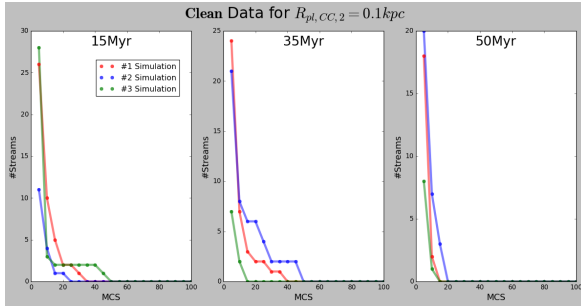


FIGURE 8. Misma que la Figura 7, pero para $R_{pl,CC} = 0.10$ kpc.

caimiento aproximadamente exponencial. La presencia de un leve exceso sobre esta tendencia para valores intermedios de MCS indica la existencia de subestructuras quimio-cinemáticamente coherentes con posible significado físico.

Con el fin de acotar de manera más precisa los intervalos temporales en los que estas estructuras persisten, se realizó un análisis temporal refinado, presentado en las Figuras 10–12. En estas figuras se consideran únicamente los intervalos de tiempo relevantes para cada conjunto, permitiendo estimar rangos característicos de supervivencia de las velocidades coherentes.

A partir del análisis temporal detallado, es posible identificar rangos característicos de supervivencia de las velocidades coherentes para cada valor del radio de Plummer del complejo de cúmulos. En el caso del conjunto con $R_{pl,CC} = 0.05$ kpc, las subestructuras quimio-cinemáticamente coherentes se detectan únicamente a tiempos muy tempranos,

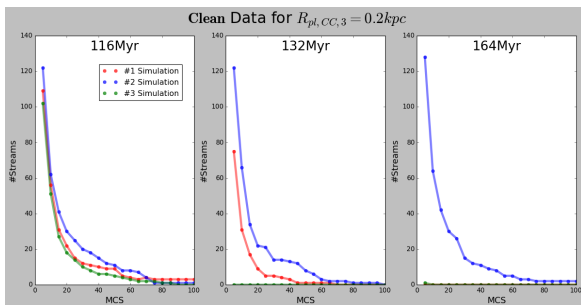


FIGURE 9. Misma que la Figura 7, pero para $R_{pl,CC} = 0.20$ kpc.

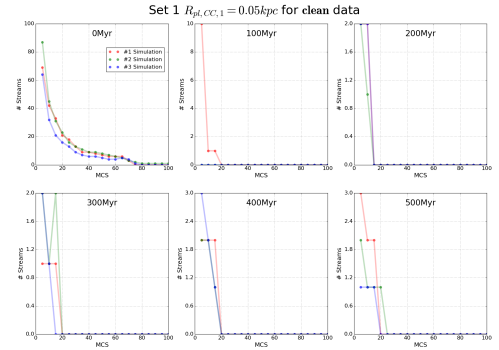


FIGURE 10. Análisis temporal detallado para $R_{pl,CC} = 0.05$ kpc, enfocado en los primeros 100 Myr de evolución.

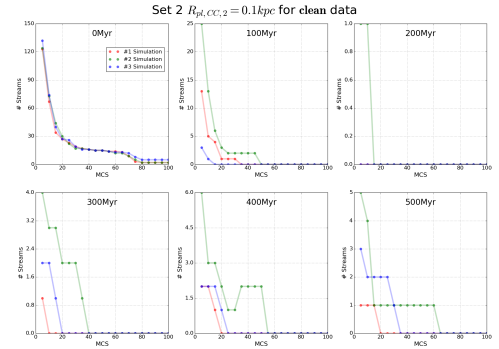


FIGURE 11. Misma que la Figura 10, pero para $R_{pl,CC} = 0.10$ kpc.

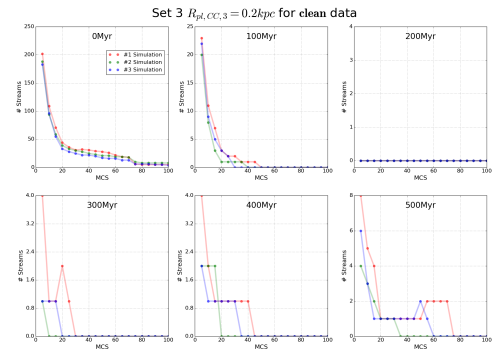


FIGURE 12. Análisis temporal detallado para $R_{pl,CC} = 0.20$ kpc, considerando el intervalo temporal donde las subestructuras permanecen detectables.

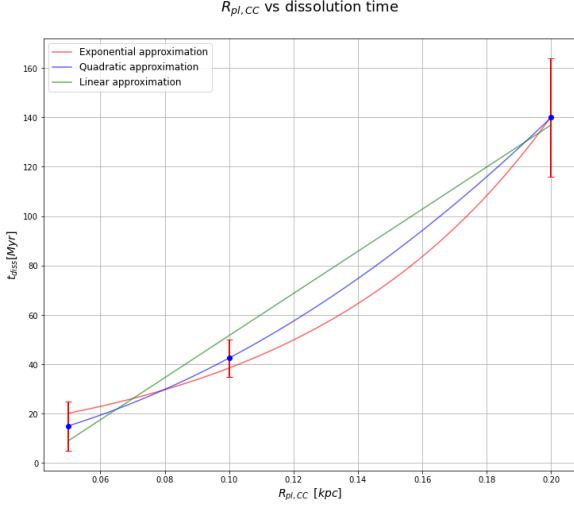


FIGURE 13. Tiempo característico de disolución de las velocidades coherentes en función del radio de Plummer del complejo de cúmulos ($R_{pl,CC}$). Los puntos corresponden a los valores medios obtenidos a partir de los rangos temporales determinados en las simulaciones, mientras que las barras de error representan la extensión de dichos rangos. Se muestran, a modo ilustrativo, aproximaciones lineal, cuadrática y exponencial, destacando la tendencia creciente del tiempo de disolución con la escala espacial inicial del sistema.

desapareciendo antes de ~ 25 Myr. Para $R_{pl,CC} = 0.10$ kpc, estas estructuras persisten durante un intervalo ligeramente más extendido, concentrado entre ~ 30 y 50 Myr. Finalmente, en el caso más extendido ($R_{pl,CC} = 0.20$ kpc), las velocidades coherentes sobreviven por tiempos significativamente mayores, manteniéndose detectables hasta ~ 160 Myr.

Estos resultados muestran una clara dependencia del tiempo de supervivencia de las subestructuras con el tamaño inicial del complejo de cúmulos, indicando que sistemas más extendidos preservan patrones quimio-cinmáticos coherentes durante intervalos temporales más largos. La Tabla 5 presenta un resumen de los rangos temporales obtenidos para cada configuración analizada.

$R_{pl,CC}$ [kpc]	Rango temporal de supervivencia [Myr]
0.05	5–25
0.10	30–50
0.20	116–164

TABLE 5. Rangos temporales característicos durante los cuales se detectan velocidades coherentes para cada valor del radio de Plummer del complejo de cúmulos ($R_{pl,CC}$), obtenidos a partir del análisis detallado de las simulaciones mediante BEACON.

Con el fin de explorar la dependencia global entre la escala espacial inicial del complejo de cúmulos y los tiempos característicos de disolución de las velocidades coherentes, en la Figura 13 se muestra el tiempo medio de dispersión en función del radio de Plummer $R_{pl,CC}$. Además, se incluyen distintas aproximaciones funcionales con el objetivo de ilustrar la tendencia observada.

A. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran una correlación clara entre el radio de Plummer del complejo de cúmulos ($R_{pl,CC}$) y la duración de las velocidades coherentes detectadas mediante BEACON. En particular, se observa que a mayor valor de $R_{pl,CC}$, las subestructuras quimio-cinmáticas persisten durante intervalos temporales más prolongados. Este comportamiento es consistente con el hecho de que sistemas más extendidos presentan mayores tiempos de cruce (*crossing time*) y tiempos de relajación, lo que retrasa los procesos dinámicos responsables de la homogenización del sistema.

Las subestructuras identificadas en los análisis son claramente distinguibles del ruido cinemático para valores intermedios del tamaño mínimo de grupo (MCS). En este trabajo no se busca maximizar el número de detecciones, sino establecer de manera conservadora los rangos temporales durante los que puede afirmarse con alta certeza la presencia de subestructuras coherentes. En este contexto, los tiempos reportados corresponden a intervalos en los que dichas estructuras aún son detectables de forma robusta. La contribución del ruido podría extender artificialmente estos tiempos, pero no reducirlos, lo que refuerza el carácter conservador de las estimaciones obtenidas.

La desaparición progresiva de las velocidades coherentes puede atribuirse a las interacciones gravitacionales aleatorias entre las estrellas, las cuales conducen a una redistribución de la energía y del momento, promoviendo un estado dinámicamente más homogéneo. Este proceso puede interpretarse como un aumento efectivo de la entropía del sistema, asociado a la pérdida de memoria de las condiciones iniciales y a la disolución de las subestructuras cinmáticas.

Desde el punto de vista del escenario de formación de UCDs mediante la fusión de cúmulos estelares, los tiempos característicos encontrados en este trabajo son significativamente menores que las escalas temporales típicas asociadas tanto al proceso de fusión como a la vida dinámica de las UCDs. Estos sistemas presentan tiempos característicos del orden de la edad del Universo, situados entre los tiempos de relajación de los cúmulos globulares y los de las galaxias ($t_{GC} < t_{UCD} < t_{gal}$; Kroupa1998). En este contexto, la detección observacional directa de las velocidades coherentes analizadas aquí resulta altamente desafiante, dado que los intervalos temporales durante los cuales estas subestructuras persisten son muy cortos en comparación con la evolución global de las UCDs.

En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque las velocidades coherentes constituyen una huella dinámica clara en etapas tempranas de la evolución del sistema, su rápida disipación limita severamente su detectabilidad observacional en UCDs evolucionadas, resaltando la importancia de estudios numéricos para caracterizar estas fases transitorias.

VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo se estudió el tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes en el escenario de formación de UCDs mediante la fusión de cúmulos globulares. Para ello,

se realizaron simulaciones computacionales con **Superbox**, cuyos resultados fueron analizados a partir de las posiciones y velocidades estelares utilizando el software **Beacon**.

Tanto los cúmulos estelares individuales como los complejos de cúmulos fueron modelados mediante una distribución de densidad de Plummer. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando tres millones de partículas en un régimen *collisionless*, con un tiempo total de evolución de 500 Myr. A lo largo de la simulación se generaron *snapshots* en distintos intervalos temporales, lo que permitió seguir la evolución dinámica del sistema y realizar el análisis correspondiente.

Para el primer conjunto de simulaciones, los tiempos de supervivencia de las velocidades coherentes asociados a radios de Plummer del complejo $R_{pl,CC,1} = 0.05$, kpc y $R_{pl,CC,2} = 0.1$, kpc se sitúan en el rango entre 0 y 100 Myr. Por otra parte, la simulación correspondiente a $R_{pl,CC,3} = 0.2$, kpc presentó tiempos de supervivencia más prolongados, comprendidos entre 100 y 200 Myr.

Para el segundo conjunto de simulaciones, los tiempos de supervivencia de las velocidades coherentes pudieron acortarse de manera más precisa. El primer complejo, con radio de Plummer $R_{pl,CC,1}$, presentó tiempos de supervivencia en el rango de 5 a 25 Myr. En el caso del segundo complejo ($R_{pl,CC,2}$), estos se encontraron entre 35 y 50 Myr, mientras que para el tercer complejo ($R_{pl,CC,3}$) los tiempos de supervivencia fueron significativamente mayores, situándose entre 116 y 164 Myr. Este comportamiento es consistente con la relación esperada entre el tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes y el tamaño característico del sistema.

Los tiempos de supervivencia de las velocidades coherentes obtenidos en este trabajo resultan ser significativamente cortos en comparación con las edades típicas estimadas para las UCDs, las que alcanzan escalas de varios Gyr. Esto implica que dichas velocidades coherentes corresponden a fenómenos transitorios, presentes únicamente en etapas tempranas de la evolución del sistema. En consecuencia, la detección observacional de estos patrones cinemáticos es poco probable, salvo en sistemas muy jóvenes o en etapas inmediatamente posteriores al proceso de fusión de los cúmulos progenitores. No obstante, la presencia o ausencia de estas señales proporciona información valiosa sobre la historia dinámica del sistema y permite restringir los escenarios de formación de las UCDs.

En este contexto, uno de los aportes de este trabajo es la caracterización explícita de la naturaleza altamente transitoria de estas velocidades coherentes y la estimación cuantitativa de sus escalas temporales de supervivencia. Si bien estudios previos han abordado la dinámica global de sistemas formados por fusión de cúmulos, los resultados presentados aquí muestran que estas firmas cinemáticas son extremadamente fugaces en comparación con la vida dinámica de las UCDs, lo que refuerza la dificultad de detectarlas de manera observacional y destaca la necesidad de estudios numéricos para su identificación y análisis.

Una de las principales limitaciones de este trabajo es el

número reducido de simulaciones realizadas por conjunto, con solo tres realizaciones independientes para cada radio de Plummer considerado. Si bien esta cantidad permite identificar tendencias generales, no es suficiente para realizar un análisis estadístico robusto ni para caracterizar completamente la dispersión asociada a las condiciones iniciales.

Como trabajo futuro, se propone ampliar el número de simulaciones por conjunto, así como explorar un rango más amplio y continuo de radios de Plummer para el complejo de cúmulos. Esto permitiría determinar de manera más precisa la dependencia del tiempo de supervivencia de las velocidades coherentes con el tamaño característico del sistema, además de mejorar la significancia estadística de los resultados.

REFERENCES

- [1] M. J. Drinkwater, M. D. Gregg, M. Hilker, K. Bekki, W. J. Couch, H. C. Ferguson, J. B. Jones, and S. Phillipps, "A class of compact dwarf galaxies from disruptive processes in galaxy clusters," vol. 423, pp. 519–521, 2003.
- [2] S. Mieske, M. Hilker, and H. Misgeld, "A search for massive ultra-compact dwarf galaxies in the centaurus galaxy cluster," vol. 472, pp. 111–119, 2007.
- [3] J. Dabringhausen, M. Hilker, and P. Kroupa, "From star clusters to dwarf galaxies: The properties of dynamically hot stellar systems," vol. 386, pp. 864–886, 2008.
- [4] M. J. Drinkwater, J. B. Jones, M. D. Gregg, and S. Phillipps, "Compact stellar systems in the fornax cluster: Super-massive star clusters or extremely compact dwarf galaxies?" 2000.
- [5] S. Phillipps, M. J. Drinkwater, M. D. Gregg, and J. B. Jones, "Ultracompact dwarf galaxies in the fornax cluster," vol. 560, no. 1, pp. 201–206, 2001.
- [6] E. A. Evstigneeva, M. J. Drinkwater, R. Jurek, P. Firth, J. B. Jones, M. D. Gregg, and S. Phillipps, "Searches for ultracompact dwarf galaxies in galaxy groups," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 378, no. 3, pp. 1036–1042, 2007.
- [7] P. Kroupa, "The dynamical evolution of stellar superclusters," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 300, no. 1, pp. 200–204, 1998.
- [8] J. M. Lotz, R. Telford, H. C. Ferguson, B. W. Miller, M. Stiavelli, and J. Mack, "Dynamical friction in de globular cluster systems," vol. 552, no. 2, pp. 572–581, 2001.
- [9] L. P. Bassino, J. C. Muzzio, and M. Rabolli, "Are globular clusters the nuclei of cannibalized dwarf galaxies?" vol. 431, pp. 634–645, 1994.
- [10] A. V. Afanasiev, I. V. Chilingarian, S. Mieske, K. T. Voggel, A. Picotti, M. Hilker, A. Seth, N. Neumayer, M. Frank, A. J. Romanowsky, G. Hau, H. Baumgardt, C. Ahn, J. Strader, M. den Brok, R. McDermid, L. Spitler, J. Brodie, and J. L. Walsh, "A 3.5 million solar masses black hole in the centre of the ultracompact dwarf galaxy fornax ucd3," vol. 477, no. 4, pp. 4856–4865, 2018.
- [11] E. C. F. S. Fortes, O. D. Miranda, F. W. Stecker, and C. A. Wuensche, "Dark matter annihilation in the most luminous and the most massive ultracompact dwarf galaxies (ucd)," vol. 2021, no. 03, p. 021, 2021.
- [12] M. Fellhauer and P. Kroupa, "The formation of ultracompact dwarf galaxies," vol. 330, no. 3, pp. 642–650, 2002.
- [13] C. Conroy, A. Loeb, and D. N. Spergel, "Evidence against dark matter halos surrounding the globular clusters mgc1 and ngc 2419," vol. 741, no. 2, p. 72, 2021.
- [14] R. Ibata, C. Nipoti, A. Sollima, M. Bellazzini, S. C. Chapman, and E. Dalessandro, "Do globular clusters possess dark matter haloes? a case study in ngc 2419," vol. 428, no. 4, pp. 3648–3659, 2013.
- [15] R. C. Brüns, P. Kroupa, M. Fellhauer, M. Metz, and P. Assmann, "A parametric study on the formation of extended star clusters and ultracompact dwarf galaxies," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 529, p. A138, 2011.
- [16] F. Urrutia Zapata, M. Fellhauer, A. G. Alarcón Jara, D. R. Matus Carrillo, and C. A. Aravena, "The formation of compact dwarf ellipticals through merging star clusters," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 489, no. 2, pp. 2746–2754, 2019.

-
- [17] B. C. Whitmore and F. Schweizer, "Hubble space telescope observations of young star clusters in ngc 4038/4039, "the antennae" galaxies," *The Astronomical Journal*, vol. 109, p. 960, 1995.
- [18] B. C. Whitmore, Q. Zhang, C. Leitherer, S. M. Fall, F. Schweizer, and B. W. Miller, "The luminosity function of young star clusters in "the antennae" galaxies (ngc 4038–4039)," *The Astronomical Journal*, vol. 118, no. 4, pp. 1551–1576, 1999.
- [19] N. Homeier, J. S. I. Gallagher, and A. Pasquali, "The star cluster system of the ngc 7673 starburst," *Astronomy and Astrophysics*, vol. 391, pp. 857–873, 2002.
- [20] I. S. Konstantopoulos, N. Bastian, L. J. Smith, M. S. Westmoquette, G. Tranco, and J. S. I. Gallagher, "A spectroscopic census of the m82 stellar cluster population," *The Astrophysical Journal*, vol. 701, pp. 1015–1031, 2009.
- [21] C. Cao and H. Wu, "Multiwavelength study of young massive star clusters in the interacting galaxy arp 24," *The Astronomical Journal*, vol. 133, pp. 1710–1721, 2007.
- [22] R. de Grijs, P. Anders, N. Bastian, R. Lynds, H. J. G. L. M. Lamers, and E. J. O’Neil, "Star cluster formation and evolution in nearby starburst galaxies – ii. initial conditions," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 343, pp. 1285–1300, 2003.
- [23] S. S. Larsen, Y. N. Efremov, B. G. Elmegreen, E. J. Alfaro, P. Battinelli, P. W. Hodge, and T. Richtler, "Hubble space telescope imaging of a peculiar stellar complex in ngc 6946," *The Astrophysical Journal*, vol. 567, pp. 896–914, 2002.
- [24] S. C. Gallagher, J. C. Charlton, S. D. Hunsberger, D. Zaritsky, and B. C. Whitmore, "Hubble space telescope images of stephan’s quintet: Star cluster formation in a compact group environment," *The Astronomical Journal*, vol. 122, pp. 163–181, 2001.
- [25] A. Pellerin, G. R. Meurer, K. Bekki, D. M. Elmegreen, O. I. Wong, and P. M. Knezek, "The collisional ring galaxy ngc 922," *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 423, p. 19, 2010.
- [26] Y. Meiron and B. Kocsis, "Diffusion and mixing in globular clusters," *The Astrophysical Journal*, vol. 855, no. 2, p. 87, 2018.
- [27] M. Fellhauer, P. Kroupa, H. Baumgardt, R. Bien, C. M. Boily, R. Spurzem, and N. Wassmer, "Superbox: An efficient code for collisionless galactic dynamics," *New Astronomy*, vol. 5, pp. 305–326, 2000.
- [28] A. Del Pino, A. Aparicio, S. L. Hidalgo, and E. L. Łokas, "Rotating stellar populations in the Fornax dSph galaxy," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 465, pp. 3708–3718, 2017.