

# The Impossible Early Galaxy Problem

Santiago Arranz Sanz

June 2019

## Introduccion

Después de leer varios artículos en los que trata dicho problema y derivados he llegado a la conclusión que el problema base es la discordancia del modelo actual de fusión jerárquica con la falta de observación de galaxias transitorias entre los halos iniciales y las galaxias más masivas en los redshift  $z \sim 4 - 6$ . Veamos algunos resúmenes de los artículos principales.

## The Impossible Early Galaxy Problem

[Steinhardt et al., 2016] Según el paradigma actual de la fusión jerárquica de galaxias en el modelo cosmológico estandar, en torno a los redshift  $z \sim 4 - 6$  ha de existir la transición de las galaxias más masivas desde los halos iniciales que acretan masa a las últimas fases de evolución bariónica vista en las galaxias con formación estelar y *quasars*. Sin embargo, ninguna evidencia ha sido encontrada en muchos estudios a alto redshift como el CFHTLS, CANDELS y el SPLASH, los primeros estudios para probar la masa alta final en estos redshift. Considerando que el ratio masa estelar- masa halo (SMHMR) estimado a bajo redshift permaneciera constante en  $z \sim 6 - 8$ , CANDELS y SPLASH darían mayores ordenes de magnitud de número de halos de masa  $M \sim 10^{12-13} M_{\odot}$  que los que se podrían haber formado a esos redshift, esto se conoce como el problema de la galaxia masiva temprana imposible. En el artículo de Steinhardt et al. [2016] consideran los posibles errores sistemáticos que puedan explicar esta contradicción de teoría y observaciones en los modelos de síntesis estelar usados para estimar los parámetros físicos y en los escenarios posibles de formación galáctica. Es posible que las incertidumbres desconocidas reduzcan la disparidad entre observaciones y simulaciones de CMD tomando una visión conservadora de las observaciones, aun así existirían tensiones considerables con la teoría.

Existe un consenso bastante amplio en la distribución de masa y redshift de los halos producidos en el colapso inicial de las pequeñas fluctuaciones de densidad en el universo temprano y el modelo de fusión jerárquico. Para la cosmología estándar la función de masa es sencilla de calcular. Este consenso se basa en la idea de la rápida evolución en la densidad de halos masivos en  $z > 4$  que deberían ser observacionalmente evidente en las funciones de masa y luminosidad galácticas. Hasta hace poco el catálogo de galaxias a redshift  $z > 6$  era limitado y sesgado a las galaxias más brillantes, galaxias individuales masivas y *quasars*. Sin embargo con los nuevos estudios como el CANDELS o el SPLASH se ha podido probar la función de luminosidad y de masa para galaxias en el rango de  $z \sim 4 - 8$ , lo que nos permite calcular la función de masa del halo correspondiente a dicho rango.

Trabajos como el de Finkelstein et al. [2015] muestra las tensiones ocasionadas en  $z > 4$  entre la evolución esperada de la función de masa del halo y las funciones de luminosidad y de masa de las galaxias.

## An increasing stellar baryon fraction in bright galaxies at high redshift.

En el artículo de Finkelstein et al. [2015] se centran en el estudio de la función de luminosidad en el UV utilizando observaciones realizadas por el HST con el detector WFC3 y el instrumento IRAC del Spitzer en una muestra de 7500 galaxias con una magnitud alrededor de  $M_{UV}^* \simeq -21$  sobre el rango de redshift  $z \sim 4 - 8$ , ya que pretenden entender los procesos físicos que regulan la abundancia de galaxias brillantes en el universo distante. Los parámetros cosmológicos usados en Finkelstein et al. [2015] son los dados por WMAP7, donde  $H_0 = 70.2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.275$  y  $\Omega_\Lambda = 0.725$ . De las 7500 galaxias de muestra se centran en 150,75,28,18 y 3 galaxias de  $M_{UV} < -21$  en redshift  $z = 4, 5, 6, 7$  y 8 respectivamente, donde los intervalos de redshift son de un grosor de  $\Delta z = 0.5$  centrados en los redshift marcados. **Dado que los periodos temporales no siguen una relación lineal con el redshift usar un intervalo de redshift constante para todos los casos no debería de ser correcto, ya que un intervalo de  $\Delta z = 0.5$  en  $z = 7$  recoge un mayor intervalo temporal que en  $z = 4$  ¿?**

### Poblaciones estelares en galaxias brillantes en UV

Gracias a los últimos estudios de las pasadas décadas se han facilitado las medidas de la función de luminosidad en el UV, la cual cuantifica las abundancias relativas de galaxias sobre un amplio rango dinámico en luminosidad. Como la luz UV es un indicador de la actividad de formación estelar, la integral de la función de luminosidad UV es un indicador de la densidad de formación estelar. La función de luminosidad es parametrizada con la función de Schechter de la forma que se ajusta a una ley de potencias en luminosidades bajas y cae exponencialmente en luminosidades altas. Dichos parámetros se corresponden con la luminosidad característica  $M_{UV}^*$ , la pendiente  $\alpha$  y la normalización  $\phi^*$ . Estudios anteriores vieron que estos parámetros evolucionaban según el redshift, decayendo tanto  $M_{UV}^*$  como  $\alpha$  según incrementa el redshift. Esta “evolución luminosa” de la función de luminosidad fue ampliamente aceptada como ajuste general de la tendencia observable en la evolución de la densidad de la formación estelar. Sin embargo, trabajos más recientes mostraron que la imagen dibujada era incompleta. Las primeras evidencias vienen de trabajos donde muestran un mayor número de lo esperado de galaxias brillantes sobre redshift  $z = 7$ .

Estudios posteriores confirmaron este exceso de galaxias brillantes y concluyeron que no era un efecto atribuible a lentes gravitacionales. Se calculó la función de luminosidad UV y se observó que era contraria a los resultados derivados de conjuntos de datos más pequeños, la luminosidad característica  $M_{UV}^*$  era significativamente independiente del redshift entre 4,5,6 y 7. La continuidad del valor de  $M_{UV}^*$  se rompe al llegar a  $z \sim 8$ , donde este cae. Además, mientras que las galaxias en general llegan a ser menos comunes en redshift altos - consistente con la caída en la densidad de la formación estelar- las galaxias brillantes permanecieron relativamente comunes en el universo distante. **Esto puede ser posible por un bias observacional, sin embargo no ¿cómo el bias observacional puede explicar que el número de galaxias brillantes permanezca constante mientras que la densidad de galaxias en general decrece?. Quizás estas galaxias brillantes son descendientes de galaxias menos brillantes e invisibles al HST como las tratadas en Wang et al. [2019] y el efecto bias este provcado por las galaxias no observables en el óptico e infrarrojo cercano. Otra posibilidad es que no sea un efecto bias lo que podrá llevar a la conclusión que estas galaxias brillantes se formaron primero que el resto.**

Tras una criba de galaxias tras los ajustes de la distribución espectral de energías (SED) finalmente el estudio se quedan solo con galaxias entre los redshift  $z \sim 4 - 7$ . Los parámetros de la mediana del ajuste con un intervalo de confianza de  $1\sigma$  no evolucionan significativamente, es decir, podemos hablar en general en redshift  $z \sim 4 - 7$  que las galaxias son moderadamente masivas  $\log[M_*/M_\odot] \sim 9.6 - 9.9$ , algo jóvenes con edades  $< 100 \text{ Myr}$ , tienen atenuación debida al polvo nada despreciables con  $E(B - V) = 0.07 - 0.13$  y alto ratio de formación estelar  $\text{SFR} \sim 40 - 60 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ . **Aun así parece que hay un ligero descenso del valor de la mediana en 0.2 dex, comparable a los márgenes de error calculados a diferencia de la masas de halo calculadas. Quizás el problema está en los márgenes de error del redshift 7 que parece ser muy amplio. Esto hace que los autores digan que no parece haber una relación entre redshift y el valor de estos parámetros, quizás un ligero aumento del SFR, Masa estelar y de la atenuación debida al polvo según decrece el redshift, aunque en muchos casos entran dentro del intervalo de confianza Tabla 1.**

Redshift	Number	$\log(M_*/M_\odot)$	Age (Myr)	$E(B - V)$	SFR ( $M_\odot \text{ yr}^{-1}$ )
z=4	94	$9.86 \pm 0.04$	$44 \pm 2$	$0.13 \pm 0.01$	$56 \pm 4$
z=5	46	$9.80 \pm 0.06$	$35 \pm 2$	$0.12 \pm 0.02$	$52 \pm 10$
z=6	19	$9.78 \pm 0.07$	$40 \pm 4$	$0.07 \pm 0.02$	$40 \pm 8$
z=7	14	$9.64 \pm 0.13$	$29 \pm 8$	$0.09 \pm 0.02$	$41 \pm 9$

Table 1: Medianas de las propiedades físicas de galaxias con  $M_{UV} < -21$  sacada de Finkelstein et al. [2015]

El paper Finkelstein et al. [2015] confirma que las cantidades de polvo observadas en las galaxias masivas/brillantes en  $z = 4 - 7$  son equivalentes. Además, las galaxias menos brillantes y masivas parecen tener menos cantidad de polvo a altos redshift, lo que no es cierto en galaxias brillantes, que confirmó ALMA detectando emisión de polvo en redshift  $z \sim 5 - 7.5$ . Si existiera una evolución de la atenuación debida al polvo en las galaxias mas brillantes según evolucione el redshift podría haber llevado a seleccionar una masa estelar inferior dada una magnitud UV, pero esto no ocurre lo que nos lleva al resultado de que la masa estelar de dichas galaxias brillantes permanecen constante sobre dicho intervalo de redshift<sup>1</sup>.

Una pregunta interesante que plantea el artículo de Finkelstein et al. [2015] es como las galaxias brillantes en UV en redshift 2-3 están relacionadas con las galaxias brillantes en redshift 6-8. Es decir, desde el punto de vista de la fusión jerárquica, ¿las galaxias brillantes de redshift bajos son descendientes de las galaxias brillantes de redshift altos? ¿Son las galaxias de redshift altos progenitores de las de redshift bajos? Además, la fusión de galaxias complica la comparación directa basada en el número de densidad de galaxias en cada redshift. Algunos estudios han intentado comparar galaxias en diferentes redshift con el mismo número de densidad mostrando que tal comparación es adecuada para identificar los descendientes de bajo redshift de poblaciones de altos redshift (Para nuestro caso de galaxias brillantes/masivas). Esto es debido a que la mayoría de las galaxias masivas de poblaciones de alto redshift no terminan fusionándose dentro de sistemas más masivos. Sin embargo, el inverso no es cierto. Es decir, el número de densidad de progenitores en redshift altos de poblaciones de galaxias en bajo redshift son comparablemente mayores a los de estos últimos (Lo que quiere decir es que al contrario que pasa con los descendientes de galaxias masivas, donde el número de densidad se mantiene ya que no ocurren grandes fusiones que aumenten significativamente la masa de estas galaxias masivas a altos redshift, el número de progenitores a alto redshift de galaxias masivas de bajo redshift es mucho mayor, ya que no solo contribuyen galaxias masivas de alto redshift a la formación de galaxias masivas de bajo redshift, sino la fusiones de galaxias más pequeñas.).

Las galaxias  $M_{UV} < -21$  en  $z \sim 2 - 3$  son los descendientes más plausibles de galaxias de alto redshift más débiles de magnitud, donde concluye el artículo de Finkelstein et al. [2015] que comparando galaxias con un brillo similar o galaxias a bajo redshift con una abundancia similar, las galaxias brillantes UV en  $z > 6$  son significativamente más jóvenes y menos masivas, pero tienen un SFR similar inferido del brillo similar en UV y exhiben relativamente una evolución escasa de la atenuación debida al polvo en estos rangos del espectro electromagnético.

### Masa de los Halos de las galaxias brillantes en UV

Con una muestra de galaxias a  $z > 6$  donde los niveles de SFR y masa estelar se muestran relativamente altos se plantea la posibilidad de que los mecanismos de enfriamiento del gas y su posterior conversión a estrellas difiera de los que ocurren a redshift más bajos. Buscando una respuesta a esta cuestión, se compara

<sup>1</sup>Las partes en azul no las veo muy claras.

la masa estelar  $M_*$  de estos sistemas con la fracción de masa bariónica del halo  $(\Omega_b/\Omega_m)M_h$  considerando una fracción bariónica cósmica  $(\Omega_b/\Omega_m) = 0.1669$ . El agrupamiento de estos sistemas habría proporcionado las restricciones más directas sobre la masa del halo, pero los números y las densidades de la superficie de estas galaxias, en particular a  $z > 7$ , aún no son suficientes para permitir un análisis de agrupamiento robusto. Por ello, se utilizó la concordancia de abundancia para estimar las masas de halo para las galaxias brillantes.

La concordancia de abundancia supone que la luminosidad de la galaxia o masa estelar sea una función monótona de la masa del halo. Se supone que las galaxias más luminosas viven en los halos más masivos. Este es ciertamente un supuesto plausible entre las galaxias luminosas que se estudian en Finkelstein et al. [2015], pero quizás no lo sea para las galaxias enanas. A partir de las simulaciones de Bolshoi<sup>2</sup> con el modelo  $\Lambda$ CMD, se selecciona una snapshot cercana al redshift que se pretende estudiar. Una vez identificado los halos virializados se establecen un ranking por masa, para después de ello realizar lo mismo con las galaxias observadas esta vez usando el criterio de luminosidad en vez del de masa y colocar cada galaxia en halo correspondiente a su rango. Este procedimiento es usado para realizar la unión de la estadística de las galaxias con la de los halos. **Esta parte no la entiendo muy bien, ¿identifican simplemente las galaxias más luminosas con los halos más masivos? ¿Dos galaxias masivas no pueden pertenecer al mismo halo? Esto daría por defecto un menor ratio de SMHM ya que se impide que las galaxias menos masivas estén en halos más masivos.**

Por otro lado se usa la parametrización de Shechter vista anteriormente de la función de luminosidad para establecer la abundancia de galaxias con una magnitud menor a  $M_{UV} < -21$  de la muestra analizada.<sup>3</sup> Comparando dicha función con la función de masa del halo obtenida del promedio en las snapshots seleccionadas en cada rango de redshift obtenemos una función que relaciona la luminosidad de las galaxias con la masa del halo en los que se hospedan, como se ve en la **Figura 1**. Con este procedimiento se obtiene unas masas de halo de  $\log M_h/M_\odot = 11.93, 11.68, 11.57$  y  $11.35$  en  $z = 4, 5, 6, 7$  respectivamente, donde los intervalos de confianza los calcularon a través de 1000 simulaciones MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*) obteniendo márgenes de  $0.01$ - $0.03$  grados de diferencia, lo que son relativamente pequeños dadas las magnitudes consideradas. **Aquí vuelve a aparecer la relación galaxias más luminosa halo más masivo dando una relación unívoca entre ambas variables ¿puede que esté aquí el error que desmintiese los resultados contradictorios con la teoría? Debe ser estudiado esta posibilidad.**

Conociendo los datos de masa estelar de las galaxias con  $M_{UV} < -21$  y la masa del halo de las que son huéspedes dichas galaxias Finkelstein et al. [2015] enfrentan ambos datos en lo que denominan *Stellar Baryon Fraction* (SBF) la cual la definen como la fracción  $M_*/M_h$  de masa estelar del halo versus la masa total (SMHM) en unidades de la fracción de materia bariónica cósmica  $(\Omega_b/\Omega_m) = 0.1669$ . Comparando el SBF con el redshift se encuentra que existe un aumento a medida que crece el redshift con un valor de  $dSBF(z)/dz = 0.024 \pm 0.007$  como se muestra en la **Figura 2**.

Dado que la mediana de las magnitudes de las muestras seleccionadas se encontraban muy cerca del valor  $M_{UV}^* = -21$  el estudio decidió volver a calcular la evolución del SBF para magnitudes  $M_{UV} = -21 \pm 0.25$ , de esta manera se obtuvo que la SBF volvía a tener una evolución positiva según crecía el redshift  $dSBF(z)/dz = 0.0123 \pm 0.0041$ , una pendiente con un  $3\sigma$  de significancia. Con ello concluyeron que el SBF aumentaba con redshift.

Los resultados son comparados con los de Behroozi et al. [2013], Barone-Nugent et al. [2014], Lee et al. [2006] y Overzier et al. [2006], donde los autores encuentran que sus predicciones de los valores  $\log(M_h/M_\odot)$  y SMHM son ligeramente mayores que las estimadas por otros métodos para los diferentes rangos de redshift escogidos, pero dichas diferencias son muy pequeñas y explicables según los autores por el hecho de que los estudios anteriores trabajan con muestras más débiles de luminosidad  $M_{UV} < -20, -19$ . Dichas similitudes al tratarse de metodologías distintas parecen corroborar los resultados predichos.

<sup>2</sup>Las simulaciones de Bolshoi usa  $2048^3$  partículas en un volumen de  $250(Mpc/h)^3$ , lo que establece una resolución de  $\log(M_h/M_*) = 10$  que es lo suficientemente pequeña para el análisis de las galaxias brillantes/masivas del análisis.

<sup>3</sup>Dadas las incertidumbres actuales de la función de masa estelar, trabajar con la función de luminosidad aporta una alternativa mucho más robusta que la masa estelar, aunque en un futuro se debería trabajar con la función de masa estelar ya que ofrece un enlace más directo que la luminosidad en UV.

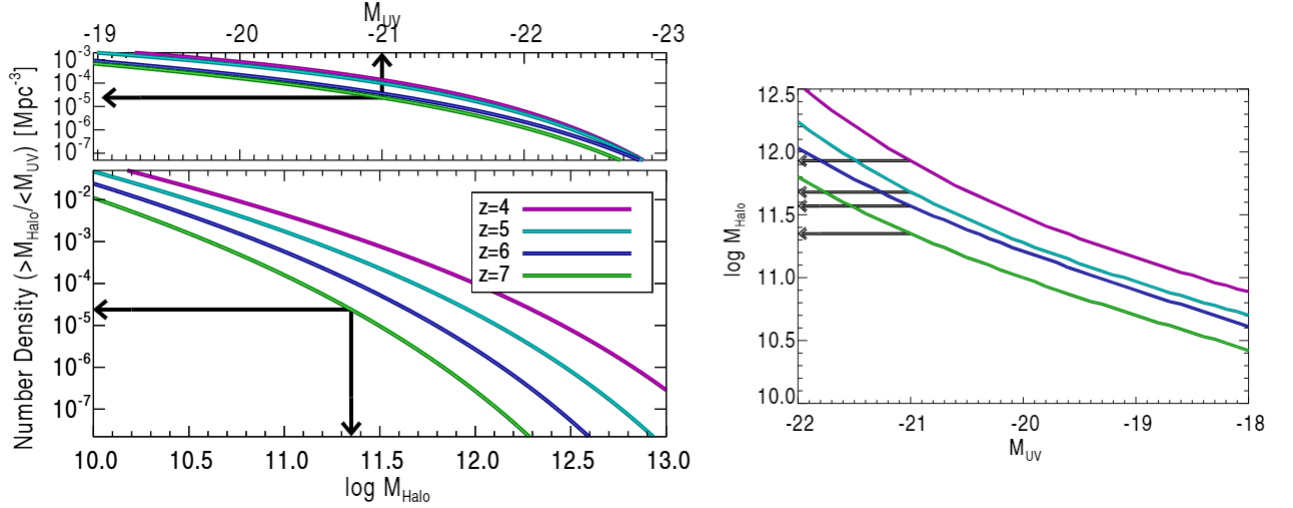


Figure 1: Imagen sacada de Finkelstein et al. [2015]. Arriba a la izquierda: la función de luminosidad acumulada en  $z = 4, 5, 6$  y  $7$ . Abajo a la izquierda: funciones de masa acumulada del halo en  $z = 4, 5, 6$  y  $7$ , derivadas del promedio de volumen de las funciones de masa de snapshot de Bolshoi en los mismos rangos de redshift como los que definen las muestras de galaxias. Las flechas muestran los resultados de la coincidencia de la abundancia en  $z = 7$ , donde las galaxias con  $M_{UV} < -21$ , que tienen  $n(M_{UV} < -21) = 2.5 \times 10^{-5} \text{Mpc}^{-3}$ , tienen masas halo de registro  $(M_h/M_\odot) = 11.35$ . A la derecha: relación entre la magnitud absoluta de UV observada y la masa de halo derivada de la combinación de abundancia en los redshift de interés. Las flechas denotan las masas de halo en la magnitud de interés de  $M_{UV} = -21$ .

Sin embargo dichas diferencias hacen plantearse en el artículo los efectos de la dispersión en UV, aplicando las correcciones sacadas de la relación entre luminosidad y masa estelar lo que hace corregir la luminosidad en 0.3 dex. Recalculando las estimaciones de masa de halo se obtiene los valores de masa característica de  $\log(M_h/M_\odot) = 1.65, 11.44, 11.36$  y  $11.13$  para los rangos de redshift centrados en  $z = 4, 5, 6$  y  $7$  respectivamente. Esto hace aplicar una corrección de 0.2 y 0.25 dex por debajo de las estimaciones de la masa del halo lo que se asemeja más a los resultados de Behroozi et al. [2013], Barone-Nugent et al. [2014], Lee et al. [2006] y Overzier et al. [2006]. Dicha variación es muy parecida entre los diferentes rangos de redshift lo que hace permanecer igual los resultados de evolución de la SBF, sin embargo si para redshift superiores los efectos sería más significativos.

Una fuente de posibles *bias* en la estimaciones del SMHM son las numerosas suposiciones que se requieren para poder estimar la masa estelar del halo, ¿podría alguna de ellas explicar que las masas estelares permanezcan casi idénticas entre  $z = 4 - 7$  mientras la masa del halo va decreciendo? Dichas fuentes pueden ser el *slope* de la función de masa inicial (IMF) calculada por la función de Salpeter., donde dicho *slope* se ha considerado en masas altas constante en los distintos rangos de redshift **Dejando a un lado la pendiente escogida de la función IMF, el tipo de función de IMF no creo que tenga mucho que ver ya que para masas altas todas las funciones coinciden bastante..** Otra fuente de bias es la parametrización de SFH, la cual es potencialmente más problemática, aunque los resultados recientes indican que, al menos en promedio, los SFR a escala de galaxias son funciones suaves del tiempo. Para intentar ver si existen posibles errores sistemáticos graves en los cálculos de la masa estelar se ha comparado los SED de los distintos rangos de redshift enfrentando el flujo medido de cada una de las galaxias medidas versus la longitud de onda. Esta comparación se ha escalado verticalmente al nivel del redshift  $z=6$  para así compara su forma. Se ha comprobado una gran concordancia entre las formas de los SED (**Figura 3**) para los distintos rangos de redshift lo que ha hecho casi descartar los errores sistemáticos graves en la estimación de la masa estelar. **Dando por buena la suposición de que con SED comparables podemos descartar fuertes efectos de bias, en dicha comparación no da ningún dato más que el visual, no compara los distintos sed con test estadísticos (o por lo menos no da los resultados).**

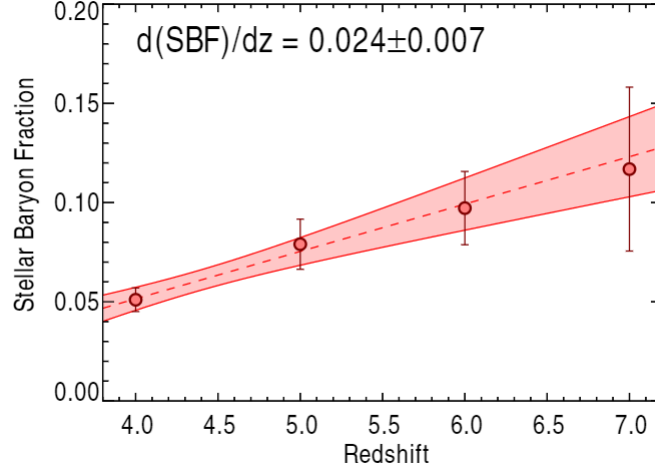


Figure 2: Imagen sacada de Finkelstein et al. [2015]. La (SBF) en galaxias brillantes ( $M_{UV} < -21$ ) de  $z = 4$  a 7. Definimos SBF como la relación de masa estelar a halo en unidades de la fracción de masa de barión cósmica  $\Omega_b/\Omega_m$ . Encontramos que el SBF aumenta al aumentar el redshift, lo que puede ser responsable de la aparente falta de evolución en la magnitud característica  $M_{UV}^*$  observada en este rango de redshift.

Redshift	$\log n(M_{UV} < -21)$ ( $\text{Mpc}^{-3}$ )	$\log M_h$ ( $M_\odot$ )	Median $M_*/M_h$	SBF
$z=4$	-3.86	$11.93^{+0.03}_{-0.03}$	$0.009 \pm 0.001$	$0.051 \pm 0.006$
$z=5$	-4.01	$11.68^{+0.04}_{-0.03}$	$0.013 \pm 0.002$	$0.079 \pm 0.013$
$z=6$	-4.45	$11.57^{+0.06}_{-0.03}$	$0.016 \pm 0.003$	$0.097 \pm 0.019$
$z=7$	-4.62	$11.35^{+0.09}_{-0.06}$	$0.020 \pm 0.007$	$0.117 \pm 0.043$

Table 2: Propiedades de los halos de materia oscura de las galaxias estudiadas, sacada de Finkelstein et al. [2015]

Si comparamos estos resultados con un test estadístico quizás si encontremos que existe un bias que pueda afectar a la conclusión de que la masa estelar permanece constante lo que podría afectar al resultado de que el SBF crece según el redshift.

Los efectos por la no detección de las galaxias polvorientas de formación estelar, es decir, las galaxias con un brillo muy alto en UV pero que son absorbido por su extremadamente alta cantidad en polvo (estas galaxias son denominadas galaxias sub-milimétricas) podrían sesgar nuestra masa de halo estimada (ya que estaríamos colocando nuestras galaxias observadas en los halos más masivos de nuestro volumen, que realmente estarían ocupadas por estas galaxias polvorientas) y además se verían intensificados junto con el hecho de que el número de densidad de estas galaxias puede variar con el redshift. Si la abundancia de SMG evoluciona con el redshift  $z \geq 4$ , entonces no tener en cuenta estos sistemas sesgaría nuestras masas de halo de manera diferente en los diferentes redshift, sesgando nuestra evolución inferida del SBF. Los efectos de estas galaxias son descartados por Finkelstein et al. [2015] ya que considera que es altamente improbable una abundancia grande de este tipo de galaxias en redshift  $z=7$  y que los efectos calculados en base a simulaciones de estas galaxias en redshift  $z = 4$  son del orden del 0.02 dex en  $\log(M_h/M_\odot)$ . Estas simulaciones se basan en el estudio de estas galaxias realizado en Casey et al. [2014] donde estiman la abundancia de este tipo de galaxias en  $z \sim 2$  y dan una estimación de la evolución según el redshift. La detección de ALMA de un gran número de galaxias masivas a  $z > 3$  en el campo CANDELS [Wang et al., 2019] indetectables con el HST

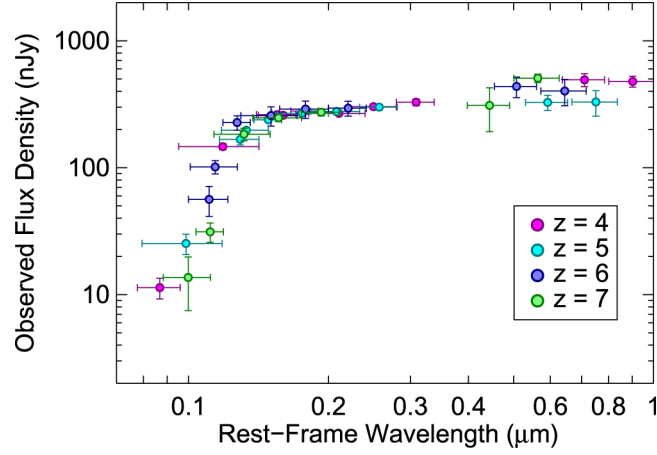


Figure 3: Comparación del flujo y la longitud de onda de las distintas muestras de galaxias medidas en los diferentes rangos de redshift escalado verticalmente a  $z = 6$ . Figura sacada de Finkelstein et al. [2015].

pone en cuestión este punto, ya que podría indicar una presencia relevante de este tipo de galaxias lo que modificaría los resultados expuestos en este paper.

## Discusiones

Revisar el paper de Wang et al. [2019] el cual ha detectado un cúmulo de galaxias muy masivas con bajo brillo UV debido al polvo a  $z > 3$  indetectables con HST y en el campo CANDELS, esto podría dar más info al trabajo.

El artículo de Finkelstein et al. [2015] plantea dos posibilidades que entran en contradicción con los hechos observados y que con estas observaciones es imposible de dilucidar más a allá de las siguientes suposiciones.

- 1) El primero de los escenarios posibles es que el gas galáctico a alto redshift tenga una mayor superficie de densidad  $\Sigma_g \propto f_{gas} M_h^{1/3} (1+z)^2$  donde  $f_{gas}$  denota la fracción de gas enfriado, es decir, en fase virializada. **No sé de donde sale dicha hipótesis y relación matemática, hay que revisar esta suposición en la bibliografía y sobre todo en Krumholz et al. [2011].** El tiempo típico de caída libre para el cual para el cual el ratio de conversión de gas a estrellas es proporcional a él, aunque sea con una constante de proporcionalidad pequeña [Krumholz et al., 2011], tiene la propiedad de que  $t_{ff} \propto (1+z)^{-3/2}$ . Sin embargo, las masas de los progenitores más masivos (MMP) de los halos que hospedan a nuestras galaxias observadas responden como  $M_{h,MMP}(z') = M_h(z) e^{-\alpha(z'-z)}$  donde  $\alpha \approx 1$  y  $z' > z$  es el redshift del progenitor. Por lo tanto podemos calcular el tiempo  $t_{grow}$  que tarda el progenitor en duplicar su masa.

$$t_{grow} \sim \left[ (1+z) H(z) \frac{d}{dz} \ln M_{h,MMP} \right] \propto (1+z)^{-5/2}$$

Esto significa que el ratio entre el tiempo de caída libre y el tiempo el cual el halo duplica su masa es proporcional  $t_{ff}/t_{grow} \propto (1+z)$ , sugiriendo que si los progenitores más pequeños no son eficientes en su formación estelar no contribuyendo con una masa estelar sustancial a la rama principal, debería ser progresivamente más difícil en los redshift altos convertir el gas adquirido en nuevas estrellas. **Al ser mas difícil esa conversión en masa estelar del polvo acretaado por las fusiones el ratio de masa estelar y masa halo ha de ser menor.** Por ejemplo, si un halo menor se fusiona con un progenitor en la rama principal en redshift altos va a tener mucho menos tiempo para que formar estrellas mientras por lo que la masa estelar no se ve afectada y el ratio de SMHM no se modifica. Sin embargo, en redshift mas bajos va a tener mucho más tiempo para formar nuevas estrellas y por tanto producto de la fusión



se van a poder formar nuevas estrellas que harán que aumente el SMHM con respecto al que había antes, esto debería de producir un aumento del SBF a medida que decrece el redshift contrario de lo que ocurre.

- II) En segundo lugar, la metalicidad del gas y la abundancia de polvo asociada parecen disminuir con el aumento del redshift y la disminución de la masa. Ya que el polvo y la metalicidad del gas son dos potentes herramientas en el enfriamiento del gas y en la obstaculación de la radiación UV, la tendencia observada del decrecimiento de la abundancia de polvo según aumenta el redshift podría tener un efecto dramático en la abundancia de gas frío ( $T < 1000K$ ) para el cual parece que ocurre la formación estelar. La caída de la abundancia del gas frío a medida que crece el redshift podría indicar también un ratio de formación estelar menor. El descubrimiento de Wang et al. [2019] de nuevas galaxias masivas fuera del alcance del HST podría echar a bajo esta suposición pues no se tiene en consideración la posible cantidad de polvo que pueden tener estas galaxias invisibles para el HST.

En ambos escenarios la SFR es mucho más bajo en redshift altos lo que hace suponer que el SMHM es más bajo a medida que avanzamos en redshift, contrario a lo que se puede ver en el paper de Finkelstein et al. [2015]. Sin embargo, el trabajo de Wang et al. [2019] descubre galaxias con una gran formación de estelar en  $z > 3$ , sin embargo no explica el porque parece que el SFR se mantuviera en dicho rango de redshift solo que es más alto de lo que se esperaría, ¿no?

Todo esto sugiere una tendencia contraria a la observada donde el SBF descendiera a medida que se avanza en redshift. Las especulaciones que realiza Finkelstein et al. [2015] para la explicación del aumento del SBF discuten diferentes especulaciones:

- Las observaciones implican una menor cantidad de gas frío disponible para la formación de estrellas en redshift bajos lo cual se podría explicar por el descenso de la densidad en el universo a medida que decrece el redshift. La transición de la fase del gas de caliente a fría ocurre en densidades de  $\sim 0.1 - 1 \text{ cm}^{-3}$  lo que podría implicar una menor fracción de masa de gas neutral en fase fría en redshift bajos. Además, la naturaleza del colapso del gas en el disco depende mucho de si la estructura gaseosa central (normalmente en forma de discos nubosos) está autogravitando de manera violenta. La formación estelar es más eficiente en grandes nubes de gas autogravitando donde dichas nubes se han observado formando estrellas en gran eficiencia en  $z \sim 3$ .
- Otra posibilidad es que estamos siendo testigos de los efectos del crecimiento del medio circumgaláctico (CGM) al rededor de las galaxias. Observaciones con el *Cosmic Origins Spectrograph* en el HST han revelado halos de gas ionizado en bajos redshift que contenían una fracción significativa de material bariónico sintetizado en metales. Es probable que el CGM creciera con el tiempo en forma del material empujado por las ondas de choque de las supernovas más violentas incrementando la temperatura del gas. El gas reprocesado podría haberse depositado en un CGM caliente e ionizado y haber inhibido la conversión de la fase del gas a fría. Sin embargo, la física del CGM aún no se comprende muy bien.
- Por último los *feedback* que construyen el medio circumgaláctico podría ser menos eficiente en redshift más altos incrementando la cantidad de gas frío disponible en la formación estelar. Se podría esperar que los efectos de los *feedback* fuesen menos efectivos en redshift altos ya que los halos son más densos y la masa tiene una mayor velocidad circular. Esto dificultaría expulsar el material de la galaxia al CGM o incluso al exterior del halo. Calculando las velocidades circulares sin embargo encuentran que decrecen a medida que crece el redshift lo que facilitaría la expulsión de material en redshift altos entrando en conflicto con lo observado. Sin embargo los efectos de los *feedback* también podrían evolucionar con el tiempo. Al decrecer la densidad la energía de las explosiones de supernova pueden transmitir una mayor cantidad de energía incrementando el tiempo de enfriamiento del gas circundante y por tanto inhibiendo la formación estelar. Otro mecanismo de *feedback* son los AGN los cuales también pueden aumentar el tiempo de enfriamiento reduciendo la SFR. Este tipo de *feedback* requiere de un agujero negro supermasivo y aunque existen algunos ejemplos de AGNs a muy altos redshift, la función de luminosidad de éstos parece decrecer rápidamente a partir de  $z > 3$ , habiendo observado recientemente



que la parte final de la función de luminosidad UV galáctica es más brusca que la función de masa de halo en  $z = 6$ , pero no en  $z = 7$ , lo que hipotéticamente podría explicarse si el *feedback* en galaxias brillantes de los primeros AGNs volviera a partir de  $z \leq 6$ . Sin embargo, los detalles de como los AGNs interactúan con la galaxia y sus alrededores, particularmente en estas épocas, es muy incierto por lo que no es del todo claro si la acreción del agujero negro tiene algún efecto significativo en la evolución del crecimiento galáctico.

De todos estos escenarios Finkelstein et al. [2015] consideran más factble el último, donde los efectos de los *feedback* decrecen con el redshift inhibiendo la formación estelar en redshift más bajos.

A pesar de las especulaciones anteriores, la consecuencia de que incrementa la disponibilidad de gas frío en redshift altos es intrigante. Los resultados en  $z = 6, 7$  muestran que el  $\sim 10 - 12\%$  del complemento cósmico de bariones se ha transformado en estrellas. El resto de bariones han de permanecer en estado fase de gas siendo más abundante la fracción de gas en redshift altos que en bajos. Una alta fracción de gas en redshift altos no es esperable y será pronto confirmada por el ALMA **Ver si existe este resultado.**

Por último el paper de Finkelstein et al. [2015] analiza los posibles descendientes de las galaxias observadas concluyendo que los halos en redshift 2 han de tener masas similares a las que hospedan SMGs siendo este tipo de galaxias un candidato plausible a descendiente de las galaxiás brillantes UV observadas.

## Conclusiones

Recientes observaciones han mostrado que la luminosidad UV característica  $M_{UV}^*$  no evoluciona significativamente entre los  $z = 4 - 7$ , lo cual es inesperado dado el descenso general en la densidad de SFR cósmico junto con el crecimiento del redshift. Para investigar los efectos físicos detrás de las observaciones de la no evolución del  $M_{UV}^*$  Finkelstein et al. [2015] ha inspeccionado a población estelar en galaxias brillantes UV en  $z = 4 - 7$  con los siguientes resultados.:

- ★ Galaxias con  $M_{UV}^* < -21$  aparentan tener propiedades muy similares entre los  $z = 4 - 7$ , incluyendo la masa estelar, la atenuación del polvo y el SFR.
- ★ Relacionando la función de luminosidad con la función de masa del halo de las simulaciones de Bolshoi se ha encontrado que las galaxias  $M_{UV}^* < -21$ , las cuales se han medido con un  $\log M_*/M_\odot = 9.6 - 9.9$ , viven en halos de  $\log M_h/M_\odot = 11.93 - 11.35$  entre los redshift 4 y 7 respectivamente. Por tanto la fracción estelar bariónica crece con una significancia de  $3.2\sigma$  con el aumento del redshift.
- ★ La tendencia observada del SBF entra en contradicción con el crecimiento simple de las galaxias. Estas observaciones implican un cambio en las propiedades físicas que gobiernan la formación estelar de  $z > 4$  las cuales, por ejemplo, reducirían la eficiencia de los *feedback* de supernova a medida que aumenta el redshift.

En futuros estudios esperan aumentar el volumen de la muestra estudiada además de extender el estudio a redshift 8 y 9. Por último se espera que con ALMA se pueda detectar la emisión de polvo que permita borrar los efectos de *bias* producidos por él, sino que probar que la reserva de gas aumenta con el redshift probando que en redshift altos existiera una mayor cantidad de gas disponible para la formación de estrellas explicando el crecimiento del SBF con el redshift.

**Algunas de las conclusiones y dudas generales que me he sacado de este artículo son:**

- ★ Una de las primeras intrigas del artículo es el origen del trabajo, el cual intenta explicar por que la luminosidad característica de las funciones de luminosidad en los  $z = 4 - 7$  se mantiene constante. Se observa que aunque las galaxias en general tienden a decrecer en densidad mientras se aumenta redshift las galaxias brillantes permanecen constantes. Esto puede ser un efecto *bias* provocadas quizás por las galaxias no observables como las descubiertas con el ALMA [Wang et al., 2019], o si no fuera un sesgo observacional quizás es un indicador de que las galaxias brillantes se formaron primero.

- ★ Por otro lado los márgenes de error de las medidas de masa estelar, SFR y edad de las galaxias parecen un poco amplios lo cual podría provocar confusiones en las conclusiones de que el SFR se mantiene constante donde se debería decir que no existe una dependencia significativa con el redshift con los márgenes de error dados. He descargado los datos de las observaciones del paper para revisar dichos cálculos junto con las observaciones de Wang para así con RAMSES replicar los cálculos. Además la idea de asociar las galaxias según ranking de masa halo y masa estelar no lo terminé de entender muy bien.
- ★ El principal efecto de *bias* que puede haber influido en este trabajo es la detección de galaxias masivas no detectables en las observaciones. Estas galaxias podrían influir en la relación de masa estelar masa halo de una manera distinta en cada redshift si la densidad en número de éstas varía con el redshift trastocando los resultados por completo del SBF. Este efecto es descartado por el artículo ya que dichas observaciones no se conocían al ser muy posteriores.

## Galaxias tempranas y sus halos

Como hemos visto en el trabajo de Finkelstein et al. [2015] la teoría espera una rápida evolución en las galaxias entre los redshift de  $z = 4 - 7$ , sin embargo las observaciones no avalaron dichas predicciones en su trabajo. En el trabajo de Steinhardt et al. [2016] pretende extender y actualizar los resultados de trabajos como el de Finkelstein et al. [2015] basándose en los datos de CANDELS y SPLASH. La ventaja de tomar redshift altos como los del estudio de  $z = 4 - 8$  es que tenemos un tiempo cósmico más pequeños (0.9 Gyr [Steinhardt et al., 2016]) en un mayor número de redshift, lo que debiese permitir ver una evolución mas detallada que en redshift bajos. Por otro lado los métodos de estimación de las masas de los halos son menos abundantes por lo que el trabajo de Steinhardt et al. [2016] trabaja básicamente con tres tipos de estimaciones.

1. El primero de ellos se base en la clusterización [Hildebrandt et al., 2009] el cual estima la masa del halo según la distribución espacial de las galaxias. La ventaja de este método es que no hay que asumir ninguna propiedad física de las galaxias, pero sí es necesario escoger un modelo de materia oscura para las simulaciones.
2. Un segundo método es el presentado y desarrollado en el artículo de Finkelstein et al. [2015], el cual se basa en la curva de luminosidad UV <sup>4</sup> y en la función de masa calculada a través de simulaciones, relacionando ambas por el principio de que el halo más masivo a de albergar la galaxia más masiva y viceversa.
3. El último método es asumir un ratio entre luminosidad/masa estelar y materia oscura. El ratio asumido es el redshift más bajos donde las estimaciones de materia oscura son más factibles.

Sobre el primer método no puedo decir mucho de momento ya que no he leído el paper de Hildebrandt et al. [2009] donde desarrollan el método, pero al igual que en el último método depende de un modelo de materia oscura lo cual podría ser una variable a tener en cuenta para que los resultados cuadren con las observaciones. Sobre el segundo método ya se ha discutido los posibles fallos que puede tener sobre todo a raíz del descubrimiento de Wang et al. [2019]. Por último considera un ratio igual a redshift más bajos lo cual no tendría porque ser cierto si las propiedades de galaxias y halos evolucionan con el tiempo. Todos estos puntos débiles pueden ser clave fundamental para poner en duda dichos resultados.

---

<sup>4</sup>Hay que recordar que podría ser incorrecta ya que en el artículo de se asumió la existencia de galaxias solo visibles en submilimétricas [Wang et al., 2019].

## References

- RL Barone-Nugent, M Trenti, JSB Wyithe, RJ Bouwens, PA Oesch, GD Illingworth, C Marcella Carollo, J Su, M Stiavelli, I Labbe, et al. Measurement of galaxy clustering at  $z \sim 7.2$  and the evolution of galaxy bias from  $3.8 < z < 8$  in the xdf, goods-s, and goods-n. *The Astrophysical Journal*, 793(1):17, 2014.
- Peter S Behroozi, Risa H Wechsler, and Charlie Conroy. The average star formation histories of galaxies in dark matter halos from  $z = 0-8$ . *The Astrophysical Journal*, 770(1):57, 2013.
- Richard G Bower, AJ Benson, R Malbon, JC Helly, CS Frenk, CM Baugh, Shaun Cole, and Cedric G Lacey. Breaking the hierarchy of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370(2): 645–655, 2006.
- Caitlin M Casey, Desika Narayanan, and Asantha Cooray. Dusty star-forming galaxies at high redshift. *Physics Reports*, 541(2):45–161, 2014.
- Steven L Finkelstein, Mimi Song, Peter Behroozi, Rachel S Somerville, Casey Papovich, Miloš Milosavljević, Avishai Dekel, Desika Narayanan, Matthew LN Ashby, Asantha Cooray, et al. An increasing stellar baryon fraction in bright galaxies at high redshift. *The Astrophysical Journal*, 814(2):95, 2015.
- H Hildebrandt, J Pielorz, T Erben, L van Waerbeke, P Simon, and P Capak. Cars: the cfhtls-archive-research survey-ii. weighing dark matter halos of lyman-break galaxies at  $z = 3-5$ . *Astronomy & Astrophysics*, 498 (3):725–736, 2009.
- Mark R Krumholz, Avishai Dekel, and Christopher F McKee. A universal, local star formation law in galactic clouds, nearby galaxies, high-redshift disks, and starbursts. *The Astrophysical Journal*, 745(1):69, 2011.
- Kyoung-Soo Lee, Mauro Giavalisco, Oleg Y Gnedin, Rachel S Somerville, Henry C Ferguson, Mark Dickinson, and Masami Ouchi. The large-scale and small-scale clustering of lyman break galaxies at  $3.5 \leq z \leq 5.5$  from the goods survey. *The Astrophysical Journal*, 642(1):63, 2006.
- Roderik A Overzier, Rychard J Bouwens, Garth D Illingworth, and Marijn Franx. Clustering of i775 dropout galaxies at  $z \sim 6$  in goods and the udf. *The Astrophysical Journal Letters*, 648(1):L5, 2006.
- Charles L Steinhardt, Peter Capak, Dan Masters, and Josh S Speagle. The impossibly early galaxy problem. *The Astrophysical Journal*, 824(1):21, 2016.
- T. Wang, C. Schreiber, D. Elbaz, Y. Yoshimura, K. Kohno, X. Shu, Y. Yamaguchi, M. Pannella, M. Franco, J. Huang, C. F. Lim, and W. H. Wang. A dominant population of optically invisible massive galaxies in the early universe. *Nature*, 572(7768):211–214, 2019. doi: 10.1038/s41586-019-1452-4. URL <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1452-4>.

# Planteamientos iniciales de cada día de trabajo

Notas que pretenden estructurar el trabajo día a día

## Agosto 2019

### Día 15 - 18

A falta de terminar de analizar el paper de Finkelstein et al. [2015] y de hacer una lista de las dudas surgidas y propuestas a dar ya he leído el artículo de Wang et al. [2019] sobre las galaxias a redshift  $z > 3$  descubiertas por ALMA las cuales parecen ser abundantes y masivas y no detectables por el HST. Esto tumbaría la suposición de Finkelstein et al. [2015] de la no existencia o poca abundancia de las galaxias sub-milimétricas lo que modificaría la función de luminosidad y por tanto la relación de masa halo - masa estelar ya que en el paper de Finkelstein et al. [2015] se basa principalmente en ella. La propuesta de lo que quiero hacer hoy es lo siguiente:

1. Terminar el análisis de Finkelstein et al. [2015]. ✓
2. Como encaja las nuevas observaciones de Wang et al. [2019] en el paper de Finkelstein et al. [2015]
3. Avanzar en el análisis de Steinhardt et al. [2016].
4. Plantear como incluir los planteamientos de Wang et al. [2019]:
  - i. Replantear la función de luminosidad de Finkelstein et al. [2015].
  - ii. Como encaja en el modelo jerárquico [Bower et al., 2006].
  - iii. Las simulaciones de RAMSES nos pueden dar un orden distinto a la masa de los halos que encajen de una manera distinta de con la función de luminosidad.