



Evolución de la actividad nuclear de galaxias centrales en cúmulos de galaxias simulados

M.B. Pereyra¹ & C. Ragone-Figueroa^{2,3}

¹ Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

² Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

³ Osservatorio Astronomico di Trieste, INAF, Italia

Contacto / mariana.pereyra.722@mi.unc.edu.ar

Resumen / En el presente trabajo se estudia la evolución de la actividad nuclear (AGN) en las galaxias más brillantes de cúmulos de galaxias (BCGs) explotando un conjunto de simulaciones hidrodinámicas de cúmulos de galaxias con modelado de acreción y *feedback* de agujeros negros supermasivos (SMBH). A diferencia de lo que sucede en las observaciones para galaxias de campo, nuestros resultados preliminares sugieren un desfase entre el pico de la evolución de la tasa de acreción de los SMBHs y la historia de formación estelar de las BCGs que los contienen. Con respecto a la conexión entre la tasa de formación estelar (SFR) y la actividad nuclear, a lo largo de la evolución es posible detectar momentos en los que en la muestra emerge una relación entre la tasa de acreción y la de formación estelar. Sin embargo, también es posible encontrar instantes en los que ninguna correlación es clara. Atribuimos este resultado, en parte, a las diferentes escalas temporales y espaciales involucradas en los procesos de acreción y formación estelar.

Abstract / In this work, we study the evolution of active galactic nuclei (AGN) in the brightest cluster galaxies (BCGs) by exploiting a suite of hydro-dynamical simulations with modeling of super-massive black hole (SMBH) accretion and feedback. At variance with observational works based on field galaxies, our preliminary results suggest the existence of a delay in the peak of the SMBH accretion rate evolution with respect to the peak in the star formation history of the galaxies. Regarding the connection between star formation rate (SFR) and nuclear activity, it is possible to detect snapshots during the evolution of the simulated BCG sample in which SFR and SMBH accretion rates are correlated. Nevertheless, it can also be envisaged periods in which no correlation is evident. We ascribe this fact to the different time and spatial scales involved in the accretion and star formation processes.

Keywords / galaxies: nuclei — galaxy: clusters, cD — galaxies: evolution — hydrodynamics

1. Introducción

En el modelo de Universo actual los Núcleos Galácticos Activos (AGN), son el producto de la acreción de agujeros negros supermasivos (SMBH), que habitan en los centros de las galaxias. En términos generales se puede decir que las galaxias con AGN son galaxias que poseen en sus centros una región muy compacta, del orden de miliparsec, desde donde se emiten cantidades enormes de energía.

La inclusión del *feedback* de núcleos activos de galaxias en los modelos de formación de galaxias es un ingrediente fundamental para poder obtener galaxias con masas comparables a las observadas. En particular, en simulaciones hidrodinámicas la masa de las galaxias más brillantes de los cúmulos de galaxias (BCG) se ve aumentada en un orden de magnitud si no se considera un modelado de *feedback* de AGN (Ragone-Figueroa et al., 2013). Sin embargo, los resultados observacionales sobre el efecto que el AGN tiene en la formación estelar de la galaxia que lo hospeda no son concluyentes. Dependiendo del trabajo, se encuentran SFRs de muestras de galaxias AGN comparables, mayores o menores que las de muestras control de galaxias sin AGN (ver Mulcahey

et al. (2022) y sus citas).

En este trabajo se estudia la evolución de la actividad AGN, asociada a la tasa de acreción del agujero negro supermasivo y su impacto en la formación estelar en BCGs simuladas.

2. Galaxias simuladas

Las simulaciones utilizadas en este trabajo fueron presentadas en Ragone-Figueroa et al. (2018). Las mismas fueron corridas con el código GADGET3, el cual es una versión modificada del código público GADGET2 Springel (2005) para incluir recetas que tratan la física bariónica que ocurre a resoluciones mayores a las alcanzadas por la simulación (física *sub-grid*). La muestra consiste de 29 BCGs obtenidas de re-simulaciones hidrodinámicas de cúmulos de galaxias. Los cúmulos fueron extraídos de una caja cosmológica con sólo gravedad de 1 Gpc h^{-1} de lado, 24 de ellos con masas $M_{200} > 10^{15} M_{\odot} \text{ h}^{-1}$, y luego resimulados con mejor resolución espacial y de masa incluyendo hidrodinámica y física *sub-grid* (enfriamiento radiativo, formación estelar, enriquecimiento químico, *feedback* de supernovas, crecimiento de SMBHs y *feedback* de AGN).

Las resoluciones involucradas son: materia oscura y gas = 5.6 kpc h^{-1} ; Estrellas y BHs = 3.0 kpc h^{-1} . Mientras que las masas de las partículas: DM = $8.47 \times 10^8 M_\odot \text{ h}^{-1}$; Gas = $1.53 \times 10^8 M_\odot \text{ h}^{-1}$.

Finalmente, para estudiar la evolución de las propiedades de interés en este trabajo, identificamos cada BCG a $z \sim 0$ y buscamos su progenitora principal hacia atrás en el tiempo.

2.1. Modelado de los SMBH

En las simulaciones utilizadas, los SMBH se modelaron utilizando partículas no colisionales. Estas partículas sólo están sujetas a interacciones gravitacionales con otras partículas. La siembra de un SMBH, es decir, su aparición dentro de una galaxia, se realiza cuando el halo de la galaxia ha adquirido un mínimo de masa ($\sim 10^{11} M_\odot \text{ h}^{-1}$).

2.2. Modelado de la acreción de los SMBHs

A partir de la aparición de un SMBH en la galaxia, este empieza a crecer por acreción del gas del medio circundante o bien por fusiones con otros SMBHs. En la simulación, la acreción de gas en el BH ($\dot{M}_{BH}$) se determina como el mínimo entre la tasa de acreción de Bondi α -modificada Bondi (1952) y el límite de Eddington,

$$\dot{M}_{Bondi,\alpha} = \alpha \frac{4\pi G^2 M_{BH}^2 \rho}{(c_s^2 + \nu_{BH}^2)^{3/2}} \quad (1)$$

$$\dot{M}_{Edd} = 4\pi \frac{G m_p}{c \sigma_T} \frac{M_{BH}}{\epsilon_r} \quad (2)$$

donde, m_p : masa de protón, σ_T : sección eficaz de Thompson, c : velocidad de la luz, M_{BH} : masa del SMBH, G : constante de gravitación, ν_{BH} : velocidad relativa entre el SMBH y el gas, ρ : densidad del gas, c_s : velocidad del sonido en el gas circundante al SMBH, ϵ_r : fracción de masa acretada que se convierte en energía y α es un factor igual a 10 o 100 dependiendo de si el gas que se acreta es caliente o frío respectivamente, siendo $T = 5 \times 10^5 \text{ K}$ el límite entre las dos fases.

La ecuación 1, describe la acreción de un objeto en el medio interestelar. La ecuación 2, asegura que la presión de radiación producida no revierta el flujo de gas.

3. Resultados

3.1. Evolución temporal de SFR y $\dot{M}_{BH}$ de la muestra global de galaxias

La Fig. 1 muestra la evolución de la mediana de la tasa de acreción del SMBH ($\dot{M}_{BH}$) y de la tasa de formación estelar (SFR) en azul y rojo respectivamente *. La tasa

*Los puntos correspondientes a las medianas de las tasas de acreción y formación estelar fueron suavizados usando la función `savgol.filter` de `scipy`. Esta función implementa un algoritmo de suavizado basado en el filtro planteado por Savitzky & Golay (1964), el cual permite reducir el ruido y resaltar tendencias subyacentes en los datos.

de acreción típica de los agujeros negros comienza a crecer hasta alcanzar un pico alrededor de 9 Gyr ($z \sim 1.4$). Por su parte, la SFR alcanza un pico más rápidamente alrededor de 11.8 Gyr ($z \sim 3.2$). Luego de sus respectivos picos ambas tasas decrecen mostrando un aumento en la dispersión de sus valores. En el caso de la mediana de la SFR se observa una oscilación en los últimos 4 Gyr que no parece estar correlacionada con el comportamiento de ($\dot{M}_{BH}$) en ese lapso de tiempo.

Puesto que la formación estelar y el crecimiento del SMBH usan el mismo combustible -el gas- podría esperarse que estas dos cantidades estén relacionadas. De hecho, las observaciones muestran que la densidad de formación estelar (SF) y la densidad de tasa de acreción de SMBHs como función del tiempo poseen un pico que coincide alrededor de $z \sim 2$ (LBtime ~ 10 Gyr), por ej. Aird et al. (2015).

Sin embargo, en este trabajo el pico encontrado para la tasa de formación estelar de las galaxias progenitoras de las BCGs simuladas, sucede antes que el pico de la SF cósmica. Probablemente debido a que las progenitoras de estas galaxias BCGs se encuentran en regiones de alta densidad, donde el colapso y la formación estelar comienzan antes que en las demás regiones del Universo.

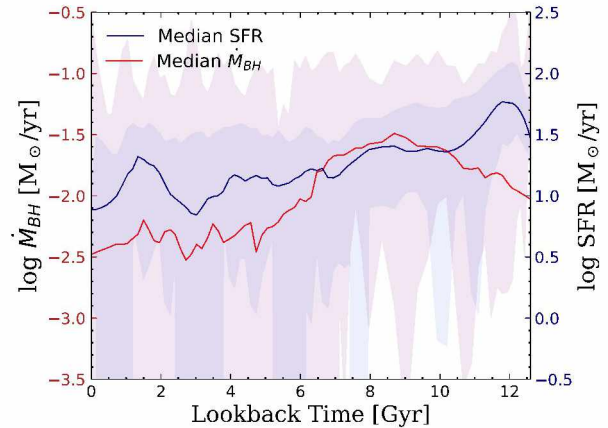


Figura 1: Evolución de las medianas de la tasa de acreción de los SMBHs (línea roja) y de la tasa de formación estelar (línea azul) en función del *Lookback Time*. Las sombras de colores correspondientes a cada línea representan los cuartiles 0.25 y 0.75.

Al contrario de lo encontrado en observaciones para muestras generales de galaxias, en la Fig. 1 se puede ver que en nuestras simulaciones existe un desfase de 2.5 Gyr entre los picos de la SFR y la $\dot{M}_{BH}$ de las galaxias progenitoras de BCGs. Este desfase puede estar siendo enmascarado en las observaciones debido a que tanto la historia de la SF cósmica como la densidad de la tasa de acreción de los SMBHs son construidas teniendo en cuenta muestras de objetos de diferentes masas no dominadas por galaxias masivas y mucho menos por progenitoras de BCGs de cúmulos que a $z = 0$ tienen masas mayores a $10^{15} M_\odot$, como es el caso de los cúmulos simulados en este trabajo.

El retraso del máximo de acreción del SMBH con

respecto al máximo de la SFR en las simulaciones se encuentra en acuerdo con el modelo de Granato et al. (2004). En este modelo, la acreción del SMBH y la formación estelar comienzan simultáneamente hasta que el SMBH, el cual crece bajo el Límite de Eddington, alcanza una masa suficiente para realizar un *feedback* capaz de suprimir la formación estelar. En este momento la SFR alcanza su máximo y comenzará a descender mientras que la acreción del SMBH continúa debido a que se asume que el *feedback* no afecta al reservorio de gas disponible para la acreción. El motivo del desfase en las simulaciones utilizadas en este trabajo es tema de futuros estudios.

3.2. Correlación SFR vs $\dot{M}_{BH}$

En la subsección anterior estudiamos la evolución temporal de las medianas de la SFR y la $\dot{M}_{BH}$ para la muestra completa de galaxias simuladas, encontrando que no existe una correlación evidente entre estas cantidades medias. Sin embargo, al estudiar individualmente la evolución de cada galaxia podemos observar períodos en los que ambas cantidades crecen juntas, períodos en los que no se observa ninguna conexión entre ellas y también períodos en los que no se insinúa ninguna correlación. Una posible causa de este comportamiento puede atribuirse a que las escalas espaciales y temporales involucradas en los procesos de formación estelar, acreción y *feedback* del AGN son distintas.

La Fig. 2 muestra para diferentes instantes la relación entre la tasa de formación estelar normalizada a la masa estelar de la galaxia (sSFR) y la tasa de acreción $\dot{M}_{BH}$ normalizada a $\dot{M}_{Edd}$. Recorriendo los paneles de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se encuentran salidas de la simulación cada vez más tardías. Puede observarse una correlación fuerte a tiempos tempranos (el coeficiente de correlación R^2 se encuentra evidenciado en cada panel) que parece debilitarse a medida que se consideran instantes más tardíos, siendo la excepción el panel 6, en donde se obtiene un valor de R^2 más grande que en los paneles 4 y 5 **.

Es relevante mencionar que los procesos involucrados son complejos, interactúan entre ellos y suceden en escalas temporales y espaciales diferentes (tiempo y escala de la formación estelar y el ciclo de actividad del AGN). Por lo tanto, es probable que el juego entre estas variables sea el responsable de que observacionalmente se encuentren resultados confirmando o poniendo en duda una conexión entre la actividad AGN y la formación estelar para muestras de galaxias generales.

4. Conclusiones

Haciendo uso de simulaciones hidrodinámicas de cúmulos de galaxias estudiamos la evolución temporal de la mediana de la tasa de formación estelar de sus galaxias BCGs y la tasa de acreción de los SMBH que habitan en ellas. A diferencia de lo que sucede cuando se considera

la población general de galaxias, para las galaxias BCGs los picos de estas dos tasas se encuentran desfasados, sugiriendo que no existe una correlación entre ellas. Sin embargo, estudiando la correlación SFR vs $\dot{M}_{BH}$ a diferentes salidas de las simulaciones, es posible encontrar instantes o períodos en los que la SFR de las progenitoras de las galaxias centrales guarda relación con la tasa de acreción de los SMBH. Esta relación es evidente a tiempos tempranos, mientras que se debilita o se pierde hacia *redshift* cero.

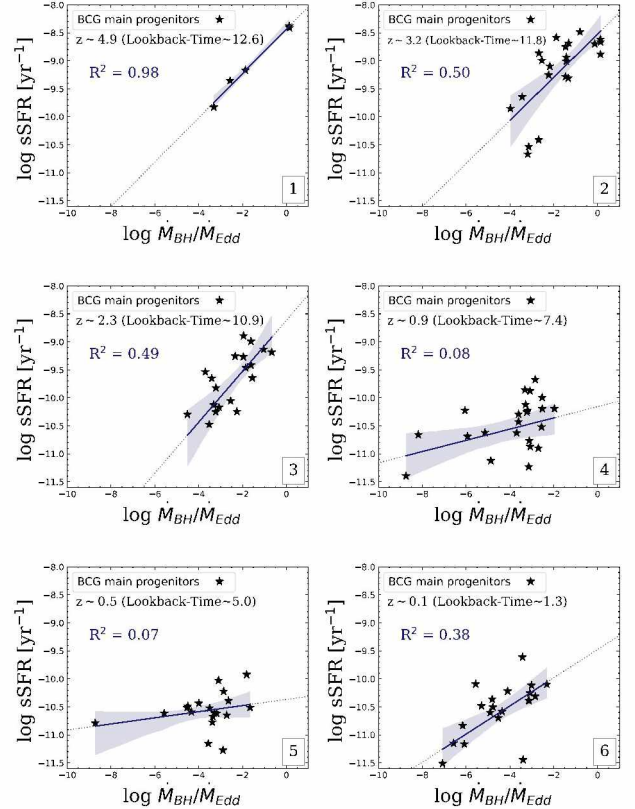


Figura 2: sSFR en función de la tasa de acreción normalizada a la tasa de acreción de Eddington de las galaxias BCGs simuladas para diferentes *redshifts*. La línea a trazos gris representa un ajuste lineal siendo R^2 el coeficiente de correlación. El sombreado representa un intervalo de confianza del 90 %.

Referencias

- Aird J., et al., 2015, MNRAS, 451, 1892
- Bondi H., 1952, MNRAS, 112, 195
- Granato G.L., et al., 2004, ApJ, 600, 580
- Mulcahey C.R., et al., 2022, A&A, 665, A144
- Ragone-Figueroa C., et al., 2013, MNRAS, 436, 1750
- Ragone-Figueroa C., et al., 2018, MNRAS, 479, 1125
- Savitzky A., Golay M.J.E., 1964, Analytical Chemistry, 36, 1627
- Springel V., 2005, MNRAS, 364, 1105