

Análisis de árboles de fusiones en simulaciones numéricas

Víctor Rufo, Juan Bernete y Luis Abalo*

Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Departamento de Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica y Departamento de Física Teórica, Madrid, España
(Dated: November 30, 2020)

En el presente artículo se estudia la evolución de los halos de materia oscura y las galaxias utilizando la **simulación del Milenio** como base de datos. Dicho análisis se divide en dos partes: una primera parte en la que se realiza el estudio de la evolución y las fusiones en halos de rangos de masas diferentes para su posterior comparación y pequeño estudio estadístico. En la segunda parte, con el objetivo de poder estudiar la evolución de las galaxias albergadas en los subhalos, se considera la materia bariónica y se estudia el color a través de las bandas B y V. El objetivo principal del artículo que se presenta es comprobar si el comportamiento de los halos y galaxias y la descripción de los mecanismos y eventos que conciernen se pueden explicar a través de la simulación.

Keywords: evolución: galaxias, halos: materia oscura y bariónica, color: excesos, formación: galaxias y estrellas

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la evolución de los halos de materia oscura y galaxias se ha realizado a partir de la base de datos en la aplicación web de **Virgo - Millennium**[6], anunciada en (*G. Lemson & the Virgo Consortium, 2006*[5]), usando *Structured Query Language* (SQL). De esta manera, se accede a todas las propiedades de las galaxias y halos así como a la relación espacial y temporal entre ellos y su entorno. El estudio está basado en el modelo de *Springel et al., 2005*[1], el cual hace predicciones sobre el crecimiento jerárquico de las estructuras a través de la inestabilidad gravitatoria. Para el caso de las propiedades de las galaxias, el modelo es el de *G. De Lucia and J. Blaizot, 2007*[2].

Los **parámetros y condiciones iniciales** de la simulación se basan en el modelo cosmológico Λ CDM. Son los establecidos en la *Tabla I*:

Ω_m	Ω_b	Ω_Λ	h	n	σ_8
0.25	0.0045	0.75	0.73	1	0.9

Tabla I: Parámetros y condiciones iniciales: $\Omega_m = \Omega_{dm} + \Omega_b$ es la densidad total de materia, Ω_b es la densidad de bariones y Ω_Λ es la densidad de materia oscura, las tres en unidades de la densidad crítica para un universo cerrado, h es la constante de Hubble, n es el índice del espectro de perturbaciones iniciales, y σ_8 es la amplitud de las perturbaciones (*Springel et al., 2005*[1])

Los datos utilizados pertenecen a la simulación *milli-Millennium* (millimill), que es una versión reducida en tamaño y número de partículas de la simulación del Milenio. El volumen de la simulación es una caja de $62.5 h^{-1} \text{Mpc}$ de lado, con $N = 270^3$ partículas de masa $8.6 \times 10^8 h^{-1} M_\odot$ (*Springel et al., 2005*[1] [7]). La simulación guarda 64 *snapshots*, que se corresponden con el tiempo de la simulación, numeradas del 0 al 63, siendo esta última el presente.

Las estructuras de la simulación son identificadas por el algoritmo SUBFIND (*Springel et al., 2001*[8]) junto con el algoritmo *Friends of Friends* (FoF). FoF se basa en la separación entre partículas, conecta aquellas que estén a una distancia menor que 0.2 veces la distancia media entre partículas. Los grupos FoF son divididos en subestructuras identificadas por SUBFIND como regiones sobredensas locales, que si cumplen ciertas características gravitacionales y tienen al menos 20 partículas, son consideradas un subhalo. Al multiplicar este número mínimo de partículas para generar una estructura por la masa de una partícula, se obtiene que la resolución de esta simulación es $1.7 \times 10^{10} h^{-1} M_\odot$. Nótese que tras esta clasificación quedan partículas dentro de halos y también fuera de ellos.

En la *Sección II* se estudian los árboles de fusión en halos de rangos de masas diferentes. Se utilizan los datos de la $m_{crit200}$ (la masa dentro del radio donde FoF tiene una sobredensidad 200 veces mayor que la densidad crítica de la simulación) y el *redshift* ($z = 0$ implica un $SnapNum = 63$, última *snapshot* de la simulación). Se obtienen los árboles de fusión de 10 subhalos dentro de los 5 rangos de masa analizados. Posteriormente, se realiza el mismo estudio para galaxias, teniendo en cuenta solo la materia bariónica, y se comparan ambos resultados.

* Víctor Rufo, Juan Bernete y Luis Abalo: labalo@ucm.es, jbernete@ucm.es y vrufo@ucm.es

En la *Sección III* se realiza un estudio de la evolución del color y la masa de tres galaxias escogidas, representando estos parámetros en sus respectivos árboles de fusiones.

II. EVOLUCIÓN DE HALOS PARA DISTINTAS MASAS

A. Procedimiento

Rango 1	$M_{crit200} > 10^{13} M_{\odot}$
Rango 2	$10^{12} M_{\odot} < M_{crit200} < 10^{13} M_{\odot}$
Rango 3	$10^{11} M_{\odot} < M_{crit200} < 10^{12} M_{\odot}$
Rango 4	$10^{10} M_{\odot} < M_{crit200} < 10^{11} M_{\odot}$
Rango 5	$10^{10} M_{\odot} > M_{crit200}$

Tabla II: Rangos de masas de los halos a *redshift* cero.

En esta primera parte, se lleva a cabo el estudio de la evolución en masa de los árboles de fusión de halos de materia oscura para cinco rangos de masa (ver *Tabla II*) a lo largo de su historia. Posteriormente, se analiza el promedio de la evolución de los halos para cada rango de masas. Así, para cada rango se analiza la evolución de 10 halos, representando su historia de fusiones y su crecimiento en masa respecto al *redshift*.

Para obtener la evolución de los halos, se trabaja con los modos H1 y H2 de la base de datos del *Millennium* [6]. El modo H1 se emplea para situar los halos con una masa crítica determinada en el rango correspondiente. Posteriormente, con el modo H2, se obtiene la historia de formación completa.

Utilizando el modo H1, se establece un *redshift* 0 mediante un *Snapnum* = 63. La determinación de los intervalos para la masa se lleva a cabo variando el intervalo de la masa crítica 200 ($m_{crit200}$) y el tamaño de la caja (x, y, z). Se ha de tener en cuenta que la masa viene dada en unidades de $10^{10} M_{\odot}$. El código desarrollado se almacena en un repositorio online [9].

Seguidamente, se introduce el *HaloID* utilizando el modo H2. Los datos obtenidos contienen la evolución del halo en cuestión, junto a sus fusiones correspondientes. Estos datos se guardan en un fichero *.csv* y se almacenan en una carpeta para su posterior tratamiento. El estudio se centra en la rama principal del halo, a la cual otros halos menores se le han ido fusionando a lo largo de la

historia.

Se representa gráficamente cada rango de masa de la *Tabla II* de la siguiente manera. Se dispone la masa crítica de cada halo normalizada con la masa a *redshift* cero en frente del inverso del factor de escala, ambos ejes en escala logarítmica decimal.

B. Resultados: Materia oscura

En primer lugar, cabe señalar que el crecimiento de los halos se realizan mediante fusiones y, en la extracción de datos de la simulación, hay una discretización temporal. Por tanto, el crecimiento ocurre en un instante de tiempo Δ_t , es decir, en un *snapNum* determinado, y no tiene un crecimiento continuo. Sin embargo, debido a que la representación escalonada de los subhalos dificulta la visualización, en la *Figura 3* se representa mediante líneas continuas.

De manera previa a estudiar la evolución de los subhalos para cada rango de masa en la *Figura 3*, y con el objetivo de evidenciar la dependencia con la masa en la historia de los halos de materia oscura, se presenta en la *Figura 1* una comparación general entre los cinco rangos de masas. En esta figura, se calcula la media de las masas de los subhalos de cada rango y para cada *redshift* respecto a las masas finales a *redshift* nulo. Las escalas de los ejes son logarítmicas, luego cada intervalo representa la variación en órdenes de magnitud.

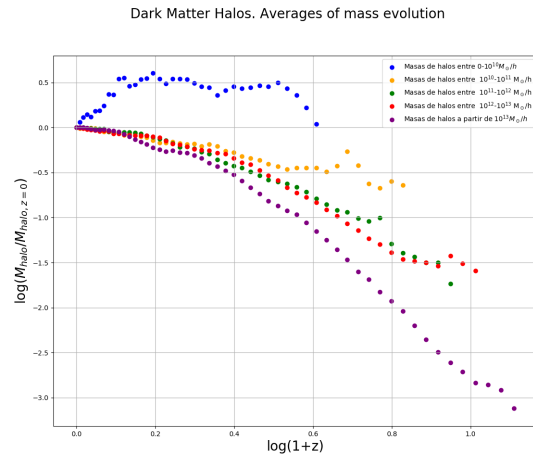


Figura 1: Promedio de la **evolución en masa de los halos** para cada rango de masa (*Tabla II*) para el caso de materia oscura. Código de colores: morado-Rango 1, rojo-Rango 2, verde-Rango 3, amarillo-Rango 4 y azul-Rango 5

Se observa que los halos más masivos tienen una historia más larga, con datos a *redshifts* más elevados. Hay un crecimiento inicial considerable y más homogéneos en los tres rangos más masivos y un aplanamiento de su curva en *redshift* más cercanos a cero. Mientras tanto, las curvas que representan los rangos menos masivos no llegan a altos *redshifts*. Las limitaciones del modelo se ponen en evidencia en el rango menos masivo, al presentar una curva nada suave y en la que la masa principalmente decrece en los halos, en lugar de crecer como ocurre en el resto de rangos. Se hablará de las limitaciones de la simulación del **Milenio**[6] en la *Sección IV*.

Aunque la tendencia general es un crecimiento en la masa, que se corresponde con el crecimiento jerárquico por las fusiones de halos, se observan también caídas en la masa. Estas caídas son menos frecuentes en los rangos de mayor masa, pero son dominantes en el rango de masas menores. Las que ocurren en halos de mayor masa pueden deberse a la salida de partículas del radio 200 (radio en que la sobredensidad es 200 veces la crítica de la simulación) tras fusiones violentas, lo que hace que esa parte de la masa deje de tenerse en cuenta hasta que la gravedad la vuelve a introducir en el radio 200, o por interacciones con halos mayores que les quiten masa. En el caso de los halos del rango más bajo de masas, aunque parte de estos decrecimientos se deben a que las interacciones con halos mayores perdiendo masa son más frecuentes, el hecho de que sea una tendencia general se debe a las limitaciones de la simulación, ya que se están seleccionando halos muy cercanos al límite que el algoritmo SUBFIND (Springel et al., 2001) [8] establece para considerar un grupo de partículas como un subhalo. Es decir, no se pueden obtener subhalos de estas masas que provengan de otros menores, ya que estos progenitores no se considerarían subhalos; solo se tienen subhalos en cuya historia reciente fueron mayores y perdieron masa. Por eso mismo, no se puede conocer su historia a alto *redshift*.

En la *Figura 3* (Apéndice) se muestra la evolución individual de cada halo de los tenidos en cuenta para cada rango de masas. Respecto a ella, se pueden hacer los siguientes comentarios:

- En (a), se aprecia un crecimiento inicial a alto *redshift* con un número considerable de fusiones entre los distintos subhalos, visualizando un aplanamiento de la curva hacia *redshifts* más pequeños. Esto se debe a que, cuanto mayor es el halo, menor diferencia de masa relativa producen las fusiones.
- En (b) y en (c), se puede verificar que el crecimiento inicial es menor al fijarse en el eje de abscisas, cuyos intervalos se han reducido, por

lo que la curva tiene un aplanamiento más temprano. La principal diferencia entre (b) y (c) es que en el tercer rango de masas, no se llega a un *redshift* tan elevado.

- En (d), fijándose de nuevo en el eje de abscisas, el crecimiento es mucho más tardío y menos acentuado.
- Finalmente, en (e), se observa una evolución muy irregular que no se suaviza para *redshifts* cercanos a 0, algo, que por el contrario, es común al resto de rangos de masa. Esto es una consecuencia de la limitación de la simulación. Esta variación abrupta de masa se debe a que, como son partículas muy masivas, cuando se define un halo de baja masa, este está dado por pocas partículas. De esta forma, la pérdida de pocas partículas, ya sea por interacciones o porque estas salgan del radio 200, supone una gran pérdida de masa relativa. Esto reduce significativamente la posibilidad de una estabilidad en el comportamiento de la curva para ningún valor del *redshift*.

La figura *Figura 4* (Apéndice) presenta la desviación típica relacionada con cada una de las medias realizadas para la *Figura 1*. Esto permite conocer la validez de dichas medias y conocer si la evolución de los halos dentro de un rango de masas son muy diferentes entre sí (grandes desviaciones) o si, por el contrario, su comportamiento es similar (bajas desviaciones). En todos los casos, las desviaciones tienden a cero en el presente, lo que es lógico, ya que cada halo tiene su propia masa en *redshift* nulo y en poco tiempo no puede cambiar mucho. En algunos casos, también se hacen cero a *redshifts* muy altos, esto es debido a que hay menos halos sobre los que promediar o incluso uno solo, ya que a mayores *redshifts* los halos son tan pequeños que no son considerados por el algoritmo SUBFIND (Springel et al., 2001) [8] y no se tiene información de ellos. Para *redshifts* intermedios es cuando esta información es interesante; la desviación típica es menor en los rangos de mayor masa, ya que todos los halos tienen un crecimiento suave similar, mientras que los rangos de masas menores muestran una desviación mayor, ya que la variación en las evoluciones es muy grande por los efectos que ya se han comentado.

C. Resultados: Materia bariónica

En este apartado se realiza un estudio similar al del anterior con la materia bariónica en lugar de la oscura. De esta forma podemos comparar y comprobar si la evolución de las galaxias sigue una tendencia similar a la de sus respectivos halos

de materia oscura en los que están centradas. En este caso, los datos son extraídos de las tablas de *G. De Lucia and J. Blaizot, 2007* [2] y el valor de masa que se toma al representar es la suma de tres componentes: masa estelar (stellarMass), masa de gas frío (coldGas) y masa de gas caliente (hotGas), para los diferentes valores del *redshift* en relación con esta misma suma para *redshift* cero.

De la misma manera que en la *Sección IIB*, el crecimiento es instantáneo pero, para una mejor visualización, la *Figura 5* no se representa de manera escalonada.

Análogamente, antes de analizar la *Figura 5* en la que se recogen la evolución de cada conjunto de subhalos para cada rango de masas de la *Tabla II*, se presenta en la *Figura 2* un promedio de las masas para cada rango y para cada *redshift*. Igualmente, las escalas son logarítmicas, con lo que la variación entre cada intervalo corresponde a un cambio en el orden de magnitud.

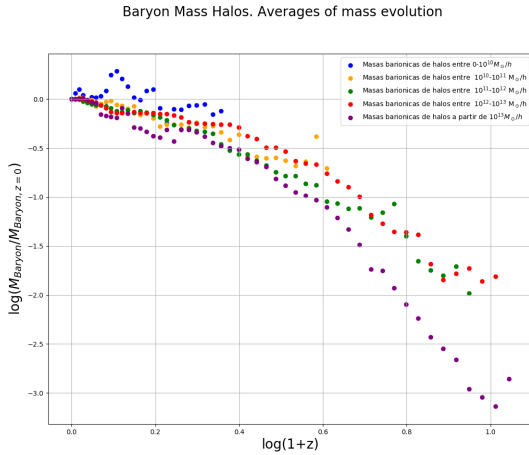


Figura 2: Promedio de la **evolución de los halos** para cada rango de masa (*Tabla II*) para el caso de materia bariónica. Código de colores: morado-Rango 1, rojo-Rango 2, verde-Rango 3, amarillo-Rango 4 y azul-Rango 5

La tendencia general es similar. Para los rangos de mayor masa se observa el crecimiento jerárquico esperado, aunque menos suave que en el caso de la materia oscura, y los datos alcanzan valores del *redshift* altos. El aplanamiento de la curva de crecimiento según se avanza hacia *redshifts* más pequeños también es visible en la gráfica. Y, de la misma manera que en la *Figura 1*, las limitaciones del modelo se hacen visible en la curva azul, correspondiente al promedio del grupo de subhalos del rango más pequeño de masa. Estos últimos

no presentan una tendencia clara, sino cambios abruptos y no alcanzan altos valores del *redshift*. La principal diferencia con el caso de la materia bariónica de la *Sección IIB*, es que el crecimiento no es igual de homogéneo.

La *Figura 5* muestra la evolución individual de cada galaxia tenida en cuenta en cada uno de los rangos de masa. En ella se observa una clara diferencia respecto a la *Figura 3* con los halos, que es la aparición frecuente de picos hacia abajo mucho más abruptos y que duran una o dos *snapshots* para luego volver a la tendencia media. Estos picos son interpretados como un fallo en el cálculo de la masa bariónica que sucede en momentos específicos. Podría tratarse de instantes en los que una fusión ha producido un desfase entre la materia bariónica y su halo, haciendo que la galaxia o parte de ella momentáneamente no esté situada en el centro del halo y, por ello, no se calcule correctamente su masa. También ocurren picos que son más frecuentes y pronunciados en el caso de los rangos de menor masa. Esto puede ser de nuevo debido a que la materia bariónica puede ser arrastrada más fácilmente en una interacción y a la eyección de gases que se produce con la formación estelar en las fusiones, modelada por *Croton et al. (2006)* [10]. Además, los valores de masa bariónica en todos los casos son mucho menores a los de la masa crítica 200 del halo, por lo que el límite de resolución de la simulación afecta más fuertemente a estas representaciones.

III. ÁRBOL DE FUSIONES

A. Procedimiento

La simulación de **Virgo - Millennium**[6] también permite el análisis de un subhalo en concreto para el estudio de la formación y evolución de las distintas galaxias a lo largo de toda su historia hasta *redshift* cero. En este caso, se utiliza G2 para extraer la información relativa a las galaxias con los IDs utilizados en H2 para cuatro subhalos.

Los cuatro halos que se seleccionan pertenecen al Rango 4 de la *Tabla II*, con masas entre $10^{12}h^{-1}M_{\odot}$ y $10^{13}h^{-1}M_{\odot}$. Este rango se escoge porque el número esperado de fusiones es el más adecuado para visualizar correctamente en gráficas. Masas mayores tendrían muchas más fusiones y el análisis se dificultaría, y masas menores se ven mucho más afectadas por los límites de la simulación.

Para la representación de la masa, se tiene en

cuenta la masa en forma de estrellas, la masa del gas caliente y el gas frío. La masa se representa en la *Figura 8* mediante el tamaño de los puntos. Para la representación del color B-V, se restan las magnitudes dadas por la simulación en dichas bandas en cada punto y el resultado se da en un eje de color.

En la *Figura 7* se representa el redshift frente a la coordenada espacial X y el color B-V queda reflejado en los colores de cada gráfica. En la *Figura 8* se representa el redshift frente al identificador de cada elemento del árbol, teniendo en cuenta el color B-V y, además, la evolución de la masa reflejada en el tamaño de los puntos. En la *Figura 9*, se recoge una representación tridimensional de cada subhalo, recogiendo dos coordenadas espaciales y el redshift, en los ejes, y el color B-V.

B. Resultados

En las *Figuras 7, 8 y 9* del Apéndice se observan las fusiones que se producen a medida que disminuye el *redshift*. La evolución en masa se muestra en la *Figura 8*. La masa se concentra, fundamentalmente, en la rama principal (rama situada a la derecha), aunque también se reparte una pequeña parte en ramas secundarias. La masa aumenta según se evoluciona hacia el presente y, respecto al color B-V, las galaxias se vuelven más rojas con el tiempo. Únicamente en las galaxias correspondientes a *redshifts* más altos presentan un color más azul.

El color de las galaxias tiene una fuerte relación con su formación estelar. Las estrellas más calientes y, por tanto, más azules, tienen tiempos de vida cortos, luego su presencia es un indicador de que se están formando estrellas en la galaxia. Mientras que las estrellas rojas viven mucho más tiempo, por lo que una alta proporción de estas indica una población estelar envejecida y sin formación. Generalmente las galaxias espirales e irregulares, que tienen mucho gas para formar estrellas, son azules, y las galaxias elípticas resultantes de múltiples fusiones son rojas y sin suficiente gas. Esto cuadra con los datos obtenidos de la simulación, donde el paso del tiempo y el crecimiento en masa enrojece a las galaxias.

Sin embargo, el enrojecimiento no es completamente uniforme. En algunos casos se puede observar que regresa ligeramente al azul tras algunas fusiones. Este efecto es el "*collisional starburst*", un aumento repentino de la formación estelar tras una fusión por la caída de grandes cantidades de gas. La modelación de este efecto en la simulación se basa en el trabajo

de *Sommerville et al. (2001)* [3]. Esta formación de nuevas estrellas viene acompañada de una eyección del gas frío remanente modelada por *Croton et al. (2006)* [10].

IV. CONCLUSIONES

La **simulación del Milenio**[6], por *Springel et al. (2005)* [1], anunciada en (*G. Lemson & the Virgo Consortium, 2006*[5]) aporta buenas predicciones para halos con una masa elevada y, sin embargo, funciona con mucha inexactitud para rangos de masa cerca al valor límite de la simulación. De esta manera, no es conveniente estudiar mediante esta simulación los halos con masas entre dicho límite y el siguiente orden de magnitud, debido a la cantidad de errores e imprecisiones que acumulan.

El límite de la simulación viene dado por la masa de cada partícula de la simulación y por el algoritmo que utiliza para el reconocimiento de estructuras, SUBFIND (*Springel et al., 2001* [8]). Con una masa por partícula de $8.6 \times 10^8 h^{-1} M_{\odot}$ y un mínimo de 20 partículas para generar una estructura, el límite se establece en $1.7 \times 10^{10} h^{-1} M_{\odot}$. Este límite genera problemas para reproducir un comportamiento correcto con halos de masas entre $1.7 \times 10^{10} h^{-1} M_{\odot}$ y $1.7 \times 10^{11} h^{-1} M_{\odot}$, ya que la cantidad de partículas en estos halos no es suficiente para una buena descripción de sus procesos físicos, ni permite conocer su historia a altos *redshifts*, donde su masa estaría por debajo del límite y, por tanto, quedaría fuera del alcance de la simulación.

En los casos alejados al límite de la simulación es interesante fijarse que el aplanamiento de la curva de crecimiento para los halos menos masivos se produce cronológicamente antes que para los halos más masivos. Además, la historia temporal presenta un menor crecimiento inicial, con un menor número de fusiones, respecto a los halos más masivos. La tendencia general es la de un crecimiento jerárquico por fusiones y absorción del medio intergaláctico (partículas que quedan fuera de halos), tal como se espera.

Al añadir el trabajo de *G. De Lucia and J. Blaizot (2006)* [2], se pueden estudiar también las propiedades de las galaxias centradas en los halos. Su comportamiento en masa sigue también una crecimiento jerárquico, pero con mayores alteraciones producidas por diferentes efectos físicos modelados, como su desplazamiento del centro del halo en las fusiones, el "*collisional starburst*" (*Sommerville et al., 2001*) [3] o la eyección de gas por el *feedback* de la formación estelar (*Croton et al., 2006*) [10].

Finalmente, se comprueban las buenas predicciones de *G. De Lucia and J. Blaizot (2006)* [2] en el envejecimiento de las galaxias al estudiar el color B-V en los árboles de fusiones. Las galaxias jóvenes y con alta formación estelar son, tal como se espera,

más azules, y las envejecidas sin formación estelar, más rojas. El efecto del "*collisional starburst*" también es visible en un ligero regreso al azul que se produce tras algunas fusiones de galaxias.

-
- [1] V. Springel et al., **The Millennium Simulation** *Simulation of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars* (Nature Publishing Group, 435-629, 2005).
 - [2] G. De Lucia and J. Blaizot, *The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 375, (2007).
 - [3] Somerville, Rachel S.; Primack, Joel R.; Faber, S. M. *The nature of high-redshift galaxies* (MNRAS, Volume 320, Issue 4, pp. 504-528, 2001).
 - [4] Guo et al. **The Millennium-WMAP7 Simulation** *Galaxy formation in WMAP1 and WMAP7 cosmologies* (MNRAS, 428-1351, 2013).
 - [5] G. Lemson and the Virgo Consortium **Database** *Halo and Galaxy Formation Histories from the Millennium Simulation: Public release of a VO-oriented and SQL-queryable database for studying the evolution of galaxies in the LambdaCDM cosmogony* (2006)
 - [6] Web: Virgo - Millennium Database
 - [7] Cole et al. *The statistical properties of Λ cold dark matter halo information* (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 546-556, 2008).
 - [8] Springel et al. *Population a cluster of galaxies - I. Results at $f_{\text{form}}\mu_2/z=0$* (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 726-750, 2001).
 - [9] Código Python - Repositorio online
 - [10] Croton et al. *The many lives of active galactic nuclei: cooling flows, black holes and the luminosities and colours of galaxies* (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 365, Issue 1, pp. 11-28, 2006).

APÉNDICE

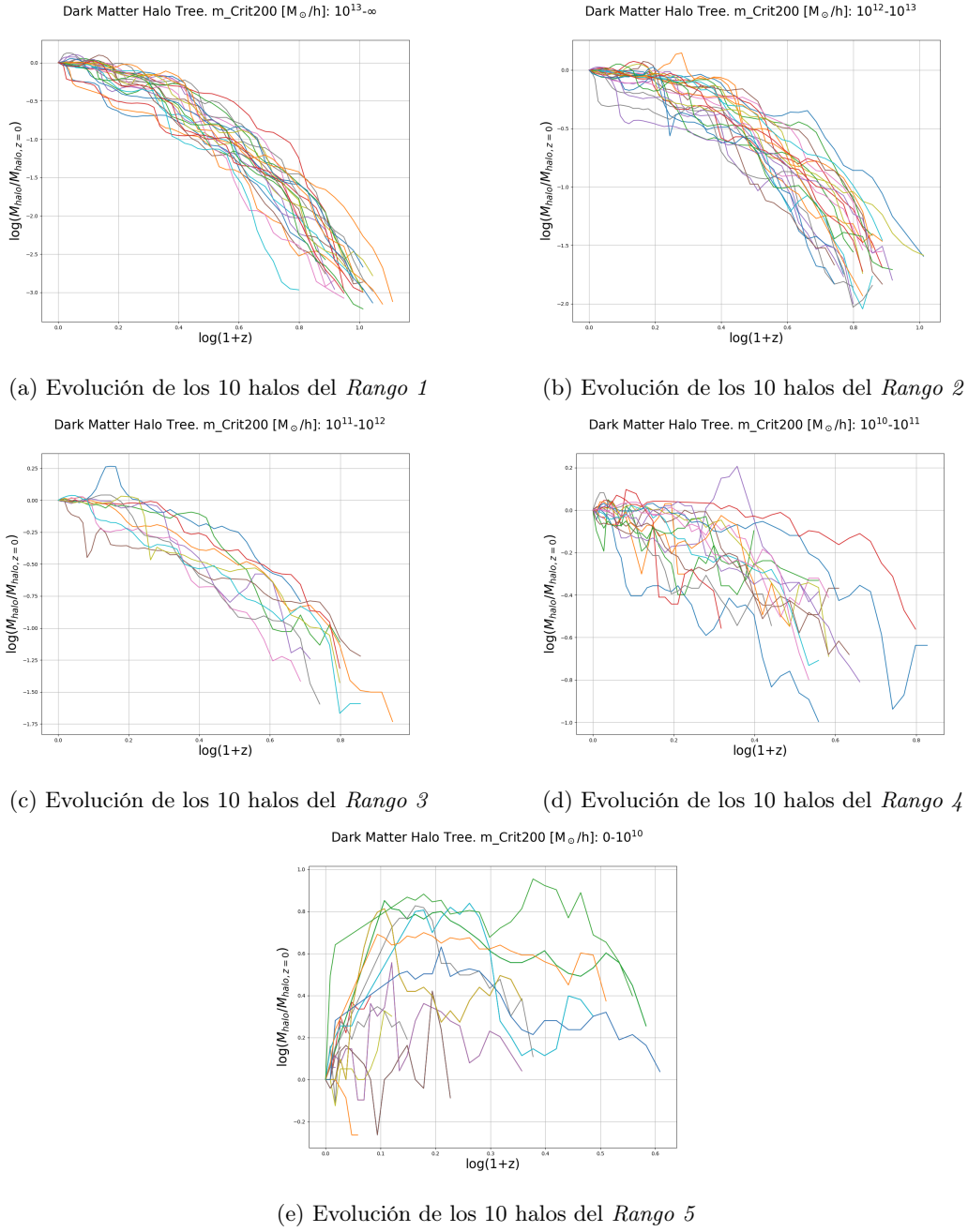


Figura 3: Evolución de los halos referentes a los rangos de la *Tabla II* para el caso de materia oscura. Se explica en la *Sección II B*

Dark Matter Halos. Averages of mass evolution & standar desviation.

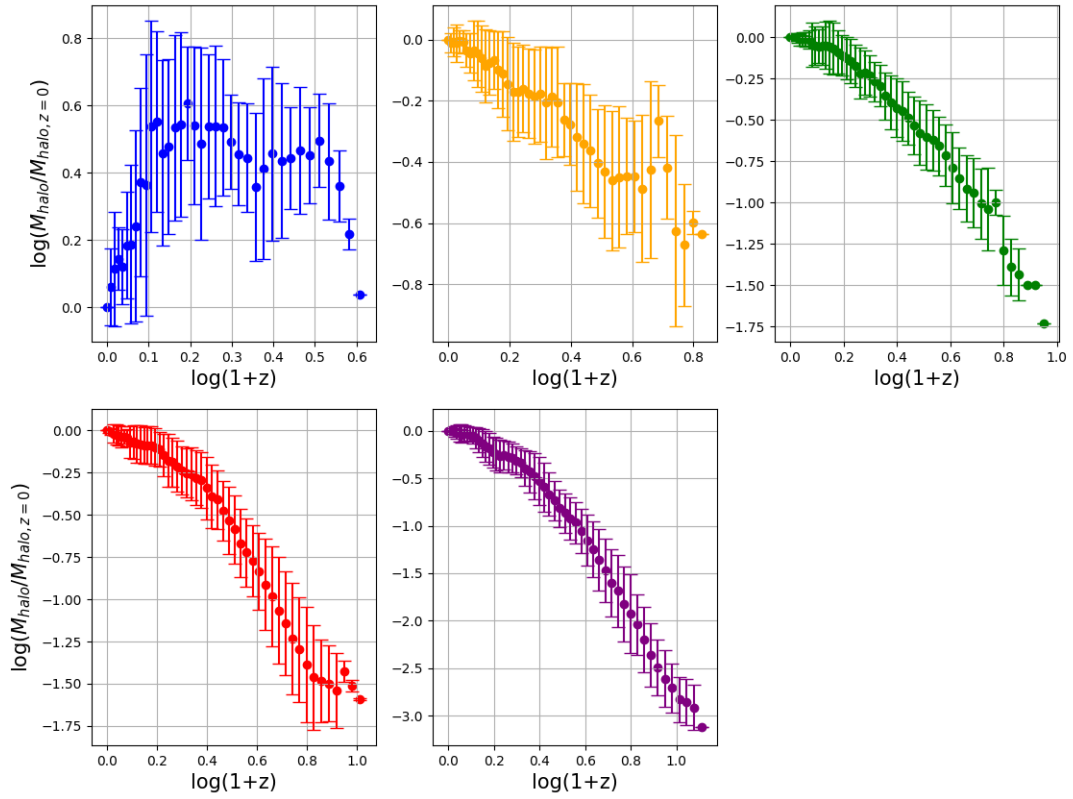


Figura 4: **Desviación típica** para el mismo tiempo en la evolución de los halos de la Figura 1 para la materia oscura. Se explica en la Sección IIB

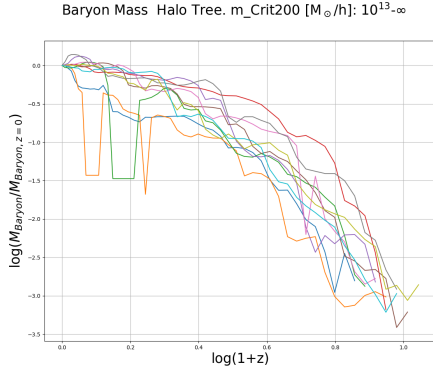
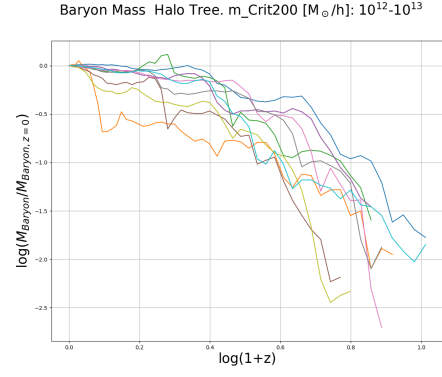
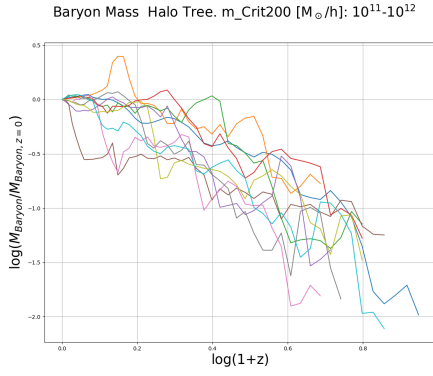
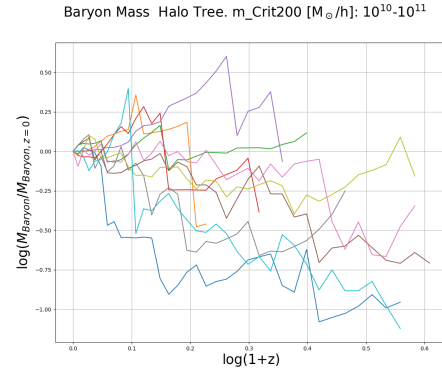
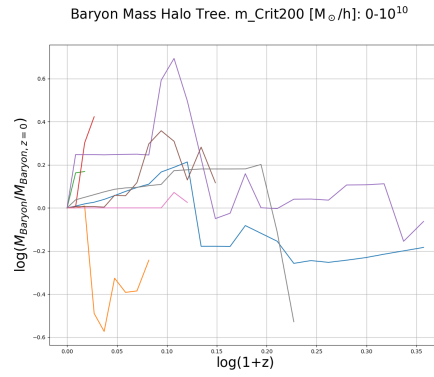
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*(e) Evolución de los 10 halos del *Rango 5*

Figura 5: Evolución de los halos referentes a los rangos de la *Tabla II* para el caso de materia bariónica. Se explica en la *Sección II C*

Baryon Mass Halos. Averages of mass evolution & standar desviation.

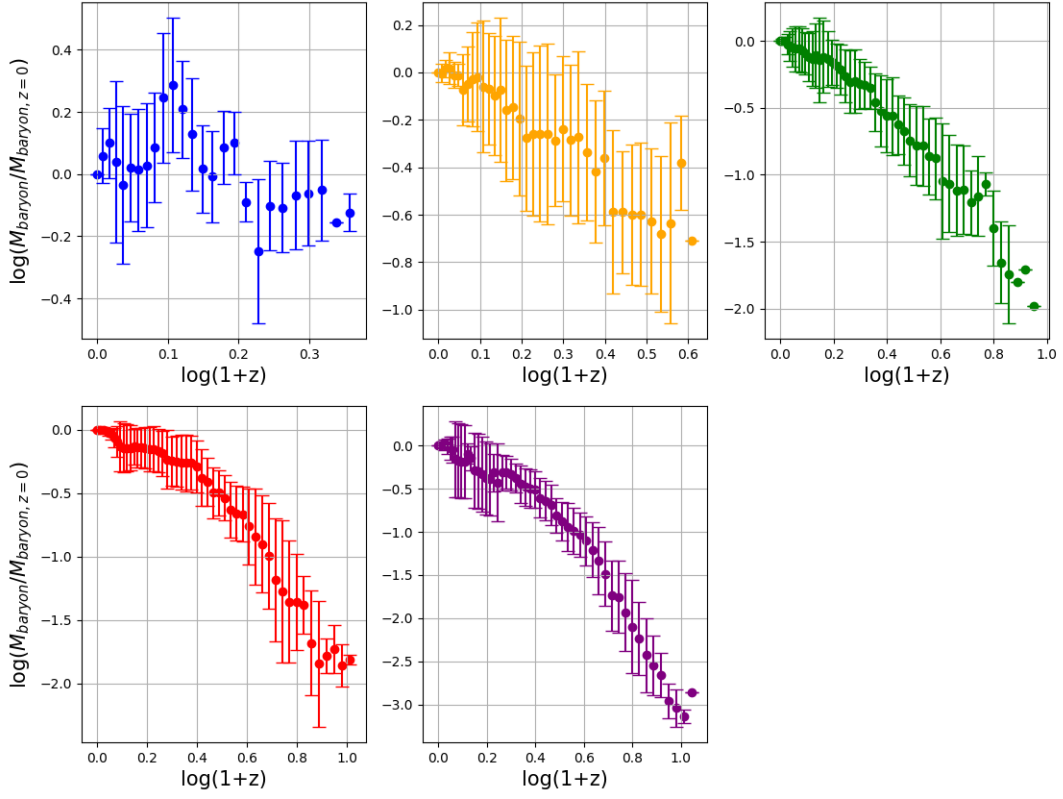


Figura 6: **Desviación típica** para el mismo tiempo en la evolución de los halos de la *Figura 2* para la meteria bariónica. Se explica en la *Sección II C*

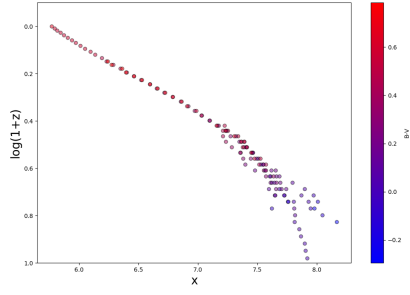
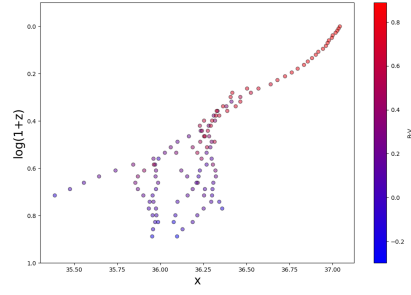
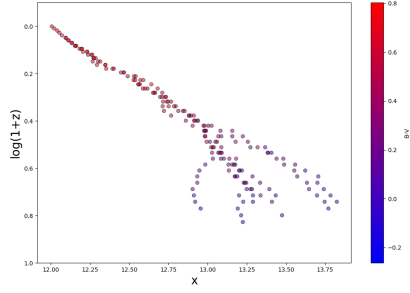
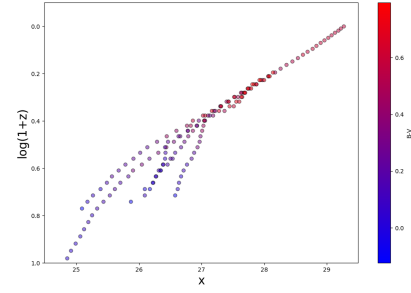
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*

Figura 7: Representación del **árbol de fusiones** para los cuatro subhalos escogidos. Pertenecen al Rango 4 de la *Tabla II*. Se explica en la *Sección III B*

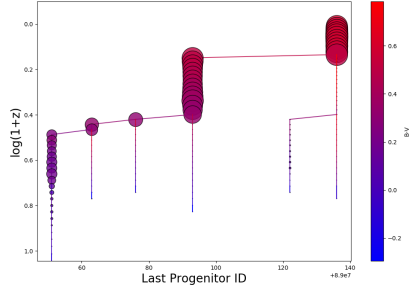
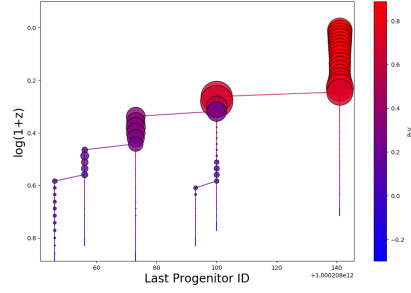
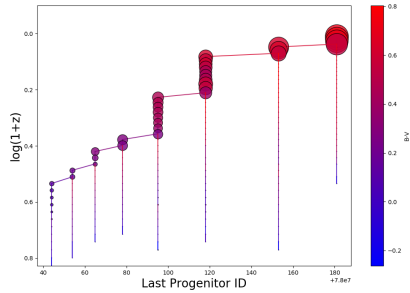
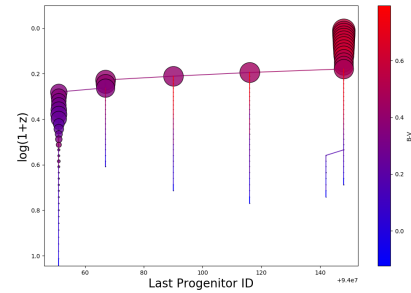
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*

Figura 8: Representación del **árbol de fusiones** para los cuatro subhalos escogidos (la masa queda reflejada en el tamaño de los puntos). Pertenecen al Rango 4 de la *Tabla II*. Se explica en la *Sección III B*

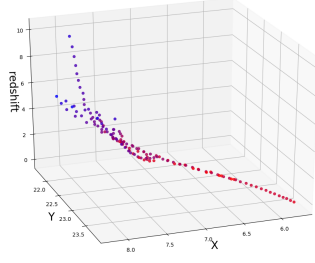
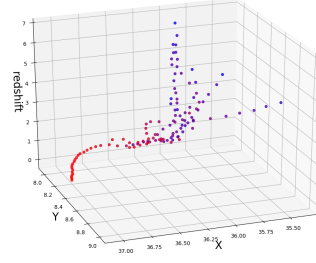
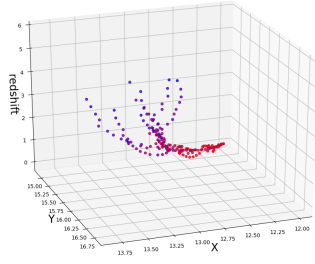
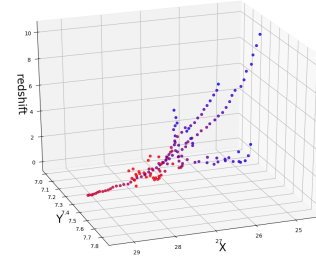
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*

Figura 9: Representación 3D del **árbol de fusiones** para los cuatro subhalos escogidos. Pertenecen al Rango 4 de la *Tabla II*. Se explica en la *Sección IIIB*