

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio del “*Impossible Early Galaxy Problem*” y sus posibles soluciones.

Autor:
Santiago ARRANZ SANZ

Tutor:
Dr. Santi ROCA FABREGA

*Un trabajo requerido para completar
el Máster universitario en Astrofísica*

in the

Departamento de Astrofísica

17 de abril de 2020

1 Introducción

El origen de este trabajo iba a ser el estudio del modelo de crecimiento de galaxias bajo la influencia por una naturaleza *warm dark matter* (WDM), en contraposición al modelo estandar asociado a la *cold dark matter* (CDM). La finalidad era el estudio de la simulaciones de WDM pero debido al escaso catálogo de estas simulaciones y el estatus de este trabajo se optó por otro enfoque. Dicho enfoque pasó desde una perspectiva centrada a las simulaciones numéricas a un visión más teórica con la esperanza de poder ser traducida en un futuro a una estado más práctico.

El objeto de este trabajo es el *Impossible Early Galaxy Problem* (IEGP), definido por primera vez en el *paper* Steinhardt y col., 2016, cómo la discordancia encontrada en ese mismo *paper* sobre los datos deducidos de las observaciones de los campos CANDELS, SPLASH y CFHLS sobre la masa de los halos entre los redshift $4 < z < 7$ y los esperados por el modelo estándar (ver **Figura 1.1**). En dichas observaciones se encuentran un gran número de halos muy masivos que quedarían muy por encima de lo esperado por la función de masa de halo deducida por el modelo cosmológico Λ CDM y el modelo jerárquico de crecimiento galáctico.

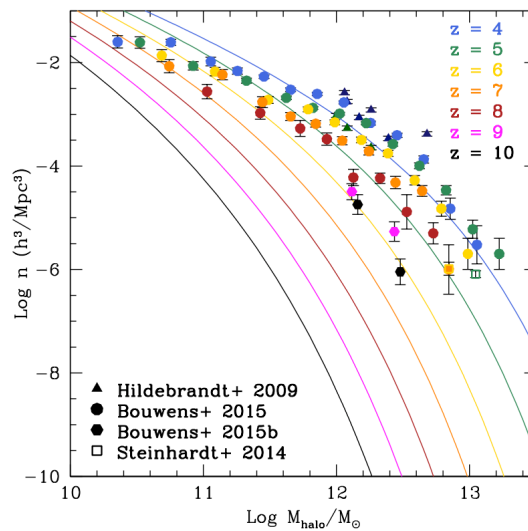


FIGURA 1.1: Figura que representa la función de masa de halo. En línea continua se muestra la predicción teórica sacada de HMFCalc (Murray, Power y Robotham, 2013) y Sheth, Mo y Tormen, 2001 mientras que los marcadores muestran los valores obtenidos a través de las observaciones estudiadas en Hildebrandt y col., 2009, Steinhardt y Speagle, 2014, Bouwens y col., 2015a y Bouwens y col., 2015b.

El objetivo final de este trabajo pretende estudiar el problema IEGP desde tres enfoques distintos con la finalidad de clarificar cual puede ser el origen más plausible de las discrepancias observadas entre teoría y observaciones que parecen mostrar la **Figura 1.1**. Estos enfoques son:

Observacional: ¿Qué *bias* observacionales pueden estar presentes? ¿Existen otros posibles *bias* observacionales que no se hayan podido tomar en cuenta? ¿Hay otro tipos de sesgos que se hayan podido cometer al calcular la función de masa de halo de las observaciones consideradas? Desde esta perspectiva se pretenderá analizar el problema y determinar si tiene un papel relevante en la discrepancias observadas. También si nuevas observaciones y simulaciones contribuyen de manera positiva o negativa en este punto como por ejemplo los trabajos Wang y col., 2019 o Behroozi y col., 2019.

Física Bariónica: Son muchos los trabajos que consideran que los procesos físicos de la materia bariónica podrían variar en función del redshift haciendo más eficiente, por ejemplo, los procesos de *feedback* de AGNs que propicián la inhibición del SFR en redshift bajos (Finkelstein y col., 2015a). Las recetas de la física bariónica juegan un papel fundamental en la relación entre masa estelar *v.s* la masa del halo (SMHMR), veremos si son relevantes en este problema como parece plantear el trabajo de Finkelstein y col., 2015a o si por el contrario son suprimibles en el IEGP simplificando un poco el problema.

Modelo Cosmológico: Por regla general y según ha marcado la experiencia de la historia científica, cuando existe una discrepancia entre observación y teoría suele ser el segundo factor el que está equivocado. Son muchos los logros del Λ CDM pero también existen muchos problemas no explicados por este modelo y el IEGP parece convertirse en otro más. Daremos un repaso de los problemas que parece no explicar el Λ CDM e intentaremos estudiar el IEGP considerando otros modelos cosmológicos y naturaleza de materia oscura que se encuentran sobre la mesa de teorías aceptadas o con el estatus de encontrarse en consideración debido a las posibles carencias del Λ CDM.

En esta primera sección daremos un pequeño resumen de los principales puntos del *paper* de Steinhardt y col., 2016 comparando de manera conjunta los resultados con los que se derivarían de las nuevas medidas ofrecidas por Behroozi y col., 2019, en un intento de ver si datos más actualizados pueden contribuir a solucionar o agravar las discrepancias observadas. En las siguientes secciones abordaremos de manera independiente los tres enfoques explicados terminando con una última sección dedicada a las conclusiones y a los posibles futuros trabajos que se podrían realizar en el campo de las simulaciones en aras de clarificar este problema. Pero lo primero es explicar el problema y allá vamos.

1.1. *The Impossible Early Galaxy Problem.*

Existe un consenso bastante amplio en el que en un escenario basado en el modelo cosmológico Λ CDM las grandes masas finales de los halos predichos por la función masa de halo cambian rápidamente entre los redshift 8 y 4, cuyos halos que contienen a las galaxias más masivas virializan hacia $z=4$ (Steinhardt y col., 2016). Sin embargo, no se han encontrado evidencias de esa evolución esperada entre los rangos de redshift mencionados, por ejemplo, trabajos como el Finkelstein y col., 2015a

y Finkelstein y col., 2015b han deducido una independencia del valor de la magnitud UV característica M_{UV}^* de la función de parametrización de Schecter con respecto al redshift en los rangos $z \in [4, 7]$, por tanto, sin encontrar signos de una evolución esperada entre las galaxias de estos redshift. Dichos trabajos encontraron un mayor número de galaxias brillantes en UV de lo esperado en redshift $z=7$, que concuerda con el resultado de Steinhardt y col., 2016 y que se puede visualizar en la **Figura 1.1**. En Steinhardt y col., 2016 compara las funciones de masa de halo obtenidas de los trabajos de Hildebrandt y col., 2009, Steinhardt y Speagle, 2014, Bouwens y col., 2015a y Bouwens y col., 2015b calculadas basándose en las observaciones de los estudios de CANDELS¹, CFHTLS² y SPLASH³ y usando tres metodologías distintas que explicaremos en la siguientes subsecciones, con las funciones de masa de halo predichas por modelos teóricos obtenidos de la herramienta *HMFCalc* (Murray, Power y Robotham, 2013) usando como base el trabajo de Sheth, Mo y Tormen, 2001 y que explicaremos con un mayor detalle más adelante. Las discrepancias que se pueden observar en la **Figura 1.1** son muy notables y estudiadas en Steinhardt y col., 2016, aquí haremos un pequeño resumen de estas explicaciones aplicando nuevas medidas y observaciones obtenidas principalmente de Behroozi y col., 2019 y Wang y col., 2019, sin embargo, existen posturas contrarias a la existencia de tal problema. Trabajos como el de Behroozi y Silk, 2018 afirman que tal problema no existe ya que los ratios de masa estelar - masa bariónica considerados en Steinhardt y col., 2016 del 9 % pueden ser superiores para los rangos de redshift entre $z = 4 - 8$, llegando a encontrarse entre el 10 % y el 40 % con un error de 0,2dex por lo que no sería descartable la aparición de ratios cercanos a la unidad (Ver **Figura 1.2**). Por el otro lado, las observaciones presentadas en Wang y col., 2019 de galaxias masivas invisibles al óptico e infrarrojo cercano parece que debiera aumentar el numero de densidad de estas galaxias aumentando la masa de estos cúmulos de por si ya masivos, aunque esto podría ser solo un indicativo del aumento de la masa estelar y por tanto un aumento del ratio SMHM favoreciendo la concordancia entre la teoría y las observaciones.

El conflicto que aparece en el trabajo de Steinhardt y col., 2016 es la presencia un gran número inesperado de halos de materia oscura en redshift altos. Esto esta medido a través del número de densidad de galaxias masivas debido al hecho que podemos ver en Mo que las galaxias masivas están presentes en los halos masivos y viceversa. Para detectar la masa de las galaxias que se hospedan en los halos de materia oscura podemos recurrir a dos procedimientos: uno es el de clusterización que se basa principalmente en la medida de la función de correlación de galaxias representado en el trabajo de Hildebrandt y col., 2009 y el otro es la medida de la masa estelar. Dado que la masa estelar es complicada a medir en estos redshift se usa la relación que existe con la función de luminosidad en UV, lo cual es un indicativo de la SFR. Esto último implica varios problemas, el primero es el representado por los resultados de Wang y col., 2019 donde presenta medias de galaxias textit invisibles al infrarrojo cercano y óptico las cuales contienen gran cantidad de polvo y son muy representativas en estos redshift en las galaxias más masivas. Los otros problemas los tengo que revisar pero sería que el SFR varía con el redshif y que las galaxias mas masivas de $> 10^{13} M_{\odot}$ presentan un amortiguamiento del SFR (masa mágica), lo cual nos las estaríamos dejando fuera. Quizás estas últimas galaxias no son representativas pero no entiendo muy bien porque las están dejando fuera, quizás por

¹Grogin y col., 2011

²Hildebrandt y col., 2009

³Capak y col., 2012

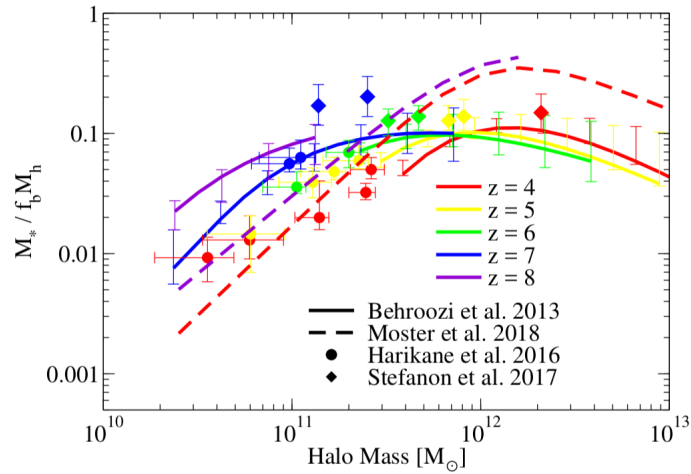


FIGURA 1.2: . Ratios de masa estelar-masa bariónica para un rango de redshift $z = 4 - 8$ que alcanzan niveles entre el 10 % y el 40 %. Con una dispersión de 0,2dex es plausible que galaxías individuales puedan alcanzar ratios cercanos a la unidad. Los resultados han sido reconvertidos a la IMF de Salpeter y a los parámetros cosmológicos de Planck 2016. Las medidas de Behroozi et al. (2013), Stefanon et al. (2017) y Moster et al. (2018) usan la técnica de enlace de abundancias; mientras que Harikane et al. (2016) usa modelos de la distribución anular de ocupación del halo. Imagen sacada de Behroozi y Silk, 2018

que esta relación de apagado del SFR no se presenta en estos redshift.

Por otro lado existen maneras de medir la masa de un halo sin medir la masa de las galaxias como las obtenidas por lentes gravitacionales o movimiento cinemático de las galaxias de los cúmulos. Veamos como encajamos todo esto en el problema.

Los siguientes pasos a seguir son el estudio de los argumentos de Behroozi y Silk, 2018 y ver como encajamos las medidas de Wang y col., 2019 con las de Behroozi y col., 2019 en el problema

Las medidas presentadas por Steinhardt y col., 2016 las podemos dividir en dos grupos. La primeras, las medidas de Bouwens y col., 2015b usando las técnicas de enlace de abundancias parecen tener dos posibles problemáticas basada en el ratio de masa estelar-masa bariónica considerado del 9 %, el cual según trabajos de Behroozi pueden ser superiores (Behroozi y Silk, 2018, Behroozi y col., 2019) y el otro es el de la masa estelar no observada presentado por Wang y col., 2019. Estos dos problemas podrían combinarse para aumentar el SMHM lo que devolvería las observaciones al campo de la teoría.

Por otro lado, las observaciones de Hildebrandt y col., 2009 también salen bastante desviadas de la teoría, tendríamos que ver cuales pueden ser las posibles razones. Los siguientes pasos a seguir sería desarrollar el punto anterior y ver las causas de este. Por último ver las diferentes casuísticas tomando distitas cosmologías sobre todo la Fuzzy Dark Matter y la teoría MOND.

Estos problemas los afrontaremos con las últimas medidas presentadas en Behroozi y col., 2019 para tener los datos más actualizados posibles por lo que es de interés hacer un pequeño repaso a lo presentado en este trabajo y resaltar los resultados de interés para nuestro dilema que podemos encontrar en él.

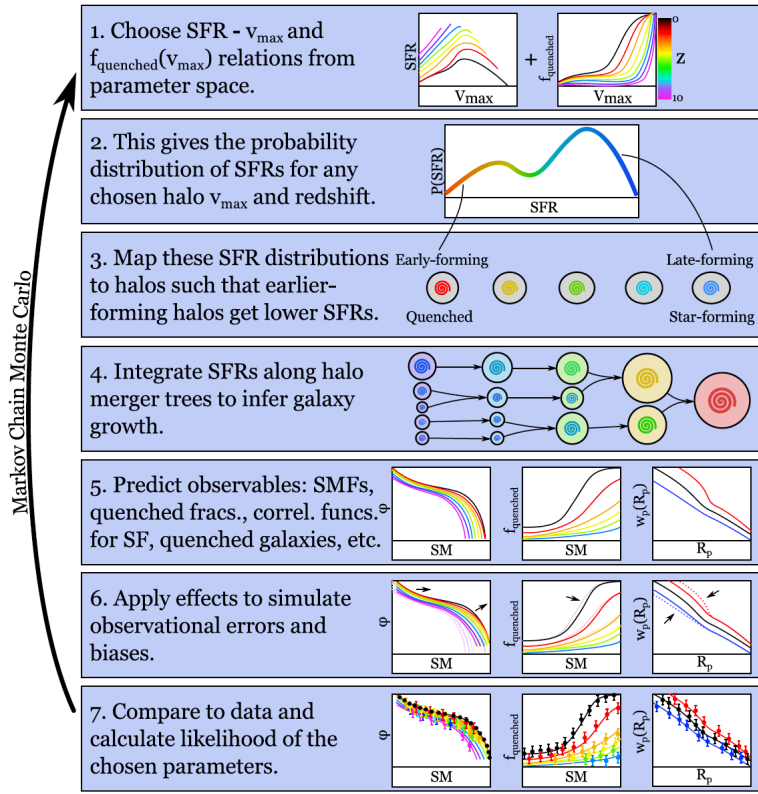


FIGURA 1.3: Resumen del método usado en Behroozi y col., 2019 para enlazar el crecimiento galáctico con el del halo.

1.1.1. Universe Machine

En el trabajo de Behroozi y col., 2019 se presenta una serie de resultados derivados de la obtención de las estimaciones de la función de masa estelar, ratio de formación estelar cósmica y específica, la función de luminosidad UV, las fracciones de amortiguamiento, funciones de autocorrelación, relación de masa estelar $v.s.$ UV y la relación IRX-UV determinadas a través de simulaciones *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) usando los datos observacionales de los estudios de CANDELS, 3D-HST, ULTRAVISTA y ZFOURGE y las simulaciones de materia oscura de *Bolshoi-Planck* y MDPL2. Sin entrar en detalle en la explicación de la metodología (nos remitiremos a Behroozi y col., 2019) daremos un pequeño esbozo de la metodología usada en estas simulaciones MCMC.

El método a grades rasgos está recogido en la **Figura 1.3** y en el cual no se considera una correlación *a priori* entre la acreción de la galaxia y la del halo. En este método se genera un universo *mock*, basado en los árboles de fusiones sacados de las simulaciones de materia oscura de *Bolshoi-Planck* y se comparan a través de funciones de verosimilitud bayesianas con las observaciones reales. A través de un algoritmo MCMC se vuelve a generar el universo *mock* y se vuelve a realizar la misma comparación obteniendo nuevas funciones de verosimilitud bayesianas.

Los resultados más interesantes en lo que respecta a este trabajo los intentaremos explicar en profundidad a continuación para luego posteriormente compararlos con las mediciones presentadas en Steinhardt y col., 2016

Relación masa estelar - UV

Las medidas dadas por Bouwens y col., 2015a y Bouwens y col., 2015b representadas en la **Figura 1.1** están basadas en el trabajo de Finkelstein y col., 2015a, el cual se basa en la técnica del *emparejamiento* de halo y galaxias para obtener la relación masa halo - luminosidad UV. Más adelante se explicará en que consiste exactamente esta técnica, pero lo interesante a saber en lo que respecta a este punto es que depende de manera intermedia en la relación masa estelar - luminosidad. Dicha relación es revisada en Behroozi y col., 2019 dando nuevos valores que dejan por encima a las estimaciones de Finkelstein y col., 2015a, Finkelstein y col., 2015b como se muestra en la **Figura 1.4**. **Esto podría ocasionar dos opciones antagónicas pero con el mismo origen de un descenso de la masa estelar. Si el SMHM se mantuviese fijo bajaría la masa del halo reconciliando la teoría con las observaciones mientras que si lo que ocasiona es una caída del SMHM podría ocasionar el efecto inverso, siendo mayor el problema de lo que es. Sin entrar en las observaciones de Wang.**

1.2. Datos Observacionales

Como ya se ha comentado, el trabajo de Steinhardt y col., 2016 divide las estimaciones de la masa de halo de los diferentes campos observados en tres grupos según la técnica usada. Como se recalca en el *paper* Steinhardt y col., 2016 la ventaja de trabajar en redshifts altos es que nos permite ver diferentes fotogramas del universo con un intervalo más corto entre ellas que si la viésemos en rangos más bajos. En nuestro caso el rango medio del intervalo de tiempo entre los redshift 4 y 7 son de 0.9 giga-años, esto nos permite mediciones entre épocas más precisas aunque a cambio nos restringe bastante en los métodos disponibles para calcular la masa de halo de estos rangos, Steinhardt y col., 2016 usa tres representados por diferentes *papers*:

- Un método es el presentado y desarrollado en el artículo de Finkelstein y col., 2015a, el cual se basa en la curva de luminosidad UV y en la función de masa calculada a través de simulaciones de Bolshoi, relacionando ambas por el principio de que el halo más masivo a de albergar la galaxia más masiva y viceversa. Las mediciones plasmadas en la **Figura 1.1** de los estudios de Bouwens y col., 2015a y Bouwens y col., 2015b usan esta técnica.
- En el trabajo de Hildebrandt y col., 2009 se muestra el método de clusterización, 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 físicas de las galaxias, pero sí es necesario escoger un modelo de materia oscura para las simulaciones.
- 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 por los métodos de agrupación. El ratio usado para el enlace entre masa estelar y de halo es $M_h/M_\star \sim 70$ siendo la técnica usada en las mediciones de Steinhardt y Speagle, 2014 que se presentan en la **Figura 1.1**.

Discutiremos estas tres técnicas por separado actualizando las medidas con los nuevos datos de Behroozi y col., 2019, pero antes de ello hagamos una pequeña presentación del trabajo de Behroozi y col., 2019.

Relación masa halo - masa estelar

Uno de los resultados más interesantes según el propósito de este trabajo es el estudio de la relación masa halo - masa estelar para el rango de redshift del estudio $z \in [0, 10]$. Se encuentra que el ratio SMHM varía entre galaxias satélite y galaxias centrales, por ejemplo en halos menos masivos el ratio de SMHM es mayor en las galaxias satélite ya que su tiempo de "apagado" es más largo creciendo en masa estelar mientras que permanece fija en su masa de materia oscura. Por otro lado en masas de halo altas el canal principal de crecimiento es via fusiones donde en las galaxias satélite es menos frecuente dando ratios de SMHM más bajos que en las galaxias centrales. La imagen del SMHM se complica en masas intermedias

1.2.1. Método de función de luminosidad UV**1.2.2. Método de Clusterización****1.2.3. Método de ratio luminosidad masa halo****1.3. Normalidad de las Galaxias**

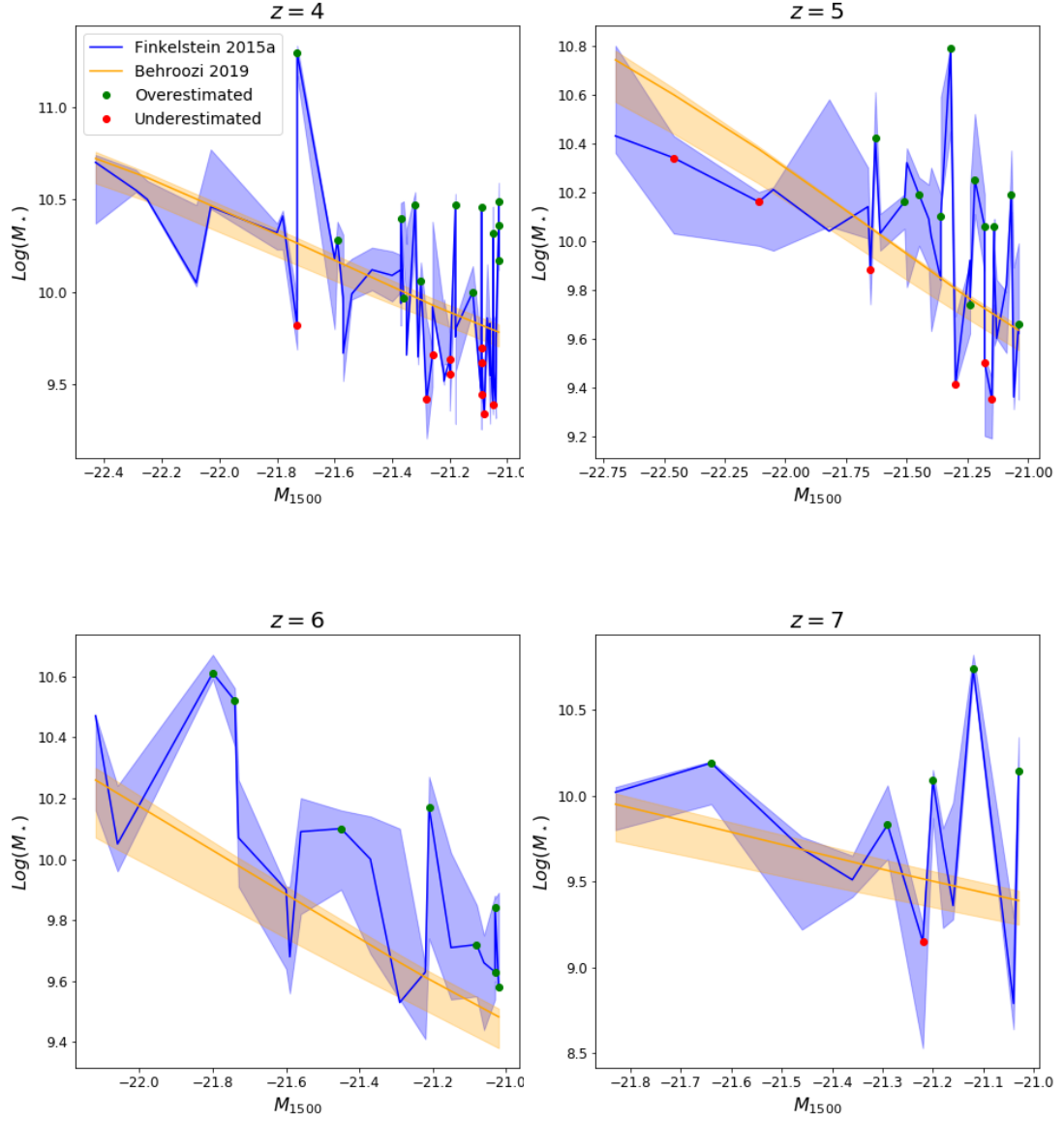


FIGURA 1.4: En la figura se representa la función que relaciona la luminosidad UV y la masa estelar del trabajo de Finkelstein y col., 2015a v.s. el resultado obtenido por el trabajo de Behroozi y col., 2019. Las observaciones son las usadas por Finkelstein y col., 2015a en el que representamos los intervalos de confianza de cada uno de los estudios. Hemos pintado en rojo aquellas mediciones de Finkelstein y col., 2015a que quedan por debajo del intervalo de confianza de las mediciones de Behroozi y col., 2019 y en verde aquellas que quedan por encima.

Bibliografía

- Behroozi, Peter y Joseph Silk (abr. de 2018). «The most massive galaxies and black holes allowed by Λ CDM». En: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 477.4, págs. 5382-5387. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/sty945](https://doi.org/10.1093/mnras/sty945). eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/477/4/5382/24874284/sty945.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty945>.
- Behroozi, Peter y col. (2019). «UniverseMachine: The correlation between galaxy growth and dark matter halo assembly from $z=0$ -10». En: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 488.3, págs. 3143-3194.
- Bouwens, RJ y col. (2015a). «Reionization after Planck: the derived growth of the cosmic ionizing emissivity now matches the growth of the galaxy UV luminosity density». En: *The Astrophysical Journal* 811.2, pág. 140.
- Bouwens, RJ y col. (2015b). «UV luminosity functions at redshifts $z=4$ to $z=10$: 10,000 galaxies from HST legacy fields». En: *The Astrophysical Journal* 803.1, pág. 34.
- Capak, Peter y col. (2012). «SPLASH: Spitzer Large Area Survey with Hyper-Suprime-Cam». En: *Spitzer Proposal*.
- Finkelstein, Steven L y col. (2015a). «An increasing stellar baryon fraction in bright galaxies at high redshift». En: *The Astrophysical Journal* 814.2, pág. 95.
- Finkelstein, Steven L y col. (2015b). «The evolution of the galaxy rest-frame ultraviolet luminosity function over the first two billion years». En: *The Astrophysical Journal* 810.1, pág. 71.
- Grogin, Norman A y col. (2011). «CANDELS: the cosmic assembly near-infrared deep extragalactic legacy survey». En: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 197.2, pág. 35.
- Hildebrandt, H y col. (2009). «CARS: the CFHTLS-Archive-Research Survey-II. Weighing dark matter halos of Lyman-break galaxies at $z=3$ -5». En: *Astronomy & Astrophysics* 498.3, págs. 725-736.
- Murray, SG, Chris Power y ASG Robotham (2013). «HMFcalc: An online tool for calculating dark matter halo mass functions». En: *Astronomy and Computing* 3, págs. 23-34.
- Sheth, Ravi K, HJ Mo y Giuseppe Tormen (2001). «Ellipsoidal collapse and an improved model for the number and spatial distribution of dark matter haloes». En: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 323.1, págs. 1-12.
- Steinhardt, Charles L y Josh S Speagle (2014). «A uniform history for galaxy evolution». En: *The Astrophysical Journal* 796.1, pág. 25.
- Steinhardt, Charles L y col. (2016). «The impossibly early galaxy problem». En: *The Astrophysical Journal* 824.1, pág. 21.
- Wang, T. y col. (2019). «A dominant population of optically invisible massive galaxies in the early Universe». En: *Nature* 572.7768, págs. 211-214. DOI: [10.1038/s41586-019-1452-4](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1452-4). URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1452-4>.

A Esquema

Planteamientos a contestar

1. **Introducción: Luces y sombras del modelo cosmológico estandar.**
 - 1.1 Modelo cosmológico estandar, breve descripción y principales logros.
 - 1.2 Naturaleza de la materia oscura, teorías y principales ventajas y desventajas de éstas
 - 1.3 Evolución jerárquica de galaxias en la cosmología estandar.
 - 1.3.1 Descripción y teoría.
 - 1.3.2 Simulaciones.
 - 1.3.3 Predicciones, Problemas y Observaciones. Hasta que punto esos problemas se pueden solucionar en el modelo estándar.
 - 1.4 El papel actual de la física barionica como heroe al rescate a los problemas de la cosmología estándar.
 - 1.5 Papel de los modelos cosmológicos ante los mismos problemas y observaciones.
 - 1.6 ¿En qué punto nos encontramos? ¿Por qué no encontramos candidatos a la CDM? Resumen.
2. **Impossible Early Galaxy Problem.**
 - 2.1 Descripción del problema de Steinhardt y col., 2016.
 - 2.1.1 Plateamiento de las observaciones analizadas.
 - 2.1.2 Contexto teórico usado en la comparación, ¿es válido?
 - 2.1.3 Relación con otros problemas observados (Impossible Early Quasar Problem, Agujeros negros medianos)
 - 2.2 ¿Cómo abordamos el problema?
 - 2.2.1 Los tres posibles frentes: Observaciones mal interpretadas, Papel de la física Bariónica no considerado, Modelo Cosmológico fallido.
 - 2.2.2 Soluciones planteadas en Steinhardt y col., 2016.
 - 2.2.3 Soluciones de otros autores: Las observaciones están mal interpretadas Behroozi y Silk, 2018, el modelo cosmológico es erróneo ($R_h=c$)...
 - 2.2.4 Otros trabajos que apoyan y rechazan las hipótesis de Steinhardt y col., 2016
3. **Observaciones**
 - 3.1 Observaciones basadas en el ratio luminosidad - masa halo
 - 3.1.1 Descripción de las observaciones de Bouwens y col., 2015b.

- 3.1.2 Modelo usado por Steinhardt y col., 2016 para la conversión luz-halo. Descripción del modelo *abundance matching* que enlaza luminosidad con masa estelar. Consideración del enlace entre masa estelar y masa de halo por $M_{\odot} \sim 70M_{\star}$.
- 3.1.3 Medidas de (Behroozi y col., 2019) y planteamiento de Behroozi y Silk, 2018 en el que plantea el error de Steinhardt y col., 2016. Análisis de ratio del ratio masa bariónica masa estelar. Rangos de error entre la relación SMHM. Método aplicado a las observaciones de Bouwens y col., 2015b.
- 3.1.4 Papel de nuevas observaciones en redshift altos (Wang y col., 2019).
- 3.2 Observaciones basadas en el *cluster analysis*.
 - 3.2.1 Descripción de las observaciones de Hildebrandt y col., 2009. Resumen de la metodología.
 - 3.2.2 Posibles errores cometidos en la medida de estas y su incertidumbre.
 - 3.2.3 Dependencia del modelo cosmológico.
 - 3.2.4 Dependencia del volumen de galaxias observadas. ¿Qué pasa si existen muchas más galaxias de las consideradas?
- 3.3 El papel de nuevas observaciones: *JWST*
- 4. **El papel de la Física Bariónica**
 - 4.1 Planteamientos de Steinhardt y col., 2016 y efectos en las medidas.
 - 4.2 Una física variante puede implicar una evolución de los ratios de luminosidad, masa estelar y masa de halo.
 - 4.3 ¿Cómo considerar estos nuevos ingredientes? El papel de los modelos semi-analíticos
- 5. **El modelo cosmológico**
 - 5.1 Descripción de la cosmología usada por Steinhardt y col., 2016.
 - 5.2 Resultados con la variación de parámetros usados.
 - 5.3 Simulaciones: Descripción de las Bolshoi y resultados con otras.
 - 5.4 ¿Qué pasaría si la teoría considerada no fuera correcta?
 - 5.4.1 Consideración de otra naturaleza de la materia oscura: WDM, FDM.
 - 5.4.1.1 Descripción
 - 5.4.1.2 Papel en la evolución galáctica
 - 5.4.1.3 Simulaciones y resultados
 - 5.4.2 Variaciones de la teoría: MOND, $R_h=c, \dots$
 - 5.5.1 Descripción
 - 5.5.2 Papel en la evolución galáctica
 - 5.5.3 Simulaciones y resultados
- 6. ¿Y ahora qué? Como seguimos a partir de aquí.