

Formación y Evolución de las Galaxias

Alfredo J. Mejía^{1,2}

¹Posgrado de Física Fundamental
Universidad de Los Andes

²Centro de Investigaciones de Astronomía

4 de mayo de 2017

MOTIVACIÓN I

Si bien los sondeos de galaxias de última generación han revelado detalles de los fenómenos físicos que intervienen en la formación y evolución de las galaxias, una construcción física *ab initio* permanece aún elusiva. La principal limitación en este sentido sigue siendo la tecnología. Por otra parte, desde el punto de vista teórico, mediante simulaciones cosmológicas autoconsistentes de formación de estructuras a gran escala, hemos llegado a la satisfactoria realización de que conocemos (y hasta cierto punto, entendemos) los aspectos físicos más relevantes en la formación de las galaxias. Existen esencialmente dos formas de modelar los procesos físicos de la formación y la evolución de las galaxias en dichas simulaciones: uno es mediante simulaciones hidrodinámicas de materia oscura y bariónica y el otro es el llamado método semianalítico; aunque ambos métodos son fundamentalmente distintos, obtienen resultados similares. Más aún, estos están en acuerdo cualitativo con las observaciones. Aún así, existen fenómenos físicos de gran importancia en la construcción de una teoría de formación de galaxias, que carecen

MOTIVACIÓN II

aún de un entendimiento completo. Es el objeto de este seminario hacer un recuento fenomenológico de los procesos físicos que intervienen en la formación de las galaxias, señalar las incertidumbres que existe en cada proceso y establecer las perspectivas a futuro. Ya que el enfoque es fenomenológico, este seminario estará naturalmente sesgado hacia los resultados del método semianalítico, sin embargo, cuando sea pertinente señalaré las diferencias entre los resultados de ambos métodos en comparación con las observaciones.

ANTECEDENTES I

FORMACIÓN DE GALAXIAS. Aunque en los primeros modelos de formación de galaxias lograban predecir algunas propiedades globales, como la función de luminosidad de las galaxias y la existencia de galaxias satélites y galaxias centrales masivas compartiendo el mismo halo de materia oscura (White y Rees, 1978). Más aún, el modelo de colapso monolítico aún permitía predecir algunas de las propiedades observadas en galaxias elípticas (Larson, 1974; Larson y Tinsley, 1974). En particular, estos modelos predecían colores más azules hacia el núcleo galáctico que los observados, esto debido a que la tasa de formación estelar se extendendía en desde el momento en que el colapso iniciaba hasta el presente. Larson y Tinsley (1974) sugería que para 'apagar' la formación estelar en este tipo de galaxias, una fuente de energía en el núcleo de estas galaxias era necesaria para barrer y calentar el material gaseoso. La realización de que algunos

ANTECEDENTES II

fenómenos físicos aún faltaban en la construcción de una teoría para describir la formación y evolución de las galaxias, era clara.

Primeros indicios de que un número significativo de galaxias podrían albergar un agujero negro supermasivo ($\sim 10^6 — 10^9 M_{\odot}$) apareció entre finales de los 80's y comienzos de los 90's (véase Kormendy y Richstone, 1995, para una revisión). Estos indicios, aunque en su mayoría circunstanciales, fueron suficientes para motivar la búsqueda de agujeros negros supermasivos en el universo local. Eventualmente, los movimientos estelares a escalas de unos pocos parsecs proveyó evidencia irrefutable de que muchas galaxias (independientemente de la clase morfológica), albergaban un agujero negro supermasivo en su núcleo. Más importante aún, las masas de dicho agujero negro estaban correlacionadas con la luminosidad (Magorrian y col., 1998) y con la masa (medida con la dispersión de velocidades central Ferrarese y Merritt, 2000). Estas

ANTECEDENTES III

correlaciones indicaban claramente que debía existir un vínculo fundamental entre la formación de las galaxias y la formación del agujero negro supermasivo que estas albergan. Eventualmente, los intentos por teorizar la formación de las galaxias comenzaron a incluir la formación y evolución de agujeros negros supermasivos y los efectos ambientales que estos producían (e.g. Springel, Di Matteo y Hernquist, [2005](#)). La lista de fenómenos físicos que capturaban la esencia de la formación y evolución de galaxias en el universo tomó la forma que hoy conocemos:

- Fusión de (sub)halos (gravedad),
- enfriamiento del material bariónico (termodinámica y transferencia radiativa),
- formación estelar,
- evolución química,
- *feedback* de la formación estelar,

ANTECEDENTES IV

- formación de agujeros negros supermasivos, y
- *feedback* de núcleos activos.

PREDICCIONES. Los primeros intentos por simular la formación de estructuras a escalas cosmológicas, lograban hacer predicciones cualitativamente en acuerdo un conjunto de observaciones:

- La formación de estructuras sobredensas,
- la formación de cúmulos de galaxias,
- las propiedades cinemáticas de esferoides y discos estelares,

Sin embargo fallaron en predecir propiedades observadas directamente como los colores y otras estimadas como la tasa de formación estelar.

TEORÍA DE FORMACIÓN DE GALAXIAS – EN CONSTRUCCIÓN I

En el marco del *Big Bang* se postula que el universo comenzó en un estado altamente denso, caliente y esencialmente homogéneo. Durante un corto período en su expansión, llamado inflación, se manifestaron fluctuaciones cuánticas que dieron origen a inhomogeneidades, las mismas que detectamos ahora en el Fondo Cósmico de Microondas (FCM). Las observaciones del FCM junto con mediciones de la distancia y las Oscilaciones Acústicas de Bariones (OAB) permiten determinar los parámetros cosmológicos con un nivel de incertidumbre considerablemente bajo (~ 10 por ciento). Estas mediciones han permitido determinar que el universo en el presente es plano y que está dominado por materia oscura y energía oscura en más de un **95** por ciento. Aunque no sabemos qué es exactamente la materia oscura, simulaciones han permitido descartar entre un gran número de candidatos. Es comúnmente asumido que la materia oscura se comporta como un fluido frío y no colisional y constituye el ~ 25 por ciento de la materia-energía en el universo. La energía oscura, por otra parte, es aún más

TEORÍA DE FORMACIÓN DE GALAXIAS – EN CONSTRUCCIÓN II

misteriosa y se ha introducido como un parámetro *ad hoc* para explicar la geometría y la tasa de expansión (acelerada) del universo. En las ecuaciones fundamentales de la Relatividad General, la energía oscura toma la forma de una constante, llamada Constante Cosmológica Λ y representa el ~ 70 por ciento de la materia-energía. El restante ~ 4 por ciento es materia bariónica.

Dadas estas condiciones iniciales, en un universo en expansión que contiene solo materia oscura, se desarrollan de manera natural regiones de sobre densidad. A medida que el universo se expande la densidad de campo (densidad promedio) disminuye. Sin embargo, cuando en estas regiones de sobre densidad se alcanza un valor crítico, la expansión del universo es despreciable y el material acumulado se convierte en autogravitante.

Los sondeos del cielo de los últimos 20 años nos ha permitido estudiar con relativo detalle (aún así estadísticamente hablando) las propiedades observables y físicas de las galaxias en escalas de tiempo cosmológicas ($z < 6$). Por una parte los

TEORÍA DE FORMACIÓN DE GALAXIAS – EN CONSTRUCCIÓN III

métodos que buscan explotar los registros fósiles en el universo local ($z < 0,5$) han servido su propósito revelando correlaciones entre las propiedades físicas de las galaxias (la relación masa-metalicidad, Tremonti y col., 2004; Sánchez y col., 2013; la relación edad-metalicidad, Worthey, 1994; Gallazzi y col., 2005; Panter y col., 2008), mientras que estudios fuera del universo local ($z > 1$) han permitido muestrear la distribución de masa estelar a escalas cosmológicas, la densidad de TFE, entre otros (véase Madau y Dickinson, 2014, para una revisión completa). Estas observaciones y mediciones han permitido la construcción de calibraciones en vista de una construcción *ab initio* de la formación de galaxias. También nos han permitido decir con certeza que hoy tenemos conocimiento de los fenómenos físicos que intervienen en la construcción de dicha teoría.

Aún así, los aspectos fundamentales relacionados con la formación estelar no están completamente entendidos. Por un lado las simulaciones que apuntan a resolver el problema de la formación de galaxias a escalas cosmológicas, de primeros

TEORÍA DE FORMACIÓN DE GALAXIAS – EN CONSTRUCCIÓN IV

principios, (e. g., MILLENIUM Springel y col., [2005](#); ILLUSTRIS Vogelsberger y col., [2014](#)) no han alcanzado la resolución espacial (< 20 pc) y ni en masa ($< 10^6 M_{\odot}$) requeridos para experimentar distintos escenarios de formación estelar físicamente plausibles, de nuevo, en el contexto cosmológico. Por otro lado, las observaciones, incluso en nuestra propia galaxia (), son aún insuficientes para elaborar una comprensión completa de los mecanismos físicos que intervienen en el MIE y como estos propician o inhiben la formación estelar (véase Naab y Ostriker, [2016](#), para una revisión).

A continuación una representación esquemática de los ingredientes necesarios para la elaboración de una teoría de formación de galaxias.

ENFRIAMIENTO DEL GAS I

El gas en el halo se asume que es calentado por ondas de choque producidas por el durante el colapso. Tradicionalmente se asume que el gas se encontraba en equilibrio colisional (sin embargo véase Wiersma, Schaye y Smith, [2009](#)). Bajo esta suposición, el mecanismo de enfriamiento más eficiente a escalas cosmológicas son los procesos radiativos de dos cuerpos. Dependiendo de la temperatura del gas, el mecanismo específico de enfriamiento será uno u otro:

Bremsstrahlung. A temperaturas $T > 10^7$ K, el gas está completamente ionizado, por lo tanto se enfría vía interacciones libre-libre como enfriamiento 'Bremsstrahlung'.

RECOMBINACIÓN. En el rango de temperaturas $10^4 < T < 10^7$ K, las especies colisionalmente ionizadas pueden decaer al nivel base y los electrones recombinarse con los iones.

ENFRIAMIENTO DEL GAS II

EMISIÓN DE METALES. A temperaturas $T < 10^4$ K el enfriamiento ocurre mediante (des)excitación colisional de especies pesadas, mediante un proceso llamado emisión de metales.

Los mecanismos de enfriamiento dependen, por supuesto, de las condiciones del gas y del medio en que este se encuentra. Si alguno de los procesos antes mencionados no es capaz de enfriar eficientemente el gas, este se convertirá en una estructura cuasi-estática soportada por presión, con una temperatura cercana a la temperatura virial. Eventualmente se enfriará, perderá su estructura soportada por presión. El gas frío es acretado en un disco en el centro del halo de materia oscura. Durante el proceso de acreción del gas se asume que el disco conserva su momento angular (véase White y Frenk, [1991](#); Cole y col., [2000](#)).

Para que la formación estelar tenga lugar, el gas debe entonces enfriarse lo suficiente como para condensarse en nubes de unas pocas decenas de parsecs.

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* I

El contenido estelar de una galaxia se ve afectado principalmente por dos fenómenos: la formación estelar, que es un fenómeno local que ocurre a escalas de unas pocas decenas de parsecs y la fusión de halos de materia oscura por acción de la gravedad, el cual tiene lugar en escalas de millones de parsecs. Las escalas temporales también son bastante diferentes entre un fenómeno y otro. La formación estelar, bajo la suposición de que no existe *feedback* estelar o de AGN (los cuales explicaré más adelante), es un fenómeno secular, es decir, se puede extender desde la formación del disco hasta el presente. El fenómeno de fusión de halos, por otra parte, puede borrar sus huellas en cuestión de unos pocos giga años.

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* II

FORMACIÓN ESTELAR. Formación estelar es probablemente el fenómeno físico más fundamental en la astrofísica. Parte de lo que lo hace interesante es que aún no están resueltas las condiciones físicas bajo las cuales tiene lugar, pues las propiedades físicas del MIE (donde la formación estelar tiene lugar) son extremadamente complejas: primero el MIE está compuesto por gas en distintas fases coexistiendo en un amplio rango de densidades y temperaturas. Desde el punto de vista de las simulaciones *ab initio* a gran escala (e.g. simulaciones cosmológicas) estas condiciones físicas aún están lejos de ser resueltas. Sin embargo, la existencia de relaciones 'globales' o que se manifiestan de forma global en poblaciones de galaxias nos ha permitido hacer avances en nuestro entendimiento teórico de los procesos físicos involucrados en la formación estelar. En este sentido, las simulaciones *ab initio* y las semi-analíticas han desarrollado recetas con la

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* III

sola meta de predecir dichas relaciones, es decir, con la sola meta de predecir de manera acertada dichas relaciones.

En una visión bastante esquemática, el proceso de formación estelar, partiendo del acentamiento del gas frío en una estructura soportada por momento angular, se puede resumir como sigue:

- Formación de gas atómico frío,
- formación de nubes de gas auto-gravitantes,
- formación de moléculas y nubes moleculares,
- formación de aglomeraciones densas dentro de esas nubes,
- formación de núcleos preestelares, estrellas y cúmulos estelares.

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* IV

De este conjunto de eventos, podemos decir que conocemos con cierto grado de certidumbre las condiciones iniciales, es decir, la formación del disco de gas, y el estadio final, cuando las estrellas y los cúmulos estelares ya se han formado. Desafortunadamente, las propiedades ópticas del del MIE en nubes de formación estelar dificultan la resolución de los fenómenos físicos mediante estudios observacionales. En particular, la formación de gas atómico, gas molecular y la formación subsiguiente de nubes moleculares, e incluso su rol en la formación estelar, son aún muy inciertas. Múltiples mecanismos siendo candidatos plausibles para la activación de la formación estelar una vez el gas se ha acentado en el disco. Desde el punto de vista teórico, en las simulaciones de formación de galaxias es común parametrizar la tasa de formación estelar,

$$\dot{\rho}_{\star} = \epsilon_{\star} \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\star}} \propto \rho_{\text{gas}}^{1,5},$$

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* V

e imponer un conjunto de reglas (condiciones) físicas para su activación. Una de estas reglas, y probablemente la más fundamental, es la escala de tiempo, t_* , en que la formación estelar ocurre localmente. En general esta escala temporal depende de las propiedades físicas del gas y puede ser función de escala dinámica de tiempo, del tiempo de enfriamiento, de la escala de tiempo para la formación de moléculas (e.g. H_2). Ciertamente, aún no está claro si alguno de los procesos físicos que involucra adoptar una escala temporal u otra, es preponderante en la formación estelar y bajo qué circunstancias lo es.

Uno puede acotar la física que interviene en la formación estelar suponiendo dos esquemas: uno en el que los efectos locales dominan los mecanismos de formación estelar y otro en el que los efectos globales lo hacen. En el primer esquema se asume que la formación estelar es controlada en el corazón de nubes moleculares, en particular, por su estructura y abundancia;

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* VI

una afirmación que es respaldada por evidencia observacional que conduce a una correlación entre la TFE y la cantidad de gas denso en nubes moleculares (e.g. Lada, Lombardi y Alves, [2010](#)). Lada, Lombardi y Alves ([2010](#)) encontraron que existe una fuerte correlación entre la abundancia de gas molecular en regiones de alta densidad con el número de objetos estelares jóvenes (directamente proporcional a la TFE). Bajo este esquema, la relación entre la TFE y la densidad del gas se explica por un decremento en la escala temporal o por un incremento de la fracción de gas por encima de cierto umbral, suponiendo $t_{\star} = f \times t_{cl}$. Bajo el segundo esquema, la formación estelar es dominada globalmente por fenómenos dinámicos, en lugar de los mecanismos de enfriamiento y la formación de gas molecular. Independientemente de la fase del gas, atómico o molecular, la densidad superficial de este es lo que controla la TFE. En lugar de suponer umbrales relacionados con el enfriamiento y la formación de gas molecular, este

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* VII

esquema supone que la transición entre los distintos regímenes de formación estelar está relacionada con inestabilidades dinámicas en el disco. En este sentido, la relación entre la TFE y la densidad del gas surge por escalas temporales acortadas en regiones de alta densidad o escalas dinámicas más cortas (e. g. Ostriker, McKee y Leroy, [2010](#)). El esquema local explica naturalmente las relaciones locales entre las propiedades del gas molecular y la TFE. Sin embargo no explica por qué una galaxia o parte de ella se encuentra en distintos regímenes de formación estelar. El esquema global, por otro lado, sugiere que los modos de formación estelar relacionados con regiones de baja densidad pueden explicarse por inestabilidades dinámicas, una afirmación que es aún incierta. A altas densidades las altas TFE se explican por el compactamiento del gas. La eficiencia es regulada por el *feedback* estelar, sin embargo, la observación de que la eficiencia es similar

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* VIII

en nubes moleculares independientemente de que estas estén formando estrellas masivas o no, plantea dudas sobre este esquema.

FUSIÓN DE HALOS. La fusión de halos o *merger* es uno de los mecanismos mediante los cuales la masa luminosa de una galaxia aumenta. Por supuesto, si una de las galaxias en el merger contiene una fracción importante de gas, la fusión o incluso la interacción entre las galaxias puede propiciar eventos de formación estelar violentos, caracterizados por un incremento en la eficiencia ϵ_{\star} . La fusión de galaxias puede también cambiar dramáticamente la estructura de las galaxias y propiciar el acrecimiento de materia al agujero negro supermasivo en la región central de las galaxias. Las simulaciones de fusión de halos de materia oscura (junto con la galaxia correspondiente), han permitido avances significativos hacia la elaboración de una teoría que explique la formación de galaxias y su evolución subsiguiente. Entre las conclusiones a las que hemos llegado están (Naab y Ostriker, [2016](#)):

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* IX

- La fusión binaria de halos es poco frecuente,
- en galaxias de baja masa y masa intermedia las estrellas se forman *in situ*,
- en galaxias masivas la fusión de galaxias es importante,

Uno puede distinguir entre dos casos extremos en la fusión de halos. Uno en el que la componente gaseosa es despreciable y por lo tanto la interacción es no colisional, y otro donde la componente gaseosa es importante.

En el primer caso solo materia oscura y materia luminosa interactúan gravitacionalmente y dependiendo de la relación entre las masas, la galaxia resultante puede desarrollar un halo más compacto debido a relajación violenta. El proceso de relajación violenta propiciará un intercambio de momento angular entre el disco de la componente principal y el halo correspondiente, produciendo un sistema cinemáticamente caliente. En general existirá transferencia de momento angular entre el halo y la componente estelar y entre la componente estelar siendo engullida y la

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* X

componente existente. El momento angular orbital de la componente de menor masa se transformará en momento rotacional en la componente más masiva, de manera que la galaxia resultante rotará más que sus progenitoras, independientemente de la morfología de las componentes interactuantes (Qu y col., [2017](#)).

Si los sistemas interactuantes son esferoidales (y una es mucho menos masiva que la otra), no habrá relajación violenta y la galaxia de mayor masa asimilará a la galaxia más pequeña en un radio mayor. Este mecanismo, de hecho es capaz de explicar con éxito la evolución estructural de las galaxias tempranas más masivas que vemos en el universo local. Sin embargo, el rol de las fusiones menores en la formación de este tipo de galaxias dependerá de la frecuencia de estos eventos y de la morfología de las componentes involucradas. Si la frecuencia de fusiones es muy baja, por ejemplo, la

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* XI

componente más masiva podría conservar su morfología original. En el caso de un disco estelar, podría haber un calentamiento moderado.

Por supuesto cuando la componente gaseosa no es despreciable en ninguna de las galaxias interactuantes ya no es posible asumir dinámica no colisional, tampoco es posible ignorar los efectos de transporte de energía mediante radiación. Interacciones de este tipo parecen ser las responsables de los fenómenos de brotes de formación estelar, como los observados en galaxias ultra-luminosas en el IR. El gas acentado en el centro de la galaxia puede hacer que el potencial sea más esférico, propiciando el desarrollo de cinemática rotacional y galaxias con morfología de disco (Jesseit y col., [2007](#)). En este tipo de interacciones, la componente gaseosa acretada por el disco, si tiene momento angular lo suficientemente bajo puede ser acretada por el agujero negro supermasivo central de la galaxia. La energía liberada durante el proceso de acreción se ha encontrado responsable de imprimir

FORMACIÓN ESTELAR Y *mergers* XII

momentum al gas acentado en el disco, disminuyendo dramáticamente la formación estelar (más adelante explicaré con más detalle la física detrás de los procesos de *feedback*).

EVOLUCIÓN QUÍMICA I

Feedback ESTELAR Y DE NÚCLEOS ACTIVOS I

PODER PREDICTIVO I

- Comparación de los resultados de las simulaciones con las observaciones.
- Discutir las incertidumbres que intervienen cuando se falla en la predicción.
- ¿Cómo se puede mejorar?.

RESUMEN Y PERSPECTIVAS I

- Mencionar los fenómenos físicos fundamentales que intervienen en la formación de las galaxias.
- Mencionar las incertidumbres en cada uno de estos fenómenos.
- Mencionar resultados más importantes de las simulaciones.
- Decir cuales son las perspectivas.

REFERENCIAS I

- 📄 Larson, R. B. (1974). "Dynamical models for the formation and evolution of spherical galaxies". En: *MNRAS* 166, págs. 585–616.
- 📄 Larson, R. B. y B. M. Tinsley (1974). "Photometric Properties of Model Spherical Galaxies". En: *ApJ* 192, págs. 293–310.
- 📄 White, S. D. M. y M. J. Rees (1978). "Core condensation in heavy halos – A two-stage theory for galaxy formation and clustering". En: *MNRAS* 183, págs. 341–358.
- 📄 White, S. D. M. y C. S. Frenk (1991). "Galaxy formation through hierarchical clustering". En: *ApJ* 379, págs. 52–79.
- 📄 Worthey, G. (1994). "Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects". En: *ApJS* 95, págs. 107–149.
- 📄 Kormendy, J. y D. Richstone (1995). "Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei". En: *ARA&A* 33, pág. 581.

REFERENCIAS II

- 📄 Magorrian, J. y col. (1998). "The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers". En: *AJ* 115, págs. 2285-2305.
- 📄 Cole, S. y col. (2000). "Hierarchical galaxy formation". En: *MNRAS* 319, págs. 168-204.
- 📄 Ferrarese, L. y D. Merritt (2000). "A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies". En: *ApJl* 539, págs. L9-L12.
- 📄 Tremonti, C. A. y col. (2004). "The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey". En: *ApJ* 613, págs. 898-913.
- 📄 Gallazzi, A. y col. (2005). "The ages and metallicities of galaxies in the local universe". En: *MNRAS* 362, págs. 41-58.
- 📄 Springel, V., T. Di Matteo y L. Hernquist (2005). "Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers". En: *MNRAS* 361, págs. 776-794.

REFERENCIAS III

- Springel, V. y col. (2005). "Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars". En: *Nature* 435, págs. 629-636.
- Jesseit, R. y col. (2007). "2D kinematics of simulated disc merger remnants". En: *MNRAS* 376, págs. 997-1020.
- Panther, B. y col. (2008). "The cosmic evolution of metallicity from the SDSS fossil record". En: *MNRAS* 391, págs. 1117-1126.
- Wiersma, R. P. C., J. Schaye y B. D. Smith (2009). "The effect of photoionization on the cooling rates of enriched, astrophysical plasmas". En: *MNRAS* 393, págs. 99-107.
- Lada, C. J., M. Lombardi y J. F. Alves (2010). "On the Star Formation Rates in Molecular Clouds". En: *ApJ* 724, págs. 687-693.
- Ostriker, E. C., C. F. McKee y A. K. Leroy (2010). "Regulation of Star Formation Rates in Multiphase Galactic Disks: A Thermal/Dynamical Equilibrium Model". En: *ApJ* 721, págs. 975-994.

REFERENCIAS IV

- 📄 Sánchez, S. F. y col. (2013). "Mass-metallicity relation explored with CALIFA. I. Is there a dependence on the star-formation rate?" En: *A&A* 554, A58, A58.
- 📄 Madau, P. y M. Dickinson (2014). "Cosmic Star-Formation History". En: *ARA&A* 52, págs. 415-486.
- 📄 Vogelsberger, M. y col. (2014). "Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe". En: *MNRAS* 444, págs. 1518-1547.
- 📄 Naab, T. y J. P. Ostriker (2016). "Theoretical Challenges in Galaxy Formation". En: *ArXiv e-prints*.
- 📄 Qu, Y. y col. (2017). "A chronicle of galaxy mass assembly in the EAGLE simulation". En: *MNRAS* 464, págs. 1659-1675.