

Análisis de árboles de fusiones en simulaciones numéricas

Víctor Rufo, Yuan Bernete y Luis Abalo*

Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Astrofísica, Madrid, España

(Dated: November 28, 2020)

En el presente artículo se estudia la evolución de los halos de materia oscura 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 oscura 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 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 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 esta 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.

Los **parámetros y condiciones iniciales** de la simulación Λ CDM, se establecen 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])

El volumen de la simulación es una caja de $500 h^{-1} Mpc$ de lado, con $N = 2160^3$ partículas de masa $8.6 \times 10^8 h^{-1} M_\odot$ (*Springel et al., 2005*[1] [7]).

Después de que se haya realizado la simulación, se construyen los árboles de fusión mediante la determinación del descendiente de cada subhalo a partir de los grupos de partículas *friends of friends* (FoF).

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 *StepNum* = 63). 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.

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.

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

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 simulación, hay una discretización temporal. Por tanto, el crecimiento ocurre en un instante de tiempo Δt , 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* no se añade.

el objetivo de evidenciar la dependencia con la masa en la historia de los halos de materia oscura, se ha presentado la figura 1 a modo de comparacin de las medias de los halos pertenecientes a cada intervalo de masas

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*. Las escalas de los ejes son logarítmicas, luego cada intervalo representa la variación en órdenes de magnitud.

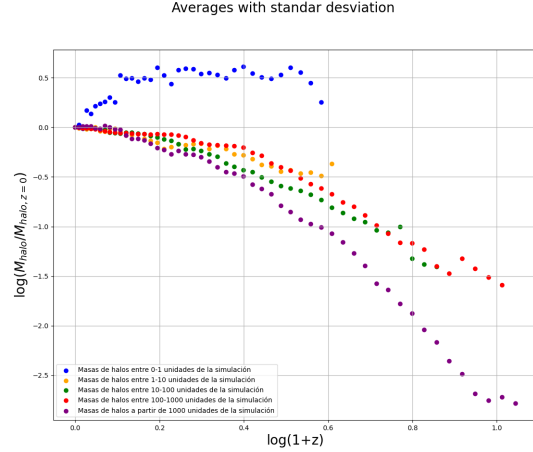


Figura 1: Promedio de la **evolución de los halos** para cada rango de masa (*Tabla II*) para el caso de materia oscura. Código de colores: morado-Rango 1, rojo-Rango 2, verde-Rango 3, amarillo-Rango 4 y azul-Rango 5

Se observa claramente que los halos más masivos tienen una historia más antigua al llegar a redshifts más elevados. Hay un crecimiento inicial considerable y más homogéneos en los tres primeros rangos (morado, rojo y verde) y un aplanamiento de su curva en redshift más cercanos a cero. Además, el rango que representa la curva amarilla no llega a un redshift muy avanzado. Las limitaciones del modelo se observan claramente en el rango representado por la curva azul, el menos masivo, el cual pone en evidencia la validez de la simulación para rangos de masa tan pequeños. Se hablará de las limitaciones de la simulación del *Milenio*[6] en la *Sección IV*.

La *Figura 1* representa la evolución de los halos para cada rango de la *Tabla II*. En general, se observan intervalos de crecimiento negativo, lo cual no tiene una explicación física congruente. Estos decrecimientos son una consecuencia de las limitaciones del modelo y se explican entendiendo que, para un *SnapNum* determinado, halos más pequeños salen fuera del radio del virial del halo principal, dejando de ser considerados, sustrayendo así la masa

correspondiente. Posteriormente, este decrecimiento se recupera gracias al colapso gravitacional. Los halos que habían salido vuelven a incluirse en el espacio que abarca el radio del virial del halo principal.

Si uno se detiene en cada gráfica dentro de la *Figura 3*, 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 con una disminución del número de fusiones a medida que se avanza hacia redshifts más pequeños. En *(b)* y en *(c)*, uno verifica que el crecimiento inicial es menor fijándose 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 por 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, si pierde algunas pocas, ya sea por el modo del conteo dado por el radio del virial o por alguna interacción, supone mucha pérdida de masa. Esto reduce significativamente la posibilidad de una estabilidad en el comportamiento de la curva a redshift cercanos a cero.

La figura *Figura 4* presenta el promedio de las masas de los halos para los cinco intervalos de masa de la *Tabla II*. Esta gráfica, refleja un cambio porcentual respecto al estado final a redshift cero. Por tanto, para un redshift dado se ve que un cierto halo ha ganado o perdido un cierto porcentaje de su masa final. Cabe esperar que para redshift cercanos al 0, su cambio porcentual sea muy pequeño, es decir, converja al estado final de manera suave. El halo ha llegado a una etapa estable y definida. Si ahora se implementa el concepto de desviación típica con muchos halos con los que promediar, ésta será mínima para esta etapa final y máxima para el estado inicial. Esto se debe a que cada halo parte con comportamientos másicos muy distintos. Si se observa alguna desviación nula comprendida entre dos momentos de desviación alta a redshift altos, esto se debe a que únicamente un halo con el que se ha promediado llega a ese redshift. No quiere decir, por tanto, que todos los halos converjan en ese punto, si no que solo hay uno.

Es decir, se interpreta la desviación como la diferen-

cia máxima entre un cambio porcentual de un halo respecto a otro para un redshift determinado. Conforme mayor sea la desviación, más distintos son los comportamientos. Los halos ganan o pierden masa de una manera más arbitraria. Si es materia negra, esto se debe a un intercambio por interacción gravitatoria. Ahora bien, si la desviación se reduce, los halos cambian de manera similar. Son más estables, tendrán menos interacciones.

De esta manera, se interpretan mejor las gráficas, resaltando la mala resolución que se produce en los halos de baja masa, cuya desviación es grande de manera continuada.

C. Resultados: Materia bariónica

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.

El crecimiento de los halos más masivos se prolonga hacia redshift más grandes, por lo tanto su historia de fusiones es más antigua. El aplanamiento de la curva de crecimiento según se avanza hacia redshift 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. Sin embargo, la principal diferencia con el caso de la materia bariónica de la *Sección IIB*, es que el crecimiento no es igual de homogéneo. La explicación se contará en detalle con la explicación relativa a la *Figura 5*.

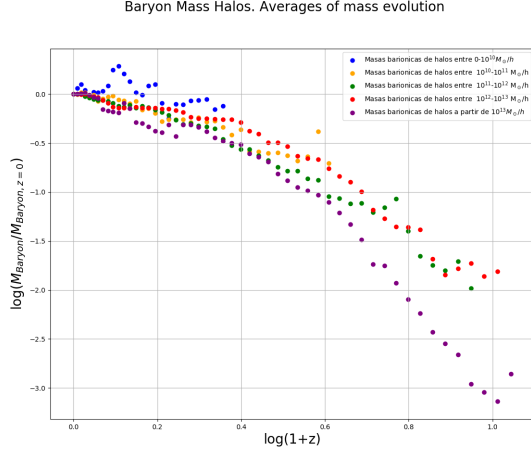


Figura 2: Promedio de la **evolución de los halos** para cada rango de masa (Tabla II) para el caso de materia bariónica. Código de colores: morado-Rango 1, rojo-Rango 2, verde-Rango 3, amarillo-Rango 4 y azul-Rango 5

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 H2 para identificar el halo y G2 para extraer la información relativa a las galaxias.

Los cuatro halos que se seleccionan pertenecen al Rango 4 de la Tabla II ya en rangos más masivos existe un número más elevado de subhalos sin galaxias.

Para la representación de la masa, se tiene en cuenta la masa en forma de estrellas, la masa del gas caliente y frío y la masa del bulbo, en el caso de que tuviera. Notar que no se representa la masa, sino que a través del tamaño de los puntos de la Figura 8, se ilustra la dependencia. Para la representación del color B-V, se restan las magnitudes simuladas en cada punto.

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 la Figura 8 se observan las fusiones que se producen a medida que se produce la evolución temporal, es decir, creciendo en el eje de abscisas. La masa se concentra, fundamentalmente, en la rama principal (rama situada a la derecha), salvo en la figura (a), que también se reparte en la rama secundaria. La masa aumenta según se evoluciona hacia redshift cero y, respecto al color B-V, las galaxias se vuelven más rojas con el tiempo. Únicamente en las galaxias correspondientes a redshift más altos presentan una mayor luminosidad en el UV.

IV. CONCLUSIONES

La **simulación del Milenio**[6], anunciada en (*G. Lemson & the Virgo Consortium, 2006*[5]) funciona bien 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, se decide despreciar los halos menos masivos, debido a la cantidad de errores e imprecisiones que acumulan.

Es interesante fijarse que el aplanamiento de la curva de crecimiento para los halos menos masivos se produce de manera cronológica 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.

Respecto a las limitaciones de la simulación, en primer lugar, se señala el problema de reproducir un comportamiento correcto con halos de masas cercanas al límite de la simulación, cerca a $10^{10} M_{\odot}$. En segundo lugar, la cantidad de partículas es excasa en halos pequeños para representar las estructuras de manera correcta.

- 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] M. Boylan-Kolchin et al. **The Millennium-II Simulation** *Resolving cosmic structure formation with the Millennium-II Simulation* (MNRAS, 398-1150, 2009).
 - [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 $[formmu2/z=0$* (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 726-750, 2001).
 - [9] Código Python - Repositorio online

APÉNDICE

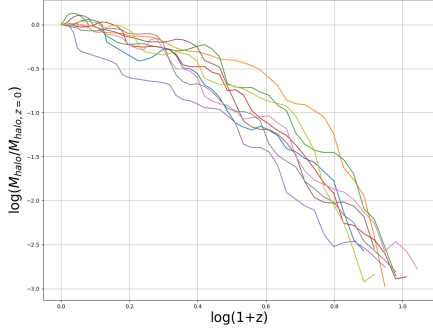
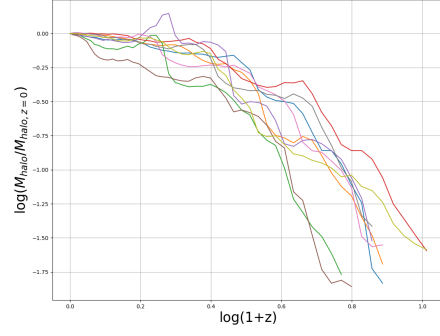
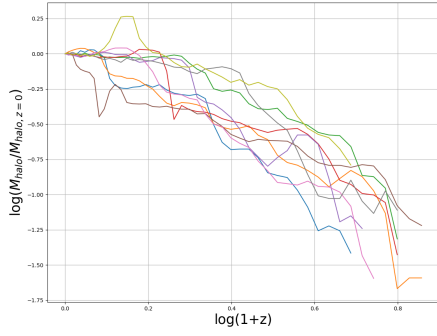
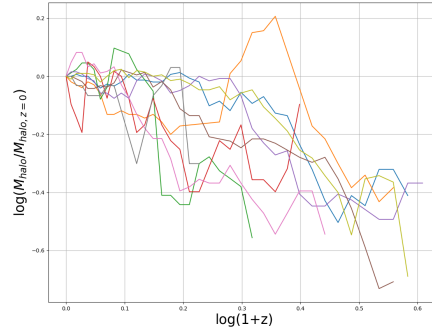
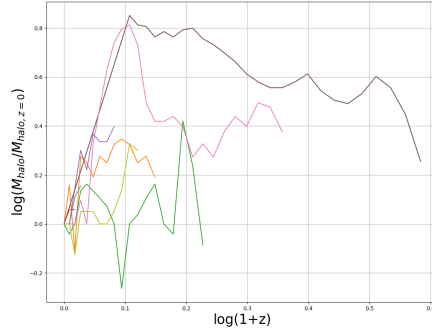
Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 1000(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 100(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 10(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 1(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 0(e) Evolución de los 10 halos del *Rango 5*

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 IIB*

Averages with standar desviation

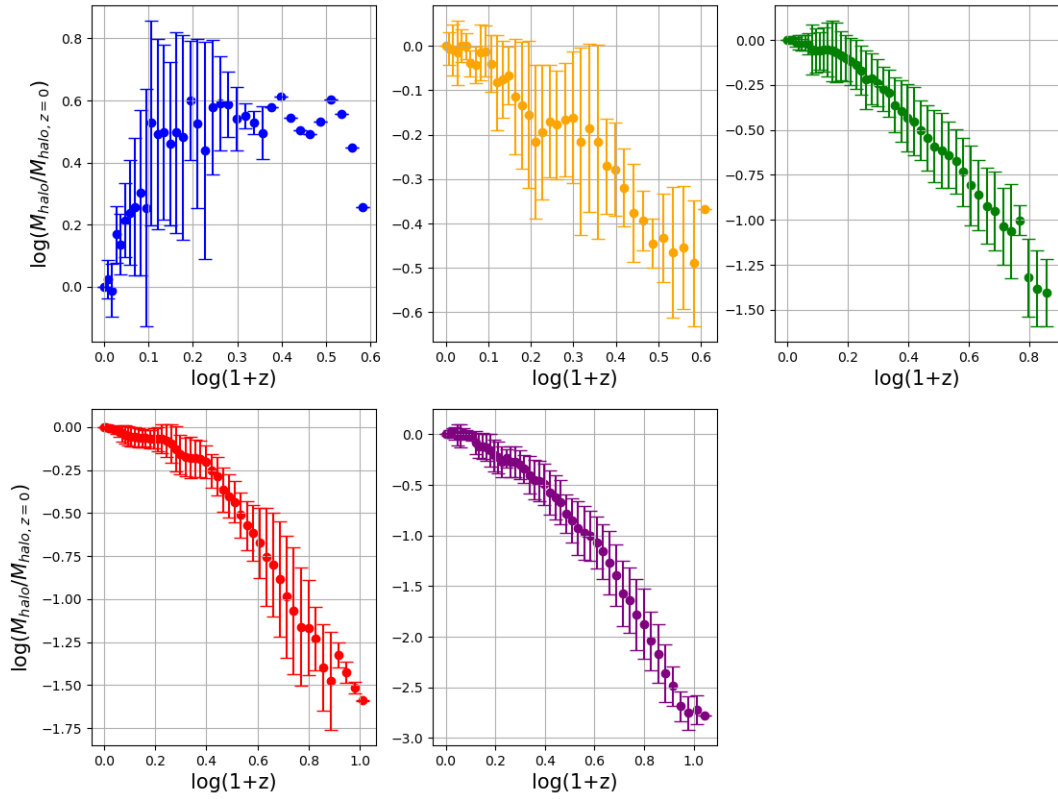


Figura 4: **Desviación típica** para el mismo tiempo en la evolución de los halos de la Figura 1 para la materia oscura. Se explica en la Sección IIB

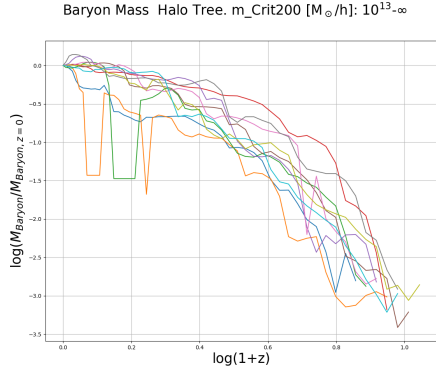
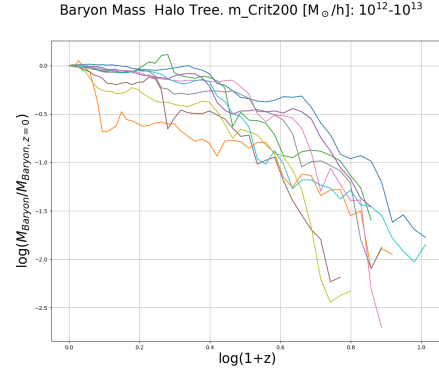
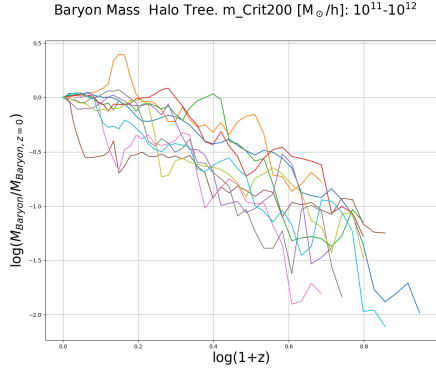
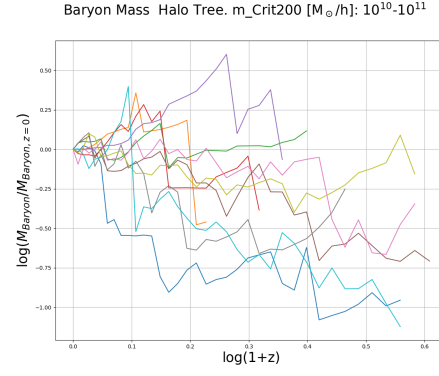
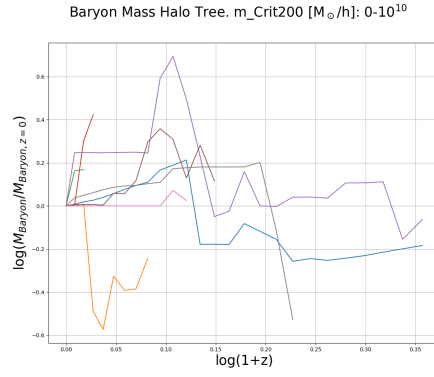
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*(e) Evolución de los 10 halos del *Rango 5*

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 IIC*

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

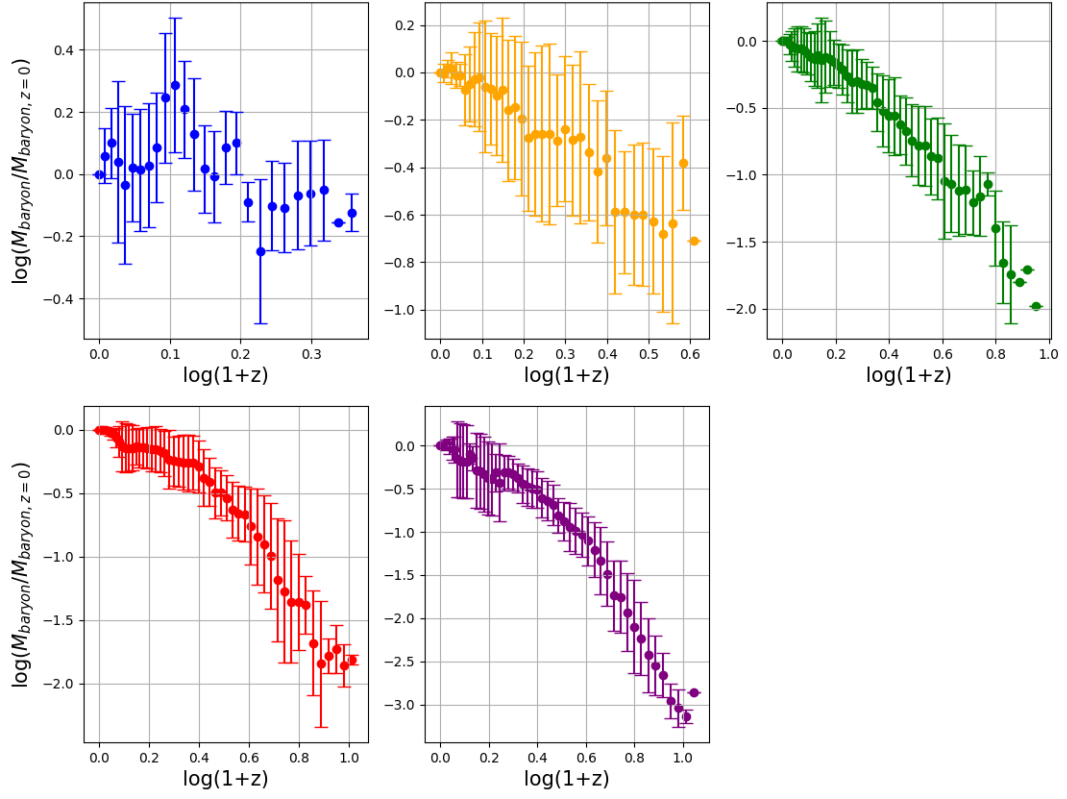


Figura 6: **Desviación típica** para el mismo tiempo en la evolución de los halos de la Figura 2 para la materia bariónica. Se explica en la Sección II C

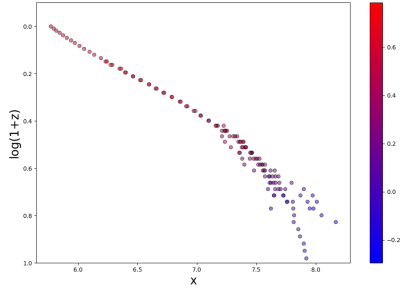
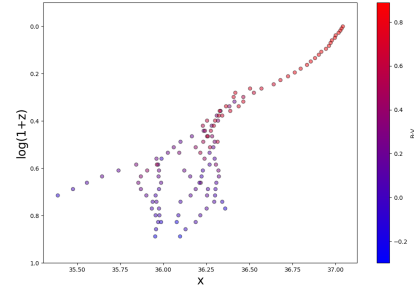
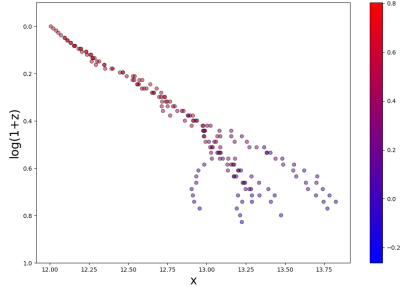
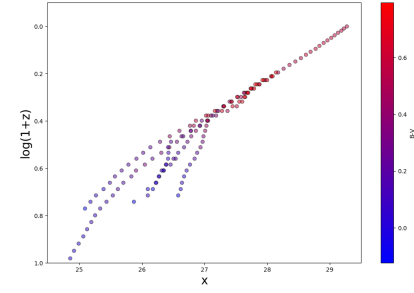
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*

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*

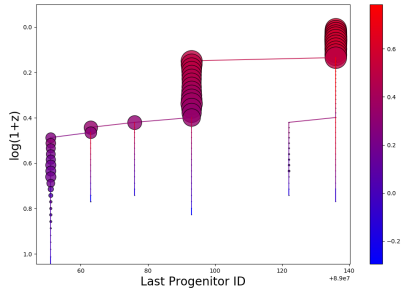
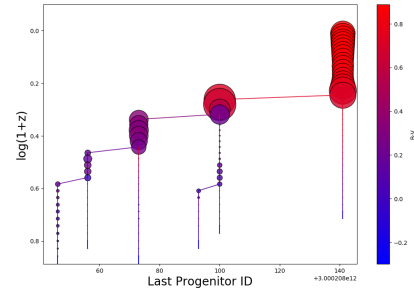
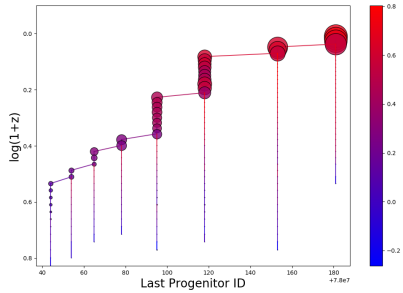
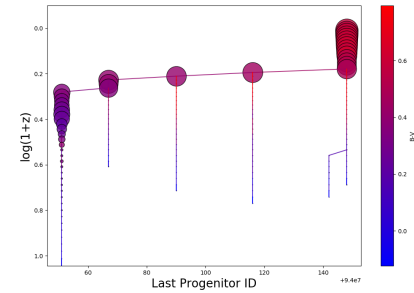
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*

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*

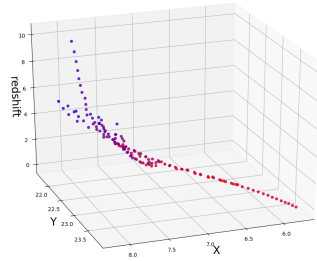
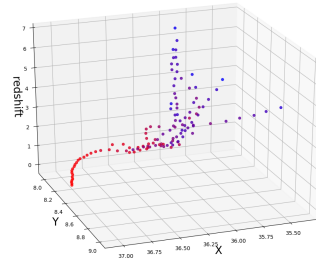
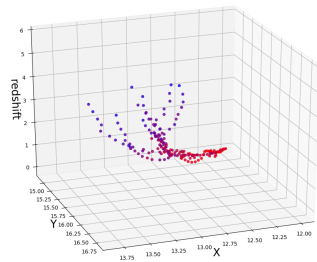
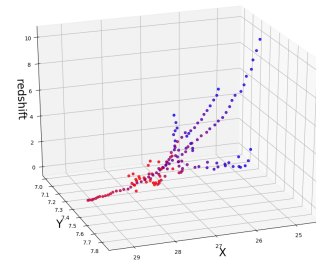
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*

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 III B*