

Análisis de árboles de fusiones en simulaciones

Arturo Pérez Roncero

19 de septiembre de 2025

1. Introducción

En esta práctica se realiza un estudio preliminar de distintos halos de masa en la simulación cosmológica TNG100¹. El proyecto Illustris ofrece 3 simulaciones distintas, TNG50, TNG100, y TNG300; con extensiones de 50, 100 y 300 Mpc. TNG50, al tener menor extensión, dispone de una mayor resolución espacial que permite indagar más cómodamente en la evolución morfológica de galaxias individuales, pudiendo observar brazos y barras en detalle. TNG300, al ser mucho más extensa, sacrifica resolución espacial a cambio de poder emular las estructuras a gran escala observadas en nuestro universo.

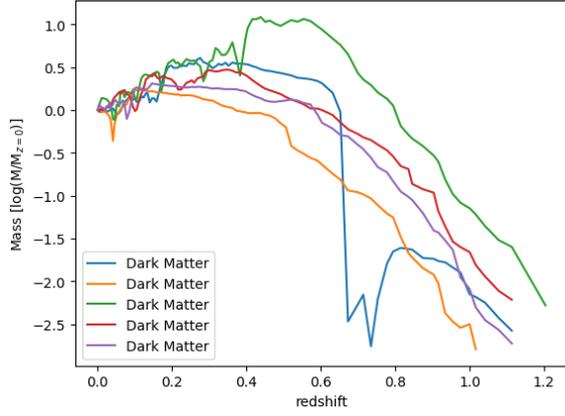
Por último, TNG100 ofrece un punto medio entre las otras dos simulaciones, y permite explorar la evolución y morfolología de una gran cantidad de halos, en una gran cantidad de rangos de masa posibles. En esta práctica se utilizarán dos rangos distintos de masa, y se compararán sus resultados.

2. Resultados

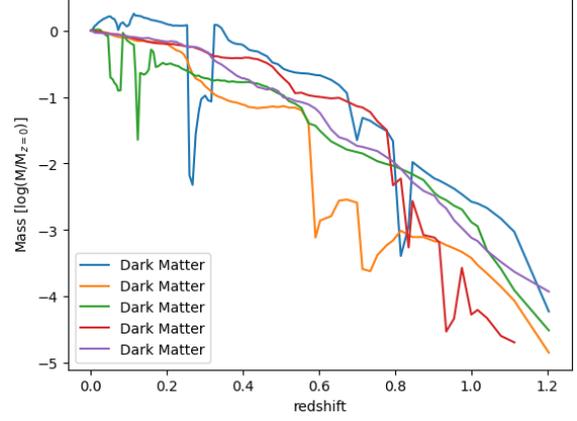
2.1. Halos de materia oscura

En primer lugar se representó la evolución de la masa de distintos cúmulos de materia oscura con misma masa final en función del redshift. Se utilizaron 2 rangos distintos de masa final, $1,01 \cdot 10^{11} - 1,11 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ y $9,00 \cdot 10^{12} - 9,90 \cdot 10^{12} M_{\odot}$, con el objetivo de ilustrar las diferencias entre la evolución de los cúmulos de mayor y menor masa. Además, para obtener una mayor claridad, se calculó la media y desviación estándar de cada uno de los 5 cúmulos en ambos rangos de masa.

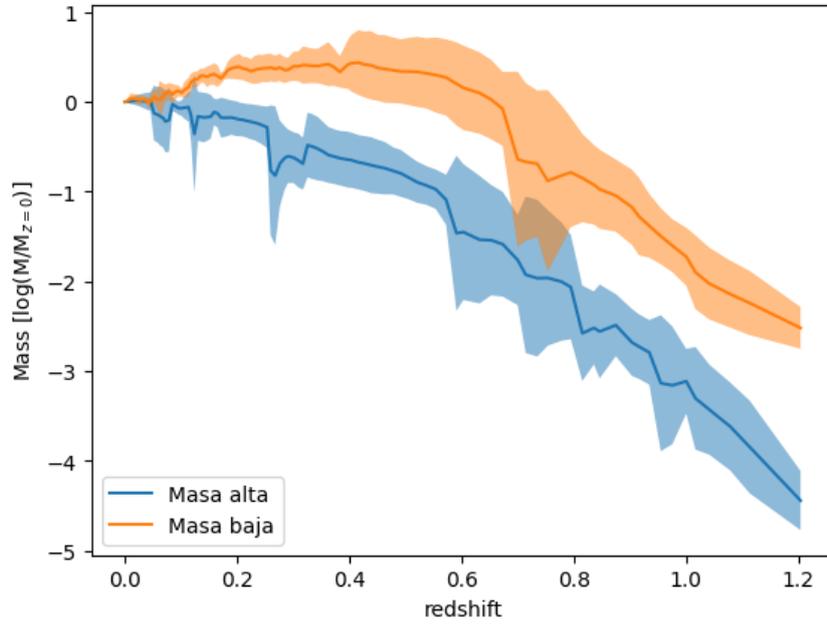
¹<https://www.tng-project.org>



(a) Masa en materia oscura de 5 cúmulos con masa final entre $1,01 \cdot 10^{11} - 1,11 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ en función de z .



(b) Masa en materia oscura de 5 cúmulos con masa final entre $9,00 \cdot 10^{12} - 9,90 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ en función de z .



(c) Media y desviación estándar de la masa de materia oscura de los 2 rangos de masa en función de z .

Figura 1: Comparación de las masas de los halos de materia oscura para ambos rangos de masas.

Se aprecia a simple vista que los cúmulos de menor masa se forman mucho antes que aquellos de mayor masa. En la tabla a continuación, en la que se presenta el valor de z para el cual el cúmulo alcanzó la mitad de su masa final (t_{50}), se observa también que dicho valor es consistentemente mayor para los halos de masa baja.

n ^o cúmulo	1	2	3	4	5	Mean value	Dispersión
Masa baja	0.512	0.656	0.677	0.717	0.840	0.680	0.118
Masa alta	0.266	0.267	0.379	0.491	0.573	0.395	0.136

Tabla 1: Valores de z para t_{50} .

Si representamos además la cronología de las fusiones que han dado lugar a la *main branch*, observamos que para el rango de masas menores, los cúmulos adquirieron su masa a alto redshift (en valores de z entre 1 y 2 ya estaban prácticamente formados), mientras que los cúmulos en el rango de masas mayores continúan acreciendo masa hasta valores mucho más bajos de redshift (valores de z entre 0.2 y 1).

Esto se debe a que los cúmulos de menor masa son el resultado de las frecuencias más altas en el perfil de sobredensidades iniciales del espectro de fluctuaciones primordiales, las cuales tienen una diferencia más pronunciada de densidad respecto al resto del universo. Al tener un contraste de densidades mayor, alcanzan la densidad crítica antes, se desacoplan antes de la expansión del universo, y por tanto colapsan también antes que los halos más grandes.

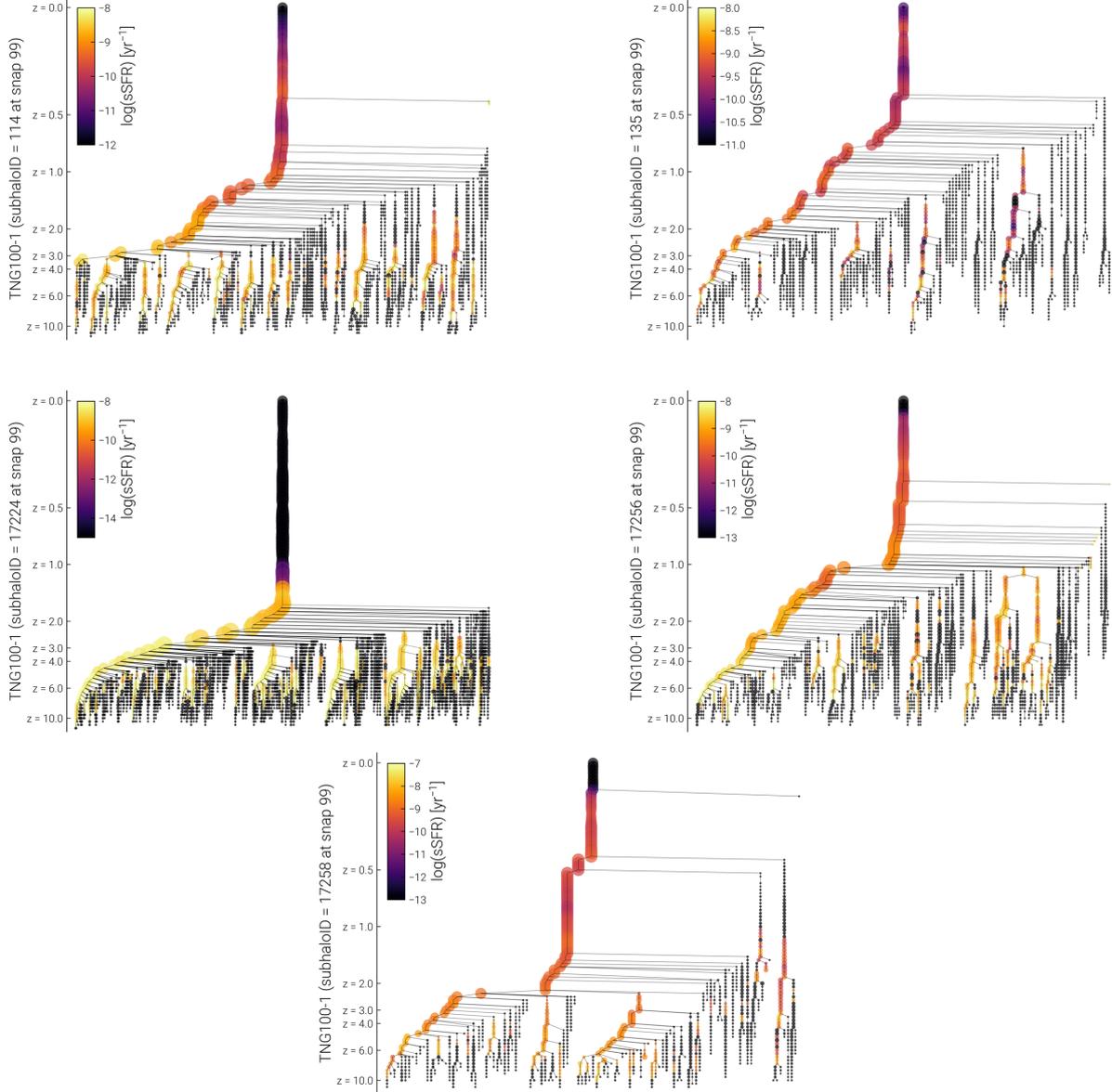


Figura 2: Árbol de fusiones de 5 cúmulos con masa final entre $1,01 \cdot 10^{11} - 1,11 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ en función de z .

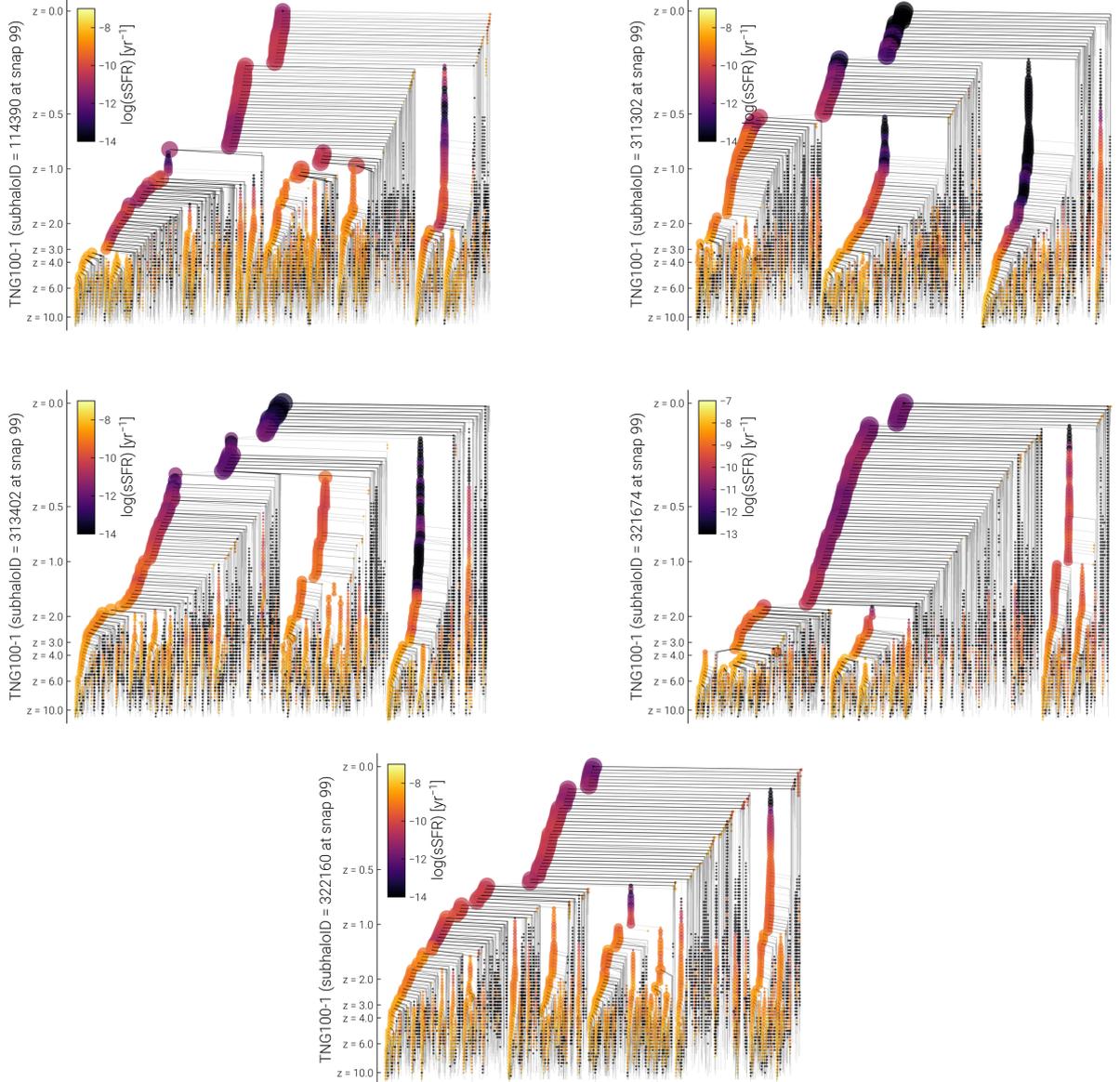


Figura 3: Árbol de fusiones de 5 cúmulos con masa final entre $9,00 \cdot 10^{12} - 9,90 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ en función de z .

El color de estas últimas gráficas no se corresponde con el color B-V, sino con la SFR (el ritmo de formación estelar). Sin embargo, estas están relacionadas, ya que una mayor SFR implica una mayor cantidad de estrellas jóvenes, que al tener un espectro de emisión de continuo de cuerpo negro más desplazado hacia longitudes de onda menores, aumentan la proporción de fotones en bandas más azules respecto a bandas más rojas. Si la SFR es muy baja, las estrellas jóvenes habrán muerto, y predominarán las estrellas más rojas, enrojeciendo también la galaxia. Es decir, una mayor SFR debería implicar un menor valor de B-V. Sin embargo, tal y como se aprecia en las tablas a continuación que recogen los valores de B-V y SFR para ambos rangos de masa, los halos de masa alta, a pesar de tener una mayor SFR, son también marginalmente más rojos que los de masa baja.

	Halo 1	Halo 2	Halo 3	Halo 4	Halo 5	Mean	Deviation
B-V	0,854	0,574	0,934	0,831	0,832	0,805	0,122
SFR	0	0,137	0	0	0	0,027	0,055

Tabla 2: Valores de B-V y SFR para los halos de menor masa.

	Halo 1	Halo 2	Halo 3	Halo 4	Halo 5	Mean	Deviation
B-V	0,776	0,882	0,859	0,783	0,839	0,828	0,042
SFR	2,462	0	0,004	1,202	0,375	0,809	0,936

Tabla 3: Valores de B-V y SFR para los halos de mayor masa.

Sin embargo, la desviación estándar de los valores escogidos es bastante elevada, y ambos valores de B-V y SFR medios son compatibles los unos con los otros. Convendría tomar una muestra más numerosa de cúmulos para poder sacar conclusiones concretas.

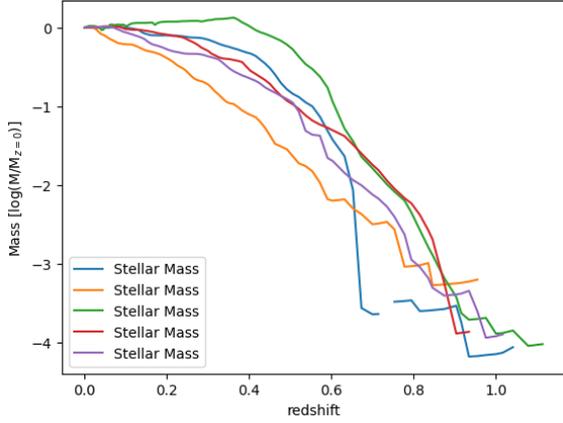
De la misma forma, no se puede deducir una relación clara entre los valores de t_{50} calculados previamente, y el color de los halos. La experiencia nos dice que los halos más masivos, que suelen ser el resultado de fusiones secas recientes que reducen el contenido en gas de la galaxia, y por tanto reducen también la formación estelar, suelen ser más rojizos. Sin embargo, no observamos esta tendencia. Esto puede ser debido a que o bien nuestro rango de masas altas no es lo suficientemente alto como para reflejar el enrojecimiento de las fusiones secas de galaxias elípticas; o bien nuestro rango de masas bajas es demasiado bajo, y existe algún mecanismo desconocido que inhiba la formación estelar y/o estirpe a la galaxia de su gas.

Por ahora es sensato concluir que, a primera vista, los dos rangos de masa seleccionados parecen resultar en galaxias de color y ritmo de formación estelar parecido.

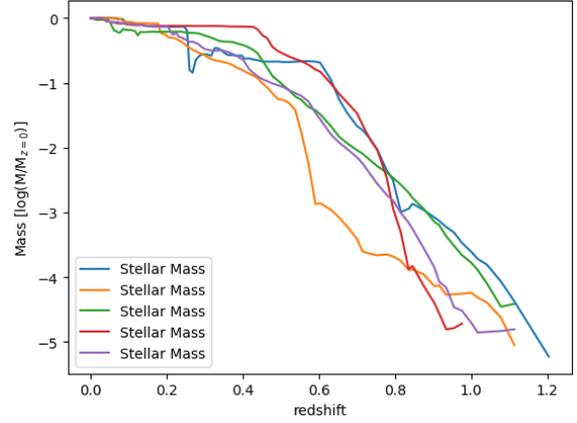
Cabe destacar que en los árboles de fusiones sí se aprecia una disminución del SFR a medida que toman lugar fusiones. Esto acarrearía consigo un enrojecimiento de la galaxia.

2.2. Materia estelar

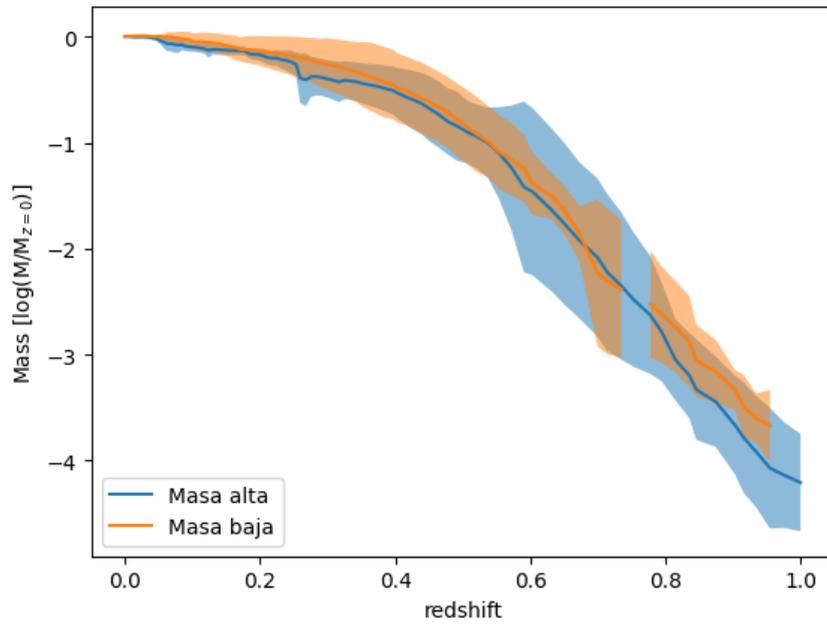
A continuación se muestran las gráficas de la masa estelar en función del redshift para los mismos cúmulos que en el apartado anterior, junto con la media y desviación típica de cada rango de masas.



(a) Masa estelar de 5 cúmulos con masa final entre $1,01 \cdot 10^{11} - 1,11 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ en función de z .



(b) Masa estelar de 5 cúmulos con masa final entre $9,00 \cdot 10^{12} - 9,90 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ en función de z .



(c) Media y desviación estándar de la masa estelar de los 2 rangos de masas en función de z .

Figura 4: Comparación de las masas estelares para ambos rangos de masas

De nuevo, se muestra en una tabla los valores de z para los cuales se alcanza la mitad de la masa final:

nº cúmulo	1	2	3	4	5	Mean value	Dispersión
Masa baja	0.320	0.402	0.437	0.451	0.552	0.432	0.084
Masa alta	0.259	0.383	0.422	0.467	0.571	0.420	0.114

Tabla 4: Valores de z para t_{50} para la masa estelar.

Se observa en las figuras y tablas de esta sección que, a diferencia de la materia oscura, la evolución con el tiempo de la materia estelar parece no depender de la masa final del halo, ya que tienen valores de t_{50} compatibles y las curvas de evolución se solapan.

Con tal de comprobar si existe alguna relación entre el valor de t_{50} del halo de materia oscura y/o de la masa estelar con la morfología en $z = 0$, se recogió en una tabla los valores del radio del gas y de la materia oscura, así como sus imágenes.

	Halo 1	Halo 2	Halo 3	Halo 4	Halo 5	Mean	Deviation
halfmassrad _{gas} [kpc]	0,0	11,3	0,0	0,0	0,0	2,27	4,53
halfmassrad _{dM} [kpc]	10,9	19,2	4,4	11,9	12,6	11,8	4,74

Tabla 5: Valores de B-V y SFR para los halos de menor masa.

	Halo 1	Halo 2	Halo 3	Halo 4	Halo 5	Mean	Deviation
halfmassrad _{gas} [kpc]	85	270	283	206	240	217	71,2
halfmassrad _{dM} [kpc]	89	177	226	146	147	157	44,7

Tabla 6: Valores de B-V y SFR para los halos de mayor masa.

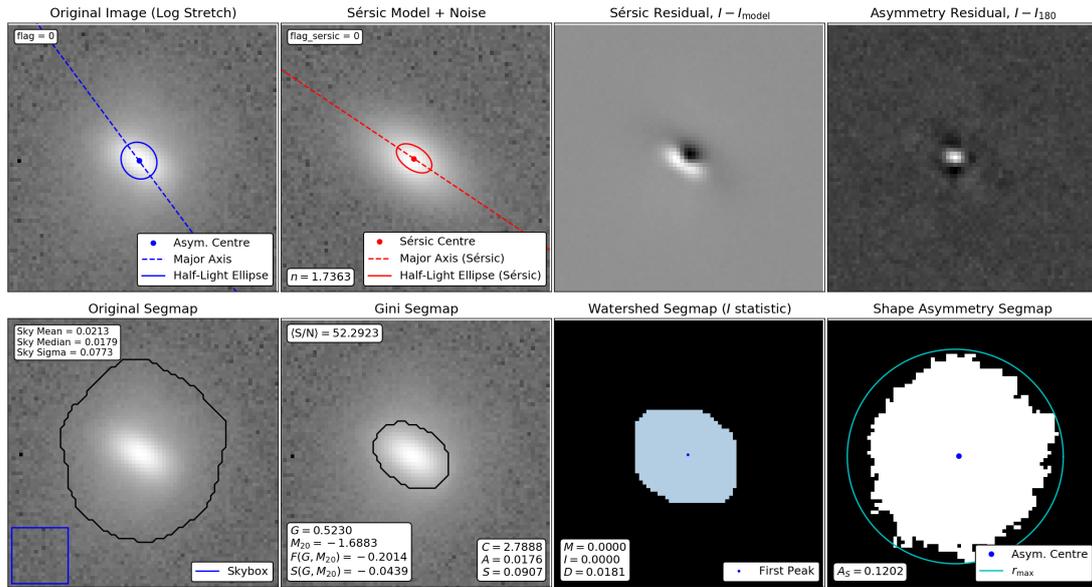


Figura 5: Morfología de un cúmulo pequeño.

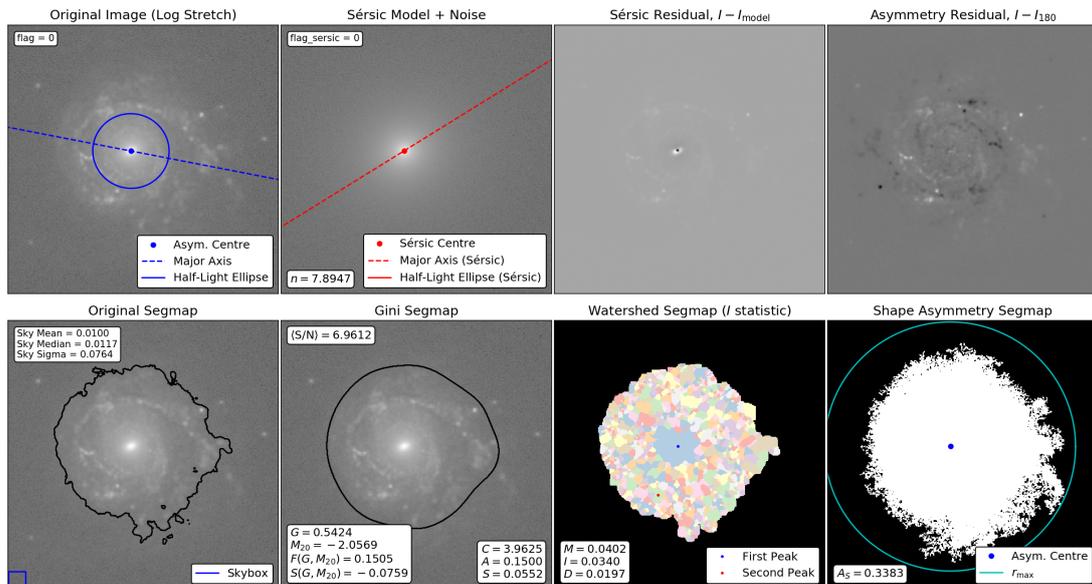


Figura 6: Morfología de un cúmulo grande.

Tal y como cabría esperar, se aprecia en las tablas y figuras que los cúmulos pequeños, todos con valores de t_{50} elevados debido a su temprana formación, tienen una morfología elíptica y de tamaño reducido (unas decenas de kpc). Por otro lado, los cúmulos más masivos tienen una morfología mucho más extensa (cientos de kpc) con estructuras más definidas (brazos espirales en algunos casos).

Esto parece indicar que bien la edad de formación, bien la masa, bien la historia de fusiones, o bien otra propiedad acoplada a estos parámetros, inhibe en los halos más pequeños la formación de estructuras en la galaxia. Esto es seguramente debido a que la evolución de brazos espirales requiere un disco denso, plano y estable de gas en el que se generen las ondas de densidad que definen los brazos; sin embargo, los halos en nuestro rango inferior de masa carecen de gas (ver Tabla 6).

La experiencia nos dice que las galaxias más masivas suelen carecer de gas y de estructura, resultando en formaciones elípticas y rojizas. Sin embargo, eso no es lo que observamos. Es probable que nuestro rango de masas no sea lo suficientemente elevado como para incorporar estas galaxias muy masivas, y por otro lado incluya las galaxias espirales más masivas, todavía con gas.

2.3. Abundancias relativas de materia oscura y estelar

En la simulación TNG-100, la utilizada en esta práctica, la masa bariónica y de materia oscura de cada partícula (la cantidad de partículas totales es la misma en ambos casos) es $1,4 \cdot 10^6 M_\odot$ y $7,5 \cdot 10^6 M_\odot$ respectivamente. Es decir, hay 5.36 veces más materia oscura que estelar.

		TNG50	TNG100	TNG300
Volume	[Mpc ³]	51.7 ³	110.7 ³	302.6 ³
L_{box}	[Mpc/h]	35	75	205
N_{GAS}	-	2160 ³	1820 ³	2500 ³
N_{DM}	-	2160 ³	1820 ³	2500 ³
N_{TR}	-	2160 ³	2×1820^3	2500 ³
m_{baryon}	[M_\odot]	8.5×10^4	1.4×10^6	1.1×10^7
m_{DM}	[M_\odot]	4.5×10^5	7.5×10^6	5.9×10^7
$\epsilon_{\text{gas,min}}$	[pc]	74	185	370
$\epsilon_{\text{DM,*}}$	[pc]	288	740	1480

Figura 7: Tabla de datos de Illustris TNG.

En el rango de masas bajas los halos tienen en el orden de $10^{11,025} M_\odot$ de materia oscura, y $10^{10,15} M_\odot$ de materia estelar. Es decir, hay en los cúmulos 7.5 veces más materia oscura que estelar. Por otro lado, en el rango de masas altas los halos tienen en el orden de $10^{12,975} M_\odot$ de materia oscura, y $10^{11,62} M_\odot$ de materia estelar. Es decir, 22.5 veces más materia oscura que estelar.

A mayor concentración de masa, mayor es la abundancia de materia oscura relativa a la estelar. Cabe destacar que la abundancia de materia estelar es menor a las condiciones iniciales de materia bariónica de la simulación en ambos rangos de masa. Esto se deba a que el proceso de formación estelar no es totalmente eficiente, y una fracción de materia bariónica se queda en forma de gas o polvo. Los resultados del apartado anterior sugieren la existencia de algún fenómeno físico que inhibe la formación de estrellas en cúmulos de mayor masa, lo cual incrementa el cociente entre la masa oscura y la estelar.

En realidad, dicho fenómeno también puede afectar, e inhibir la formación estelar, en cúmulos tanto grandes como pequeños. Se trata del *feedback*, un proceso en el que la presión de radiación generada por las emisiones de núcleos galácticos activos en cúmulos muy masivos, o supernovas y estrellas en cúmulos muy poco masivos, expulsa el gas de la galaxia, y previene la formación estelar.

El feedback de AGNs afecta sobre todo a rangos de masa del halo de materia oscura superiores a $10^{14}M_{\odot}$, y el feedback de supernovas a rangos de masa por debajo de $10^{10}M_{\odot}$. Nuestros rangos de masas están en torno a $10^{11}M_{\odot}$ y $10^{13}M_{\odot}$, lo cual sugiere que el feedback de AGNs tiene un papel más dominante en nuestro caso, aumentando la abundancia de materia oscura respecto a la estelar de forma más pronunciada para los halos más masivos.

Volviendo a los resultados de la Figura 4, a diferencia de la materia oscura, la evolución con el redshift de la materia estelar parece no depender de la masa final del halo. Esto sugiere que, a pesar de que la cantidad de materia estelar sí dependa de la masa del halo, su evolución está autorregulada por procesos no acoplados a la evolución de la materia oscura. Uno de esos procesos podría ser el propio feedback, ya que una mayor formación estelar acarrearía una mayor cantidad de supernovas, que podrían inhibir la posterior formación de más estrellas, regulando la masa estelar en el halo.

A su vez, el feedback podría ser el responsable de que no se observe una relación clara entre la masa de los cúmulos y el color de la galaxia para los rangos de masa escogidos, ya que el feedback estelar podría estar inhibiendo la formación de estrellas jóvenes que contribuyan en el azul en el rango de masas bajas, y de forma análoga el feedback de AGNs podría estar inhibiendo la formación estelar en el rango masivo, resultando en colores parecidos en ambos casos.

De la misma forma, podría ser este mismo feedback el responsable de que no se observen estructuras en el rango de masas bajas, ya que al perder el gas pierden también la habilidad de formar brazos espirales. Por otro lado, es posible que esto también se deba a las fusiones que dan lugar al halo final, aunque sería poco probable debido a la ausencia de mergers mayores en su historia de fusiones (ver Figura 2).

3. Conclusiones

En conclusión, los rangos de masa seleccionados parecen corresponder a las galaxias elípticas enanas (formadas a alto redshift, sin estructura, y de color ni azul ni rojo) y a las galaxias espirales más masivas (extensas, formadas recientemente como el resultado de fusiones húmedas, con brazos y/o barras, y tampoco muy rojas o azules).

Ambos rangos parecen tener valores de B-V y SFR similares, seguramente el resultado de efectos de feedback (estelar en el caso de las poco masivas, y de AGNs en el caso de las masivas).

Al contrario que la materia oscura, la materia estelar parece estar desacoplada de la masa del halo, y sigue una evolución independiente aparentemente autorregulada por mecanismos internos a la galaxia.