



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Tesis de grado para obtener la Licenciatura en Astronomía
**Formación y Evolución de galaxias lenticulares:
diferencias respecto a los caminos evolutivos de
galaxias con estructura espiral**

Elio Oscar Crisci

Director: Dr. Ignacio Daniel Gargiulo

LA PLATA, ARGENTINA
- 2023 -

Resumen

Las galaxias llamadas lenticulares se encuentran en diversos ambientes en el Universo y son abundantes entre las galaxias de disco. A partir de su descubrimiento, llamaron el interés tanto de astrónomos observacionales como teóricos del campo de la formación galáctica. Sin embargo, aún hoy, los detalles involucrados en su formación y evolución no están completamente entendidos. Todas las galaxias lenticulares tienen una apariencia morfológica similar, sin embargo, una vasta cantidad de evidencia sugiere que su formación se debe a una serie de caminos evolutivos considerablemente disímiles. En este trabajo utilizaremos las simulaciones cosmológicas magnetohidrodinámicas de última generación IllustrisTNG para estudiar en detalle los dos mecanismos actualmente más aceptados en la formación de galaxias lenticulares: las fusiones galácticas y el desvanecimiento de galaxias espirales en ambientes de alta densidad.

Aceptamos la hipótesis de que las galaxias lenticulares son galaxias de disco con un origen en común a las galaxias espirales, pero que toman un camino evolutivo alternativo a partir de algún suceso particular. Clasificamos visualmente una muestra de galaxias de disco simuladas con masas estelares en un intervalo de masas similares a la de la Vía Láctea y M31 en dos submuestras, una de galaxias lenticulares y otra de espirales. Comparamos las características de las galaxias lenticulares simuladas con aquellas de las galaxias espirales, y encontramos tendencias en acuerdo con las observaciones. Las galaxias lenticulares presentan menor formación estelar y contenido de gas disponible para formar estrellas que las espirales. Las dispersiones de velocidades a lo largo de perfiles radiales son mayores para las galaxias lenticulares. Estudiamos en detalle la historia de fusiones a lo largo de sus historias. Para aquellas galaxias lenticulares que son satélites a $z = 0$, analizamos la evolución de su formación estelar y su disponibilidad de gas frío, a medida que caen en el cúmulo o grupo al

cual pertenecen a $z = 0$, para intentar cuantificar el efecto del ambiente donde residen. Encontramos que las galaxias lenticulares tienen mayor cantidad de fusiones significativas (con cocientes de masa entre las galaxias fusionadas de más del 10 por ciento) que las galaxias espirales. Además, hallamos que la última fusión significativa ocurre a tiempos más tardíos y con galaxias más masivas para galaxias lenticulares, en promedio. Las galaxias lenticulares satélite tienen un grado de soporte rotacional similar al de las galaxias espirales, mayor a aquellas que son centrales. Adicionalmente, encontramos que las galaxias satélite lenticulares son menos masivas que las centrales en el intervalo de masas estudiado. Finalmente concluimos que, en promedio, las galaxias lenticulares satélite se transforman más por efecto de ambiente que por fusiones, contrariamente a las centrales, y que el ambiente tiene un efecto más inmediato que las fusiones en la transformación de galaxias espirales hacia lenticulares.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Modelo cosmológico y paradigma Λ CDM	2
1.2. Hipótesis de trabajo y objetivos	4
2. Simulaciones	7
2.1. Características técnicas	8
2.2. Variables utilizadas	11
2.2.1. Halos de materia oscura	11
2.2.2. Subhalos	12
2.2.3. Partículas	13
2.2.4. Árboles de fusión	13
3. Resultados	17
3.1. Muestra de galaxias simuladas	17
3.2. Propiedades generales de galaxias lenticulares y espirales	21
3.3. Propiedades cinemáticas de galaxias lenticulares y espirales	25
3.4. Caminos evolutivos de galaxias lenticulares y espirales	28
3.4.1. Impacto de las fusiones de galaxias	28
3.4.2. Efectos de ambiente	31
4. Discusión	39
5. Conclusiones	43
5.1. Trabajo a futuro	45

Capítulo 1

Introducción

Un porcentaje mayoritario de las galaxias en el Universo con masas por encima del régimen de las galaxias enanas posee un disco galáctico formado por estrellas, gas y polvo en órbita casi circular alrededor del centro galáctico, ver [Conselice \(2006\)](#). Entre las galaxias que poseen un disco se encuentran las galaxias lenticulares. Estas galaxias presentan características tanto de galaxias elípticas como de espirales. Consisten de una población de estrellas rojas y envejecidas, contienen poco gas frío y por ende poca formación estelar como en galaxias elípticas y a su vez presentan una estructura de disco extendida como en galaxias espirales, pero carecen de brazos. Debido a esto, las galaxias clasificadas como lenticulares (S0) ocupan un lugar intermedio entre las galaxias elípticas (E) y las espirales con barra, o sin ella (S, Sb), en el “diagrama de diapasón” de Hubble (Fig. 1.1). Sin embargo, esto no significa que exista un camino evolutivo entre la familia de galaxias de disco hacia las elípticas.

Los mecanismos de formación de galaxias lenticulares generalmente caen en dos categorías principales. La primera gran categoría involucra la extracción de gas de una galaxia espiral con formación estelar a medida que cae en un ambiente con mayores densidades de galaxias, como puede ser un cúmulo o un grupo. El principal proceso físico involucrado en este fenómeno se lo conoce como *ram pressure stripping* (presión de barrido) y es una presión ejercida por el gas caliente existente en el pozo de potencial de un grupo o un cúmulo sobre el gas contenido en la galaxia ([Quilis et al., 2000](#); [Crowl et al., 2005](#)). Cuando una galaxia espiral cae en un ambiente denso, tal como un grupo o cúmulo de galaxias, el gas interno de esta es forzado a salir al interactuar con el medio intracúmulo. Galaxias que se encuentran atravesando este proceso han sido observadas *in fraganti* en varios cúmulos y usualmente se las llama galaxias

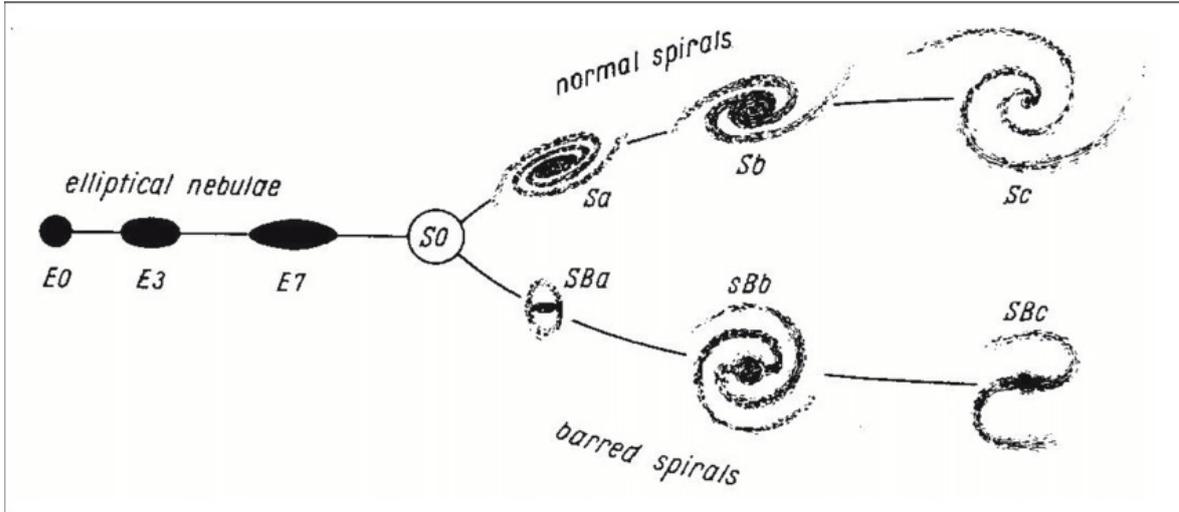


Figura 1.1. Clasificación morfológica de Hubble (Hubble, 1926)

“medusas” (*jellyfish*, Poggianti et al., 2017; Ebeling et al., 2014), por la forma que adquiere la cola de gas removido, en la que se produce formación estelar.

El segundo mecanismo involucra eventos de fusión (e.g., Querejeta et al., 2015; Tapia et al., 2017). En este proceso, una fusión entre una galaxia espiral y una galaxia menor provoca que el gas sea expulsado fuera de la galaxia espiral o bien consumido en un brote de formación estelar. Recientemente, Deeley et al. (2021) utilizaron la simulación magnetohidrodinámica TNG100, del proyecto IllustrisTNG (Nelson et al., 2018; Pillepich et al., 2018b), para estudiar los mecanismos de formación de galaxias lenticulares, y encontraron que prevalecen los dos mecanismos mencionados. Un 37% de las galaxias lenticulares de su muestra simulada son formadas a partir de la “caída” de la galaxia a grupos masivos (con masas viriales entre $10^{13}M_{\odot}$ y $10^{14}M_{\odot}$) y la consecuente reducción del gas frío disponible debido, principalmente, a la presión de barrido. Por otro lado, un 57% de su muestra de galaxias lenticulares adquieren su morfología como resultado de fusiones galácticas. El restante 6% está constituido por galaxias lenticulares que serían el resultado de la evolución pasiva de galaxias de disco muy aisladas, que no tienen abastecimiento de nuevo gas para formar estrellas.

1.1. Modelo cosmológico y paradigma Λ CDM

El paradigma actual de formación y evolución de galaxias se conoce como el modelo de materia oscura fría con constante cosmológica Λ CDM (del inglés: Lambda-Cold Dark

Matter). De acuerdo a esta formulación, la densidad de energía del Universo está compuesta por materia bariónica, materia oscura y energía oscura. La proporción de cada componente, según las últimas observaciones del satélite Planck ([Planck Collaboration, 2020](#))⁽ⁱ⁾ viene dada por los parámetros cosmológicos (constante de Hubble $H_0 = 67.4 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, parámetro de densidad de materia $\Omega_m = 0.315$, parámetro de densidad de materia bariónica $\Omega_b h^2 = 0.0224$ y parámetro de densidad de energía oscura $\Omega_\Lambda = 0.685$). De esta manera, la energía oscura representa el 69 % de la densidad de energía del Universo y el 31 % restante la materia. Del porcentaje de materia del Universo, el 26 % es materia oscura. El 5 % restante corresponde a la materia bariónica, los átomos y moléculas que son los bloques que constituyen los planetas, las estrellas y las nubes de gas que forman el Universo visible.

La cosmología moderna está basada en el principio cosmológico, el cual establece que el Universo es espacialmente homogéneo e isótropo en grandes escalas. La isotropía implica que en grandes escalas, el Universo presenta las mismas propiedades independientemente de la dirección en la que se observa. Mientras que de la homogeneidad se desprende que no existe ningún observador privilegiado en el Universo y que cualquier observador comóvil⁽ⁱⁱ⁾ mide las mismas propiedades sin importar el lugar en el que se encuentra. Los grandes relevamientos de galaxias actuales muestran la homogeneidad de la distribución de la materia, trazada por las galaxias, a grandes escalas (e.g., Dark Energy Survey, [Sánchez et al., 2022](#)).

El modelo asume que la relatividad general es la teoría correcta de la gravedad en escalas cosmológicas y utiliza la métrica de Robertson-Walker, las ecuaciones de Friedmann-Lemaître y las ecuaciones de estado cosmológicas para describir el Universo observable desde inmediatamente después de la época inflacionaria hasta el presente y el futuro. La constante cosmológica Λ (lambda) es el término que se agrega a las ecuaciones de campo de Einstein para dar cuenta de la expansión acelerada del Universo y está asociada con una energía del vacío o energía oscura en el espacio vacío. Una constante cosmológica tiene presión negativa, $p = -\rho c^2$. En este modelo, las estructuras presentes en el Universo en la actualidad provienen a partir de pequeñas fluctuaciones primordiales en la densidad amplificadas por inestabilidad gravitacional. Esta suposición está respaldada por las observaciones de la radiación del fondo

⁽ⁱ⁾Sin embargo la simulación IllustrisTNG utilizada en este trabajo usa los parámetros dados por [Planck Collaboration et al. \(2016\)](#).

⁽ⁱⁱ⁾Es aquel que se encuentra en reposo en relación al fondo cósmico de microondas y, por lo tanto, no experimentaría un flujo neto de materia debido a la expansión del universo en las grandes escalas.

cósmico de microondas (CMB por sus siglas en inglés) el cual se corresponde con una radiación de cuerpo negro a una temperatura de 2.728 K con fluctuaciones relativas del orden de 10^{-5} . Las mediciones fueron llevadas a cabo por el satélite COBE (Smoot et al., 1992), luego por el satélite WMAP (Spergel et al., 2007) y más recientemente por el satélite PLANCK (Planck Collaboration, 2020). Estas proveen una imagen de la estructura del Universo en el momento en que la materia se desacopló de la radiación y permiten calcular los parámetros cosmológicos. La inestabilidad gravitacional amplifica las fluctuaciones primordiales presentes en la materia oscura y dan lugar a la aparición de estructuras virializadas llamadas halos de materia oscura. El gas inicialmente se mueve solidario a la dinámica de la materia por la fuerza gravitacional. Posteriormente el gas pierde energía térmica a través de disipación radiativa y comienza a colapsar. Este gas frío y denso formará las estrellas en sistemas estelares ligados gravitacionalmente como las galaxias.

1.2. Hipótesis de trabajo y objetivos

En el presente trabajo daremos un primer paso en el estudio de la formación de galaxias lenticulares mediante simulaciones hidrodinámicas en contexto cosmológico con una resolución sin precedente para este tipo de análisis. Partimos de la hipótesis de que las galaxias lenticulares son principalmente el resultado de una transformación morfológica de galaxias de disco con estructura espiral. Es por ello que la muestra estudiada en esta tesis contiene galaxias espirales, pues fueron tomadas como referencia del camino evolutivo alternativo seguido por una galaxia de disco. Buscamos entender las condiciones de formación de las galaxias lenticulares y el posible proceso de transición entre una galaxia de disco con estructura espiral y una galaxia lenticular.

Los objetivos particulares de la tesis son:

- Determinar a partir de qué eventos en su historia evolutiva, las galaxias lenticulares, caracterizadas por la presencia de un disco, se apartan de la evolución de una galaxia de disco que presenta estructura espiral.
- Bajo la hipótesis de transformación morfológica por fusiones, caracterizar las fusiones que intervienen en la formación de galaxias lenticulares, considerando las propiedades

generales de las galaxias satélites involucradas en dichas fusiones.

- Encontrar una preferencia, o la falta de ella, en los canales de formación de galaxias lenticulares, según el ambiente en el que residen (campo, grupos de galaxias, cúmulos de galaxias). Encontrar bajo qué condiciones los efectos del ambiente, como la presión de barrido, actúan con mayor eficiencia en la transformación de las galaxias espirales a lenticulares.

La presente tesis está organizada de la siguiente manera:

- En el capítulo 2, describimos con cierto grado de detalle las simulaciones IllustrisTNG. Mencionamos las variables utilizadas, y su descripción, para el análisis de datos y ventajas de TNG50 frente a TNG100 y TNG300, etc.
- En el capítulo 3, presentamos la muestra de galaxias elegida y la clasificación realizada. Caracterizamos las submuestras obtenidas a $z = 0$ analizando distribuciones de masas, diagrama Color-Magnitud, tasas de formación de estelar, etc. Analizamos la cinemática de las muestras y sus historias de formación estelar. Luego mostramos parámetros estadísticos sobre sus historias de fusión. Por último, para aquellas galaxias lenticulares que son satélite a $z = 0$, analizamos su “caída” a los ambientes en los cuales residen.
- En el capítulo 4 discutimos los resultados de capítulo 3 en el contexto de la bibliografía especializada en el campo.
- Finalmente, en el capítulo 5 presentamos tanto las conclusiones como las perspectivas y el trabajo que puede plantearse a futuro dentro de este tema de investigación.

Capítulo 2

Simulaciones

El proyecto IllustrisTNG (TNG) es un consorcio de grupos de investigación internacional, que realizó un conjunto de simulaciones hidrodinámicas cosmológicas de formación de galaxias, cuyos datos son públicos⁽ⁱ⁾ (Naiman et al., 2018; Nelson et al., 2018; Marinacci et al., 2014; Springel et al., 2018; Pillepich et al., 2018a). Utilizando el código AREPO (Springel, 2010) siguen la evolución temporal de un volumen cosmológico cúbico. El código resuelve las ecuaciones acopladas de la magnetohidrodinámica y de la autogravedad. Para resolver la magnetohidrodinámica se adopta el enfoque Euleriano, con la novedad de que se emplea un teselado de Voronoi del volumen simulado, donde los puntos que generan las celdas se mueven con el flujo de gas formando una malla adaptativa.

Las ecuaciones de Poisson para la gravedad son resueltas mediante un esquema TREE-PM (Xu, 1995) con las celdas de gas tratadas como masas puntuales cuya posición es su centro de masa y todos los demás componentes de la materia debidamente muestreados como partículas. En el límite de resolución y para resolver fenómenos físicos de pequeña escala que no pueden resolverse autoconsistentemente, las simulaciones hidrodinámicas recurren a recetas semi-analíticas para incluir los procesos físicos fundamentales como el enfriamiento radiativo del gas, formación estelar estocástica (con un umbral de densidad de hidrógeno neutro de $n_{\text{H}} \simeq 0.13 \text{ cm}^{-3}$), enriquecimiento químico, feedback de supernovas, acreción y fusión de agujeros negros supermasivos, y feedback de núcleo galáctico activo (AGN, por sus siglas en inglés) asociado a ellos. Todos los aspectos del modelo de subgrilla son descritos en Pillepich et al. (2018b). El modelo de AGN es descrito con más detalle en Weinberger

⁽ⁱ⁾<https://www.tng-project.org/>

et al. (2017).

2.1. Características técnicas

El proyecto IllustrisTNG cuenta con tres cajas de simulaciones disponibles, cuyos volúmenes son de 50, 100 y 300 Mpc comóviles de lado. Para cada caja cosmológica existen varios niveles de resolución, 3 para los volúmenes de 100 y 300 Mpc y 4 para la caja de 50 Mpc. Para cada nivel, el factor de resolución de masa disminuye en un factor de 8, y la resolución espacial en 2. Para cada una de las 10 ejecuciones anteriores hay versiones alternativas donde solo se tiene en cuenta la materia oscura. Las realizaciones de más alta resolución TNG50-1, TNG100-1 y TNG300-1 incluyen 2×2160^3 , 2×1820^3 y 2×2500^3 elementos resueltos, respectivamente.

Todos los datos producidos en cada corrida se guardan en 100 Salidas o SNAPSHOTS (numerados del 0 al 99), los cuales se corresponden, cada uno, con un valor de corrimiento al rojo o *redshift* z , y están equiespaciados en una escala logarítmica del factor de escala cosmológico $a^{(i)}$. En este trabajo mostraremos los resultados utilizando el *Lookback Time* (LBT), en lugar del *redshift* o el factor de escala. Para obtener la relación entre LBT y *redshift* empleamos la calculadora cosmológica NED ⁽ⁱⁱ⁾, con los valores de parámetros cosmológicos usados en la simulación. Estos parámetros se asumen con una cosmología consistente con los resultados de Planck Collaboration et al. (2016) ($\Omega_{\Lambda,0} = 0.6911$, $\Omega_{m,0} = 0.3089$, $\Omega_{b,0} = 0.0486$, $\sigma_8 = 0.8159$, $n_s = 0.9667$ y $h = 0.6774$). Se puede ver en la Fig. 2.1 como varían el *redshift* y el LBT en función de los SNAPSHOTS y del factor de escala cosmológico.

A diferencia de sus antecesoras, las simulaciones Illustris (Vogelsberger et al., 2014; Genel et al., 2014), en IllustrisTNG se tienen dos tipos de SNAPSHOTS diferentes: ‘full’ y ‘mini’. Ambos abarcan el volumen completo de la caja, pero los SNAPSHOTS ‘mini’ tienen solamente un subconjunto disponible de campos para las partículas. Los campos son los arreglos que almacenan la información de las diferentes propiedades. En TNG hay 20 SNAPSHOTS ‘full’ y 80 ‘mini’. Los 20 SNAPSHOTS ‘full’ se muestran en la tabla 2.1.

⁽ⁱ⁾El factor de escala es una función que describe cómo cambia el tamaño del Universo a lo largo del tiempo debido a la expansión del mismo. Este se utiliza para describir cómo cambian las distancias entre objetos a medida que el Universo se expande. Se relaciona con el z mediante $a = \frac{a_0}{1+z}$, con a_0 el valor del factor de escala en el presente

⁽ⁱⁱ⁾https://ned.ipac.caltech.edu/help/cosmology_calc.html

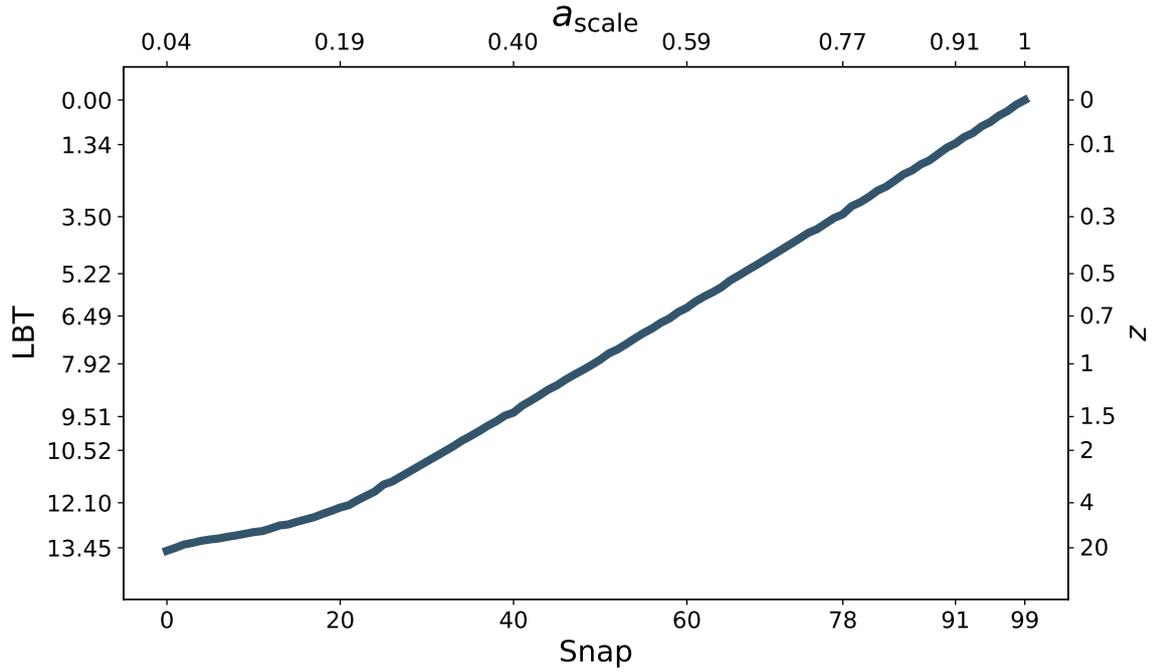


Figura 2.1. *Lookback time* (LBT) y *redshift* (z) en función de los SNAPSHOTS y del factor de escala cosmológico a . Notar que una variación constante en los SNAPSHOTS no se corresponde con una variación constante en LBT o z .

Tabla 2.1. Número de SNAPSHOTS junto con el factor de escala y *redshift* correspondientes. Las veinte SNAPSHOTS que se muestran aquí son las ‘full’, mientras que las ochenta restantes son ‘mini’ con un subconjunto de campos.

Snap	a	z	Snap	a	z
2	0.0769	12	33	0.3333	2
3	0.0833	11	40	0.4	1.5
4	0.0909	10	50	0.5	1
6	0.1	9	59	0.5882	0.7
8	0.1111	8	67	0.6667	0.5
11	0.125	7	72	0.7143	0.4
13	0.1429	6	78	0.7692	0.3
17	0.1667	5	84	0.8333	0.2
21	0.2	4	91	0.9091	0.1
25	0.25	3	99	1	0

Los halos de materia oscura, que en lo más hondo de su pozo de potencial albergan a una galaxia central o huésped, son reconocidos en cada SNAPSHOT por el algoritmo FRIENDS OF FRIENDS (FoF) (Davis et al., 1985) con una distancia de enlace de $b = 0.2$ veces la separación

2. Simulaciones

Tabla 2.2. Características de la simulación analizada en este trabajo. Las propiedades que se muestran en las filas son: longitud del lado de la caja (unidades comóviles); número de celdas de gas iniciales y partículas de materia oscura; resolución media de la masa de partículas bariónicas y de materia oscura (en masas solares); tamaño medio de las celdas de gas formadoras de estrellas. Para obtener una descripción completa de la simulación, consultar la página de inicio del proyecto IllustrisTNG.

Run		TNG50-1
L_{box}	[Mpc]	51.7^3
$N_{\text{DM,GAS}}$	-	2160^3
m_{baryon}	[M_{\odot}]	8.5×10^4
m_{DM}	[M_{\odot}]	4.6×10^5
$\langle r_{\text{gas,SF}} \rangle$	[pc]	$\sim 100 - 150$
$\epsilon_{\text{DM},\star}$	[pc]	290

media entre partículas. Este algoritmo se corre sobre partículas de materia oscura y luego, en una segunda etapa, los demás tipos de partículas (estrellas, agujeros negros, gas) se anexan a un determinado halo dependiendo de la partícula de materia oscura más cercana (Dolag et al., 2009). Por último, las subestructuras o subhalos, que contienen a las galaxias satélite, son reconocidas por el algoritmo SUBFIND (Springel et al., 2001). Todas las estructuras están ordenadas por su masa en forma decreciente en cada SNAPSHOT. Con el objetivo de conectar la historia de los halos y subhalos de la simulación se construyen los árboles de fusión (MERGER TREES) usando el algoritmo SUBLINK (Rodríguez-Gomez et al., 2015). Estos árboles pueden ser recorridos, es decir, se pueden determinar los descendientes y/o progenitores de un dado subhalo. De esta manera se relacionan objetos a lo largo de los diferentes SNAPSHOTS. Para los detalles técnicos, descripciones de algoritmos y más detalles de los datos mencionados en este capítulo ir a Nelson et al. (2019).

Para cada tipo de objeto se puede obtener información acerca de varias características (en la próxima sección detallamos las usadas en este trabajo). Esta información se almacena en campos, los cuales consisten en arreglos de propiedades para todos los halos, subhalos o partículas. El total de los campos disponibles para cada catálogo se puede encontrar listado en la página web de la simulación IllustrisTNG ⁽ⁱⁱⁱ⁾.

En este trabajo utilizamos la simulación TNG50-1. Dicha simulación se corre en una caja cosmológica que tiene un volumen comóvil de $(51.7\text{Mpc})^3$, y contiene 2160^3 partículas de materia oscura y 2160^3 celdas de gas. La resolución en masa de estas partículas es de $4.5 \times 10^5 M_{\odot}$ y $8.5 \times 10^4 M_{\odot}$ respectivamente, mientras que la resolución dinámica máxima es de

⁽ⁱⁱⁱ⁾<https://www.tng-project.org/data/docs/specifications/>

290 pc. Las resoluciones utilizadas en TNG50 son más de cien veces mejores que en TNG300, permitiendo una vista más detallada de propiedades estructurales de galaxias y fenómenos de gas, de pequeña escala, dentro y alrededor de galaxias. En TNG50, los SNAPSHOT ‘full’ contienen 2.7 TB de información, mientras que el volumen completo de datos es de 320 TB. Para poder trabajar con las bases de datos y funciones predefinidas en IllustrisTNG se utilizó JUPYTERLAB. Esta es una interfaz que permite programar y correr dichos programas en servidores externos debido al volumen de datos que maneja la simulación. La librería que contiene las funciones utilizadas en el JUPYTERLAB para la obtención de datos para los halos, subhalos y partículas, para su análisis, es el paquete ILLUSTRIS_PYTHON.

2.2. Variables utilizadas

2.2.1. Halos de materia oscura

Los halos de materia oscura son unidades básicas de la estructura cosmológica. Son regiones hipotéticas que se han desacoplado de la expansión cósmica y contienen materia ligada gravitacionalmente. Es importante destacar la diferencia con un halo galáctico, el cual es una componente extendida y aproximadamente esférica de una galaxia que se extiende más allá de la región principal, que tiene materia visible.

Para la obtención de las variables utilizadas se recurrió a las funciones del paquete ILLUSTRIS_PYTHON provisto por la colaboración. En este trabajo, los campos utilizados para los halos fueron:

- `GROUPFIRSTSUB`: Índice del subhalo en la tabla que contiene el grupo subfind dentro de este halo FoF.
- `GROUPPOS`: Posición espacial dentro de la caja periódica de la partícula con la mínima energía potencial gravitacional. Estas coordenadas son comóviles.
- `GROUP_R_CRIT500`: Radio comóvil de una esfera centrada en el `GroupPos` del halo, cuya densidad es 500 veces la densidad crítica del universo en ese momento.
- `GROUP_R_CRIT200`: Radio comóvil de una esfera centrada en el `GroupPos` del halo, cuya densidad es 200 veces la densidad crítica del universo en ese momento.

2. Simulaciones

En la literatura, tanto al `GROUP_R_CRIT500` como al `GROUP_R_CRIT200`, se los suele denotar como R_{500} y R_{200} , respectivamente, y así lo haremos aquí.

2.2.2. Subhalos

Los subhalos son subestructuras de materia oscura que son identificados por el algoritmo `SUBFIND` utilizando criterios de ligadura dentro de los halos de materia oscura, a diferencia del algoritmo `FoF`, que asocia las partículas de los halos por criterios de cercanía. Las galaxias se forman dentro de estas subestructuras. Las propiedades de las galaxias están tabuladas en los catálogos de subhalos de la simulación.

Los arreglos correspondientes a subhalos están ordenados de manera decreciente según su masa, por lo que a cada subhalo se le asocia un número identificador `ID` que indica, dentro de un `SNAPSHOT`, la posición dentro de este arreglo. Es decir, dado un `SNAPSHOT`, el subhalo con `ID = 0` será el más masivo, el subhalo con `ID = 1` será el segundo más masivo y así sucesivamente.

Los campos de subhalos utilizados fueron:

- `SUBHALO_STELLARPHOTOMETRICS`: Magnitudes basadas en las luminosidades de las partículas estelares en las bandas: U, B, V, K, g, r, i, z. Las magnitudes para cada partícula estelar se calculan mediante modelos de síntesis de población de [Bruzual & Charlot \(2003\)](#)
- `SUBHALO_MASSTYPE`: Masa total de todas las partículas que conforman al subhalo, separadas por clase (ver tabla 2.3).
- `SUBHALO_SFR`: Suma de la tasa de formación estelar individual de todas las partículas de gas de este subhalo.
- `SUBHALO_STELLARPHOTOMETRICS_RAD`: Radio al cual el perfil de brillo superficial (calculado para todos los miembros estelares) cae por debajo de $20.7 \text{ mag arcsec}^{-2}$ en la banda K. El mismo está dado en unidades comóviles.
- `SUBHALO_MASS`: Masa total de todas las partículas que conforman al subhalo.
- `SUBHALO_POS`: Posición, dentro de la caja periódica en la simulación, de la partícula

con la menor energía potencial gravitatoria del subhalo. Está dada en coordenadas comóviles.

- SUBHALOGRNR: Índice del grupo del Halo FoF al cual pertenece el subhalo.

2.2.3. Partículas

Las partículas que se encuentran en los SNAPSHOTS pertenecientes ya sea a halos, subhalos o medio interestelar están clasificadas en 5 clases de partículas diferentes. Estas pueden ser partículas de gas, de materia oscura, partículas estelares y de viento⁽ⁱ⁾, trazadores⁽ⁱⁱ⁾ y agujeros negros. En la Tabla 2.3 se muestran las mismas, junto con el código que se les asigna. Las partículas de cada SNAPSHOT están organizadas de acuerdo a su membresía a los grupos o subgrupos que se encuentran en la simulación.

Los campos pertenecientes a cada partícula se solicitan para algún halo o subhalo particular. Las utilizadas en este trabajo fueron:

- MASSES: Arreglo que contiene la masa de cada partícula de gas de este subhalo.
- SFR: Arreglo que contiene la tasa de formación estelar de cada partícula de gas de este subhalo.
- COORDINATES: Arreglo que contiene las 3 componentes de la posición espacial para el tipo de partícula solicitada, dentro de la caja periódica. Las posiciones están referidas a una de las esquinas de la caja y son dadas en unidades comóviles.
- VELOCITIES: Arreglo que contiene las 3 componentes de la velocidad para el tipo de partícula solicitada. Están dadas en $\text{km}/\text{s}\sqrt{a}$.

Notar que en este trabajo, las dos primeras variables fueron utilizadas para partículas de gas, mientras que las dos últimas para partículas estelares.

2.2.4. Árboles de fusión

Con el fin de conectar las historias evolutivas de los halos y subhalos, utilizamos los árboles de fusión, que permiten obtener un campo requerido para un subhalo durante todos

⁽ⁱ⁾Estas son partículas de viento que se usan para modelar los AGN.

⁽ⁱⁱ⁾Como es un código euleriano con celdas, se definen estas “partículas” que trazan al gas.

2. Simulaciones

Tabla 2.3. Clasificación de las partículas que componen cada SNAPSHOT de las simulaciones IllustrisTNG.

Tipo	Partícula
0	Gas
1	Materia oscura
2	Trazadores
3	Masa estelar y partículas de viento
4	Agujeros negros

los SNAPSHOTS donde este fue identificado. El algoritmo SUBLINK construye árboles de fusión en el nivel de subhalo. Se asigna un descendiente único a cada subhalo en tres pasos (ver [Rodríguez-Gomez et al. \(2015\)](#) para información más completa). Primero, los candidatos a descendientes se identifican para cada subhalo como aquellos subhalos en el siguiente SNAPSHOT que tienen partículas comunes con el subhalo en cuestión. En segundo lugar, cada uno de los candidatos descendientes recibe una puntuación basada en una función de mérito que tiene en cuenta el rango de energía de enlace de cada partícula. Finalmente, el descendiente único del subhalo en cuestión es el candidato descendiente con la puntuación más alta. A veces, el buscador de halo no detecta un subhalo pequeño que atraviesa una estructura más grande porque el contraste de densidad no es lo suficientemente alto. SUBLINK soluciona este problema al permitir que algunos subhalos salten un SNAPSHOT al encontrar un descendiente. Una vez que se han realizado todas las conexiones descendientes, el progenitor principal de cada subhalo se define como el que tiene la ‘historia más masiva’ por detrás.

Para trabajar con los árboles de fusión los campos utilizados fueron:

- **SUBHALOID:** Identificador único para el subhalo.
- **SNAPNUM:** Arreglo que contiene los SNAPSHOTS en los cuales el subhalo es encontrado.
- **FIRSTPROGENITORID:** Es el SUBHALOID del progenitor principal del subhalo analizado. El progenitor principal es el progenitor más masivo que ha tenido el subhalo a lo largo de su historia de fusión. Para aquellos subhalos sin progenitor el valor de este campo es -1.
- **NEXTPROGENITORID:** Es el SUBHALOID del segundo progenitor más masivo de este subhalo, el cual comparte el mismo descendiente que este subhalo. Si no hay más subhalos que comparten un mismo descendiente, el valor de este campo es -1.

- SUBFINDID: Índice del subhalo en el grupo de catálogo SUBFIND.

Hay que notar que si bien estos campos son exclusivos de los árboles de fusión, también es posible obtener los campos mencionados antes para el catálogo de subhalos a lo largo y ancho del árbol, y con estos tener la información requerida en todos los SNAPSHTS.

Se puede acceder tanto a la rama principal del árbol de fusión como así también al árbol completo. La rama principal del árbol es aquella en la que solo se accede al progenitor principal en cada SNAPSHOT de un subhalo dado. En cambio al acceder al árbol completo obtenemos la información de todos los progenitores del subhalo.

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo caracterizaremos la muestra de galaxias a $z = 0$, comparando aquellas que son galaxias espirales con las que son lenticulares, según nuestra clasificación. Luego analizaremos las historias de fusiones de cada submuestra, para hallar diferencias estadísticas en las fusiones sufridas. Por último, para aquellas galaxias lenticulares que son satélite a $z = 0$, haremos un análisis más profundo sobre la evolución de la tasa de formación estelar y gas, que estas disponen, a medida que ingresan al grupo o cúmulo en el cual residen.

3.1. Muestra de galaxias simuladas

La muestra de galaxias de disco simuladas fue tomada de [Gargiulo et al. \(2022\)](#). Estas son galaxias con masas similares a las de la Vía Láctea y M31 que cumplen con los siguientes criterios:

- Tienen masas estelares M_* en el rango $[10^{10.5} - 10^{11.2}]M_\odot$, donde M_* es la suma de todas las partículas estelares encerradas en una esfera de 30 kpc, centrada en la partícula de materia oscura más ligada a $z = 0$.
- Presentan morfología de disco. Para cuantificar esto, seleccionamos galaxias con $s < 0.45$, donde $s = c/a$ es la relación entre el eje menor y el mayor del tensor de inercia estelar, medido dentro de una y dos veces el radio que contiene la mitad de la masa estelar. Adicionalmente, agregamos veinticinco galaxias con $s > 0.45$ en el rango de masa adoptado que muestran una clara morfología de disco cuando inspeccionamos visualmente

3. Resultados

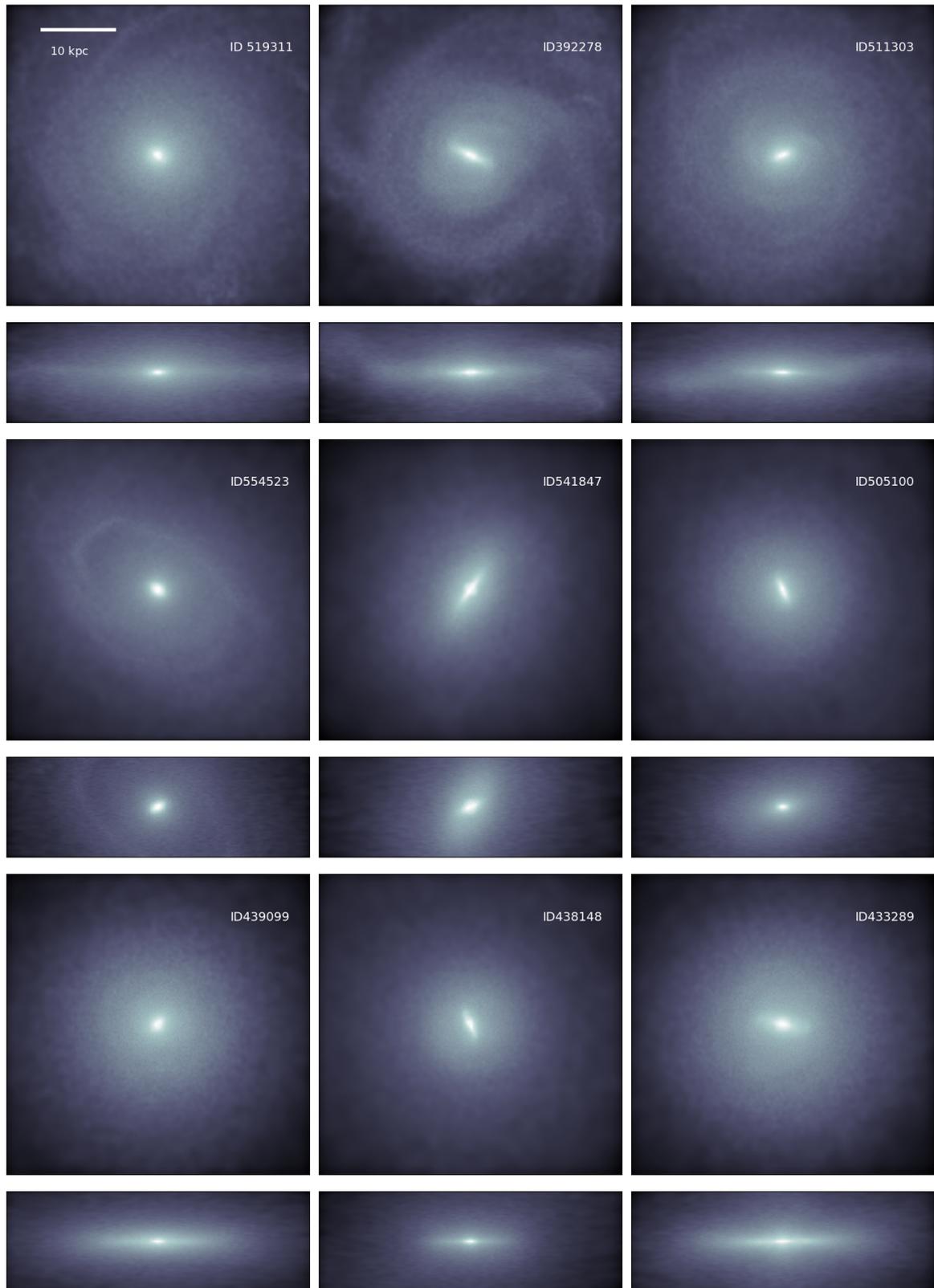


Figura 3.1. Proyecciones orientadas de frente (*face-on*) y de canto (*edge-on*) de algunas de las galaxias simuladas de la muestra utilizada en este trabajo, compuesta por 287 galaxias de TNG50 similares a la Vía Láctea y M31. En la primera fila se pueden apreciar galaxias espirales, en la fila del medio tres ejemplos de galaxias con restos de estructura espiral y perturbadas, que finalmente fueron añadidas como galaxias lenticulares, y en la última fila tres ejemplos de galaxias clasificadas como lenticulares.

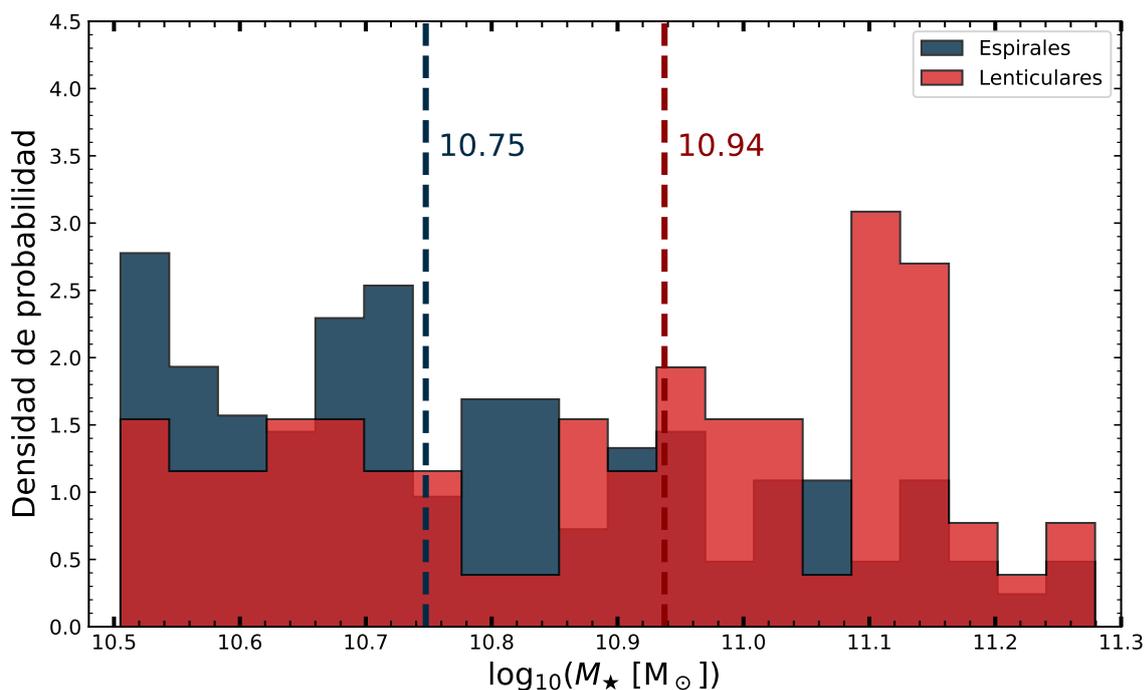


Figura 3.2. Distribuciones de masas estelares para galaxias lenticulares (rojo) y espirales (azul). Se muestran los valores de las medianas de ambas distribuciones con líneas punteadas respetando los colores.

las imágenes sintéticas de tres bandas.

Sabemos que nuestra muestra no es completa pues las galaxias lenticulares abarcan un rango más amplio, tanto en el parámetro s como en masas. Esto puede generar un efecto de selección en nuestras conclusiones, o un cierto sesgo hacia un determinado camino de formación. En un futuro seremos menos restrictivos a la hora de seleccionar por masa, así incluiremos todo el intervalo posible de galaxias lenticulares, y estudiaremos también la prevalencia de los mecanismos de formación según la masa.

Una vez obtenida esta muestra de 287 galaxias de disco, realizamos una inspección visual de las imágenes generadas a partir del paquete PY-SPHVIEWER (Benitez-Llambay, 2015) para discriminar entre galaxias de disco con estructura espiral y galaxias lenticulares. El único criterio utilizado fue la búsqueda de brazos espirales de cualquier multiplicidad en las imágenes de las galaxias orientadas de frente (*face-on*). En una primera instancia, 221 galaxias fueron catalogadas como espirales, 30 como lenticulares y en 36 no hubo coincidencia entre las dos personas involucradas en la clasificación. Las 36 galaxias en las que no hubo coincidencia presentaban una estructura espiral casi inexistente o restos de una estructura de anillo y

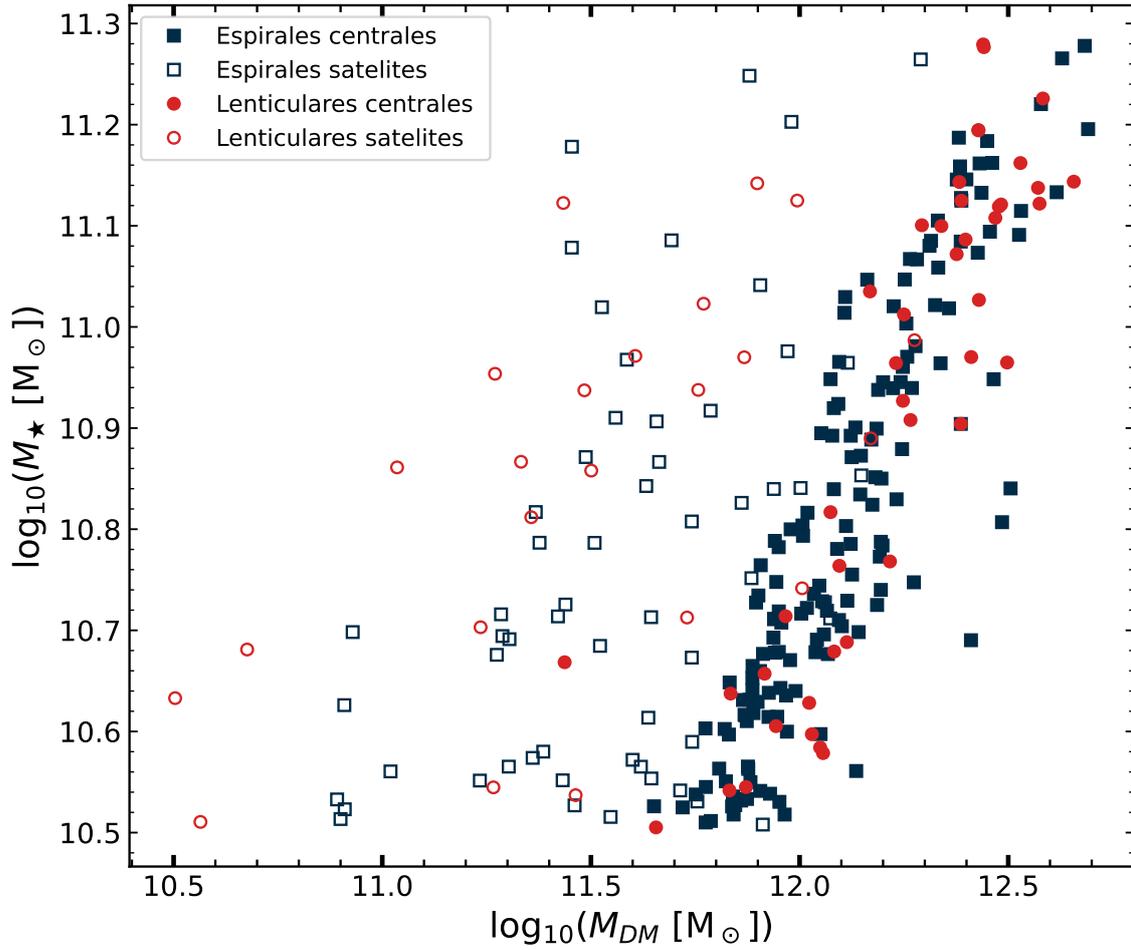


Figura 3.3. Masa estelar en función de la masa de materia oscura para galaxias espirales y lenticulares. Los símbolos llenos denotan galaxias centrales, mientras que los vacíos refieren a galaxias satélite.

fueron agregadas a la muestra de lenticulares. Finalmente, la muestra se compone de 221 galaxias espirales y 66 galaxias lenticulares. En la Fig. 3.1 se puede ver una submuestra de galaxias espirales y lenticulares, incluyendo algunos ejemplos de galaxias con vestigios de estructura espiral que, finalmente fueron clasificadas como lenticulares.

En la Fig. 3.2 se muestra la distribución de masas estelares de la muestra de galaxias espirales en azul y la de galaxias lenticulares en rojo (el código de colores se mantendrá de aquí en adelante). Observamos que las galaxias lenticulares son, en promedio, más masivas. Esto queda claro al observar la mediana de las distribuciones. Estas se muestran como líneas punteadas y sus valores son $\tilde{\mu}_{len} = 10.94$ para galaxias lenticulares y $\tilde{\mu}_{esp} = 10.75$ para galaxias espirales, respectivamente.

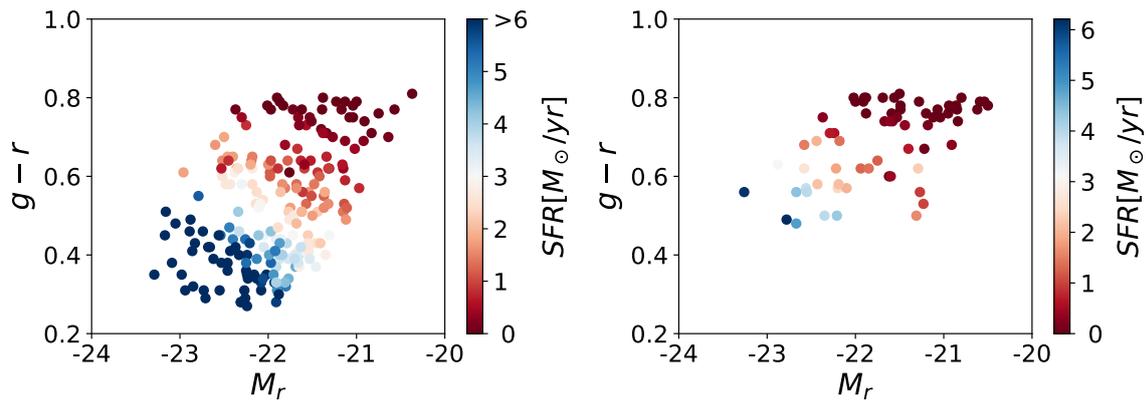


Figura 3.4. *Panel izquierdo:* Diagrama color-magnitud para galaxias espirales coloreados según su SFR. *Panel derecho:* Lo mismo que en el panel izquierdo pero para galaxias lenticulares.

Finalmente, en la Fig. 3.3 graficamos la masa estelar de las galaxias simuladas como función de la masa de materia oscura correspondiente a la subestructura que las contiene. Los símbolos vacíos indican aquellas galaxias que resultan ser satélites (ver Sec. 2) a $z = 0$. Se observa que las galaxias centrales están más dominadas por materia oscura que las galaxias satélite. Esto se debe a que cuando una galaxia cae en un grupo o cúmulo y se convierte en satélite pierde una parte de su halo de materia oscura por efectos de decaído por mareas (*Tidal stripping*). Las galaxias lenticulares parecen sufrir más por este efecto, ya que en promedio, las masas de materia oscura de las galaxias lenticulares satélite son menores que aquellas que son galaxias espirales satélite. Esto es una primera indicación de los diferentes caminos evolutivos que pueden determinar o modificar la morfología de una galaxia de disco.

3.2. Propiedades generales de galaxias lenticulares y espirales

Una de las diferencias principales en las características físicas entre galaxias lenticulares y espirales es el color integrado dado por sus poblaciones estelares (Sandage & Visvanathan, 1978; Freeman & Jones, 1970). Para poder analizar esto obtuvimos del campo SUBHALOSTELLARPHOTOMETRICS las magnitudes en las bandas r y g para todas las galaxias de la muestra y realizamos la resta $g - r$ para obtener el índice de color.

En la Fig. 3.4 mostramos el diagrama Color-Magnitud para las muestras de galaxias espirales y lenticulares, y con colores mostramos la tasa de formación estelar (SFR por sus siglas en inglés) para cada galaxia.

3. Resultados

En el panel izquierdo vemos que las galaxias espirales abarcan un amplio margen en color y brillo en la banda r, mientras que en el panel derecho observamos que las galaxias lenticulares tienden a ser objetos más enrojecidos. Esto implica que las poblaciones estelares que las conforman son más viejas y/o más metálicas.

Sabemos que las galaxias lenticulares suelen presentar una menor tasa de formación estelar que las galaxias espirales (Temi et al., 2009) y en los diagramas de C-M estas siguen lo que se conoce como la *red sequence* (secuencia roja) pero en nuestra muestra vemos que hay varias galaxias que se alejan de esta secuencia y además tienen una alta SFR. Esto se debe a que al clasificar morfológicamente mediante imágenes hay galaxias que no cumplen con los criterios de selección utilizados en observaciones. Más allá de eso, en nuestra muestra obtuvimos que, en galaxias lenticulares, el 62 % tiene una SFR baja ($< 0.2M_{\odot}/yr$). En cambio, en las galaxias espirales el 83 % si supera esa tasa de formación. La gran mayoría del 17 % de galaxias espirales que tiene una SFR $< 0.2M_{\odot}/yr$ presenta una estructura espiral muy débil y pueden ser consideradas objetos en transición hacia galaxias lenticulares.

Resulta de interés analizar como evolucionó la SFR de los distintos tipos de galaxias. Para ello recurrimos a los MERGER TREES o árboles de fusión, los cuales nos permiten tener un campo disponible para los subhalos (galaxias) a lo largo de todos los SNAPSHOTS para los cuales esa galaxia se pudo identificar. Luego, realizamos un bineado en el tiempo, y para cada bin calculamos la mediana. En la Fig. 3.5 mostramos la SFR de todas las galaxias a lo largo de su historia con líneas transparentadas, y las medianas por bin correspondientes a cada muestra, en trazo continuo. Las galaxias espirales, en el panel izquierdo, muestran una formación estelar que declina suavemente en el tiempo luego de alcanzar un máximo a 10 Gyr de LBT. En la actualidad se mantienen, en promedio, activas. En cambio, se observa en el panel derecho que en el caso de las galaxias lenticulares la mediana tiene un pico más alto que el de las galaxias espirales a los 10 Gyr y se mantiene en valores altos hasta los 6 Gyrs de LBT para luego descender rápidamente y hacerse casi 0 a $z = 0$. Efectivamente, la evolución de la SFR en los distintos tipos de galaxias de disco difiere considerablemente.

La SFR de una galaxia está directamente relacionada con la cantidad de gas frío disponible que esta posee, pues a partir de este es que la galaxia puede (o no) formar estrellas. Es por ello que analizamos la fracción de gas frío disponible para cada galaxia con respecto a la masa

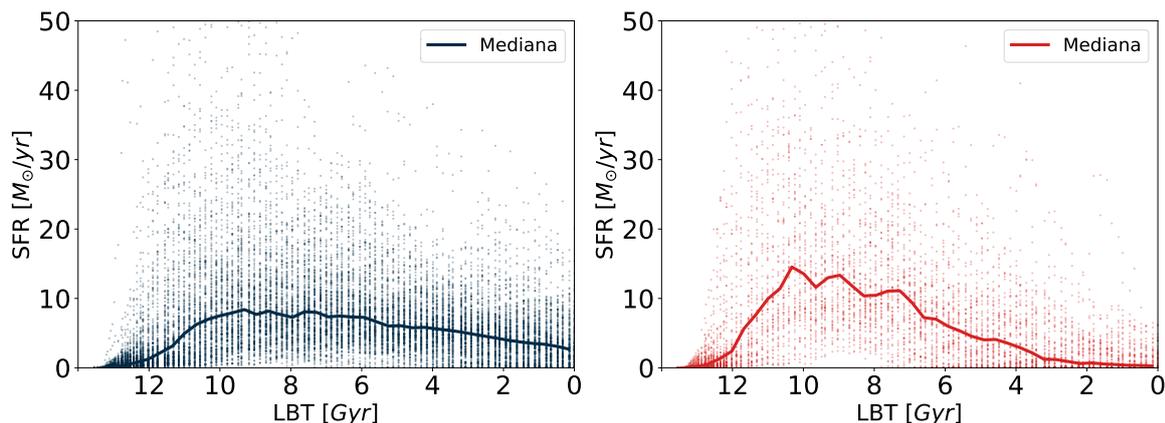


Figura 3.5. *Panel izquierdo:* Tasa de formación estelar (SFR) como función del LBT para todas las galaxias espirales. Se muestra la mediana en trazo continuo. *Panel derecho:* Lo mismo que en el panel izquierdo pero para galaxias lenticulares.

estelar que posee. Para esto, a través del catálogo de partículas accedimos a las partículas de gas para cada galaxia. Consideramos partículas de gas frío a aquellas que presentaban formación estelar (el campo $\text{SFR} > 0$) y luego sumamos las masas de estas. La masa de cada partícula de gas la obtuvimos del campo `MASES` (ver Sec 2.2.3).

En el panel central de la Fig. 3.6 mostramos la fracción de gas frío (respecto a la masa estelar de la galaxia) como función de la masa estelar. Los símbolos azules denotan galaxias espirales, mientras que los rojos galaxias lenticulares. Observamos que en las galaxias lenticulares, para todo el rango de masas estelares, su masa de gas frío con respecto a la masa estelar, no supera el 15% mientras que las espirales tienen más gas frío en general, a veces llegando hasta el 40%. En el panel derecho mostramos las distribuciones de gas frío para ambos tipos de galaxias de la muestra. En línea punteada se muestra la mediana de cada distribución. Queda claro lo se comentó en el párrafo anterior, ya que las medianas son 0.098 para galaxias espirales y 0.007 para galaxias lenticulares. De hecho, en nuestra muestra, de las 66 galaxias clasificadas como lenticulares, 50 tienen una fracción de gas frío < 0.05 , es decir un 75%. Y de las 221 clasificadas como espirales, 153 poseen una fracción de gas frío > 0.05 , es decir el 69%.

La diferencia observada en los caminos evolutivos de manera agregada nos motiva a estudiar en detalle los eventos asociados a las historias de formación particulares de las galaxias lenticulares.

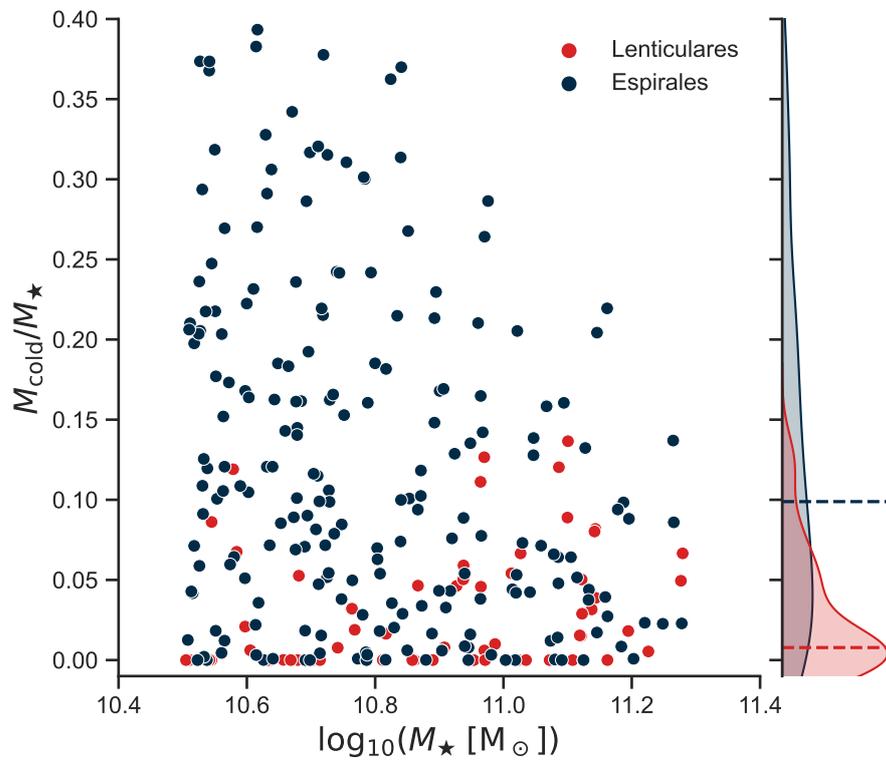


Figura 3.6. *Panel central:* Fracción de gas frío con respecto a la masa estelar como función de la masa estelar para galaxias espirales (puntos azules) y para galaxias lenticulares (puntos rojos). *Panel derecho:* Distribución de la fracción de gas frío con respecto a la masa estelar para galaxias espirales (azul) y para galaxias lenticulares (rojo). Se muestra la mediana de cada distribución con línea punteada.

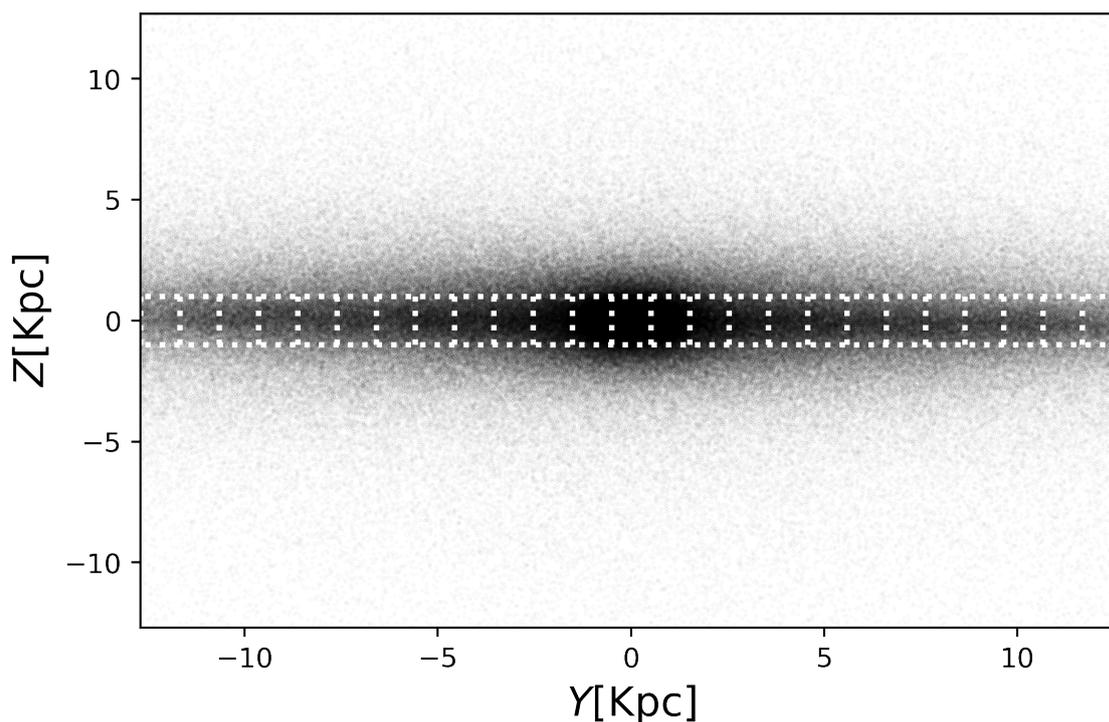


Figura 3.7. Imagen de canto (*edge-on*) de una de las galaxias de la muestra. Los puntos negros corresponden a partículas estelares mientras que las líneas blancas muestran los bins elegidos para calcular los perfiles de velocidad y dispersión radiales.

3.3. Propiedades cinemáticas de galaxias lenticulares y espirales

Un aspecto relevante a la hora de caracterizar las galaxias lenticulares son las propiedades cinemáticas de sus estrellas. Los discos finos y definidos son típicos de galaxias espirales, mientras que las galaxias lenticulares suelen presentar discos gruesos y menos soportados por rotación (Bekki, 1998). Con el fin de realizar una comparación entre las propiedades cinemáticas de las galaxias lenticulares y espirales de la muestra, calculamos perfiles radiales de velocidad de rotación (de acá en más V_{rot}), dispersión de velocidades (σ_V) y el cociente entre las dos cantidades (V_{rot}/σ_V), que suele utilizarse como una medida del grado de soporte de rotación de una galaxia. En primer lugar, para cada galaxia de la muestra se extrajeron del catálogo de partículas, posiciones y velocidades de las partículas estelares. Estas están referenciadas a una esquina de la caja cosmológica simulada (ver Sec. 2). Es por eso que rotamos las posiciones y velocidades de tal manera que la componente cartesiana Z sea

3. Resultados

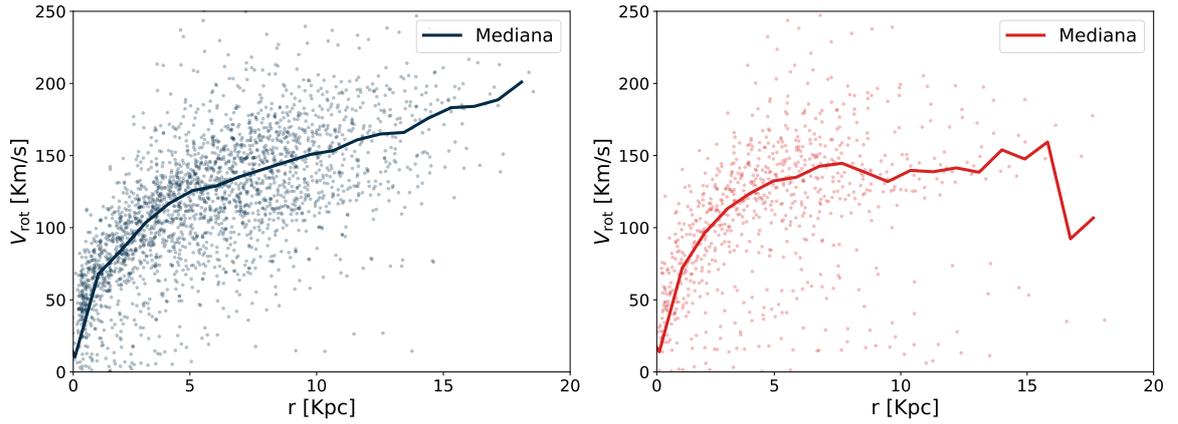


Figura 3.8. *Panel izquierdo:* Velocidad de rotación media en función de la distancia al centro galáctico para todas las galaxias espirales. Se muestra también la mediana como línea continua. *Panel derecho:* Lo mismo que el panel izquierdo pero para galaxias lenticulares.

paralela al momento angular de las galaxias (perpendicular al disco). En consecuencia, la V_{rot} puede ser considerada la componente X de la velocidad al mirar la galaxia de canto. Se delimitó el tamaño de la galaxia utilizando el radio fotométrico r (ver sección 2.2.3).

Luego se realizó un bineado en el intervalo $(-r, r)$ kpc en la dirección Y, que es paralela al disco galáctico, y en el intervalo $(-1, 1)$ kpc en la dirección Z, perpendicular al disco. Finalmente, dentro de cada bin se calculó la velocidad media de rotación (V_{rot}), la dispersión de velocidades (σ_V) y el cociente entre las dos cantidades (V_{rot}/σ_V). En la Fig. 3.7 se muestra la imagen de una de las galaxias simuladas de canto, resaltando las regiones donde se calculan las cantidades mencionadas.

En las Figs. 3.8 y 3.9 se graficaron los perfiles radiales de velocidad media de la V_{rot} y de dispersión de velocidades σ_V , respectivamente. En los paneles izquierdos se muestran los perfiles para todas las galaxias espirales mientras que en los paneles derechos para galaxias lenticulares. En ambas figuras se incluye la mediana de los bins de cada perfil en línea continua con los colores correspondientes, azul para espirales y rojo para lenticulares.

Para poder realizar una mejor comparación de lo obtenido para ambos tipos de galaxias, en el panel izquierdo de la Fig. 3.10 graficamos las medianas de los perfiles radiales de velocidad media V_{rot} para galaxias espirales y lenticulares. Al observar la V_{rot} no se aprecian diferencias significativas entre las medianas de ambos perfiles para $r \leq 8\text{Kpc}$, luego hasta los 15 kpc la V_{rot} para galaxias lenticulares se mantiene aproximadamente constante mientras que para las galaxias espirales sigue aumentando. A partir de los 15 kpc se amplía dicha diferencia, pero

3.3. Propiedades cinemáticas de galaxias lenticulares y espirales

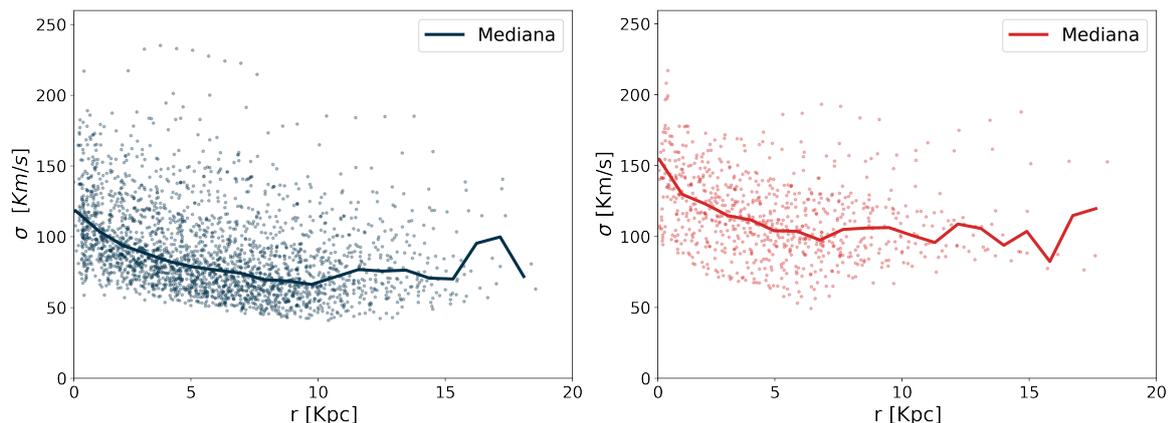


Figura 3.9. *Panel izquierdo:* Dispersión de la velocidad de rotación media en función de la distancia al centro galáctico para todas las galaxias espirales. Se muestra también la mediana como línea continua. *Panel derecho:* Lo mismo que el panel izquierdo pero para galaxias lenticulares.

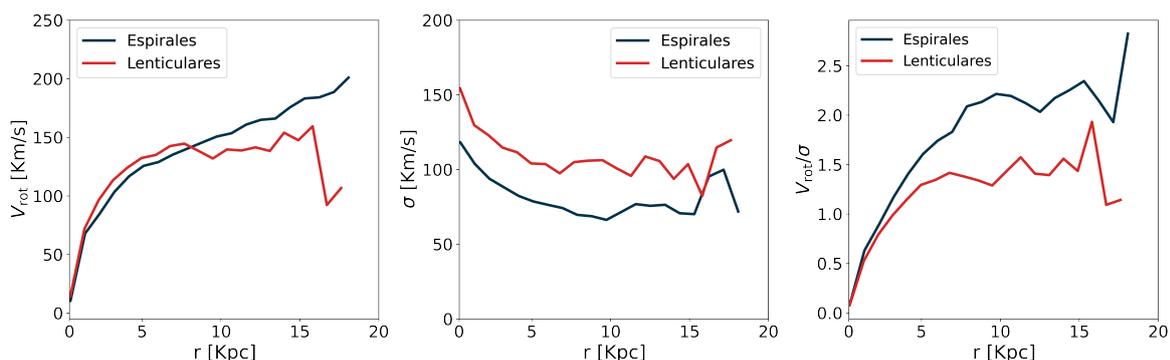


Figura 3.10. *Panel izquierdo:* Medianas de las velocidades de rotación media para galaxias espirales (azul) y para lenticulares (roja). *Panel central:* Medianas de las dispersiones de velocidades de rotación media para galaxias espirales (azul) y para lenticulares (roja). *Panel derecho:* Medianas del cociente entre velocidades de rotación media y la dispersión de esta, para galaxias espirales (azul) y para lenticulares (roja).

esta se debe al ruido estadístico por la menor cantidad de galaxias con radios superiores a 15 kpc. En el panel central mostramos las medianas de los perfiles radiales de dispersión de velocidades. Se aprecia que, si bien la forma es similar, la dispersión de velocidades en los bins radiales en galaxias lenticulares es mayor a todo radio. En el panel derecho mostramos la mediana del cociente entre V_{rot} y σ_V dentro de cada bin. Se puede observar como en los kpc centrales no hay diferencia entre las galaxias espirales y las galaxias lenticulares, pero luego de los 3 kpc las galaxias lenticulares se muestran menos soportadas por rotación.

3.4. Caminos evolutivos de galaxias lenticulares y espirales

En lo que sigue comenzaremos a explorar las razones por las cuales las galaxias lenticulares pierden su gas frío y su capacidad de formar estrellas.

3.4.1. Impacto de las fusiones de galaxias

Como mencionamos en la Sec. 1, una de las principales vías invocadas para explicar la transformación morfológica de las galaxias lenticulares son las fusiones galácticas. En esta sección analizaremos las historias de las fusiones de galaxias de disco de la muestra y buscaremos, en particular, diferencias en las historias de fusiones de las galaxias lenticulares y espirales. Para ello, nuevamente se trabajó con los árboles de fusión. Se obtuvieron las variables `FIRSTPROGENITORID` y `NEXTPROGENITORID` para cada galaxia (ver Sec.2.2.4.). Estas permiten recorrer las historias de acreción de las galaxias.

En el análisis que sigue hemos considerado solo fusiones significativas. Definimos una fusión significativa como aquella que cumple que el cociente de masas de la fusión (*merger ratio*) es $M_{\text{sat}}/M_{\text{host}} \geq 0.1$, donde M_{host} es la masa total de la galaxia huésped mientras que M_{sat} es la masa de la galaxia satélite acretada, pero calculada cuando esta fue máxima en su historia anterior. Esto lo hacemos para no subestimar la masa al momento de la fusión, ya que antes de que la misma ocurra hay un flujo de partículas desde el halo secundario hacia el primario debido a diferentes procesos físicos como el decapamiento por marea (*tidal stripping*) o presión de barrido en el caso del gas. En simulaciones de alta resolución como TNG50, no considerar este efecto puede producir una gran subestimación del cociente de masas de la fusión (Rodríguez-Gomez et al., 2015).

Dos indicadores de primer orden al momento de analizar el impacto de las fusiones en los caminos evolutivos de las galaxias son la cantidad de fusiones significativas que han experimentado y el cociente de masas de las mismas. El panel izquierdo de la Fig. 3.11 muestra las distribuciones del número de fusiones significativas sufridas por galaxias lenticulares y espirales en color rojo y azul, respectivamente. En línea punteada se muestran ambas medianas con sus colores correspondientes. Observamos que las galaxias lenticulares tienen, en promedio, mayor cantidad de fusiones significativas a lo largo de su historia, como lo indican las medianas que señalan 7 fusiones significativas para galaxias espirales y 9 para galaxias lenticulares.

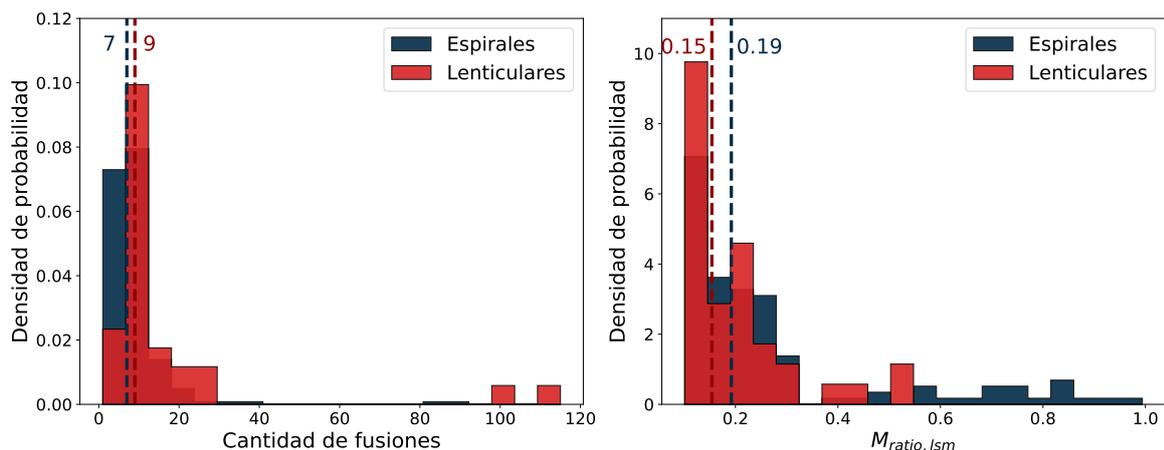


Figura 3.11. *Panel izquierdo:* Densidad de probabilidad de la cantidad de fusiones significativas sufridas tanto para galaxias espirales (azul) como para lenticulares (rojo). Se muestra también la mediana como línea punteada. *Panel derecho:* Densidad de probabilidad del cociente de masas en la última fusión significativa. Se muestra también la mediana como línea punteada.

Hay que notar que esta cantidad puede estar sobredimensionada, pues a tiempos tempranos ($LBT \geq 10$) cuando las galaxias se están asentando y tienen poca masa, reciben muchas fusiones que son significativas. En el panel derecho mostramos la distribución de cocientes entre la masa huésped y la masa del satélite de la última fusión significativa (UFS o lsm, por sus siglas en inglés) para las muestras de galaxias lenticulares y galaxias espirales respetando el mismo código de colores que en el panel izquierdo. Se muestran en línea punteada las medianas. Obtuvimos que las medianas del cociente de masa de la UFS son 0.15 para galaxias lenticulares y 0.19 para galaxias espirales. Una posible interpretación de lo obtenido es que, al momento de la fusión, las galaxias lenticulares son, en promedio, más masivas dado que a $z = 0$ vimos que las galaxias lenticulares son, en promedio, más masivas en nuestra muestra (ver Fig. 3.2). Veremos que esta hipótesis se confirma con el análisis de la siguiente figura.

Los otros indicadores que pueden ser relevantes son el momento en el cual ocurrió la UFS y la masa que tenía el satélite involucrado en el momento en que fue acretado por la galaxia huésped. En el panel central de la Fig. 3.12 mostramos la masa total de la galaxia satélite de la UFS como función del LBT para galaxias lenticulares (rojo) y para espirales (azul). No existe una correlación llamativa para ningún grupo de galaxias en particular.

En el panel superior mostramos las distribuciones de LBT de la UFS de ambos tipos de galaxias de la muestra. Se observa que para las galaxias lenticulares hay un leve desplazamiento hacia tiempos más tardíos. En cambio, para las galaxias espirales la distribución se

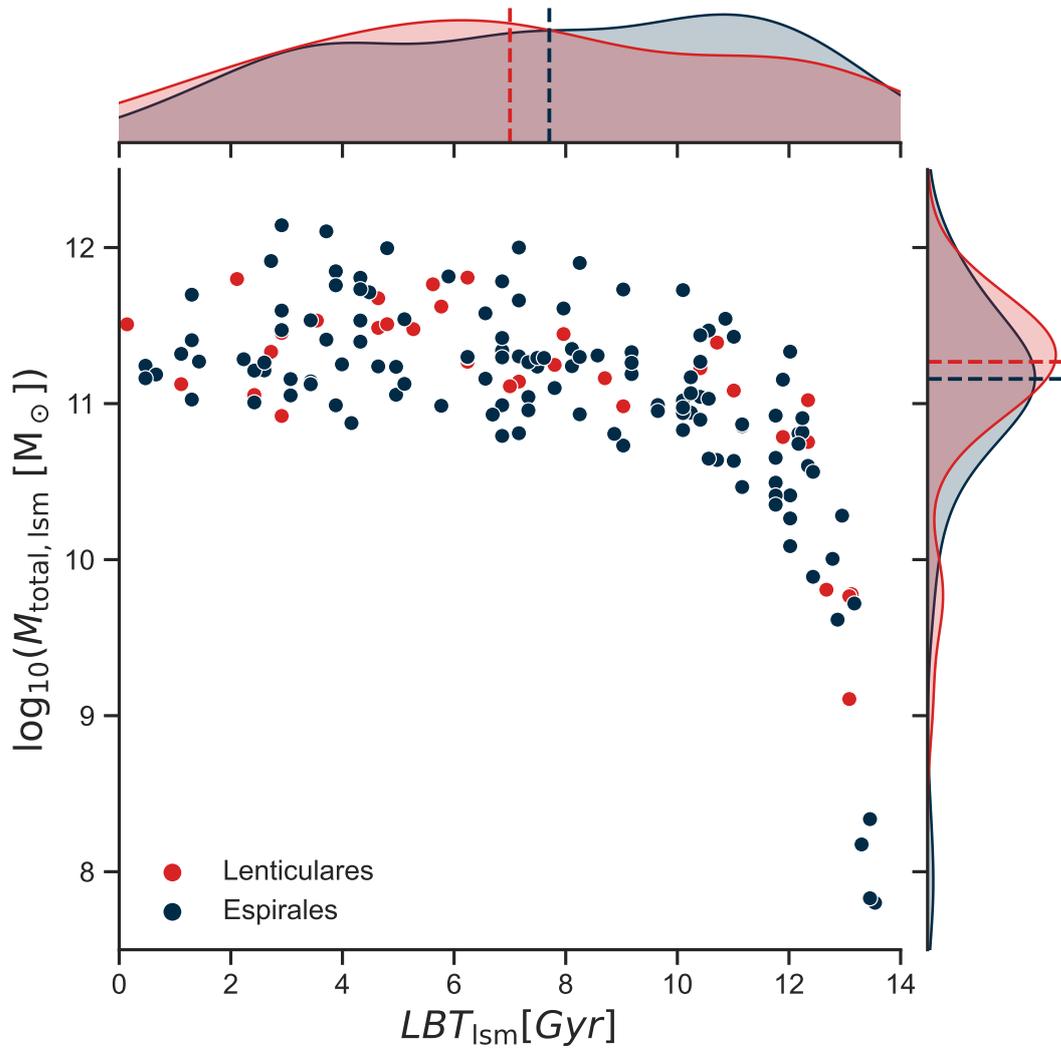


Figura 3.12. *Panel central:* Masa total de la última fusión significativa en función del LBT para galaxias espirales (azul) y para lenticulares (rojo). *Panel superior:* Densidad de probabilidad del LBT de la última fusión significativa para galaxias espirales (azul) y lenticulares (rojo). Se incluyen las medianas de cada distribución en línea punteada con sus respectivos colores. *Panel derecho:* Lo mismo que el panel superior pero para la masa total de la galaxia satélite de la última fusión significativa.

desplaza a tiempos tempranos. Esto se manifiesta en sus medianas cuyos valores son 7.7 Gyrs y 7 Gyrs de LBT para galaxias espirales y lenticulares, respectivamente. En el panel derecho se muestran las distribuciones de masa del satélite de la UFS para galaxias lenticulares y para galaxias espirales. En línea punteada se muestran las medianas de las distribuciones. Podemos ver que las galaxias satélite acretadas son, en promedio, apenas más masivas en el caso de las lenticulares. De hecho sus medianas son $\tilde{\mu}_{\text{masa}\star\text{len}} = 11.27$ y $\tilde{\mu}_{\text{masa}\star\text{esp}} = 11.16$ para galaxias lenticulares y espirales, respectivamente. Lo anterior confirma que los cocientes de masa de las UFS son, en promedio, mayores para las galaxias espirales pues la masa de las galaxias huéspedes lenticulares al momento de las fusiones significativas es mayor (Fig. 3.11).

Otro de los posibles fenómenos que podrían influenciar en la morfología de las galaxias de disco es la existencia en su historia de fusiones muy masivas. Estudiamos la presencia de ellas en ambas muestras de galaxias y descubrimos que las distribuciones de fusiones más masivas en su historia son muy similares a las del UFS presentada en el panel derecho de la Fig. 3.12. Esto se debe a que con nuestra definición de fusión significativa, la mayoría de ellas ocurre a tiempos muy tempranos y aquellas que ocurren a tiempos tardíos son menos probables. Es así que alrededor del 80% de las fusiones más masivas en la muestra de galaxias espirales y el 77% en la muestra de galaxias lenticulares terminan siendo a la vez la última fusión significativa. De todas maneras, aunque exista esta pequeña diferencia, el tiempo de la UFS termina siendo más relevante para influenciar en la morfología. Esto es, la diferencia entre las medianas de las distribuciones de LBT de la UFS de galaxias espirales y lenticulares es de 0.71 Gyr y la diferencia entre las medianas del LBT de la fusión más masiva es de 0.31 Gyr.

En lo anterior que vimos que los parámetros utilizados para caracterizar las fusiones, tanto cantidad como calidad de las mismas, difieren de una submuestra a otra, aunque lo hacen de manera muy leve. Sin embargo, en su conjunto, dichos parámetros dan soporte a la existencia de una diferencia en los caminos evolutivos de galaxias espirales y galaxias lenticulares.

3.4.2. Efectos de ambiente

La formación estelar en las galaxias está alimentada por el gas frío que poseen y por lo tanto se espera que la remoción del mismo juegue un papel relevante en la transformación de las galaxias de disco en galaxias lenticulares. Uno de los procesos que se señalan como

3. Resultados

responsables de la remoción de gas disponible para formar estrellas en las galaxias lenticulares es la presión de barrido ejercida por el medio intracúmulo o intragrupo, cuando las galaxias orbitan en un cúmulo o grupo (ver Sec. 1).

Del total de nuestra muestra, 66 galaxias fueron clasificadas como lenticulares y de esta submuestra 23 (35%) son además satélites de otra galaxia a $z = 0$. Seguiremos esta submuestra de galaxias para comprender el papel que juega el ambiente en el cual se sumerge la galaxia en su caída hacia el grupo o cúmulo del cual forma parte a $z = 0$.

Para cada una de las 23 galaxias mencionadas se obtuvieron las variables SUBHALOGRNR y FIRSTGROUPSUB con el fin de obtener cuál galaxia es la central del halo FoF al cual la galaxia satélite pertenece a $z = 0$. Luego, utilizando los MERGERTREES, obtuvimos las variables SUBHALOPOS y SFR para todos los SNAPSHOTS (ver Sec 2.2 para las definiciones anteriores).

Una vez que disponemos de las posiciones de las galaxias en la caja, calculamos la distancia entre la galaxia satélite y la galaxia central del grupo al cual pertenece a $z = 0$ para cada SNAPSHOT. Con esto estudiamos la distancia a la galaxia central en función del tiempo, y con colores, la evolución de la tasa de formación estelar y del contenido gaseoso de las 23 galaxias satélite que resultan lenticulares a $z = 0$. Mostraremos 7 casos individuales que representan de la mejor manera la variedad de situaciones encontradas.

En la Fig. 3.13 mostramos la evolución de la galaxia con ID = 5. Se puede ver que la primera fusión significativa ocurre a LBT = 11.4 Gyrs, esta dispara un brote de formación casi inmediatamente después de la fusión. Luego, a medida que cae en el cúmulo, el gas caliente del halo al cual pertenece se enfría y aumentan las reservas de gas frío mientras todavía la galaxia es central. Una vez que entra al R_{500} tiene dos fusiones significativas más; a LBT's 3.7 Gyr y a 2.9 Gyr, estas se dan muy cerca del momento cuando la galaxia pasa por el pericentro de su órbita, es decir, el punto de máxima cercanía a la galaxia central del cúmulo, que tiene una masa de $1.96 \times 10^{14} M_{\odot}$. Posterior a este acercamiento, tanto la formación estelar como el contenido de gas frío descienden abruptamente. Debido a que el cúmulo es considerablemente masivo, la presión de barrido será importante y removerá el gas frío de la galaxia satélite a medida que esta cae en el cúmulo. Sin embargo, el hecho de que existan dos fusiones significativas dificulta cuantificar el efecto del ambiente, de manera separada al efecto de las fusiones y señalar una única causa de la pérdida de gas frío y extinción de la

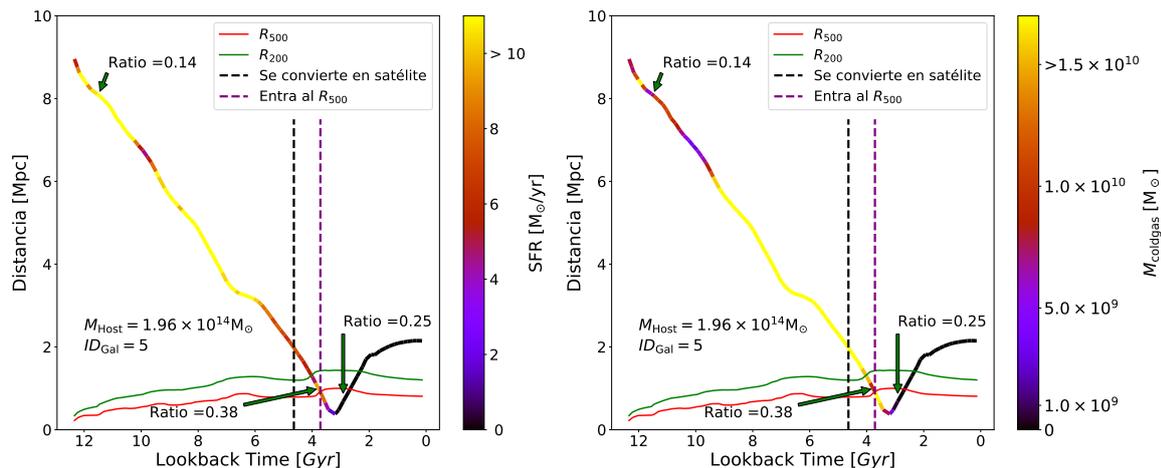


Figura 3.13. *Panel izquierdo:* Distancia de la galaxia con ID = 5 a la galaxia central del grupo al cual pertenece a $z = 0$ como función del LBT. El color de la línea indica la SFR de la galaxia según los niveles de la barra de color. Las líneas rojas y verdes muestran la evolución del R_{500} y R_{200} del halo FoF al cual pertenece la galaxia central. Las líneas a rayas negras y violetas indican el momento en que la galaxia comienza a ser satélite y el momento de ingreso al R_{500} . Las flechas verdes marcan las fusiones significativas junto con el cociente de masas de la misma. *Panel derecho:* Este panel muestra lo mismo que el panel izquierdo pero la escala de colores denota la masa de gas frío de la que dispone la galaxia. No es posible cuantificar por separado la importancia del efecto de la presión de barrido y la de las fusiones en la pérdida de gas y la extinción de la SFR.

formación estelar.

En el caso de la galaxia con ID = 454172 (ver Fig. 3.14) vemos que hay una fusión significativa a 8.7 Gyr de LBT. Se observa que después de esta fusión la galaxia pierde todo su gas frío y su formación estelar en un lapso de tiempo prolongado. Esto debido a que la fusión que experimenta, si bien es significativa, es una fusión cuyo cociente de masas es bajo. La transición hacia galaxia lenticular ocurre 2 Gyr antes de que la galaxia deje de ser central, y a $z = 0$ ni siquiera ha entrado al R_{200} del grupo al cual pertenece. Esto nos sugiere que la galaxia no ha perdido su gas frío por la presión de barrido del medio intragrupo sino más bien por la fusión sufrida.

Si ahora observamos a la galaxia ID = 117253 (ver Fig. 3.15), esta muestra una fusión significativa a 7.9 Gyrs de LBT con un cociente de masa bajo, pero en este caso la formación estelar y contenido de gas frío se extinguen en un tiempo menor. La galaxia comienza a perder su gas frío, y su formación estelar se detiene, también en este caso, antes que la galaxia deje de ser central. Nuevamente, la presión de barrido no parece ser la causa principal de la pérdida de gas.

Para la galaxia con ID = 96763 (ver Fig. 3.16) observamos que tiene 3 fusiones significa-

3. Resultados

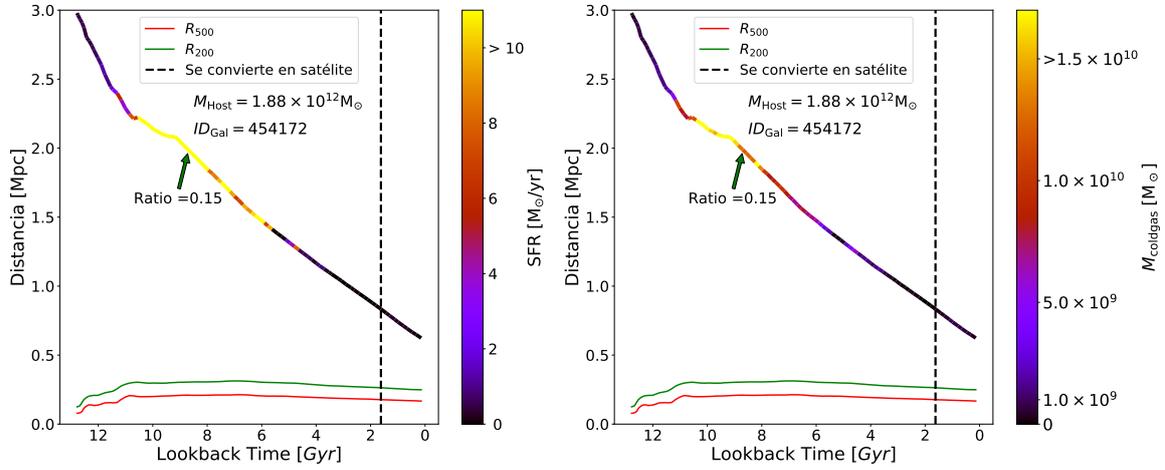


Figura 3.14. Se muestra lo mismo que en la Fig. 3.13 pero para la galaxia con ID = 454172. La galaxia pierde su formación estelar y su gas frío mucho antes de entrar al R_{200} .

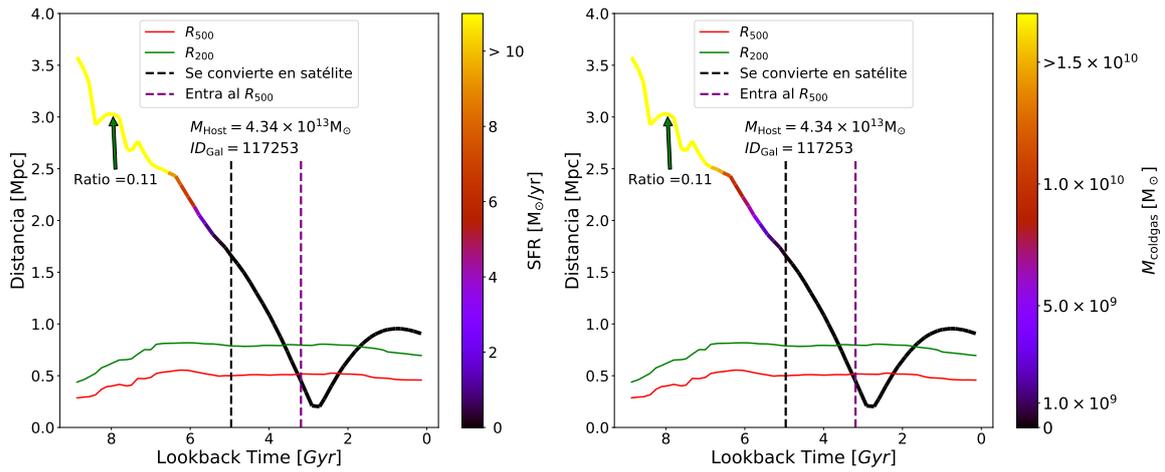


Figura 3.15. Se muestra lo mismo que en la figura 3.13 pero para la galaxia con ID = 117253. La galaxia pierde su gas frío antes de convertirse en satélite.

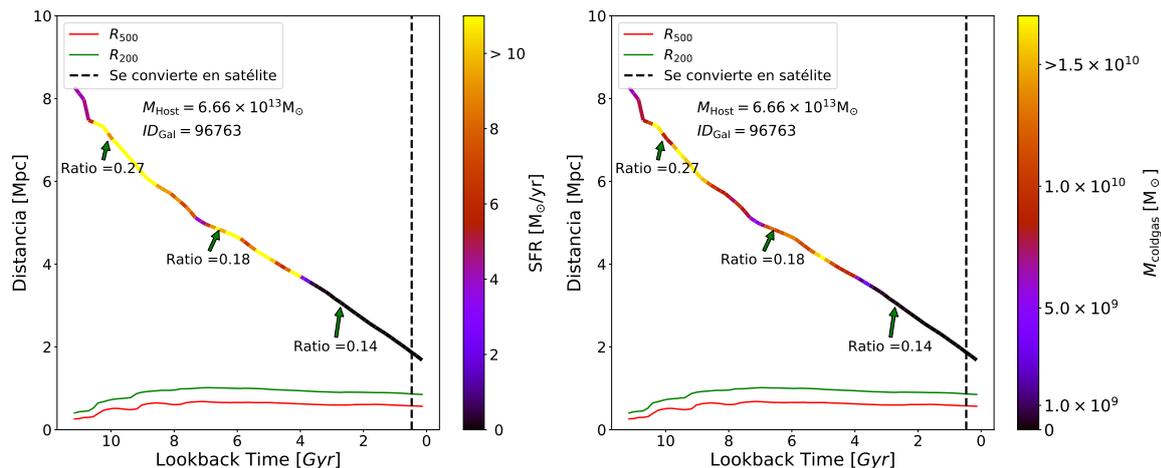


Figura 3.16. Se muestra lo mismo que en la Fig. 3.13 pero para la galaxia con ID = 96763. Esta galaxia pierde su formación estelar y pierde su gas frío antes de convertirse en satélite.

tivas. Estas ocurren a 10 Gyrs, 6.56 Gyrs y 2.72 Gyrs de LBT. Tanto su formación estelar como sus reservas de gas frío son oscilantes en el tiempo, pero 2.5 Gyrs después de la segunda fusión significativa, su formación estelar se extingue y pierde sus reservas de gas frío.

De manera similar a los dos casos anteriores, el ambiente en el cual reside a $z = 0$ no parece influir en su transformación pues prácticamente ha sido una galaxia central durante toda su historia y su transformación ocurre mucho antes de convertirse en satélite, y en la actualidad no ha ingresado siquiera al R_{200} del grupo al cual pertenece.

Para las tres galaxias anteriormente analizadas, la presión de barrido no ha sido la responsable de su transformación en galaxia lenticular sino más bien las fusiones sufridas, ya que se transformaron antes de convertirse en galaxia satélite o antes de ingresar a las regiones internas del grupo.

En la galaxia ID = 96764 (ver Fig. 3.17) observamos dos fusiones significativas en 10.1 Gyrs y 4.8 Gyrs de LBT. Luego de la primera fusión, la formación estelar y las reservas de gas frío se mantienen altas, durante unos 3 Gyrs, para luego disminuir aunque no completamente. La galaxia recibe un flujo de gas frío cerca de 6 Gyrs de LBT, que agota en un brote de formación estelar. Ingresa al R_{500} del grupo a los 2.3 Gyrs de LBT y durante su paso por el pericentro de su órbita alrededor del centro galáctico se observa la pérdida total de su gas frío y de su tasa de formación estelar. Si bien sufrió una fusión poco antes de convertirse en una galaxia satélite, el último evento antes de la transformación en una galaxia lenticular fue el ingreso a las regiones internas del grupo. Esto sugiere que la presión de barrido del medio

3. Resultados

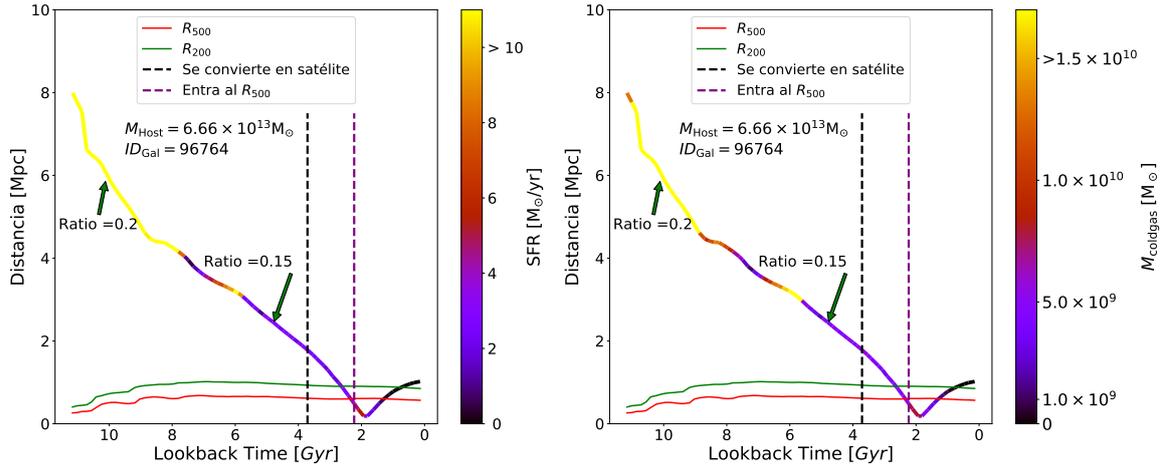


Figura 3.17. Se muestra lo mismo que en la Fig. 3.13 pero para la galaxia con ID = 96764. La galaxia pierde su gas frío y extingue su formación estelar luego de su paso por el pericentro de su órbita alrededor del centro galáctico.

intragrupo fue la principal responsable de la transformación.

En el caso de la galaxia con ID = 300904 (ver Fig. 3.18) lo primero a mencionar es el salto en la distancia a su galaxia central a 5 Gyrs de LBT. Esto se debe, probablemente, a un error en la identificación de la galaxia del algoritmo SUBFIND durante el seguimiento de la misma. Se puede observar que tiene dos fusiones significativas a 9.8 Gyr y 5.6 Gyr de LBT. La que ocurre a tiempos más tempranos dispara y mantiene la formación estelar durante 2 Gyr aproximadamente. Cuando comienza a mermar la tasa de formación estelar ocurre una segunda fusión que aumenta las reservas de gas frío y produce un nuevo brote de formación estelar. Luego, la galaxia sigue ingresando hacia las regiones internas del grupo y después de cruzar el R_{500} a los 2.5 Gyrs, y alcanzar el pericentro de su órbita, merma abruptamente su formación estelar y sus depósitos de gas frío debido a la presión de barrido del medio intra-grupo.

Por último, analizamos la galaxia con ID = 404818 (ver Fig. 3.19). La fusiones ocurren a 10.8 Gyrs y 9.7 Gyrs de LBT. Después de la primera, se dispara un brote de formación estelar y a su vez aumentan las reservas de gas frío. Casi 4 Gyrs después de la primera fusión, cuando la galaxia se convierte en satélite, la formación estelar y el gas frío a comienzan a disminuir lentamente pero una vez que la galaxia ingresa al R_{500} del grupo al cual pertenece, la formación estelar cesa abruptamente casi por completo. Y luego de pasar por el pericentro de su órbita termina de perder todo su gas frío.

3.4. Caminos evolutivos de galaxias lenticulares y espirales

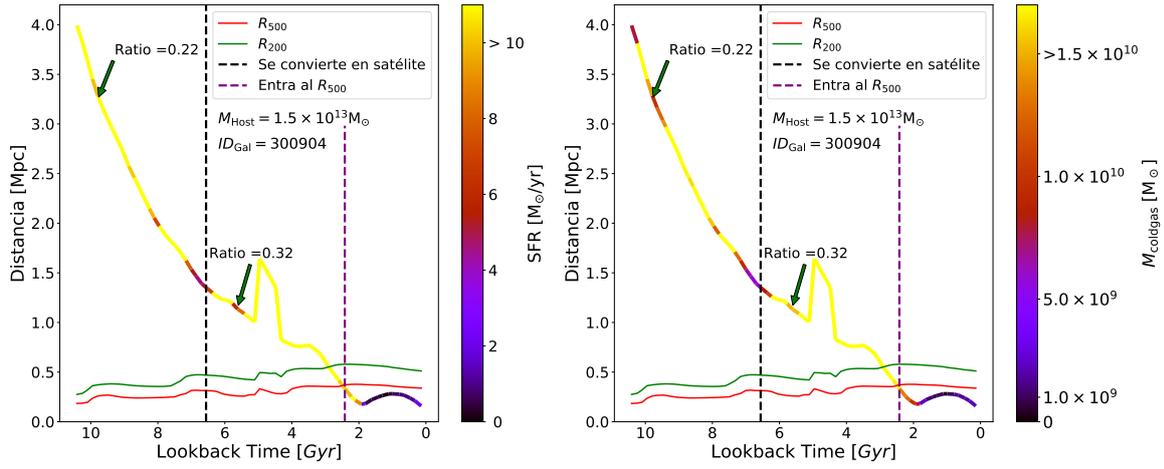


Figura 3.18. Se muestra lo mismo que en la Fig. 3.13 pero para la galaxia con ID = 300904. Esta galaxia pierde su formación estelar y pierde su gas frío en los últimos 2 Gyrs.

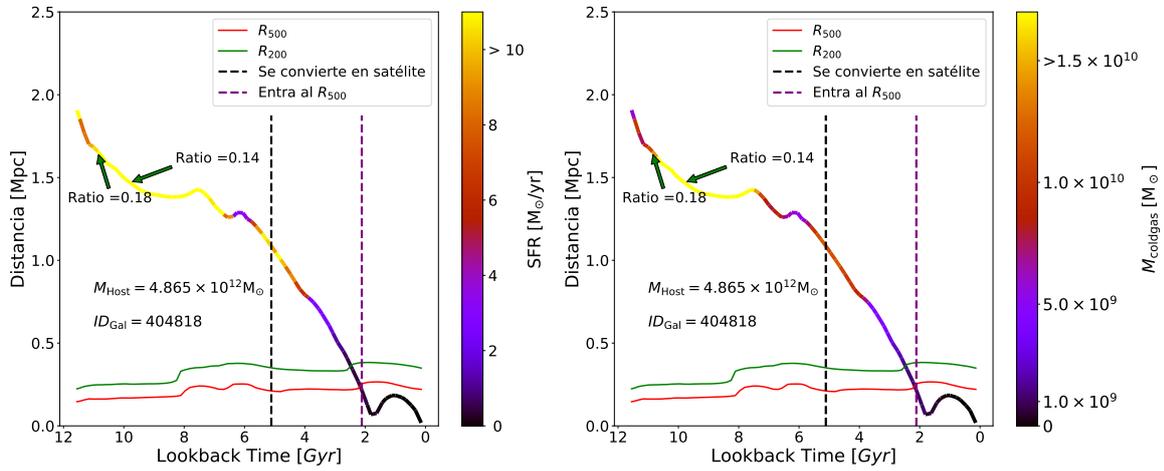


Figura 3.19. Se muestra lo mismo que en la Fig. 3.13 pero para la galaxia con ID = 404818. La galaxia extingue su tasa de formación estelar y pierde su gas frío luego del ingreso al R_{500} .

En estos tres últimos casos observamos que, si bien tienen fusiones que impactan en las reservas de gas frío o en la tasa de formación estelar, es la caída a un grupo o cúmulo que provoca la transformación en una galaxia lenticular. Tanto la tasa de formación estelar como las reservas de gas disminuyen rápidamente luego del ingreso en las regiones internas.

Capítulo 4

Discusión

En esta sección pondremos los resultados obtenidos en perspectiva comparando con trabajos previos.

En [Tapia et al. \(2017\)](#) estudiaron la formación de galaxias S0 a partir de fusiones utilizando la evolución de la relación Tully Fisher desde $z \sim 1$. Basado en la evolución de las galaxias lenticulares en esta relación ellos sugieren que las galaxias transformadas en lenticulares por fusiones deberían ser en promedio más masivas que aquellas formadas por efectos de ambiente y en muchos casos albergar poblaciones de estrellas jóvenes en las regiones centrales producidas por brotes de formación estelar. En la [Fig. 4.1](#) testeamos la hipótesis de la diferencia de masa de las galaxias lenticulares, separando la muestra entre las galaxias que observamos que detienen su formación estelar debido a efectos de ambiente y el resto de las galaxias lenticulares que resultan ser centrales en su mayoría. Excluimos las tres galaxias satélites que identificamos que el ambiente no había influenciado en su evolución. Observamos que existe una diferencia leve entre las masas de los dos grupos de galaxias. Las galaxias lenticulares afectadas por efectos de ambiente tienen una mediana de $\tilde{\mu}_{\text{satelite}} = 10.86$, ligeramente menor al resto de las lenticulares cuya mediana es $\tilde{\mu}_{\text{centrales}} = 10.96$.

En un trabajo reciente [Deeley et al. \(2021\)](#) estudiaron los caminos de formación de galaxias lenticulares usando la simulación TNG100. En este trabajo observaron que en muchos casos en los que las fusiones fueron las responsables de la transformación en galaxias lenticulares, estas probablemente fueron centrales la mayor parte su historia. Esto parece estar en concordancia con las transformaciones de las galaxias ID = 96763 y 454172 de nuestra muestra ([Sec. 3.4.2](#)). También observaron que existe un lapso de tiempo que en varios casos supera los 4 Gyr

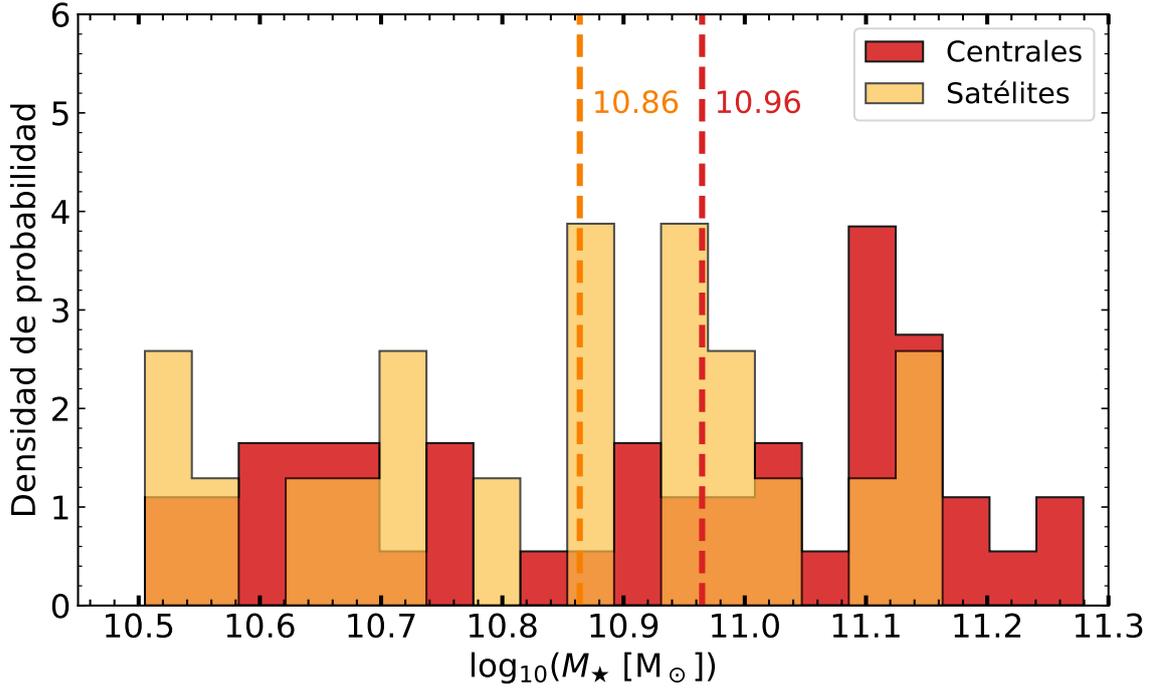


Figura 4.1. Distribuciones de masas estelares para galaxias lenticulares centrales (rojo) y lenticulares satélites (naranja) a $z = 0$. Se muestran los valores de las medianas de ambas distribuciones con líneas punteadas respetando los colores.

entre las fusiones y la transformación hacia una galaxia pasiva y con su gas frío agotado, también en concordancia con las galaxias anteriores ya que ambas parecen transformarse ≈ 3 Gyr después cuando todavía eran centrales. Sin embargo [Querejeta et al. \(2015\)](#) encontraron que el ensamblaje en una S0 ocurre típicamente dentro de los 3 Gyr. Observaron que las galaxias que entraban a un grupo o cúmulo masivo perdían el gas mucho más rápido que las que se transformaban mediante fusiones. Y además, no eran galaxias lenticulares antes de la caída. Es decir, fue la caída lo que las volvió galaxias pasivas. Esto parece explicar la rápida remoción de gas de la galaxia ID = 5 y 300904. Ellos observaron que la transformación ocurre, en la mayoría de los casos, cuando la galaxia atraviesa el R_{200} . En nuestro caso, la drástica remoción de gas ocurre al llegar al pericentro de su órbita. Esto puede estar relacionado con el hecho de que la presión de barrido depende, entre otras cosas, de la masa del grupo. Esto explicaría por qué la galaxia 300904 a $z = 0$ conserva gas frío y SFR pero su morfología es lenticular.

La galaxia ID = 117253, si bien experimenta una fusión, y el lapso de tiempo entre la fusión y la extinción de la formación estelar concuerda con aquel sugerido por [Deeley et al.](#)

(2021), la pérdida de la formación estelar (gas frío) ocurre tan rápido que la galaxia también encaja en el escenario de pérdida de gas por la presión de barrido. Estos hechos sugieren que el ambiente podría estar afectando a la galaxia, aunque se encuentra lejos de la región más internas del cúmulo. Una posible explicación es que en su caída hacia el cúmulo, la galaxia esté atravesando un filamento. En el futuro cercano estudiaremos la influencia del ambiente utilizando catálogos de filamentos disponibles en la colaboración Illustris.

Deeley et al. (2021) observaron que galaxias aisladas o en ambientes de poca densidad, al no recibir un influjo de gas, la formación estelar se va apagando poco a poco y agotando el gas. La galaxia ID = 404818 parece estar en un ambiente de estas características, pues su grupo huésped no es masivo y gran parte de la extinción de la formación estelar ocurre fuera del R_{200} , cuando la galaxia ya es satélite y carece de flujos de gas frío de galaxias satélite de ella misma. Adicionalmente, su transformación en una galaxia pasiva comienza más de 6 Gyr después de la última fusión.

En un trabajo reciente de Deeley et al. (2020) utilizaron el relevamiento SAMI (Green et al., 2018) de espectroscopía de unidad de campo integral (Integral field Unit, IFU), para estudiar las características cinemáticas de una muestra de 219 galaxias lenticulares en el Universo cercano. Encontraron que aquellas con mayor grado de soporte por rotación (medido a partir del cociente entre la velocidad de rotación y la dispersión de velocidades radial) tienden a ser más consistentes con un origen de galaxia espiral desvanecida (formada por efectos de ambiente), mientras que las de menor soporte por rotación son más propensas a ser originadas por fusiones. Además, aquellas galaxias con mayor grado de soporte de rotación tienden a estar localizadas en ambientes de alta densidad con mayor frecuencia.

Suponiendo que las galaxias lenticulares son la transformación morfológica de las galaxias espirales, es esperable que en una galaxia espiral desvanecida la distribución del espacio de las fases del contenido estelar no variará considerablemente y por lo tanto que mantenga su grado de soporte rotacional. Debido a alta velocidad relativa entre galaxias en cúmulos y grupos de alta masa, la ocurrencia de fusiones se espera que sea menor que en ambientes menos densos (Barnes & Hernquist, 1992). Con el objetivo de testear esta hipótesis, en la Fig. 4.2 realizamos el mismo gráfico que en la Fig. 3.10 pero solo para galaxias lenticulares. Estas fueron separadas en galaxias centrales (rojo) y galaxias satélite (naranja). Observamos que las galaxias satélite tienen en promedio un soporte rotacional mayor que las centrales y coincide con lo hallado

4. Discusión

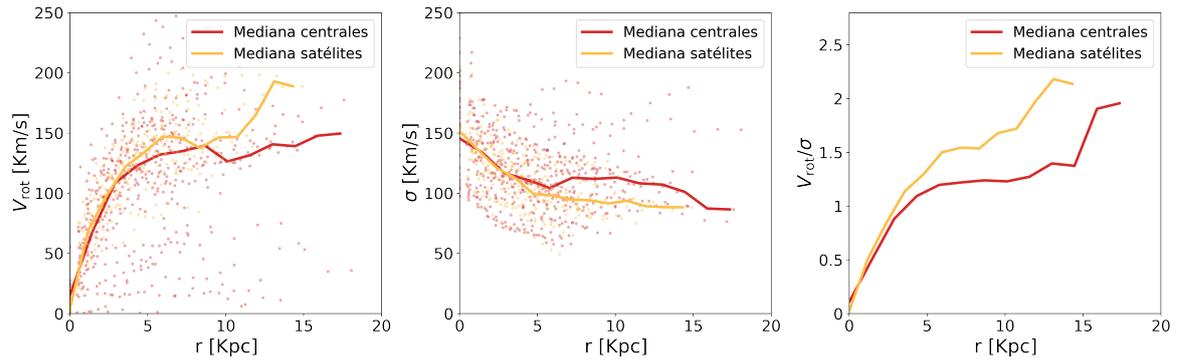


Figura 4.2. *Panel izquierdo:* Medianas de las velocidades de rotación para galaxias lenticulares centrales (rojo) y para galaxias lenticulares satélites (naranja) a $z = 0$. *Panel central:* Medianas de las dispersiones de velocidades en la línea de la visual para la misma submuestra del panel izquierdo. *Panel derecho:* Medianas del cociente entre velocidades en la línea de la visual y la dispersión de esta, para la misma submuestra del panel izquierdo.

por [Deeley et al. \(2020\)](#). Mas aún, si comparamos con la Fig. 3.10 la cinemática de las galaxias lenticulares satélite es similar a la cinemática de las galaxias espirales, dándole soporte a la idea de que, en general, galaxias lenticulares satélite modifican su morfología por efectos de ambiente más que por fusiones, las cuales podrían alterar fuertemente la cinemática luego de la fusión.

Capítulo 5

Conclusiones

Analizamos las propiedades de una muestra de 287 galaxias de disco en un intervalo de masas cercano a la masa de la Vía Láctea y M31. Encontramos que alrededor del 23 % tienen una morfología de galaxia lenticular. Las propiedades generales de la muestra de galaxias simuladas son consistentes con las propiedades de galaxias lenticulares observadas:

- Las galaxias lenticulares simuladas de nuestra muestra tienden a ser objetos enrojecidos. Más del 77 % tiene un índice de color > 0.6 mientras que en el grupo de las galaxias espirales 34 % supera ese umbral (ver Fig. 3.4).
- Las galaxias lenticulares son, en promedio, pasivas desde hace más de 2 Gyr y la evolución de la SFR en los dos tipos de galaxias de disco difiere considerablemente (ver Fig. 3.5).
- La fracción de gas frío disponible es generalmente menor en las galaxias lenticulares de nuestra muestra, ya que el 75 % de las galaxias lenticulares no supera la fracción de 0.05 de gas frío con respecto a su masa estelar. Mientras que para galaxias espirales el 69 % supera ese umbral. Las medianas de las distribuciones de la fracción gas frío son 0.008 y 0.098 para galaxias lenticulares y espirales, respectivamente (ver Fig. 3.6).
- Las medianas de los perfiles radiales de V_{rot} muestran que no hay diferencias significativas en ambos tipos de galaxias en las regiones centrales del disco. Sin embargo la mediana de la dispersión σ_V es mayor para galaxias lenticulares y estas están menos soportadas por rotación. A su vez, encontramos que las galaxias lenticulares satélite

5. Conclusiones

están más soportadas por rotación, en promedio, respecto a las lenticulares centrales (ver Fig. 4.2).

Encontramos que las fusiones galácticas están probablemente involucradas en la formación y/o transformación morfológica de galaxias lenticulares a partir de un número de correlaciones encontradas en nuestra muestra de galaxias:

- Las galaxias lenticulares sufren mas fusiones significativas en promedio que las galaxias espirales (medianas de 9 y 7, respectivamente) (ver Fig. 3.11).
- Los satélites involucrados en la UFS de galaxias lenticulares son, en promedio, ligeramente más masivos que aquellos involucrados en la UFS de galaxias espirales. La mediana de la distribución de UFS de galaxias lenticulares es $\tilde{\mu}_{len} = 11.27$ y la de galaxias espirales es $\tilde{\mu}_{esp} = 11.16$ (ver Fig. 3.12).
- La UFS ocurre a tiempos mas tardíos, en promedio, en las galaxias lenticulares respecto a las UFS de las galaxias espirales. La mediana de la distribución de LBT de la UFS es de 7 Gyr para las galaxias lenticulares y de 7.7 Gyr para las galaxias espirales (ver Fig. 3.12).

Observando la evolución en la SFR y en el contenido de gas frío durante la caída de galaxias lenticulares que son satélite a $z = 0$ hemos encontrado que:

- Galaxias lenticulares que ‘caen’ en un ambiente denso, pierden sus reservas de gas frío y su SFR en un corto período de tiempo cuando alcanzan las regiones internas del grupo o cúmulo, por ejemplo, su pericentro de órbita o el R_{500} del grupo FoF al cual pertenece (Fig. 3.13, Fig. 3.18, Fig. 3.17).
- En galaxias lenticulares satélite a $z = 0$ pero que han sido centrales durante la mayor parte del tiempo las fusiones significativas son las responsables de la transformación morfológica en lenticulares (Fig. 3.16, Fig. 3.14).
- Galaxias de disco aisladas o en ambientes pocos densos y con pocas fusiones significativas o solo a tiempos muy tempranos, se vuelven pasivas debido a su aislamiento al no recibir influjos de gas frío que las reactiven (Fig. 3.19).

Observamos además que no todas las galaxias lenticulares que son satélite a $z = 0$ lo hacen debido a efectos de ambiente. Sin embargo, al estudiar la cinemática separando en galaxias lenticulares centrales y satélites, en promedio, aquellas que son satélites se vuelven lenticulares debido a la remoción de gas por presión de barrido pues conservan la cinemática de galaxias espirales (Fig. 4.2).

5.1. Trabajo a futuro

Estudiaremos en mayor profundidad la cinemática de galaxias lenticulares para las cuales tengamos mayores indicios que se formaron por efectos del ambiente, con el objetivo de encontrar diferencias respecto a aquellas que se formaron a partir de fusiones. Indagaremos con mayor profundidad en el efecto de las fusiones en la formación y transformación morfológica hacia galaxias lenticulares, estudiando casos particulares.

Estudiaremos el escenario en el que las galaxias lenticulares sufren la transformación morfológica en grupos, previamente a caer en grupos más masivos, o cúmulos (Just et al., 2010).

Usaremos los identificadores de las galaxias que fueron clasificadas en Deeley et al. (2021) utilizando las Illustris TNG100 para buscar sus contrapartes en TNG50. De esta manera buscaremos responder interrogantes tales como: ¿Cómo afecta la resolución de la simulación a la identificación de estructura espiral en galaxias de disco? ¿Cómo afecta la resolución al resultado de una fusión? ¿Cómo afecta la resolución a la extinción del gas por presión de barrido?

En este trabajo de tesis nos enfocamos casi exclusivamente en fenómenos exógenos que pueden explicar la formación y/o transformación morfológica de galaxias lenticulares. En una próxima etapa haremos hincapié también en los procesos internos y seculares, tales como AGN o inestabilidad de disco, para entender los casos en los que la formación estelar se extingue sin existir ningún evento disparador externo.

Bibliografía

- Barnes J. E., Hernquist L., 1992, *ARA&A*, **30**, 705
- Bekki K., 1998, *ApJ*, **502**, L133
- Benitez-Llambay A., 2015, py-sphviewer: Py-SPHViewer v1.0.0, [doi:10.5281/zenodo.21703](https://doi.org/10.5281/zenodo.21703),
<http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.21703>
- Bruzual G., Charlot S., 2003, *MNRAS*, **344**, 1000
- Conselice C. J., 2006, *MNRAS*, **373**, 1389
- Crowl H. H., Kenney J. D. P., van Gorkom J. H., Vollmer B., 2005, *AJ*, **130**, 65
- Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M., 1985, *ApJ*, **292**, 371
- Deeley S., et al., 2020, *MNRAS*, **498**, 2372
- Deeley S., Drinkwater M. J., Sweet S. M., Bekki K., Couch W. J., Forbes D. A., Dolfi A.,
2021, *MNRAS*, **508**, 895
- Dolag K., Borgani S., Murante G., Springel V., 2009, *MNRAS*, **399**, 497
- Ebeling H., Stephenson L. N., Edge A. C., 2014, *ApJ*, **781**, L40
- Freeman F. F., Jones B. B., 1970, , **15**, 288
- Gargiulo I. D., et al., 2022, *MNRAS*, **512**, 2537
- Genel S., et al., 2014, *MNRAS*, **445**, 175
- Green A. W., et al., 2018, *MNRAS*, **475**, 716
- Hubble E. P., 1926, *ApJ*, **64**, 321
- Just D. W., Zaritsky D., Sand D. J., Desai V., Rudnick G., 2010, *ApJ*, **711**, 192
- Marinacci F., Pakmor R., Springel V., 2014, *MNRAS*, **437**, 1750
- Naiman J. P., et al., 2018, *MNRAS*, **477**, 1206
- Nelson D., et al., 2018, *MNRAS*, **475**, 624
- Nelson D., et al., 2019, *Computational Astrophysics and Cosmology*, **6**, 2

BIBLIOGRAFÍA

- Pillepich A., et al., 2018a, *MNRAS*, **473**, 4077
- Pillepich A., et al., 2018b, *MNRAS*, **475**, 648
- Planck Collaboration 2020, *A&A*, **641**, A6
- Planck Collaboration et al., 2016, *A&A*, **594**, A13
- Poggianti B. M., et al., 2017, *Nature*, **548**, 304
- Querejeta M., et al., 2015, *Galaxies*, **3**, 202
- Quilis V., Moore B., Bower R., 2000, *Science*, **288**, 1617
- Rodriguez-Gomez V., et al., 2015, *MNRAS*, **449**, 49
- Sánchez et al. 2022, *arXiv e-prints*, p. [arXiv:2211.16593](https://arxiv.org/abs/2211.16593)
- Sandage A., Visvanathan N., 1978, *ApJ*, **223**, 707
- Smoot G. F., et al., 1992, *ApJ*, **396**, L1
- Spergel D. N., et al., 2007, *ApJS*, **170**, 377
- Springel V., 2010, *MNRAS*, **401**, 791
- Springel V., White S. D. M., Tormen G., Kauffmann G., 2001, *MNRAS*, **328**, 726
- Springel V., et al., 2018, *MNRAS*, **475**, 676
- Tapia T., Eliche-Moral M. C., Aceves H., Rodríguez-Pérez C., Borlaff A., Querejeta M., 2017, *A&A*, **604**, A105
- Temi P., Brighenti F., Mathews W. G., 2009, *ApJ*, **707**, 890
- Vogelsberger M., et al., 2014, *MNRAS*, **444**, 1518
- Weinberger R., et al., 2017, *MNRAS*, **465**, 3291
- Xu G., 1995, *ApJS*, **98**, 355