

Formación y Evolución de las Galaxias

Alfredo J. Mejía^{1,2}

¹Posgrado de Física Fundamental
Universidad de Los Andes

²Centro de Investigaciones de Astronomía

27 de abril 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 (Cole y col., [2000](#)). 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.

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

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.
- 📄 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.
- 📄 Magorrian, J. y col. (1998). "The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers". En: *AJ* 115, págs. 2285–2305.

REFERENCIAS II

- 📄 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.
- 📄 Springel, V. y col. (2005). "Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars". En: *Nature* 435, págs. 629-636.

REFERENCIAS III

- Panter, 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.
- 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*.