



Análisis de árboles de fusiones en simulaciones numéricas

Enrique Galceran García
Alejandro Ariza Carrasco

30 de noviembre de 2018

Resumen

En el Universo se encuentra una materia no bariónica de naturaleza desconocida, denominada *materia oscura*, que constituye aproximadamente el 25,67 % de la densidad de materia del Universo. Tenemos ciertas constancias observacionales de esta, debido a que interviene en gran medida en multitud de objetos presentes en el Universo.

Por tanto, los halos de materia oscura proporcionan uno de los pilares cósmicos del Universo observado, siendo piezas clave para comprender como esta materia afecta a la formación y evolución de las galaxias. En este trabajo nos encargaremos de construir el recorrido de evolución de la materia oscura en el Universo, de esta forma podremos llegar a comprender la importancia de esta en la formación y evolución de galaxias. Llevaremos a cabo dicha labor a través de los resultados de la simulación de *Millennium*, una *simulación de N-cuerpos*, que nos proporcionará un análisis de estos halos de materia oscura y mediante el cual podremos realizar la construcción de sus árboles de fusiones, comprobando de esta forma la posible evolución de los halos de materia oscura hasta la época actual, proporcionándonos además una visión de las propiedades y evolución de las galaxias que se forman en dichos halos.

Índice

1. Introducción

2. Fundamentos Teóricos

- 2.1. Press-Schechter Extendido
- 2.2. Simulaciones N-cuerpos

3. Metodología

- 3.1. Obtención de halos de materia oscura
- 3.2. Obtención de halos de bariones
- 3.3. Árbol de fusión completo

4. Resultados

- 4.1. Comparación de las masas relativas
 - 4.1.1. Halos de Materia Oscura
 - 4.1.2. Halos de Bariones
 - 4.1.3. Comparación
- 4.2. Colapso jerárquico

5. Conclusiones

Referencias

A. Contenido Complementario

B. Ramas de fusión de halos

1. Introducción

- 1 La materia oscura es de naturaleza desconocida, donde las
- 2 partículas que la pueden constituir aún están por descu-
- 3 brir, no obstante, se considera que se trata de materia no
- 4 luminosa y no relativista que constituye aproximadamen-
- 5 te 25,67 % de la densidad de materia del Universo. No está
- 6 constituida por materia ordinaria (que interactúa con la
- 7 luz), tal y como se observó gracias al estudio de las aniso-
- 8 tropías del Fondo de Microondas.
- 9 Fue el estudio de la dispersión de las velocidades orbitales
- de las galaxias en los cúmulos, donde el astrónomo Fritz
- Zwicky propuso la existencia de dicha materia. También se
- observó que esta materia explica otros tantos fenómenos
- relacionados con las galaxias, desde la relación existente
- entre masa-luminosidad de estas en los cúmulos hasta las
- curvas de rotación de algunas de ellas, así como su forma-
- ción y evolución entre otros tantos.
- La materia oscura al ser no relativista, es decir fría, es
- generalmente conocida como *Materia Oscura Fría* (*CDM*,
- Cold Dark Matter*) en un hecho que queda reflejado, pue-
- sto que en la formación de estructuras del Universo, esta
- se lleva a cabo desde las galaxias a los cúmulos, luego la
- formación se produce desde la escala más pequeña a la
- más grande.

El análisis de árboles de fusiones de halos de materia oscura se fundamenta en la época del Universo donde la materia oscura dominaba, denominada *dark matter* (*DM*). Sabemos que tras el Big Bang, el Universo se encontraba formado por diversas partículas en un plasma caliente aproximadamente a una temperatura de $10^{10} K$. Debido a

esta temperatura los átomos no podían formarse, ya que todos los electrones en el plasma no podían unirse a los protones debido a su eliminación por la colisión con un fotón. A medida que transcurrió el tiempo, unos 380.000 años después del Big Bang (redshift 1100), el Universo se fue enfriando debido a su expansión, provocando de esta forma que los electrones ahora sí pudiesen combinarse con los protones para formar átomos de hidrógeno. Los fotones no podían intervenir debido a que estos perdían energía como consecuencia de dicha expansión y enfriamiento, viajando sin obstáculos en todas direcciones del Universo. De esta forma el Universo pasó a ser transparente, en una época que sería conocida como *recombinación* o *desacoplamiento*. Estos fotones al momento de desacoplarse son los que hoy observamos como la *Radiación de Fondo de Microondas (CMB)*.

En la época de dominación de la radiación, la materia bariónica se encontraba acoplada con la radiación, pero al mismo tiempo debido a los potenciales gravitacionales que la materia oscura creaba en el plasma, esta materia bariónica era dispersada por la radiación como consecuencia de la presión que esta última ejercía sobre los bariones. Estos continuos acoplamientos y desacoplamientos producían unas perturbaciones propagadas como ondas acústicas hasta el momento de la época de desacoplamiento, donde finalmente los bariones y la radiación se desacoplaron, de manera que la velocidad del sonido del plasma cayó a 0, quedando de esta forma “congeladas” dichas ondas acústicas. Estas ondas acústicas que podemos observar son las denominadas *Oscilaciones Acústicas Bariónicas (BAO)*.

Por tanto, es de vital importancia el estudio y aprendizaje de la evolución a partir de estas etapas que acabaron dando lugar a la formación de las estructuras y propiedades que se observan en el Universo actual. Para poder llevar a cabo estos estudios se deben realizar modelos denominados semi-analíticos de formación de galaxias. Estos modelos nos permitirán seguir el recorrido evolutivo de los halos de materia oscura mediante agrupaciones jerárquicas (árboles), donde se le asignará unas propiedades físicas bien definidas a las galaxias que se formen a partir de estos halos y durante este proceso predecir también la historia de las propiedades físicas del gas y del ritmo de formación de estrellas.

La formación de estructuras en el Universo es un proceso no lineal. Por lo tanto, los métodos analíticos se limitan a obtener una comprensión profunda del proceso en sí y de los estados finales del desarrollo de una perturbación de la densidad en el colapso gravitacional en curso. Por consiguiente, debemos tener en cuenta esto, considerando de esta forma que las perturbaciones no colapsan a un solo punto en trayectorias rectilíneas, sino que perturbaciones de menor escala dentro de los halos dan lugar a desviaciones de respecto a las orbitas radiales, mayores cuanto mayor es la densidad. A este proceso se le denomina *relajación violenta* y determina la distribución de *DM*. De esta manera, como hemos mencionado anteriormente, debemos considerar la existencia de materia que no interacciona con la radiación y fría, para que de esta forma amplifique el crecimiento no lineal y de lugar a la formación de galaxias ya a alto z . Por tanto, este trabajo se basará en modelos

de *CDM*, ya que serán estos los que nos den una mayor visión y profundidad de la formación y evolución de galaxias, a través de los árboles de fusión originados para los halos de materia oscura.

Para llevar a cabo la construcción de árboles de fusiones de halos de materia oscura nos basaremos en dos modelos que son utilizados actualmente para su generación y para la explicación del proceso evolutivo de estos y de la formación y evolución de las galaxias. Llegaremos a ver cómo la distribución de *CDM* acreta masa a lo largo del redshift, comprobando de esta forma a partir de diferentes rangos de masa cómo se ofrecen las distintas posibilidades para la explicación de la enorme cantidad de galaxias presente en el Universo actual, donde la luminosidad de estas además tendrá su explicación debido al enfriamiento y condensación del gas en los halos progenitores. Por un lado, a partir del formalismo de *Press-Schechter Extendido* y por otro lado por medio de *simulaciones de N-cuerpos*. Estos dos modelos serán explicados con más detalle en el apartado *Fundamentos teóricos*.

En base a estos árboles de fusiones, se puede encontrar además una relación entre la estructura jerárquica de estos y la formación y evolución de *brightest cluster galaxies (BCGs)*, tal y cómo nos propone deLucia (*deLucia et Blazot 2007*)⁽²⁾.

2. Fundamentos Teóricos

En este apartado vamos a proceder, como se ha explicado anteriormente, a detallar cada uno de los modelos que aquí se han mencionado, *Press-Schechter Extendido (ePS)* y *simulaciones de N-cuerpos*. Recordemos que el principal objetivo de los modelos *CDM* es visualizar y explicar la formación y evolución de galaxias, a partir de constantes y parámetros cosmológicos, reproduciendo la historia de agrupación jerárquica de la materia oscura y durante este proceso predecir también la historia de las propiedades físicas gas y del ritmo de formación de estrellas.

2.1. Press-Schechter Extendido

Como hemos indicado antes, el crecimiento de las estructuras es un proceso no lineal, de modo que el formalismo de P-S se limita a obtener una comprensión profunda del proceso en sí, de forma analítica a partir de las constantes y los parámetros cosmológicos construyendo una explicación del colapso de halos oscuros, proporcionando una rápida exploración de las historias de acreción de masa de los halos para un amplio rango de masas.

Este modelo fue desarrollado por Press y Schechter (1974)⁽¹⁾, quienes aplicaron el modelo de colapso jerárquico esférico a un campo de densidad Gaussiano. Con ello pudieron determinar la distribución en materia oscura, de objetos colapsados. No obstante, el formalismo de *Press-Schechter* estándar nos dice que todo halo a una escala que está por encima de la densidad crítica (δ_c) está colapsado, y cualquier halo que esté por debajo de esta densidad crítica aún no ha colapsado también en esa escala, es decir, solo tiene en cuenta que las trayectorias sean

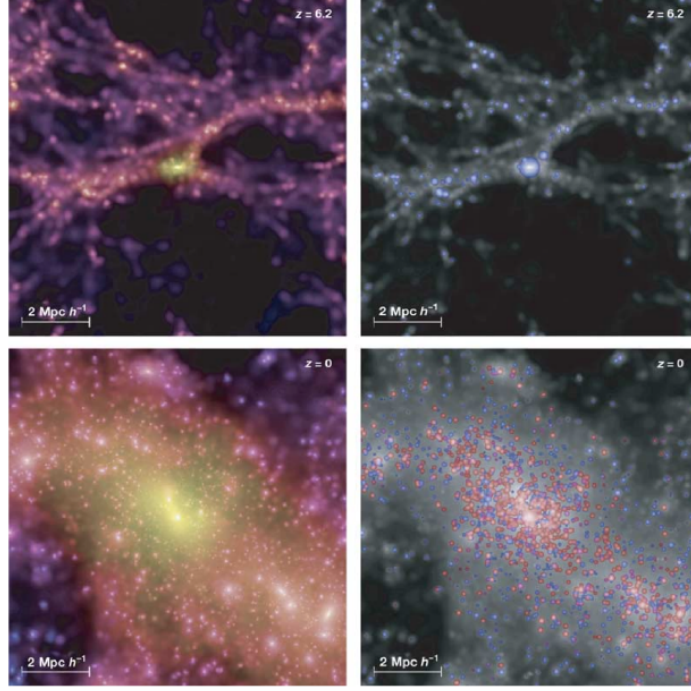


Figura 1 – Densidad y dispersión local de velocidades de un halo de materia oscura modelado con la simulación y en diferentes escalas

siempre crecientes en densidad cuando pasa el tiempo y cuando crecen en la escala de las fluctuaciones.

Esto nos provoca dos limitaciones importantes⁽⁶⁾: la primera de ellas es que no considera la mitad de la masa en objetos colapsados, es decir, no considera la mitad de halos que están por debajo de la δ_c que habían colapsado a un instante anterior, esto es, se olvida de los halos que, aunque en el momento que estamos mirando en la escala no están por encima de la densidad crítica si lo habían estado en un instante anterior; la segunda limitación es que no nos proporciona información sobre la función de masa de los precursores que serán requisito indispensable para realizar, mediante las técnicas Monte Carlo, los árboles de fusiones.

Para solucionar estos inconvenientes se elabora el formalismo de *Press-Schechter Extendido*, el cual se seguirá basando en el formalismo de P-S estándar, pero con una serie de suposiciones extras. Lo primero que permite el formalismo *ePS* es asignar masas a elementos virializados en diferentes escalas, partiendo de la fluctuación inicial de densidad, donde recordemos que el crecimiento de la fluctuación por las diferentes escalas es un proceso de camino aleatorio, de modo que cuando llega al límite para el colapso puede darse con la misma probabilidad una trayectoria de crecimiento espejo, esto es la trayectoria opuesta.

Con esto, *ePS* tiene en cuenta esos halos que habían colapsado en un instante anterior pero que ahora en esa escala no superaban la densidad crítica, donde el P-S estándar ignoraba esta fracción de objetos. Al considerar los diferentes tipos de trayectorias a ambos lados del límite de la densidad crítica, el formalismo de *ePS* soluciona también la limitación del formalismo estándar, la cual consistía en que no era capaz de darnos información sobre la función de masa de los halos precursores, mientras que *ePS* si nos permite calcularla probabilísticamente. Como puede tra-

bajar con funciones de masa de los precursores, se deben utilizar simulaciones de Monte Carlo para estimar el precursor más probable.

2.2. Simulaciones N-cuerpos

Los primeros intentos de Holmberg (1941) anticiparon el uso extensivo de *simulaciones de N-cuerpos* en la era del análisis numérico utilizando ordenadores. Se crearon los primeros códigos de *N-cuerpos* (Aarseth 1963) y el desarrollo de simulaciones numéricas siguió vinculado al de la potencia computacional. Hoy en día esto sigue siendo cierto, con la presencia ubicua de la codificación paralela, que amplía las posibilidades de los ordenadores actuales simplemente agregando una gran cantidad de ellos, en lugar de centrarse en la potencia individual de cada procesador. De esta manera, los códigos de *N-cuerpos* actuales aprovechan esta nueva forma de usar los ordenadores para hacer que las simulaciones sean más eficientes en términos de tiempo de ejecución. A partir de la era superordenadores en la actualidad, empezaron a ser capaces de predecir y recrear todas estas funciones de masa de halos que el P-S estaba intentando predecir.

Básicamente, estas simulaciones consisten en una caja cúbica, también conocida como caja de simulación, que representa una región en el Universo que no sufre efectos de límites a medida que se implementan las condiciones de los límites periódicos. El campo de densidad está representado por trazas discretas llamadas partículas. Por supuesto, cuantas más partículas haya en una simulación, mayor será la resolución. Estas partículas elementales solo interactuarán gravitacionalmente por lo que, considerando el Universo como un fluido sin colisión llegaremos a tener un conjunto de partículas discretas representadas a partir de *N-cuerpos*. Por otro lado, a veces no es necesario

resolver objetos colapsados individuales (conocidos como halos de materia oscura) con muchas partículas por halo, pero es conveniente tener buenas estadísticas del halo.

En esta práctica hemos utilizado resultados de la simulación de *Millennium*⁽³⁾. Un ejemplo de la simulación de *Millennium* lo podemos ver en la figura 1. *Millennium* presenta $1,0078 \times 10^{10}$ partículas, con un redshift desde 127 hasta el presente, en una región cúbica de $500h^{-1}Mpc$ por lado, donde $1+z$ es el factor de escala de expansión del Universo relativo al presente y una constante de Hubble de $100kms^{-1}Mpc^{-1}$; y el modelo cosmológico a considerar es un modelo ΛCDM con $\Omega_m = 0,25$; $\Omega_b = 0,045$; $\Omega_\Lambda = 0,75$; $h = 0,73$; $n = 1$ y $\sigma_8 = 0,9$. Dados estos parámetros y su alta resolución y volumen, esta simulación nos permite elaborar las historias de formación de los halos de materia oscura, donde se considerarán que el primer halo progenitor será aquel que es más masivo de los progenitores.

3. Metodología

Como hemos comentado en el apartado de *Fundamentos teóricos*, vamos a utilizar los resultados proporcionados por la web de simulación *Millennium*¹. Nuestro objetivo es recrear los árboles de fusiones que son capaces de generar las simulaciones numéricas, así como con las predicciones de los SAMs para las propiedades de las galaxias que se forman en estos halos.

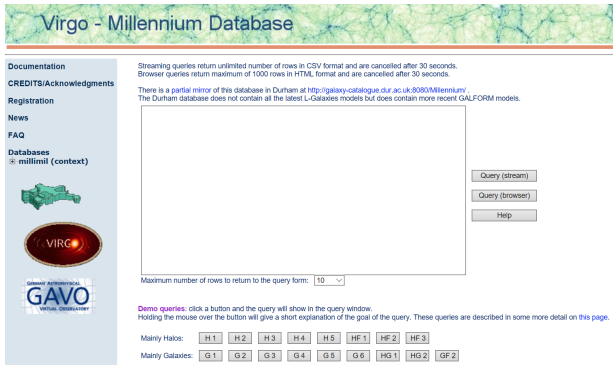


Figura 2 – Menú de la página web de *Millennium*.

Esta web dispone de una serie de *queries* recogidas en una especie de tabla o panel, con distintos botones que podremos seleccionar para obtener los datos correspondientes a lo que se quiere estudiar. Para ello la página web de *Millennium* cuenta con una serie de documentos en los que explica que hace cada botón del panel de *queries*. Por tanto, será este panel el que nos permita realizar los propósitos de búsqueda de halos y subhalos, los cuales serán recogidos en una submuestra para diferentes rangos de masa, donde los valores escogidos vendrán en el apartado *Resultados*. Estos halos y subhalos lo llegaremos a obtener en función de los parámetros de la base de datos *MPAHalo*, la cual nos recoge todos los halos de materia oscura que fueron obtenidos de la simulación.

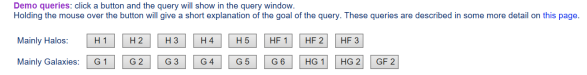


Figura 3 – Panel de *queries*.

3.1. Obtención de halos de materia oscura

Buscamos representar la masa de los halos de materia oscura por lo que la columna en la que nos tendremos que fijar para este dato es la columna *mCrit200* cuyas unidades y definición las podemos encontrar en la documentación, donde encontramos que las unidades de esta son $10^{10}M_{sun}/h$.

El procedimiento llevado a cabo para obtener los halos de materia oscura y lo que buscamos representar es el siguiente:

- Seleccionamos una submuestra para una masa de halo dada mediante la opción *H1* dentro del panel de queries. Como buscamos los halos de materia oscura a $z = 0$, para cada rango de masas, deberemos poner *snapnum=63* que será la que represente este redshift 0. De aquí sacamos los *halosID*.
- Debemos conseguir sus historias de ensamblaje (evolución de la masa con el tiempo) por lo que usaremos el botón *H2* para cada *haloID* seleccionado.
- Los datos generados para cada *haloID* los extraemos cambiarlo a CSV.

Antes de representar los datos, se debe hacer una serie de correcciones, o de lo contrario la gráfica de estos presentarán una serie de errores que a la larga complicará el entendimiento de lo que se quiere estudiar. En primer lugar, hemos representado solo las ramas principales de cada halo, por lo que hemos eliminado todas las subramas y por último hemos quitado aquellos valores de la tabla donde la masa era 0.

3.2. Obtención de halos de bariones

En este caso, a partir del catálogo *DeLucia2006a* de la base de datos de *Millennium*, buscamos la evolución de la masa en estrellas en vez de la masa total (oscura) de los halos, por tanto, en este caso nos tendremos que quedar con la masa estelar, *stellarMass*. Este procedimiento se lleva a cabo mediante el botón *G2* y se realizará para los mismos objetos de los halos del caso anterior, para de esta forma disponer de un método de comparación.

3.3. Árbol de fusión completo

Por último, mostraremos un árbol de fusiones completo en que se incluirá la información del color de la galaxia que se fusiona con la galaxia principal. Dicho método de obtención será una combinación de los botones del panel de *queries* llevado a cabo en los procedimientos anteriores, de modo que escogiendo un *haloID* en particular, primero se utilizará el catálogo de *MPAHalo* para de esta forma obtener toda la información de la materia oscura, y en segundo lugar se utiliza el catálogo de *DeLucia2006a* para

¹gavo.mpa-garching.mpg.de/Millennium/MyDB

obtener la información de los bariones de ese *haloID*. El *haloID* escogido y lo que se busca obtener será explicado en el apartado *Resultados*.

4. Resultados

4.1. Comparación de las masas relativas

A la hora de obtener resultados, hemos hecho una serie de búsquedas en las bases de datos en las que podemos cambiar los diferentes parámetros que nos interesan. Vamos a separar las diferentes galaxias en 4 grupos en función de la masa del halo en el presente (snapshot de la simulación 63):

- $M_{final} < 10^{10} M_{sun}/h$
- $10^{10} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{11,5} M_{sun}/h$
- $10^{11,5} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{12,5} M_{sun}/h$
- $10^{11,5} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{12,5} M_{sun}/h$

Para las masas pequeñas tenemos la limitación de la propia simulación. El tamaño de las partículas es mayor que $10^8 M_{sun}/h$ y necesita poder colapsar, luego el grupo más pequeño termina estando delimitado a $5,1 \times 10^9 M_{sun}/h < M_{final} < 10^{11,5} M_{sun}/h$.

4.1.1. Halos de Materia Oscura

Ordenando por la masa crítica del halo final, podemos tomar los datos de los diferentes halos de los grupos. Utilizando Matlab, podemos recolectar todos estos datos y mostrarlos todos juntos con el fin de poder manipularlos:

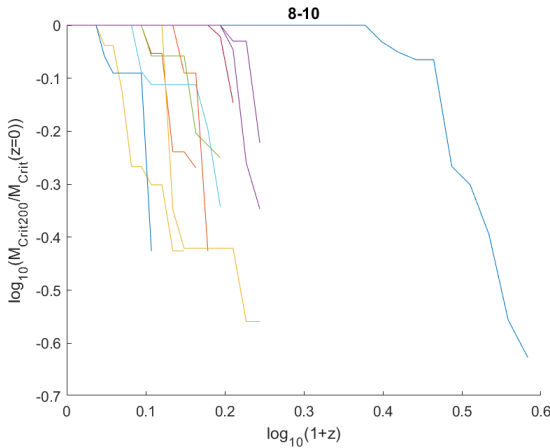


Figura 4 – Halos de DM dentro del rango $M_{final} < 10^{10} M_{sun}/h$.

Los datos obtenidos para el primer grupo (figura 4) son poco representativos de la realidad de las galaxias de ese tamaño en la realidad. El tamaño de las partículas con las que se hacen estas simulaciones son casi del tamaño completo de estas galaxias, luego tienen muy pocos datos de historia de estas galaxias así como errores muy grandes.

Ahora, podemos realizar para cada uno de los snapshots el valor medio de todos los casos disponibles para cada

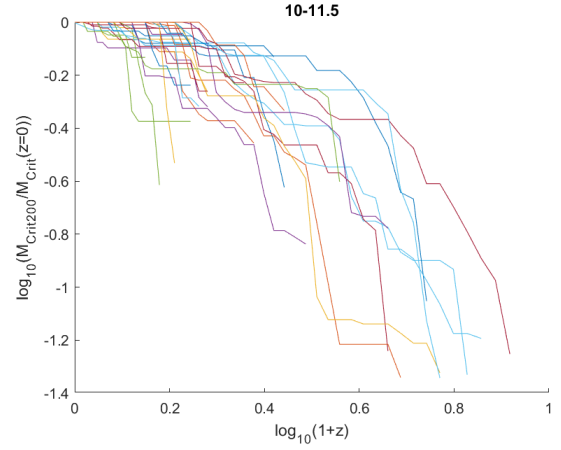


Figura 5 – Halos de DM dentro del rango $10^{10} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{11,5} M_{sun}/h$.

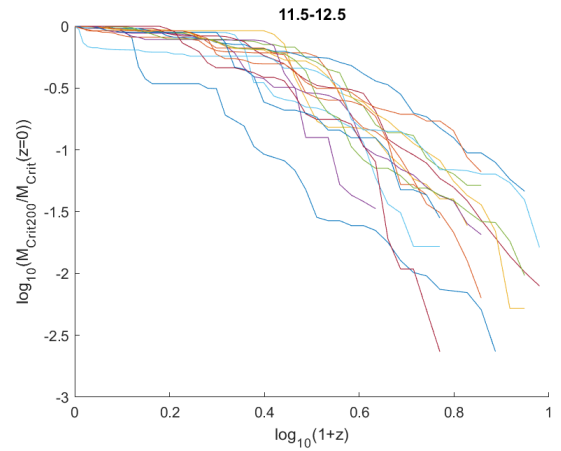


Figura 6 – Halos de DM dentro del rango $10^{11,5} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{12,5} M_{sun}/h$.

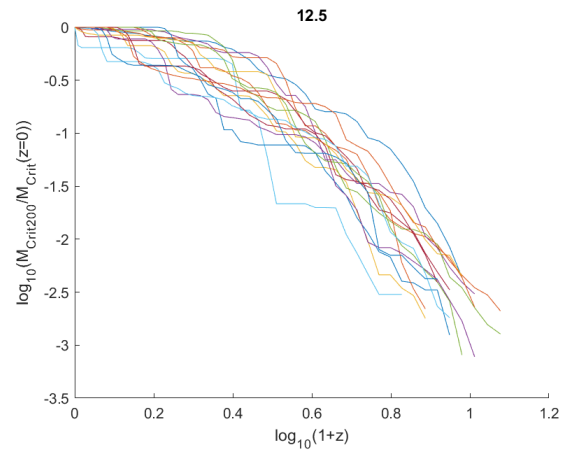


Figura 7 – Halos de DM dentro del rango $10^{11,5} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{12,5} M_{sun}/h$.

snapshot². Realizando esta medida de la media, obtenemos la figura 8.

²La relación entre Snapshots y redshift es única y biyectiva para estas simulaciones, luego hablar de snapshots es equivalente a hablar de redshift.

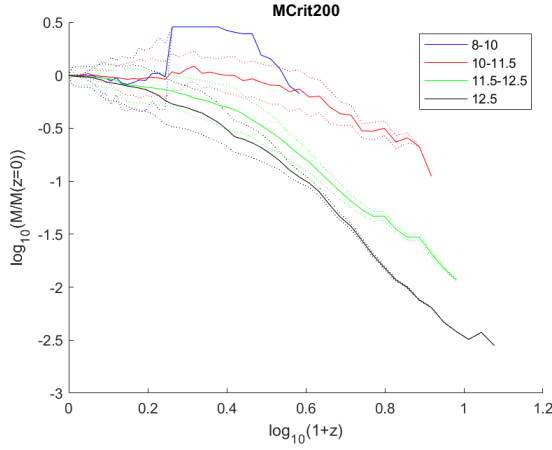


Figura 8 – Valor medio de los halos de Materia Oscura para cada grupo de datos.

4.1.2. Halos de Bariones

Al igual que hemos hecho con la materia oscura, podemos obtener los datos de los Bariones de la simulación Lucia2006. Para que podamos comparar los datos, obtenemos los datos de los mismos halos de materia oscura que hemos buscado en el apartado 4.1.1:

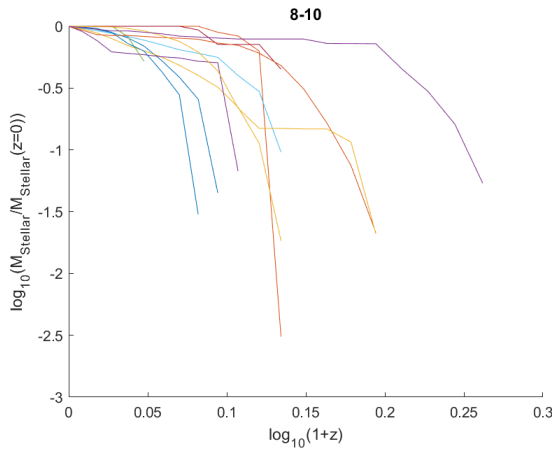


Figura 9 – Halos de Bariones dentro del rango $M_{final} < 10^{10} M_{sun}/h$.

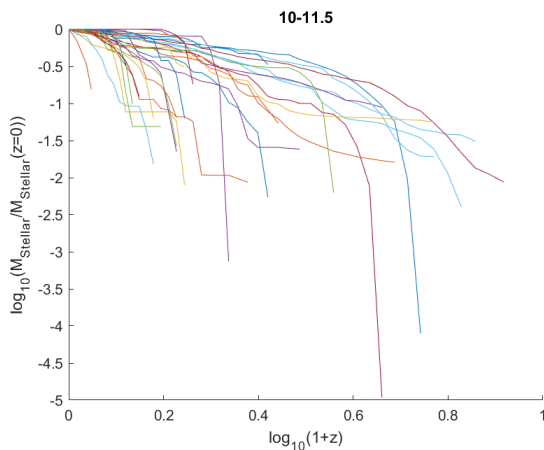


Figura 10 – Halos de Bariones dentro del rango $10^{10} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{11.5} M_{sun}/h$.

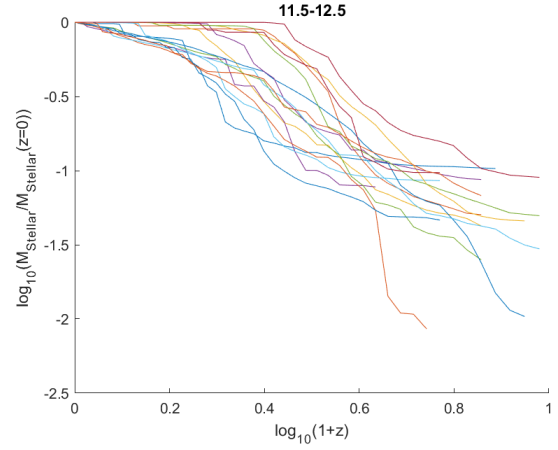


Figura 11 – Halos de Bariones dentro del rango $10^{11.5} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{12.5} M_{sun}/h$.

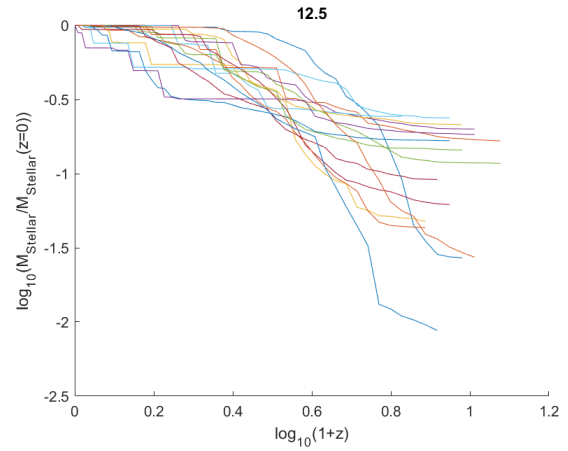


Figura 12 – Halos de Bariones dentro del rango $10^{11.5} M_{sun}/h < M_{final} < 10^{12.5} M_{sun}/h$.

Así mismo, podemos operar los valores medios por redshifts para los bariones, quedándonos la figura 13.

4.1.3. Comparación

Como podemos ver comparando las figuras 8 y 13, el comportamiento de ambos halos se comportan de forma inversa. A mayor redshift, los bariones con mayor masa tienden a tener una masa relativa mayor que en el caso de la materia oscura.

4.2. Colapso jerárquico

La segunda parte del cálculo consiste en obtener los datos de un halo de materia oscura así como el del halo de bariones asociado y ver cómo se va colapsando con el paso del tiempo. En nuestro caso hemos escogido uno de los halos de Materia oscura más grande que hemos podido encontrar (*haloID* = 3000060000000) con 975 subhalos. Sabemos que hay halos más grandes que éste, pero nos encontramos con el problema en el código de que no nos devuelve más que 1000 salidas las diferentes *queries*. También vamos a necesitar los halos de bariones para nuestra gráfica, luego buscamos la galaxia que tenga el mismo

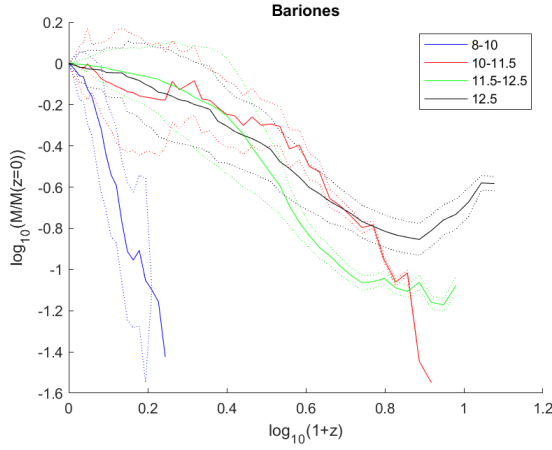


Figura 13 – Valor medio de los halos de Bariones para cada grupo de datos.

haloID. En nuestro caso este grupo nos ha devuelto solamente 845 subhalos.

Esta diferencia de salidas viene dado porque los halos de materia oscura colapsan antes que los halos de bariones. Esta diferencia nos lleva a halos de materia oscura sin bariones, que representaremos con un círculo blanco en la figura 18³. Sin embargo, para los halos más masivos, puede ocurrir que haya varias ocurrencias de colapso de bariones. Efectivamente nos encontramos con eso. Para los subhalos más masivos que tenemos en nuestra selección, tenemos varios subhalos de bariones.

Sin embargo, también queremos poder comparar la cantidad de masa estelar con la que nos encontraríamos en dichos halos. Así pues, podemos cambiar los colores de la gráfica por $\log_{10}(M_{\text{estelar}}/M_{\text{sol}})$. Podemos ver los resultados en la figura 19⁴.

5. Conclusiones

Parte de los objetivos de esta práctica consistía en comparar los resultados de materia oscura y de bariones que hemos obtenido. Para hacer eso podemos utilizar las gráficas 8 y 13. Como mencionamos en la sección 4.1.3, los halos masivos crecen más a redshift alto/bajo para los bariones/materia oscura respectivamente.

Esto viene dado por los burst de formación estelar. La formación estelar no es constante cuando hablamos a escalas astronómicas, si no que va por brotes aislados donde hay una alta tasa de formación y después dejan de darse las condiciones para formar estrellas (i.e. la densidad baje por debajo de la densidad crítica de Jeans, ya sea porque se termine el combustible, la densidad del gas baje, etc.)

Al no tener una formación constante es importante ver cuándo ocurre ese brote de formación. Para poder verla de forma más clara, podemos representar por separado los diferentes grupos que hemos seleccionado en función de las masas (figuras 14-17).

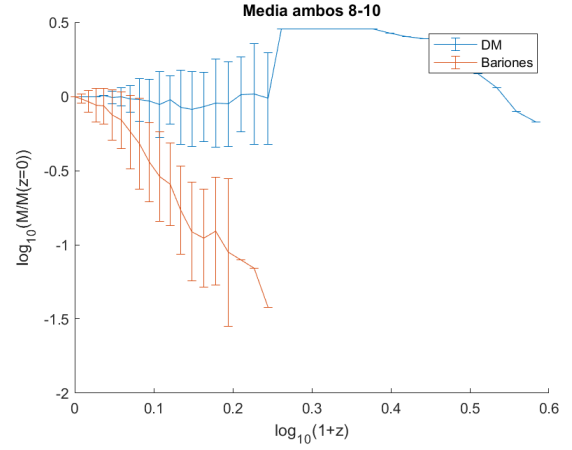


Figura 14 – Comparación de las masas medias.

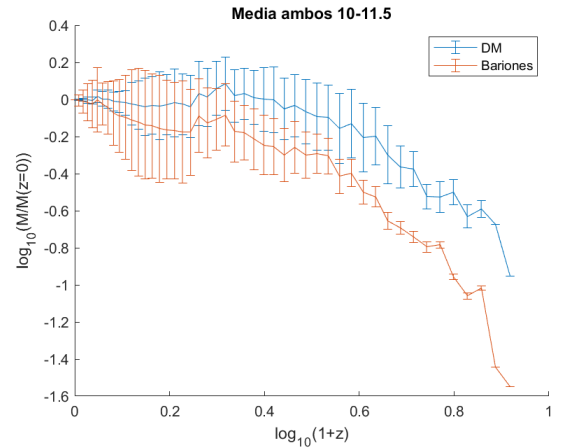


Figura 15 – Comparación de las masas medias.

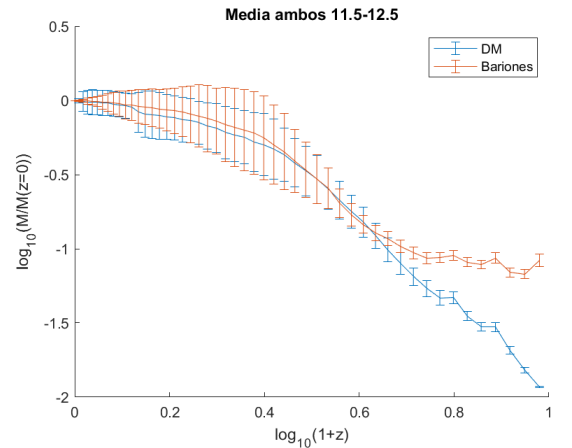


Figura 16 – Comparación de las masas medias.

Depende mucho el resultado de qué halos hayamos seleccionado de la base de datos, pero se aprecia como hay una tendencia para los bariones a tener un brote de crecimiento más tardío si el halo final tiene poca masa mientras que ocurre al revés para halos finales muy masivos. Fijándonos en la evolución de la masa bariónica (comparando las figuras 13 y las 14-17) podemos ver cómo la masa relativa y evolución de la masa bariónica es bastante consistente mientras que la evolución de la masa de materia oscura es mucho más divergente.

³La figura se encuentra al final del todo para poder verse mejor.

⁴Idem figura 18

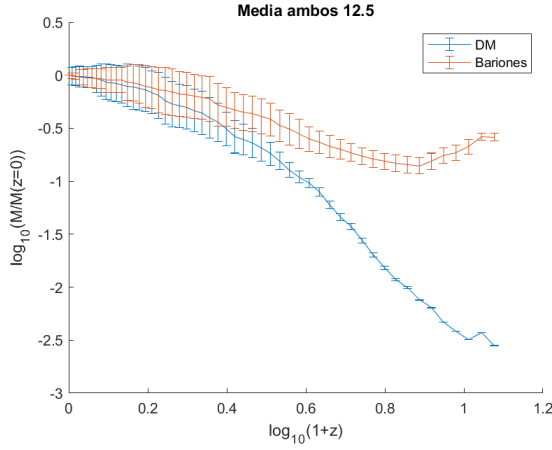


Figura 17 – Comparación de las masas medias.

En resumidas cuentas, si vemos la evolución de las masas con respecto a la masa final, podemos inducir el rango de la masa que tendrá el halo final.

De cara a la evolución jerárquica en la figura 18, podemos aprender varias cosas importantes:

- La masa de los subhalos es bastante consistente entre sí. Los halos que crecen mucho terminan siendo engullidos en ramas de mayor masa de una forma bastante consistente.
- La edad de estos halos de materia oscura y bariones se puede apreciar claramente en el color: a medida que avanza en edad estos halos se van haciendo más rojizos, dejando los halos jóvenes con colores azules.

Algo más difícil de ver en la gráfica pero que sí se puede apreciar observando los datos viene a colación de haber cogido uno de los halos más grandes de la simulación (de hecho es el más grande que hemos podido encontrar entero en la base de datos debido a la limitación de 1000 puntos). Vamos a tener una gran variedad de subhalos en lo que respecta a las masas. Una gran parte de los halos más pequeños están representados por puntos blancos, que representan que no hay masa bariónica que haya colapsado⁵. Sin embargo, la cantidad de halos que tenemos de bariones no corresponde con tantos halos de materia oscura sin masa bariónica. Si miramos más despacio los halos muy masivos podemos apreciar cómo en la mayor parte de ellos tenemos no uno, si no varios halos de bariones que han colapsado con éxito.

Este hecho nos haría pensar que la relación entre materia oscura y materia bariónica para los halos más masivos será cercana, pero cuando nos fijamos en la figura 19 podemos ver cómo eso no es cierto.

Mirando las subramas, vemos lo que esperábamos: a medida que evoluciona un halo, la masa relativa entre ambas se va haciendo cada vez más pequeña. Sin embargo cuando se fusionan las diferentes ramas, podemos ver que esta similitud desaparece. Una posible explicación es que tenemos varios halos bariónicos dentro de un sólo halo de materia oscura. Mientras que hay una relación 1-1 se en-

⁵Podría ocurrir que en la vida real sí que hubiera habido colapso de bariones y que la simulación no tuviera suficiente resolución, pero vamos a suponer que la simulación esté bien.

tiende fácilmente cómo tenemos el disco galáctico dentro de la esfera del halo. Cuando pasan a haber varias galaxias dentro de un halo, tenemos que tener también en cuenta la materia que hay entre las diferentes galaxias. Si estas galaxias después chocan en una única elíptica entonces la relación entre ambas masas volverá a reducirse mientras que sigue creciendo la galaxia.

Otro aspecto que hemos tenido que tener en cuenta a la hora de analizar la simulación es el hecho de que una vez la materia ha colapsado no puede deshacerse el colapso. Como la simulación del *Millennium* es una simulación de *N-Cuerpos* y estamos usando la masa crítica para medir la masa, ésta depende mucho de la densidad y la posición de dichas partículas. Cuando un cúmulo de partículas (como un halo muy pequeño, colapsado o no) se acerca a nuestro halo que estamos analizando puede ocurrir que se acerque tanto que los límites de dónde empieza o termina el halo se vean modificadas para incluir a este halo pasajero. Para evitar estos picos la solución reside en forzar a la simulación para que sea monótona creciente en el tiempo. Aunque pueda parecer a primera vista que este resultado sea menos preciso ocurre al revés. Un halo no tiene un borde claramente delimitado, si no que (al igual que la atmósfera) tiene un borde difuminado. Un halo pasajero como ese puede volver a salir del borde que la simulación haya puesto automáticamente; pero independientemente de si está dentro o fuera de ella la simulación tendrá en cuenta esas partículas.

Referencias

- [1] Van Den Bosch, F. C., *The Universal mass accretion history of cold dark matter haloes*, 2002. Mon Not R Astron Soc, 346 (Oxford University Press), 98-110.
- [2] De Lucia, G. and Blaizot, J., *The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies*, 2007. Mon Not R Astron Soc, 375 (Oxford University Press), 2-14.
- [3] Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al., *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars*, 2005. Nature, 435 (Nature Publishing Group), 629.
- [4] Cole, S., Helly, J., Frenk, C. S. and Parkinson, H., *The statistical properties of Λ cold dark matter halo formation*, 2008. Mon Not R Astron Soc, 383 (Oxford University Press), 546-556.
- [5] Jenkins, A., Frenk, C. S., White, S. D. M., et al., *The mass function of dark matter halos*, 2000. Mon Not R Astron Soc, 000 (Oxford University Press), 1-14.
- [6] Roca, S. *Apuntes de clase*, 2018. Formación y evolución de galaxias, Universidad Complutense de Madrid.

A. Contenido Complementario

Material adicional (como los datos de las queries, los códigos o más figuras) se puede encontrar en el repositorio: <https://github.com/enriquegalceran/Practica-1-FyEG>

B. Ramas de fusión de halos

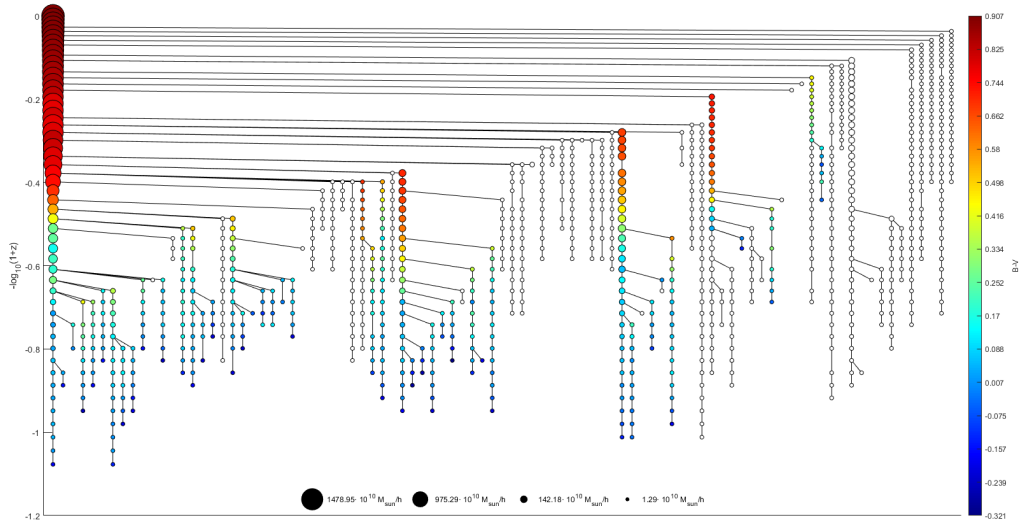


Figura 18 – Fusión de Halos de Materia oscura. Escala de color representando el exceso de color B-V (blanco = sin halos de bariones).

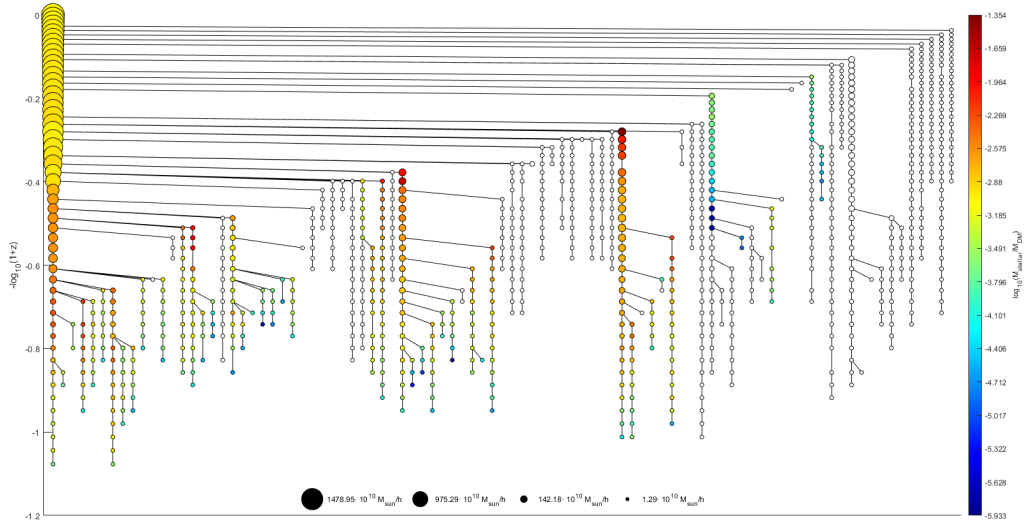


Figura 19 – Fusión de Halos de Materia oscura. Escala de color representando la relación entre la masa estelar y la masa de materia oscura.