

The Impossible Early Galaxy Problem

Santiago Arranz Sanz

June 2019

Chapter 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 estándar asociado a la *cold dark matter* (CDM). La finalidad era el estudio de las 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 una visión más teórica con la esperanza de poder ser traducida en un futuro a un estado más práctico.

El objeto de este trabajo es el *Impossible Early Galaxy Problem* (IEGP), definido por primera vez en el *paper* Steinhardt et al. [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.

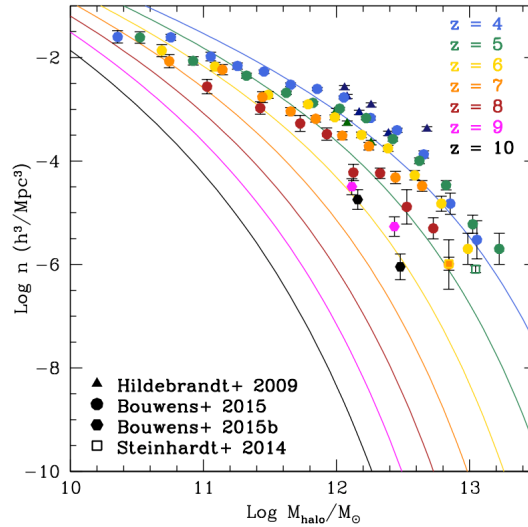


Figure 1.1: Figura que representa la función de masa de halo. En línea continua se muestra la predicción teórica sacada de HMFCalc [Murray et al., 2013] y Sheth et al. [2001] mientras que los marcadores muestran los valores obtenidos a través de las observaciones estudiadas en Hildebrandt et al. [2009], Steinhardt and Speagle [2014], Bouwens et al. [2015a] y Bouwens et al. [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 enfoque son:

Observacional: ¿Qué *bias* observacionales pueden estar presentes? ¿Existen otros posibles *bias* observacionales que no se hayan podido tomar en cuenta? ¿Hay otros 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 et al. [2019] o Behroozi et al. [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 et al., 2015b]. 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 et al. [2015b] 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 et al. [2016] comparando de manera conjunta los resultados con los que se derivarían de las nuevas medidas ofrecidas por Behroozi et al. [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 et al., 2016]. Sin embargo, no se han encontrado evidencias de esa evolución esperada entre los rangos de redshift mencionados, por ejemplo, trabajos como el Finkelstein et al. [2015b] y Finkelstein et al. [2015a] han deducido una independencia del valor de la magnitud UV característica M_{UV}^* de la función de parametrización de Schechter 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 et al. [2016] y que se puede visualizar en la **Figura 1.1**. En Steinhardt et al. [2016] compara las funciones de masa de halo obtenidas de los trabajos de Hildebrandt et al. [2009], Steinhardt and Speagle [2014], Bouwens et al. [2015a] y Bouwens et al. [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 et al., 2013] usando como base el trabajo de Sheth et al. [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 et al. [2016], aquí haremos un pequeño resumen de estas explicaciones aplicando nuevas medidas y observaciones obtenidas principalmente de Behroozi et al. [2019] y Wang et al. [2019], sin embargo, existen posturas contrarias a la existencia de tal problema. Trabajos como el de Behroozi and Silk [2018] afirman que tal problema no existe ya que los ratios de masa estelar - masa bariónica considerados en Steinhardt et al. [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

¹Grogin et al. [2011]

²Hildebrandt et al. [2009]

³Capak et al. [2012]

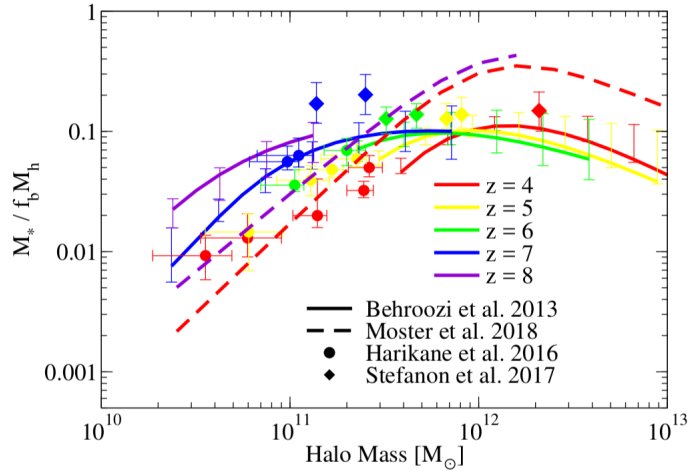


Figure 1.2: . Ratios de masa estelar-masa bariónica para un rango de redshift $z = 4 - 8$ que alcanzan niveles entre el 10% y el 40%. Con una dispersión de 0.2dex es plausible que galaxías individuales puedan alcanzar ratios cercanos a la unidad. Los resultados han sido reconvertidos a la IMF de Salpeter 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 and Silk [2018]

otro lado, las observaciones presentadas en Wang et al. [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 et al. [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 et al. [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 et al. [2019] donde presenta medias de galaxias textitnvisibles 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 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 and Silk [2018] y ver como encajamos las medidas de Wang et al. [2019] con las de Behroozi et al. [2019] en el problema

Las medidas presentadas por Steinhardt et al. [2016] las podemos dividir en dos grupos. La primeras, las medidas de Bouwens et al. [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 and Silk [2018], Behroozi et al. [2019]) y el otro es el de la masa estelar no observada presentado por Wang et al. [2019]. Estos dos problemas podrían combinarse para aumentar el SMHM lo que devolvería las observaciones al campo de la teoría.

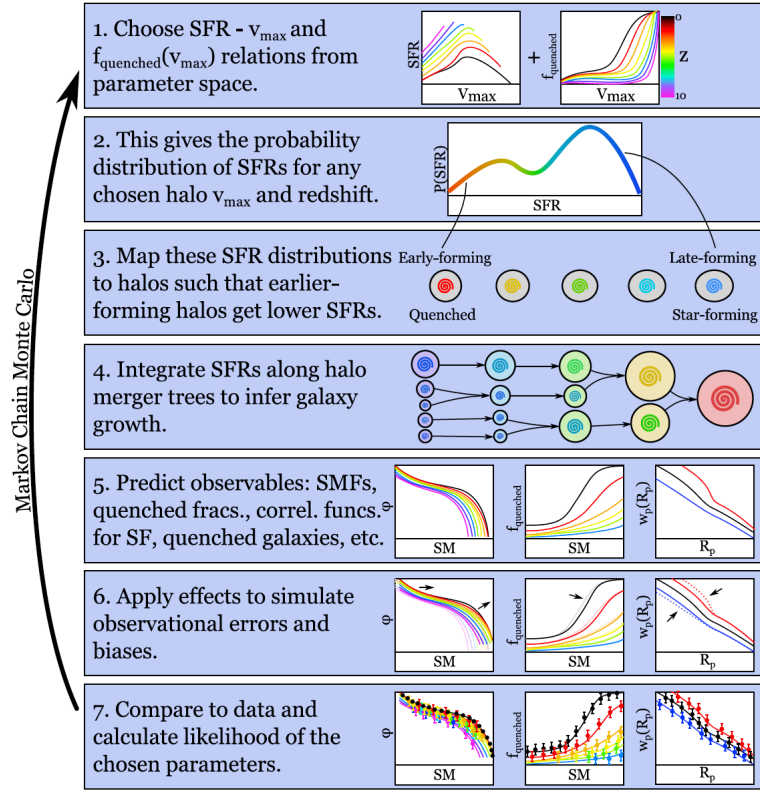


Figure 1.3: Resumen del método usado en Behroozi et al. [2019] para enlazar el crecimiento galáctico con el del halo.

Por otro lado, las observaciones de Hildebrandt et al. [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 distintas cosmologías sobre todo la Fuzzy Dark Matter y la teoría MOND.

Estos problemas los afrontaremos con las últimas medidas presentadas en Behroozi et al. [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.

1.1.1 Universe Machine

En el trabajo de Behroozi et al. [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 et al. [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 et al. [2016]

Relación masa estelar - UV

Las medidas dadas por Bouwens et al. [2015a] y Bouwens et al. [2015b] representadas en la **Figura 1.1** están basadas en el trabajo de Finkelstein et al. [2015b], 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 et al. [2019] dando nuevos valores que dejan por encima a las estimaciones de Finkelstein et al. [2015b], Finkelstein et al. [2015a] 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 et al. [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 et al. [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 et al. [2016] usa tres representados por diferentes *papers*:

- Un método es el presentado y desarrollado en el artículo de Finkelstein et al. [2015b], 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 et al. [2015a] y Bouwens et al. [2015b] usan esta técnica.
- En el trabajo de Hildebrandt et al. [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 and 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 et al. [2019], pero antes de ello hagamos una pequeña presentación del trabajo de Behroozi et al. [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

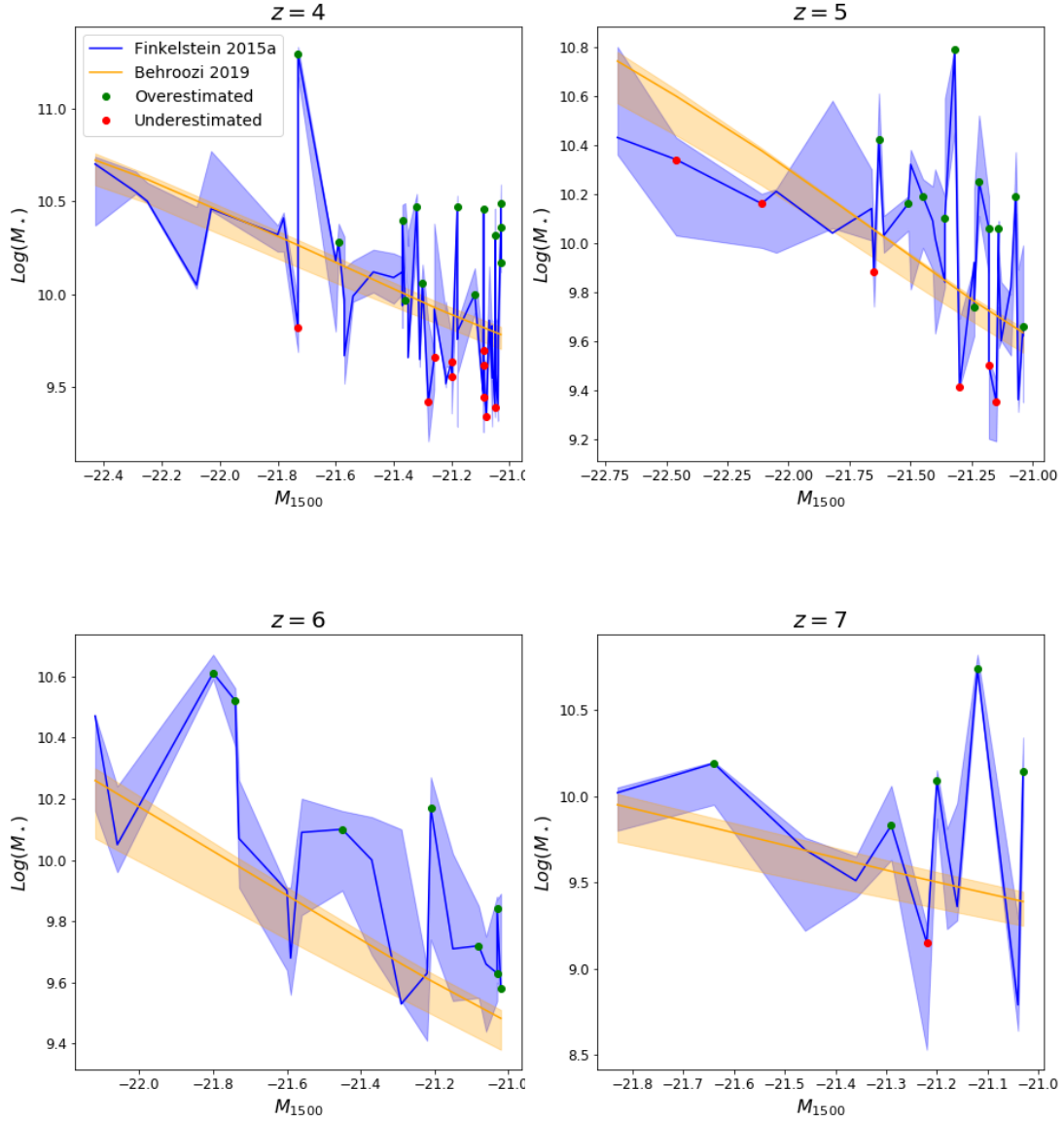


Figure 1.4: En la figura se representa la función que relaciona la luminosidad UV y la masa estelar del trabajo de Finkelstein et al. [2015b] *v.s.* el resultado obtenido por el trabajo de Behroozi et al. [2019]. Las observaciones son las usadas por Finkelstein et al. [2015b] en el que representamos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

Bibliography

- Peter Behroozi and Joseph Silk. The most massive galaxies and black holes allowed by Λ cdm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(4):5382–5387, 04 2018. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/sty945. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/sty945>.
- Peter Behroozi, Risa H Wechsler, Andrew P Hearin, and Charlie Conroy. Universe-machine: The correlation between galaxy growth and dark matter halo assembly from $z = 0$ -10. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488(3):3143–3194, 2019.
- RJ Bouwens, GD Illingworth, PA Oesch, J Caruana, B Holwerda, R Smit, and S Wilkins. Reionization after planck: the derived growth of the cosmic ionizing emissivity now matches the growth of the galaxy uv luminosity density. *The Astrophysical Journal*, 811(2):140, 2015a.
- RJ Bouwens, GD Illingworth, PA Oesch, M Trenti, I Labbé, L Bradley, M Carollo, PG van Dokkum, V Gonzalez, B Holwerda, et al. Uv luminosity functions at redshifts $z = 4$ to $z = 10$: 10,000 galaxies from hst legacy fields. *The Astrophysical Journal*, 803(1):34, 2015b.
- Peter Capak, Herve Aussel, Kevin Bundy, Marcella Carollo, Ranga Ram Chary, Francesca Civano, Jean Coupon, Catrina Diener, Jenifer Donley, Jim Dunlop, et al. Splash: Spitzer large area survey with hyper-suprime-cam. *Spitzer Proposal*, 2012.
- Steven L Finkelstein, Russell E Ryan Jr, Casey Papovich, Mark Dickinson, Mimi Song, Rachel S Somerville, Henry C Ferguson, Brett Salmon, Mauro Giavalisco, Anton M Koekemoer, et al. The evolution of the galaxy rest-frame ultraviolet luminosity function over the first two billion years. *The Astrophysical Journal*, 810(1):71, 2015a.
- 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, 2015b.
- Norman A Grogin, Dale D Kocevski, SM Faber, Henry C Ferguson, Anton M Koekemoer, Adam G Riess, Viviana Acquaviva, David M Alexander, Omar Almaini, Matthew LN Ashby, et al. Candels: the cosmic assembly near-infrared deep extragalactic legacy survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197(2):35, 2011.
- 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.
- SG Murray, Chris Power, and ASG Robotham. Hmfcalc: An online tool for calculating dark matter halo mass functions. *Astronomy and Computing*, 3:23–34, 2013.
- Ravi K Sheth, HJ Mo, and Giuseppe Tormen. Ellipsoidal collapse and an improved model for the number and spatial distribution of dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 323(1):1–12, 2001.
- Charles L Steinhardt and Josh S Speagle. A uniform history for galaxy evolution. *The Astrophysical Journal*, 796(1):25, 2014.
- 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>.