

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

24 de diciembre de 2019



# 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 práctica.

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  $\Lambda$ CDM y el modelo jerárquico de crecimiento galáctico.

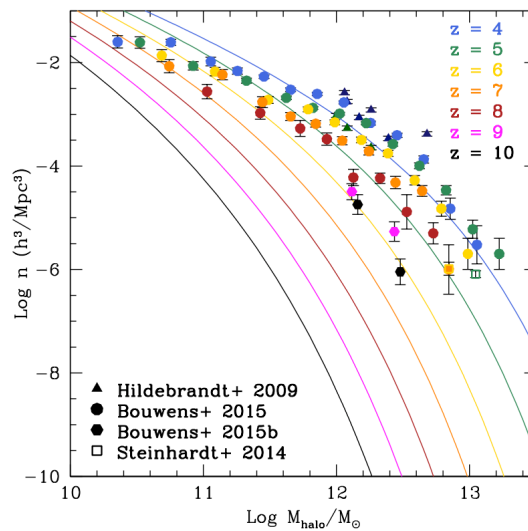


FIGURA 1.1: Figura que representa la función de masa de halo. En línea continua se muestra la predicción teórica sacada de HMFCalc (Murray, Power y Robotham, 2013) y Sheth, Mo y Tormen, 2001 mientras que los marcadores muestran los valores obtenidos a través de las observaciones estudiadas en Hildebrandt 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  $\Lambda$ 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  $\Lambda$ 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  $\Lambda$ 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  $\Lambda$ 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 paraetrización de Scheter 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  $z=7$  contrario a lo esperado y que concuerda con el resultado estudiado aquí del *paper* 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 CANDELS<sup>1</sup>, CFHTLS<sup>2</sup> y SPLASH<sup>3</sup> y usando tres metodologías distintas que explicaremos en la siguiente subsección, 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 en otra subsección más adelante. Las discrepancias que se pueden observar en la **Figura 1.1** son muy notables y son estudiadas en Steinhardt y col., 2016. Aquí haremos un pequeño resumen de estas explicaciones aplicando las nuevas métricas obtenidas de Behroozi y col., 2019 pero antes para poder comprender mejor los posibles *bias* observacionales considerados u omitidos explicaremos en mayor detalle como se han obtenido dichas medidas de la función de masa de halo de las observaciones.

## 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

---

<sup>1</sup>Grogin y col., 2011

<sup>2</sup>Hildebrandt y col., 2009

<sup>3</sup>Capak y col., 2012

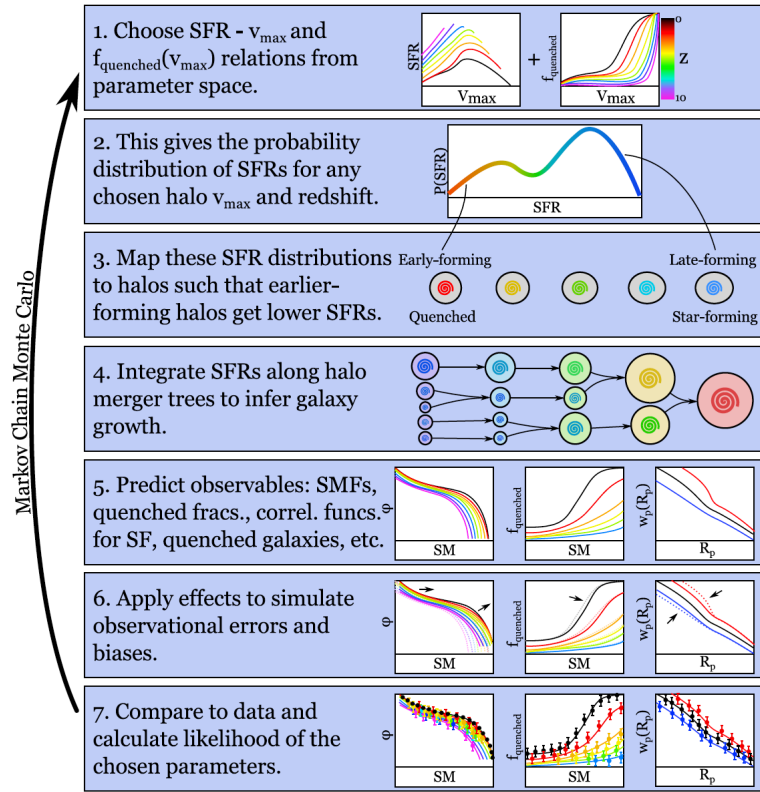


FIGURA 1.2: Resumen del método usado en Behroozi y col., 2019 para enlazar el crecimiento galáctico con el del halo.

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.

### 1.2.1. *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 grados rasgos está recogido en la Figura 1.2 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 mayor profundidad.

### 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 las estimaciones de Finkelstein y col., 2015a, Finkelstein y col., 2015b como se muestra en la **Figura 1.3**.

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 usa la relación entre masa estelar y masa de halo para lograr establecer una conexión entre la masa del halo y la luminosidad UV mediante el procedimiento de emparejamiento. En el trabajo de Behroozi y col., 2019 se revisa la relación basándose en las distribuciones de probabilidad calculadas en las simulaciones MCMC de las funciones de masa estelar, luminosidad y las correcciones debidas a la atenuación de polvo según el redshift. Comparando los resultados de Behroozi y col., 2019 con los de Finkelstein y col., 2015a encontramos que estos últimos se encuentran sobre-estimados con respecto a los últimos datos de los primeros (**Figura 1.3**) en las galaxias más débiles, esto podría provocar una sobre-estimación de la masa de los halos ocasionando las discrepancias observadas si el ratio de masa estelar masa halo permaneciera constante o el efecto contrario si esto provocase que el ratio SMHM decayese.

### 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 vía 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

**1.2.2. Método de función de luminosidad UV**

**1.2.3. Método de Clusterización**

**1.2.4. Método de ratio luminosidad masa halo**

**1.3. Normalidad de las Galaxias**



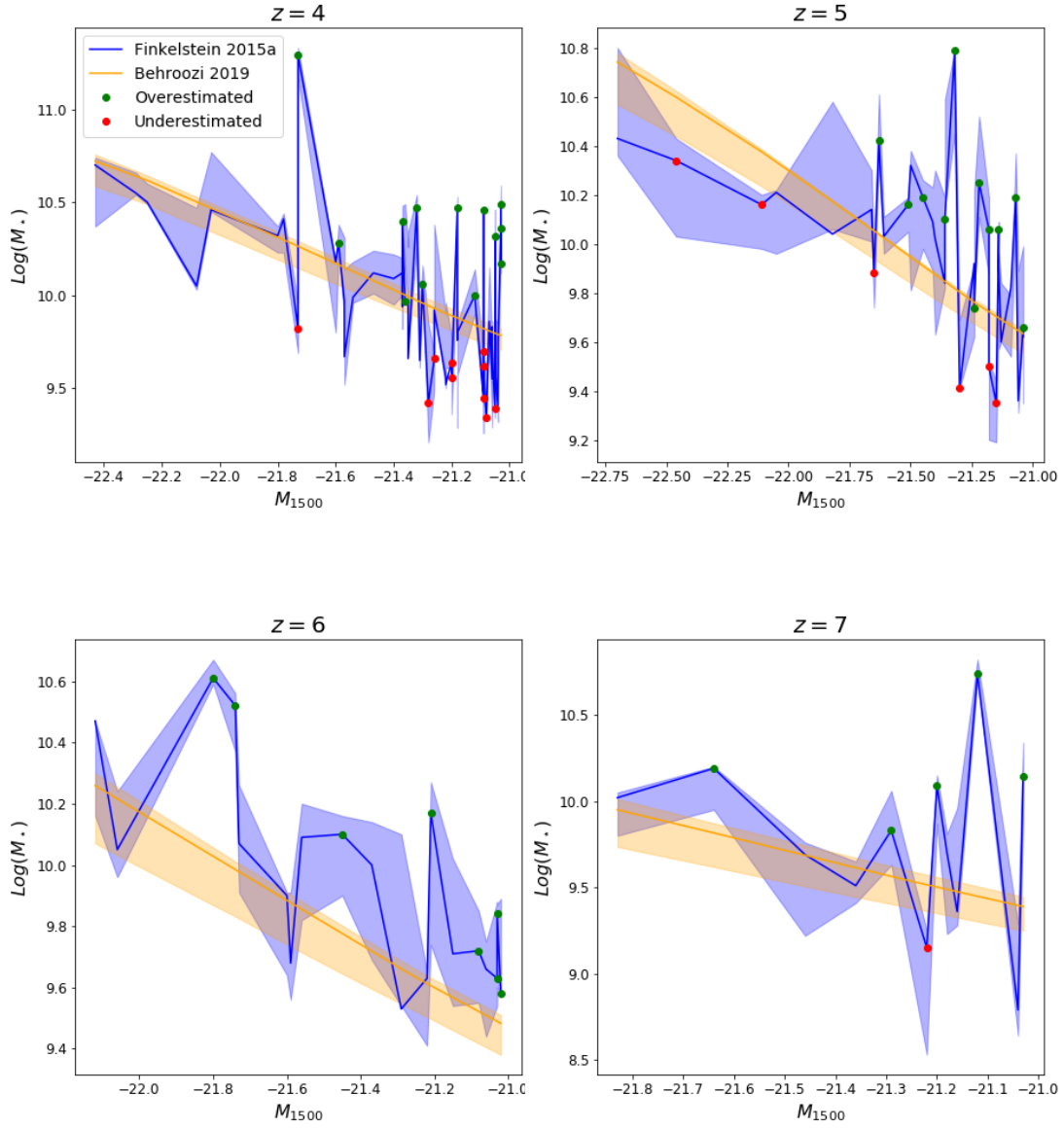


FIGURA 1.3: En la figura se representa la función que relaciona la luminosidad UV y la masa estelar del trabajo de Finkelstein y col., 2015a v.s. el resultado obtenido por el trabajo de Behroozi y col., 2019. Las observaciones son las usadas por Finkelstein y col., 2015a en el que representamos los intervalos 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 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>.