

## **ESTUDIO DE LA FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE CÚMULOS DE GALAXIAS A PARTIR DE SIMULACIONES COMOLÓGICAS DE FORMACIÓN DE ESTRUCTURA**

**Sofía A. Cora\***, **Simon D. M. White†**, y **Volker Springel†**

\*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas  
Universidad Nacional de La Plata, CONICET  
Paseo del Bosque s/n, 1900 La Plata, Argentina  
e-mail: sacora@fcaglp.unlp.edu.ar

†Max-Planck-Institut für Astrophysik  
Karl-Schwarzschild-Strasse 1  
85740 Garching bei München, Alemania

**Key Words:** Galaxias: cúmulos: general - galaxias: abundancias - métodos: numéricos.

**Abstract.** *El propósito del presente estudio es contribuir al entendimiento de los mecanismos físicos involucrados en la formación y evolución de cúmulos de galaxias que dan lugar a las propiedades termodinámicas y químicas observadas en estos objetos. En particular, nos centramos en el análisis de la distribución de metales contenidos en el gas caliente atrapado en los cúmulos (medio intracúmulo), el cual guarda evidencia sobre la historia de formación estelar de las galaxias, de la importancia relativa de distintas fuentes de producción de especies químicas (pérdidas de masa por vientos estelares, supernovas), de los mecanismos que contribuyen a enriquecer químicamente el gas intracúmulo, y de la evolución termodinámica del gas.*

*Para llevar a cabo esta investigación, se utiliza un modelo híbrido de enriquecimiento químico que combina simulaciones cosmológicas de N-cuerpos hidrodinámicas de un cúmulo de galaxias con un modelo semi-analítico de formación de galaxias. La parte hidrodinámica de las simulaciones se basa en la técnica de hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH: Smoothed Particle Hydrodynamics). Las simulaciones N-cuerpos/SPH aportan la información referente a la distribución de materia oscura y gas, que constituye la base para la aplicación del modelo semianalítico. El mismo contempla modelos simplificados de los complicados e interactuantes procesos físicos que intervienen en la formación de galaxias.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Los estudios observacionales de galaxias y sistemas de galaxias se vienen desarrollando sistemáticamente desde hace varias décadas permitiendo la comprensión de diferentes aspectos dinámicos y astrofísicos. El desarrollo de poderosos instrumentos tales como el Hubble Space Telescope, y las diferentes misiones satelitales de observación en rayos-X (Einstein, ROSAT, ASCA, Chandra, XMM-Newton), han permitido substanciales avances observacionales, junto con el planteo de nuevos interrogantes. La disponibilidad de mediciones de galaxias con diferentes corrimientos al rojo (redshifts) en distintas longitudes de onda (ultravioleta, infrarrojo medio y radio) permiten el estudio de la evolución de sus propiedades astrofísicas. En particular, los catálogos de galaxias distantes como el Canada-France Redshift Survey, Sloan Digital Sky Survey (SDSS), 2dF Galaxy Redshift Survey, Lyman-Break Galaxy Surveys y el Hubble Deep Field han permitido obtener las primeras conclusiones acerca de aspectos tales como la historia global de formación estelar y la evolución de la densidad de los metales (elementos químicos con número atómico superior a 2) en función del redshift.<sup>1-3</sup> Estos relevamientos también han posibilitado la determinación, a partir de estudios morfológicos,<sup>4</sup> de la población de galaxias responsables de la declinación de la tasa de formación estelar desde los últimos nueve mil millones de años.<sup>5</sup> Las observaciones de propiedades astrofísicas de objetos galácticos en diferentes estadios de evolución del Universo hacen posible llevar a cabo la confrontación con los resultados teóricos obtenidos a partir de la consideración de distintos escenarios de formación de estructuras y evolución química de galaxias y del medio intergaláctico. El modelo de agregación jerárquica es el que mayor número de condicionamientos observacionales satisface. En este tipo de escenario, las galaxias se forman por la fusión de estructuras menores que dan origen a estructuras de mayor escala; la forma en que este proceso se lleva a cabo depende del modelo cosmológico adoptado.

Las observaciones más recientes obtenidas por WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)<sup>6</sup> referentes a la polarización de la radiación cósmica de fondo, indican que la geometría de nuestro Universo es espacialmente plana y que las grandes estructuras astrofísicas se originaron a partir de fluctuaciones de materia primordiales, caracterizadas por condiciones iniciales adiabáticas y con distribución gaussiana. Además, las mismas observaciones sugieren que la materia experimentó un período de reionización entre redshifts  $z \approx 9 - 20$  (correspondientes a edades del Universo entre 8.5 y  $7 \times 10^9$  años; la edad actual es del orden de  $1 \times 10^{10}$  años),<sup>7</sup> al cual podría haber contribuido una primera generación de estrellas a las cuales se refiere como población III.<sup>8</sup> Estas fluctuaciones iniciales crecen por efectos de la gravedad, colapsando y separándose de la expansión general para formar estructuras astrofísicas ligadas. El destino de la expansión del Universo está determinado por la densidad media de materia. Según las evidencias observacionales, el parámetro cosmológico de densidad es  $\Omega = 1$ , puesto que se define como el cociente entre la densidad de materia observada y la densidad media en un universo plano, a la cual se denomina densidad crítica. Los resultados obtenidos por WMAP y por observaciones de estructura a gran escala en el Universo dadas por 2df muestran evidencias de que el Universo tiene densidad baja de materia, de modo que la correspondiente fracción de densidad

crítica está dada por  $\Omega_M = 0.3$ . A su vez, se tienen dos tipos de materia, bariónica y oscura, que contribuyen respectivamente alrededor de 10% y 90% a la densidad total de materia. La materia oscura estaría compuesta de algún tipo de partículas exóticas cuya evolución está determinada por la fuerza de la gravedad. Los bariones constituyen la materia observable y su evolución es más compleja, involucrando procesos relacionados con sus propiedades microfísicas, tales como, enfriamiento del gas por procesos radiativos, formación estelar, calentamiento del gas por efecto de explosión de supernovas, enriquecimiento químico, campos magnéticos. El hecho de que el Universo sea plano con baja densidad de materia sugiere la existencia de una constante cosmológica  $\Omega_\Lambda = 0.7$ , de modo que  $\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ . Respecto a este tema, se tienen datos complementarios aportados por observaciones de supernovas de tipo Ia, las cuales han demostrado ser indicadores de distancia muy precisos, ideales para obtener la información requerida para medir la expansión del Universo. Los resultados del High- $z$  Supernova Cosmology Team<sup>9</sup> and the Supernova Cosmology Project<sup>10</sup> han mostrado sorprendentemente que el Universo no se está desacelerando (y por lo tanto no se encuentra dominado por la materia), sino que aparentemente estaría en una etapa de aceleración, siendo dominado por una presión negativa o “energía oscura”. Esta componente estaría tenida en cuenta por una constante cosmológica no nula.

El modelo de agregación jerárquica, que se basa en la existencia de materia oscura fría (“Cold Dark Matter”, CDM; compuesta por partículas muy masivas moviéndose a baja velocidad) predice un primer crecimiento lineal de la materia para luego entrar en un régimen no-lineal que da lugar a la formación de halos de materia oscura. La transición a la fase no lineal se produce cuando las fluctuaciones de densidad aumentan demasiado su amplitud por el crecimiento de la estructura. Existen modelos que permiten estimar las escalas características en las que se distribuyen los objetos en un dado instante de tiempo y determinar la estructura de los objetos individuales (“spherical top-hat model”, “ellipsoidal top-hat model”, entre otros). Sin embargo, el entendimiento del origen de las funciones de masa de galaxias y cúmulos de galaxias, la naturaleza y morfología del colapso protogaláctico, la tasa de fusión de galaxias y su evolución temporal, y la relación entre la población de galaxias y el medio de mayor escala en las cuales se encuentran embebidas, necesita la realización de un seguimiento detallado de la forma en que evoluciona la población de halos de materia oscura. Este requerimiento ha conducido al desarrollo de modelos analíticos, tal como la teoría de Press-Schechter.<sup>11</sup> Si bien este tipo de modelo ha contribuido enormemente al entendimiento del proceso de agregación jerárquica, es claro que el gran avance experimentado a nivel del cálculo computacional ha convertido a las simulaciones numéricas de  $N$ -cuerpos en una herramienta estándar en el área de formación de estructura.

Uno de los más impresionantes resultados que han surgido a partir de simulaciones cosmológicas de formación de estructura en el Universo es la “red cósmica”. El modelo de materia oscura fría ha tenido un gran éxito en describir tanto la formación de galaxias como la distribución de materia a gran escala. A medida que se produce el colapso, la materia se acumula en una red cósmica con sobredensidades moderadas en forma de láminas y filamentos, en cuyas intersecciones se ubican galaxias y cúmulos de galaxias, siendo estos últimos los sis-

temas virializados más grandes del universo. El gas asociado a estas estructuras experimenta complejos procesos físicos, que incluyen el calentamiento por “shock” sufrido al caer en los pozos de potencial determinados por los halos de materia oscura, enfriamiento radiativo que da lugar al proceso de formación estelar, y enriquecimiento energético y químico aportado por las explosiones de supernovas y vientos estelares procedentes de las galaxias generadas. De este modo, el gas intergaláctico comprende un amplio rango de temperaturas y densidades, según se trate de filamentos y láminas o del gas contenido en grupos y cúmulos de galaxias, las cuales determinan la emisión de estos sistemas en distintas bandas del espectro electromagnético.

Las simulaciones numéricas de formación de estructura que incluyen hidrodinámica permiten seguir la dinámica del gas acoplada al régimen no-lineal del crecimiento gravitacional de la estructura. En este marco de formación, las fusiones pueden afectar la historia de formación estelar de los objetos galácticos,<sup>12,13</sup> y como consecuencia, la evolución química de la población estelar y del medio interestelar. Las colisiones e interacciones con estructuras y subestructuras también juegan un papel crucial en la evolución morfológica de las galaxias.<sup>14</sup> Por tal motivo, las simulaciones cosmológicas hidrodinámicas han comenzado a incluir los procesos físicos que afectan a la materia bariónica,<sup>15,16</sup> convirtiéndose en el método más poderoso para el estudio de la formación de galaxias. Este tipo de tratamiento tiene la ventaja de partir de principios fundamentales de la física y ser autoconsistente, pero su punto débil reside en el hecho de que, al incluir todos estos procesos físicos, se vuelve muy costoso computacionalmente y, por lo tanto, el rango dinámico resuelto es en general deficiente.

Por otro lado, gran parte del actual entendimiento de la formación de galaxias ha sido obtenido a partir de técnicas semi-analíticas.<sup>17,18</sup> En estos modelos, cada uno de los complicados e interactuantes procesos físicos involucrados en la formación de galaxias es aproximado usando un modelo físico simplificado. A expensas de las incertezas introducidas por estas suposiciones, las técnicas semi-analíticas permiten acceder a un rango dinámico mucho mayor que las simulaciones numéricas, y explorar rápidamente un amplio espectro de parámetros analizando la influencia de las simplificaciones asumidas. Con un limitado número de parámetros libres, los modelos semi-analíticos han sido bastante exitosos al permitir una interpretación coherente y unificada de un amplio rango de propiedades de galaxias, tales como, funciones de luminosidad, relaciones de Tully-Fisher y Faber-Jackson, distribuciones de morfología, color y medida, e historias de formación estelar individual y global.<sup>19,20</sup> Estos modelos toman como base la información sobre la distribución de halos de materia oscura y los correspondientes árboles de fusión dada por la teoría de Press-Schechter o la obtenida a partir de las simulaciones de  $N$ -cuerpos.

La combinación de simulaciones numéricas cosmológicas y modelos semi-analíticos resulta ser un método muy adecuado para el estudio de los fenómenos que intervienen en la formación de galaxias y cúmulos de galaxias. Su principal ventaja reside en el hecho de que las simulaciones de  $N$ -cuerpos no deben ser repetidas cada vez que se cambian las suposiciones sobre los procesos bariónicos, las cuales son tenidas en cuenta en los modelos semi-analíticos. La aplicación conjunta de estas dos técnicas complementarias dan lugar a un modelo híbrido. Este modelo es la herramienta que se emplea para estudiar el enriquecimiento químico del medio in-

tracúmulo, que constituye el tema central del presente trabajo de investigación. La descripción del mismo se diagrama de la siguiente forma. La sección 2 presenta un enfoque general del problema a tratar y las razones que incentivan este estudio. En la sección 3 se describe el modelo híbrido, dando detalles de la simulación cosmológica analizada y de la técnica numérica empleada para llevarla a cabo; también se resumen las principales características de nuestra versión del modelo semi-analítico. En la última sección 4 se hace una breve referencia al esquema aplicado de enriquecimiento químico del medio intracúmulo junto con los resultados principales encontrados, a partir de los cuales se dan las perspectivas de futuros análisis a realizar.

## 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA A TRATAR

Los cúmulos de galaxias son las estructuras virializadas más grandes del Universo que ya han sido desacopladas de la expansión general del mismo. La materia oscura que los componen generan profundos pozos de potencial en los cuales quedan atrapados sus galaxias como así también el gas difuso y caliente que constituye el medio intracúmulo. Sólo un pequeño porcentaje de la materia bariónica que componen los cúmulos está representado por sus galaxias miembros ( $\approx 10\%$ ), puesto que la fracción restante se encuentra en forma de gas, el cual fue calentado por “shock” durante el proceso de acreción. Las características de este gas lo convierten en un excelente emisor en la banda de rayos X del espectro electromagnético. Las distintas misiones satelitales con observatorios de rayos X realizadas en las últimas décadas (ASCA, Einstein, ROSAT)<sup>21</sup> han extraído información muy valiosa del gas intracúmulo, referentes a las propiedades termodinámicas y químicas del cúmulo. La detección de líneas de emisión de hierro altamente ionizado en el espectro generado por el medio intracúmulo es uno de los descubrimientos más significativos concerniente a la observación de cúmulos en la banda de rayos X. El alto contenido de hierro, con abundancias del orden de  $\approx 30\%$  del valor solar, respalda el hecho de que parte de su gas caliente no es de origen primordial sino que ha sido generado en las galaxias que residen en el cúmulo.

Los metales fusionados en el interior de las estrellas son liberados a lo largo de la evolución de las mismas mediante vientos estelares, o eyectados al finalizar su vida explotando como supernovas. Las estrellas sólo se forman eficientemente a partir de gas frío y denso, la mayoría del cual se encuentra ligado a galaxias con profundos pozos de potencial. La presencia de metales en el medio intracúmulo indica que los mismos fueron removidos de las galaxias progenitoras y posteriormente distribuidos en el medio intergaláctico. Los posibles procesos responsables de este efecto son los vientos galácticos generados a partir de explosiones de supernovas,<sup>22,23</sup> “ram pressure stripping”, consistente en el desprendimiento del gas ligado al pozo de potencial de una nube de gas o galaxia por efectos dinámicos dentro del medio intracúmulo en el cual se encuentran,<sup>24</sup> y enriquecimiento temprano producido por hipernovas asociadas a la población III de estrellas.<sup>25</sup> Estos procesos se ven reflejados en las propiedades termodinámicas y químicas del medio intracúmulo. Por lo tanto, las mediciones en rayos X de la distribución de metalicidad (cociente entre la masa de metales contenida por un sistema y su masa total) en este medio es la única forma de estudiar la historia química de las galaxias. Actualmente, este tipo de

observaciones es llevada a cabo por la nueva generación de telescopios de rayos X, Chandra y XMM-Newton. Los mismos cuentan con una resolución espacial y sensibilidad ampliamente mejoradas, por lo que permiten obtener información sobre la distribución espacial de distintos elementos químicos.<sup>26-28</sup> El conocimiento de la masa total de metales y de la relación entre las abundancias de distintas especies químicas permiten estimar la masa total de estrellas formadas, como así también inferir las propiedades de las fuentes que dan origen a estos elementos; en particular, se puede estimar la proporción relativa de distintos tipos de supernovas, las cuales producen diferentes elementos químicos dependiendo del origen y evolución de sus estrellas progenitoras.

El objetivo del presente proyecto consiste en estudiar mediante técnicas numéricas el origen de las propiedades químicas del medio intracúmulo, intentando establecer conexiones entre la historia de formación de la estructura en un universo jerárquico y los patrones químicos de las galaxias y del medio intracúmulo. Para llevar a cabo este estudio se utilizará un modelo híbrido de formación de galaxias que se describe en la siguiente sección. Los resultados obtenidos a partir de este tratamiento numérico serán empleados para evaluar los procesos físicos considerados, para corroborar las conclusiones que se desprenden de estudios puramente observacionales, y para formular predicciones confrontables con las observaciones.

### 3 MODELO HÍBRIDO DE ENRIQUECIMIENTO QUÍMICO

Nuestro modelo híbrido consiste en la combinación de simulaciones cosmológicas hidrodinámicas y modelos semi-analíticos de formación de galaxias.

Los métodos hidrodinámicos utilizados en simulaciones cosmológicas se separan en dos grupos principales:<sup>29</sup>

- a) técnicas que emplean una grilla Euleriana, que incluyen técnicas adaptativas de refinamiento de grilla (“Adaptive Mesh Refinement”, AMR), y
- b) técnicas que siguen los elementos de fluido de manera Lagrangiana usando partículas de gas (“Smoothed Particle Hydrodynamics”, SPH).

Esta última es la empleada en las simulaciones de cúmulos de galaxias realizadas.

La generación de la población de galaxias mediante la aplicación del modelo semi-analítico sólo necesita del árbol de fusiones de los subhalos de materia oscura que fueron surgiendo a lo largo de la formación y evolución del cúmulo, los cuales son identificados en las salidas de las simulaciones de  $N$ -cuerpos. Sin embargo, el análisis de la evolución de la distribución de metales en el medio intracúmulo es posible a partir del enriquecimiento químico de las partículas de gas que representan a este medio, por lo que es indispensable contar con simulaciones hidrodinámicas de cúmulos de galaxias para llevar a cabo este proyecto.

#### 3.1 Simulaciones cosmológicas hidrodinámicas de cúmulos de galaxias

Las simulaciones hidrodinámicas de cúmulos de galaxias  $N$ -Body/SPH fueron realizadas mediante una versión paralela del código TreeSPH GADGET<sup>30</sup> que combina la técnica SPH con

un algoritmo árbol jerárquico para las fuerzas gravitacionales.

El cálculo de las fuerzas gravitatorias de largo rango es realizado mediante el algoritmo partícula-grilla (“particle-mesh”, PM), mientras que un algoritmo árbol resuelve las interacciones gravitacionales de corto alcance, dando lugar al método TreePM.

El método hidrodinámico utiliza un conjunto discreto de partículas trazadoras que describen el estado de un fluido. Estas partículas de gas pueden pensarse como elementos de fluido cuyo estado termodinámico puede ser expresado en términos de su energía interna por unidad de masa o su entropía por unidad de masa. La aplicación de una técnica de interpolación permite definir las cantidades continuas que caracterizan a los fluidos.<sup>31</sup>

La descripción detallada de la física considerada, del cálculo de las fuerzas gravitacionales y de la implementación de la técnica SPH está dada en el trabajo que presenta el código utilizado.<sup>32</sup>

Las simulaciones analizadas suponen que el gas no se enfría por radiación y se las denominan “adiabáticas”. Esta suposición resulta aproximadamente válida puesto que el tiempo de enfriamiento del gas en las partes externas del cúmulo es mucho mayor que la edad del Universo. Esto no es cierto en la zona central del cúmulo, donde las densidades del gas son lo suficientemente altas para dar lugar a tiempos de enfriamiento cortos con la correspondiente generación de radiación. La mayor parte de la luminosidad del cúmulo es emitida por la zona central, con un radio del orden de  $\approx 100 - 200 \text{ Kpc}^{21}$  (el radio virial de un cúmulo es  $\approx 1.5 \text{ Mpc}$ ;  $1 \text{ Mpc} = 10^3 \text{ Kpc} = 3.08 \times 10^{24} \text{ cm}$ ).

Estas simulaciones de cúmulos de galaxias fueron generadas mediante la técnica de “zooming in” en la región de interés.<sup>32</sup> El paso inicial consistió en usar una simulación cosmológica en un volumen suficientemente grande (modelo GIF- $\Lambda$ CDM) que permitió la selección de un cúmulo apropiado. Las simulaciones fueron comenzadas en una CRAY T3D en el centro de cómputos del Max-Planck Society en Garching sobre 128 procesadores. Una vez que el nivel de agrupación (“clustering”) requirió una red más fina y, por lo tanto, una mayor cantidad de memoria total, las simulaciones fueron transferidas a la T3D en el Edinburgh Parallel Computer Centre y finalizada en 256 procesadores. Para el presente estudio se utiliza el modelo  $\Lambda$ CDM con parámetros cosmológicos  $\Omega_M=0.3$ ,  $\Omega_\Lambda=0.7$ ,  $h = 0.7$  (se emplea la convención de considerar la constante de Hubble como  $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ), y normalizado con  $\sigma_8 = 0.9$ ; este último parámetro corresponde a la fluctuación cuadrática media del campo de densidad suavizado en un radio de  $8 h^{-1} \text{ Mpc}$ . Esta simulación siguió la evolución de  $256^3$  partículas de materia oscura de masa  $1.4 \times 10^{10} h^{-1} M_\odot$  dentro de una caja comóvil de  $141.3 h^{-1} \text{ Mpc}$  de lado. Luego se seleccionó el segundo cúmulo más masivo que se formó en esta simulación, que posee una masa virial de  $8.4 \times 10^{14} h^{-1} M_\odot$  y que parece bien relajado al tiempo actual.

En una segunda etapa, se simuló nuevamente la formación de este cúmulo con mayor resolución desde un corrimiento al rojo  $z = 20$  hasta  $z = 0$  (tiempo actual) utilizando el código árbol paralelizado TreeSPH GADGET.<sup>30</sup> Como se mencionó previamente, la inclusión del gas en la resimulación del cúmulo es un ingrediente esencial en este estudio pues la componente gaseosa representa al medio intracumular cuyo enriquecimiento químico se investiga. En estas simulaciones se consideró un 13% de partículas bariónicas y el resto quedó constituido por

materia oscura. Cada componente está representada por  $2 \times 10^6$  partículas en la zona de alta resolución. De este modo, las partículas de gas y materia oscura tienen una masa de  $1.82 \times 10^8 h^{-1} M_{\odot}$  y  $1.18 \times 10^9 h^{-1} M_{\odot}$ , respectivamente. Se utilizó un parámetro de ablandamiento gravitacional  $\varepsilon = 3 h^{-1} \text{Kpc}$ . Estos parámetros determinan la resolución de masa y fuerza de la simulación. La resolución fue disminuida gradualmente en la zona externa del volumen considerado, utilizando partículas cuyas masas aumentan a medida que se alejan del centro del cúmulo. Esta zona esférica circundante se extiende hasta un radio de  $141.3 h^{-1} \text{Mpc}$ , que es el tamaño de la caja de la simulación original. La figura 1a muestra la densidad de masa proyectada de la materia oscura en la simulación original (GIF- $\Lambda$ CDM). El cuadro blanco encierra la zona que posteriormente es re-simulada con mayor resolución.<sup>32</sup>

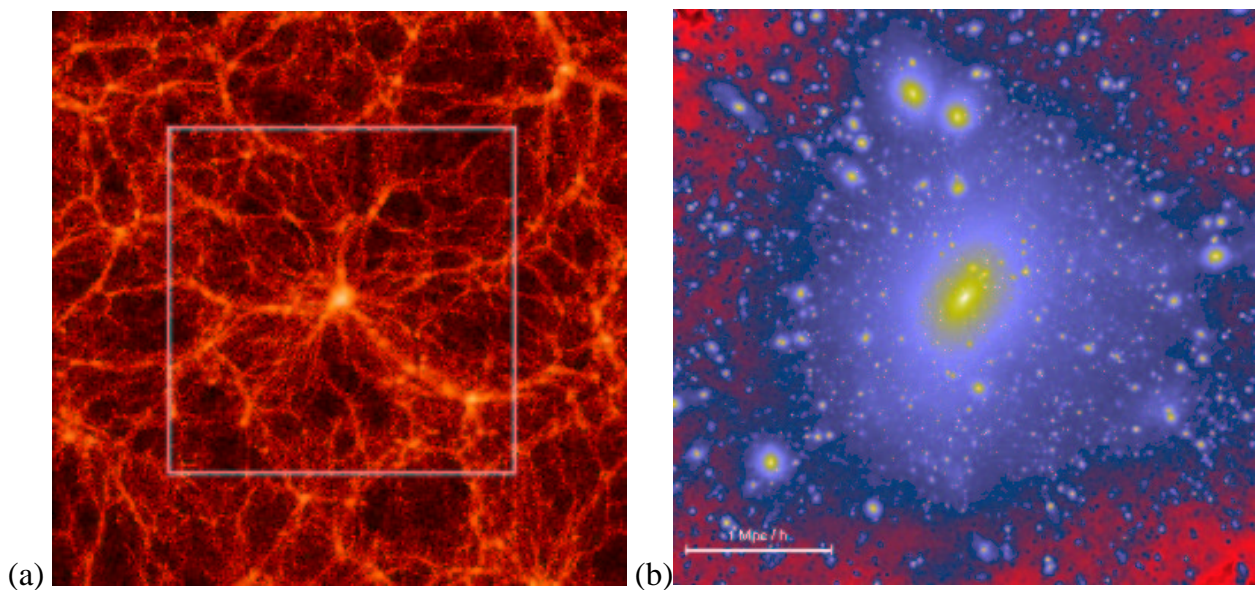


Figure 1: (a) Densidad de masa de la materia oscura en la simulación original (GIF- $\Lambda$ CDM) proyectada en una capa de  $10 h^{-1} \text{Mpc}$  alrededor del centro del cúmulo de galaxias. La imagen tiene  $141 h^{-1} \text{Mpc}$  de lado. El cuadro blanco, de  $85 h^{-1} \text{Mpc}$  de lado, encierra la zona que es re-simulada con mayor resolución utilizando el código TreeSPH GADGET. (b) Distribución de halos de materia oscura en la simulación de un cúmulo de galaxias con alta resolución ( $6.6 \times 10^7$  partículas de materia oscura con masa de  $4.68 \times 10^7 h^{-1} M_{\odot}$ ). La imagen muestra toda la masa en una caja de  $4 h^{-1} \text{Mpc}$  de lado alrededor del cúmulo. Para visualizar las subestructuras, las partículas fueron pesadas por su densidad local, y se aplicó una escala logarítmica de colores.

El primer paso en el análisis de estas simulaciones es la determinación de las estructuras de materia oscura que se forman por procesos de acreción y fusión en el modelo de agregación jerárquica considerado. El algoritmo utilizado para realizar este procedimiento se denomina SUBFIND.<sup>32</sup> Recientes estudios de la dinámica de cúmulos de galaxias muestran que, utilizando una resolución de masa suficientemente alta, las subestructuras de materia oscura pueden sobrevivir durante un largo tiempo en medios de alta densidad como grupos o cúmulos de galaxias.<sup>33</sup> Los núcleos de los halos de materia oscura, donde residen las galaxias, que caen dentro del cúmulo permanecen intactos y orbitan como objetos autoconsistentes en el halo de



materia oscura del cúmulo. Este fenómeno no se observaba en simulaciones previas, con menos resolución de fuerza y masa, en las que surgía el problema de “overmerging”, por el cual los halos que caían al cúmulo se evaporaban rápidamente y el cúmulo exhibía pocos signos de subestructura.<sup>34</sup> La figura 1b muestra la distribución de halos de materia oscura en  $z = 0$  para un cúmulo simulado con una resolución de masa 30 veces mayor que el analizado en el presente estudio.<sup>32</sup> Se puede apreciar una gran cantidad de subestructuras correspondientes a los núcleos de halos de materia oscura que sobreviven dentro del cúmulo luego de haber sido acretaados en un tiempo anterior.

### 3.2 Modelo semi-analítico de formación de galaxias

Los procesos físicos incluidos en el modelo semi-analítico (MSA) determinan las propiedades físicas y químicas de las galaxias generadas a partir de la aplicación del mismo. La versión del MSA utilizada se basa en un modelo que tiene en cuenta los efectos de enfriamiento del gas caliente por procesos radiativos, formación estelar, feedback energético por explosiones de supernovas y fusión de galaxias.<sup>32</sup> Nuestro interés en la evolución química del medio intracúmulo requiere la implementación de un modelo de producción de los elementos más abundantes. El tratamiento de la circulación de metales entre las distintas componenets bariónicas (gas caliente, gas frío y estrellas) sigue los lineamientos de una versión anterior del MSA.<sup>35</sup> La actual versión del MSA contempla un modelo químico más detallado, en el cual se distingue entre diferentes elementos químicos (en vez de considerar la masa total de metales) producidos por estrellas en distintos rangos de masa y liberados al medio circundante mediante vientos estelares o explosiones de supernovas. En este último caso, se considera separadamente la contribución de metales por parte de las llamadas supernovas “core collapse” (SNs CC), que se generan a partir de estrellas masivas ( $> 10^8 M_{\odot}$ ) siendo las de tipo II (SNs II) las más abundantes, y las supernovas de tipo Ia (SNs Ia). El modelo más aceptado del sistema progenitor de estas últimas es aquél que considera un sistema binario de estrellas, donde la más pequeña (enana blanca de carbono-oxígeno) sufre una deflagración de carbono por acretar material de su compañera. Esta mejora en el modelo químico es necesaria para estudiar la evolución espacial y temporal de las abundancias de diferentes especies y así inferir la importancia relativa de la contribución de distintos tipos de supernovas en la contaminación metálica del medio intracúmulo, con el fin de alcanzar un mejor entendimiento de la forma en que se produce el enriquecimiento químico del mismo. Los detalles de esta implementación son dados en un trabajo en preparación.<sup>36</sup>

A continuación se presentan las principales ecuaciones utilizadas en el MSA, y se describe brevemente el intercambio de masa entre las distintas componentes bariónicas que da lugar a la generación de galaxias a partir de los halos de materia oscura dados por la simulación:

1. Inicialmente, a cada halo de materia oscura de masa virial  $M_{\text{vir}}$  se le asigna una masa de gas caliente  $M_{\text{hot}} = f_b M_{\text{vir}}$ , donde  $f_b = 0.13$  es la fracción de masa en forma de bariones adoptada en la simulación.
2. El gas caliente sufre enfriamiento radiativo (“cooling”) y pierde una cantidad de masa  $M_{\text{cool}}$  que es transferida a la fase fría dando lugar a una masa de gas frío  $M_{\text{cold}}$ . La masa

$M_{\text{cool}}$  está dada por:<sup>18</sup>

$$\frac{dM_{\text{cool}}}{dt} = 4\pi\rho_g r_{\text{cool}}^2 \frac{dr_{\text{cool}}}{dt}, \quad (1)$$

donde  $\rho_g$  es el perfil de densidad de una esfera isoterma supuesto para la distribución del gas caliente dentro del halo de materia oscura, y  $r_{\text{cool}}$  es el radio de enfriamiento, definido como el radio para el cual el tiempo de enfriamiento local  $t_{\text{cool}}(r)$  es igual al tiempo en que el halo ha logrado enfriarse quasi-estáticamente.

3. La tasa de formación estelar se supone proporcional a la masa de gas frío,  $M_{\text{cold}}$ , e inversamente proporcional al tiempo dinámico de la galaxia  $t_{\text{dyn}}^{\text{gx}} = R_{\text{eff}}/V_{\text{vir}}$ , donde  $R_{\text{eff}} = 0.1R_{\text{vir}}$ , y  $R_{\text{vir}}$  y  $V_{\text{vir}}$  denotan el radio y velocidad virial del halo de materia oscura:

$$\frac{dM_{\star}}{dt} = \frac{\alpha M_{\text{cold}}}{t_{\text{dyn}}^{\text{gx}}}, \quad (2)$$

siendo  $\alpha$  un parámetro adimensional que regula la eficiencia de formación estelar. Adoptamos una eficiencia de formación estelar variable que depende de las propiedades del halo:<sup>35</sup>

$$\alpha(V_{\text{vir}}) = \alpha_0 (V_{\text{vir}}/220 \text{ km s}^{-1})^n, \quad (3)$$

donde  $\alpha_0$  y  $n$  son considerados como parámetros libres.

4. Para cada evento de formación estelar adoptamos una función inicial de masa (Salpeter), la cual nos da el número de estrellas comprendidas en un dado rango de masas por cada masa solar formada. Llamamos  $\eta_{\text{II}}$  al correspondiente número de estrellas progenitoras de supernovas de tipo II. La energía liberada por cada explosión de SN II ( $E_{\text{SNII}} = 1.2 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ ) calienta el gas frío de cada galaxia por lo que el mismo se ve reducido en una cantidad  $\Delta M_{\text{reheat}}$  dada por:

$$\Delta M_{\text{reheat}} = \frac{4}{3}\epsilon \frac{\eta_{\text{II}} E_{\text{SNII}}}{V_{\text{vir}}^2} \Delta M_{\star}, \quad (4)$$

donde  $\epsilon$  es un parámetro adimensional que regula la eficiencia del proceso de feedback. La dependencia con  $V_{\text{vir}}$  indica que las galaxias con pozos de potencial menos profundos (menor  $V_{\text{vir}}$ ) son más eficientes para liberar el gas caliente. La transferencia de este gas a la fase caliente aumenta la masa  $M_{\text{hot}}$  del halo.

En principio, cada halo tiene asociada una galaxia, pero la fusión de los mismos durante el proceso de agregación jerárquica da lugar a la presencia de varias galaxias dentro de un halo mayor, muchas de ellas conservan sus respectivas subestructuras de materia oscura. A su vez, las galaxias satélites que orbitan dentro de un cierto halo de materia oscura (ya sea el determinado por la subestructura de materia oscura de una galaxia o el halo mayor) experimentan

fricción dinámica y eventualmente se fusionan con la galaxia central del halo. Teniendo en cuenta estos procesos, se tiene que la masa de gas caliente en un dado halo queda definida como

$$M_{\text{hot}} = f_b M_{\text{vir}} - \sum_i [M_{\text{stellar}}^{(i)} - M_{\text{cold}}^{(i)}], \quad (5)$$

donde  $M_{\text{stellar}}$  y  $M_{\text{cold}}$  son las masas de estrellas y gas frío contenidos por cada galaxia, y la suma se extiende sobre todas las galaxias que se encuentran dentro del halo de materia oscura.

Los elementos químicos generados por las estrellas formadas siguen el mismo camino que la transferencia de masas arriba descripta. De este modo, tanto las fases fría y caliente se contaminan progresivamente, dando lugar a nuevas generaciones de estrellas con metalicidades cada vez más grandes. A su vez, la masa de los distintos elementos químicos eyectados depende de la metalicidad de la estrella, como lo indican los cálculos de nucleosíntesis estelar.<sup>37,38</sup> Se considera la eyección de metales por parte de estrellas de masa baja e intermedia ( $0.8M_{\odot} < M < 5 - 8M_{\odot}$ ),<sup>38</sup> y y estrellas quasi-masivas ( $5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$ ) y masivas ( $8M_{\odot} < M < 120M_{\odot}$ ).<sup>37</sup> En este trabajo se analiza la evolución de las abundancias químicas de los siguientes elementos: H,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{40}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ . Los estrellas con masa baja e intermedia contribuyen con  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ , y posiblemente  $^{16}\text{O}$ , a través de vientos estelares. Mientras que las estrellas en los rangos mayores de masas considerados enriquecen el medio mediante vientos estelares y explosiones de supernovas tipo CC; estas últimas producen principalmente los llamados elementos  $\alpha$  ( $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{40}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ).

Por otro lado, en el MSA también se tiene en cuenta la contribución de SNs Ia, que se caracterizan por una alta producción de hierro ( $\simeq 0.6M_{\odot}$ ) y un largo tiempo transcurrido entre la formación del sistema progenitor de la supernova y la explosión de la misma, estimado en  $4 \times 10^9$  años.<sup>39</sup> La combinación de estas dos propiedades otorgan características particulares a los patrones de abundancias de galaxias y del medio intracúmulo. Al implementar la contribución de las SNs Ia, debemos especificar dos parámetros que las caracterizan: el cociente  $(N_{\text{Ia}}/N_{\text{CC}})_{\text{SF}}$  entre el número de estrellas que darán origen a cada tipo de supernova en un dado brote de formación estelar (“star formation”, SF), y el tiempo de retardo  $t_{\text{Ia}}$  de la explosión de supernova desde el nacimiento de su estrella progenitora. Los metales eyectados por las SNs Ia están dados por los cálculos de nucleosíntesis correspondientes al modelo W7.<sup>40</sup>

### 3.2.1 Normalización del MSA

Habiendo descripto los procesos que intervienen en el MSA y los parámetros que regulan la eficiencia y el efecto de los mismos, se debe “normalizar” el modelo, es decir, establecer el valor de estas cantidades a fin de que las componentes bariónicas satisfagan el mayor número de propiedades observadas.

El valor apropiado de las eficiencias de formación estelar  $\alpha_0$  y feedback  $\epsilon$  se encuentra a partir de los siguientes requisitos:

- las galaxias del tipo de nuestra Vía Láctea, con velocidades de rotación en el rango  $200 < V_c < 240 \text{ km s}^{-1}$  deben tener una componente de gas frío  $M_{\text{cold}} \approx 8 \times 10^9 h^{-1} M_{\odot}$ ;

- las galaxias espirales tipo Sb/Sc deben satisfacer la relación de Tully-Fisher, que da la relación entre la magnitud en la banda I de la galaxia y su ancho de velocidad  $W$  (estimado como el doble de la velocidad de rotación):

$$M_I - 5 \log h = -21.00 \pm 0.02 - 7.68 \pm 0.14 (\log(W_c) - 2.5).^{32,35}$$

El valor del parámetro  $n$  que también interviene en la fórmula de formación estelar se calibra exigiendo que la relación entre la fracción de gas en las galaxias y la luminosidad de las mismas muestre la tendencia apropiada, siendo  $\approx 0.1$  para las galaxias espirales luminosas y aumentando hasta  $\approx 0.8$  en las galaxias irregulares poco masivas.<sup>41</sup>

Por otro lado, las propiedades químicas de las galaxias y del medio intracúmulo demandan una normalización de la función inicial de masa tal que la contribución de estrellas de alta masa permita alcanzar el nivel de metalicidad observado en galaxias del tipo de la Vía Láctea ( $\approx 0.7Z_\odot$ ) y en el medio intracúmulo ( $\approx 0.3Z_\odot$ ).<sup>42,43</sup>

Finalmente, los parámetros de SNs Ia fueron elegidos de modo de reproducir los resultados de recientes proyectos observacionales que dan indicios de la evolución de las tasas de supernovas SNs CC y SNs Ia con el redshift.<sup>39,44,45</sup>

De este modo, los valores de los parámetros libres del MSA, es decir, de aquéllos que no fueron fijados con anterioridad sino que son ajustados para reproducir las propiedades observacionales descriptas son:

- $\alpha_0 = 0.1$ ,
- $\epsilon = 0.2$ ,
- $(N_{\text{Ia}}/N_{\text{CC}})_{\text{SF}} = 0.2$ ,
- $t_{\text{Ia}} = 4. \times 10^9$  años.

La figura 2 muestra algunos de los resultados que surgen del MSA caracterizado por estos parámetros. En ella se presentan la relación de Tully-Fisher, la función de luminosidad del cúmulo y la relación entre la fracción de gas contenida por las galaxias y la luminosidad de las mismas.

#### 4 ENRIQUECIMIENTO QUÍMICO DEL MEDIO INTRACÚMULO

Las recientes observaciones en rayos X de satélites tales como ASCA, Chandra y XMM-Newton proveen información sobre perfiles de temperatura y abundancias químicas de cúmulos de galaxias.<sup>26-28,42,43</sup> La comparación de los resultados de las simulaciones con la base de datos observacionales existente ayudan a restringir el rango de parámetros usados en los modelos, especialmente en lo referente al esquema de formación de galaxias y a los posibles escenarios propuestos para el enriquecimiento químico del medio intracúmulo.

El buen acuerdo que muestran las propiedades del gas y las galaxias dadas por el MSA con cantidades observadas indica que la normalización del modelo resulta adecuada. Por consiguiente, la forma en que se aplica la transferencia de masas y metales entre las componentes

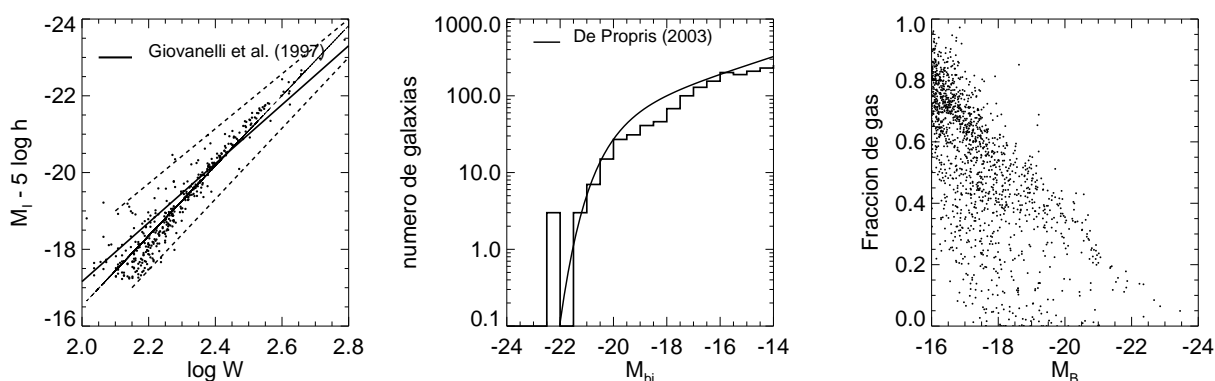


Figure 2: Panel izquierdo: relación de Tully-Fisher; la línea gruesa es un ajuste a los valores observados,<sup>46</sup> las líneas punteadas delimitan el área determinada por la dispersión de los datos observacionales, y la línea delgada es el ajuste a los valores simulados. Panel medio: función de luminosidad del cúmulo; el histograma corresponde a los valores simulados, y la curva representa el ajuste de la función de Schechter a la función de luminosidad compuesta de cúmulos.<sup>47</sup> Panel derecho: relación entre la fracción de gas frío contenido por las galaxias y la magnitud de las mismas en la banda B del espectro.

bariónicas puede ser extendida a las partículas de gas de la simulación a fin de estudiar el proceso de enriquecimiento químico del medio intracúmulo y analizar la distribución de metales resultante.

Se considera un esquema simple de enriquecimiento químico de las partículas de gas. En cada paso de tiempo, se identifican las partículas comprendidas dentro de una esfera de radio dado centrada en cada galaxia. Las mismas son contaminadas por la misma cantidad de elementos químicos que se deposita en el gas caliente asociado a cada halo de materia oscura en el cual reside la galaxia considerada; de esta forma, se establece una conexión entre la simulación y el MSA.<sup>36</sup>

La distribución de los elementos químicos puede visualizarse mediante el cálculo de perfiles de abundancias. Para ello, se consideran cáscaras esféricas concéntricas que contienen al cúmulo, dentro de las cuales se estiman los valores medios de las abundancias. La figura 3 muestra los perfiles obtenidos para las abundancias de Fe, O, Si y S respecto del hidrógeno referidas al valor solar. En ellas, se discrimina entre la contribución de SNs Ia (líneas de rayas y puntos) y las SNs II (líneas de rayas). Las abundancias totales obtenidas al considerar ambos tipos de supernovas son las que se comparan con los valores observados.<sup>28</sup> La línea de puntos delimita el área determinada por las bandas de error de las abundancias totales. Las abundancias medidas (círculos llenos) fueron obtenidas por XMM-Newton a partir de la observación de 19 cúmulos de galaxias. Los valores presentados en la figura corresponden al valor medio de abundancias de aquellos cúmulos con temperaturas similares a la del cúmulo simulado ( $\approx 7$  KeV). La comparación con resultados observacionales muestra que la contribución de SNs Ia es necesaria para recuperar la distribución de abundancias de hierro, tal como se demuestra en otros trabajos. La producción de Si por parte de este tipo de supernovas también contribuye a que los resultados del modelo se acerquen a los valores medios observados. Sin embargo, los

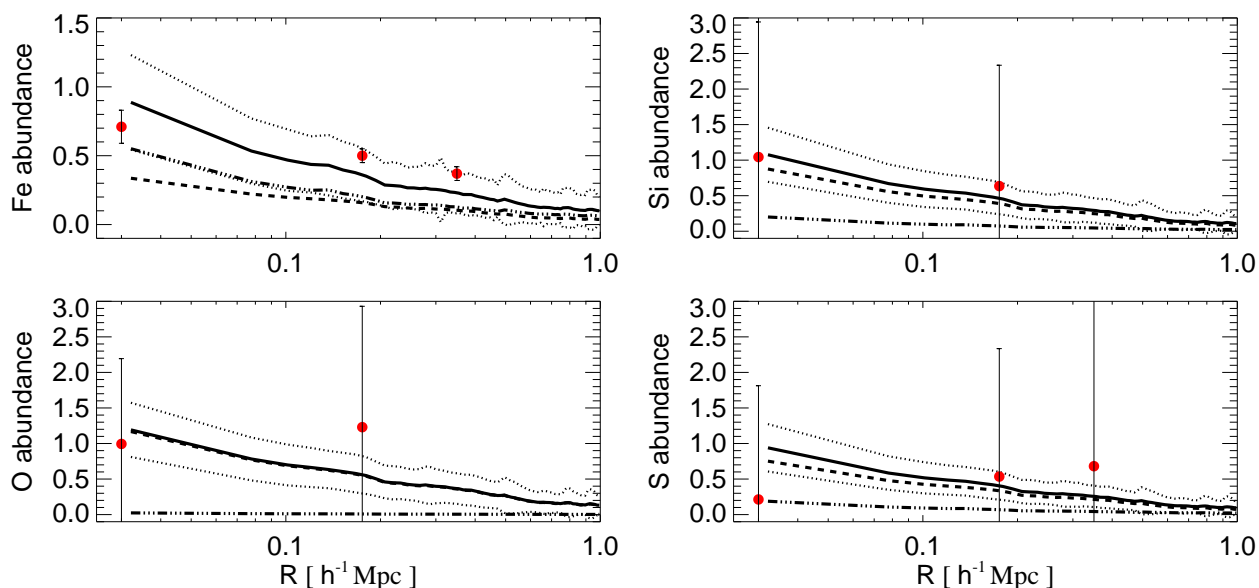


Figure 3: Perfiles de abundancias de Fe, O, Si y S respecto del H referidas al valor solar. Las líneas llenas corresponden a las abundancias totales, resultantes de la contribución conjunta de SNs Ia y II. Las líneas punteadas marcan el área definida por los errores (1 desviación estándar) asociados a este perfil. También se muestra el perfil obtenido al considerar separadamente a las SNs Ia (líneas de rayas y puntos) y SNs II (Líneas de rayas).

errores en la determinación del Si son mayores que los del Fe, por lo que estas mediciones no resultan muy útiles al momento de establecer cotas restrictivas en distintos parámetros y procesos físicos incluidos en el MSA. En general, se aprecia que la tendencia sugerida por las observaciones de un aumento en las abundancias de Fe y Si hacia el centro del cúmulo es reproducida por los resultados de las simulaciones. Este comportamiento se repite en las distribuciones de O y S dadas por el modelos híbrido, pero en estos casos se aparta de la tendencia observada que muestra una distribución de abundancias más bien plana, especialmente para el O. La razón de esta discrepancia merece ser analizada con mayor profundidad, pero cabe destacar nuevamente que las incertezas observacionales y las inherentes a los modelos de nucleosíntesis empleados no permiten realizar una comparación demasiado detallada.

La Figura 4 muestra las abundancias relativas de O, Si y S con respecto al Fe. Como se mencionó anteriormente, es claro que la sólo contribución de SNs II (lineas a rayas) no permiten recuperar los patrones de abundancias observado.

La figura 5 muestra mapas de densidad de hidrógeno (a), temperatura (b), intensidad de emisión en la banda de rayos X (c) y distribución de la abundancia de hierro (d) del medio intracúmulo. Estas distribuciones proyectadas se obtienen a partir de las partículas de gas contenidas dentro del radio virial del cúmulo, cuyas propiedades termodinámicas y químicas fueron pesadas con sus masas. Se observa que la abundancia de hierro en el centro del cúmulo es levemente superior al valor solar y luego decrece hacia la parte externa del cúmulo (se usa la convención  $[Fe/H] = \log(Fe/H) - \log(Fe/H)_{\odot}$ , donde  $(Fe/H)$  es la abundancia de hierro por número

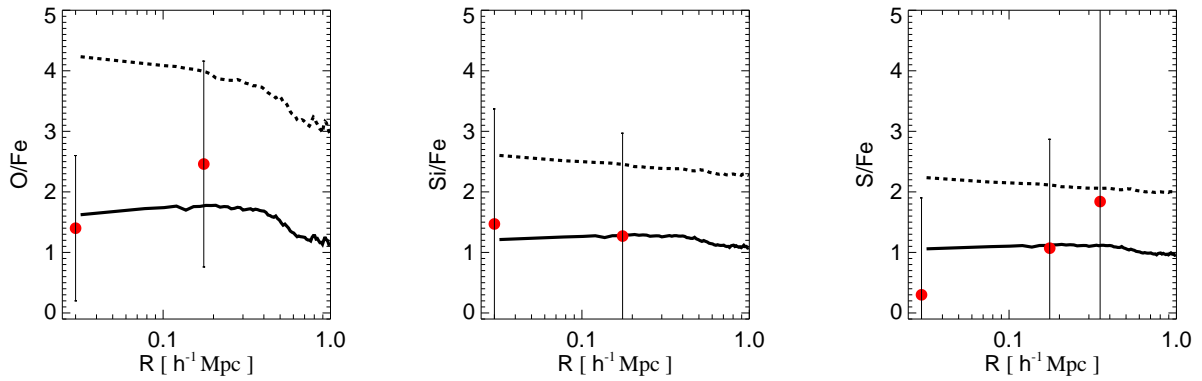


Figure 4: Relaciones entre las abundancias químicas de O, Si y S respecto al Fe referidas al valor solar. El significado de las líneas es el mismo que en la figura 3.

de átomos con respecto al hidrógeno). En la región externa se puede apreciar la presencia de zonas de alta metalicidad que contienen gas con alta densidad y bajas temperaturas. Las mismas corresponden a grupos que han desarrollado su propio perfil de metalicidad antes de ser acretados por el cúmulo.

El patrón de abundancias químicas es sensible a la importancia relativa de las fuentes que producen los distintos elementos, y al momento en que éstas contribuyen a la contaminación del medio en relación a las escalas de tiempo de fusión de las estructuras en el proceso de agregación jerárquica. La distribución que se genera a partir de esta compleja combinación también refleja el hecho de que el gas contaminado no permanece necesariamente cerca de la galaxia que dio origen a los metales que el mismo contiene. El desprendimiento del gas situado en la zona externa de los halos de materia oscura que contienen a las galaxias da lugar a un proceso de mezcla que suaviza las distribuciones de metales. Toda esta información está contenida en el modelo híbrido utilizado, por lo que la profundización en el análisis de sus resultados nos permitirá contribuir al esclarecimiento de los interrogantes planteados cuyo fin último es explicar los factores que intervienen en la formación y evolución de galaxias.

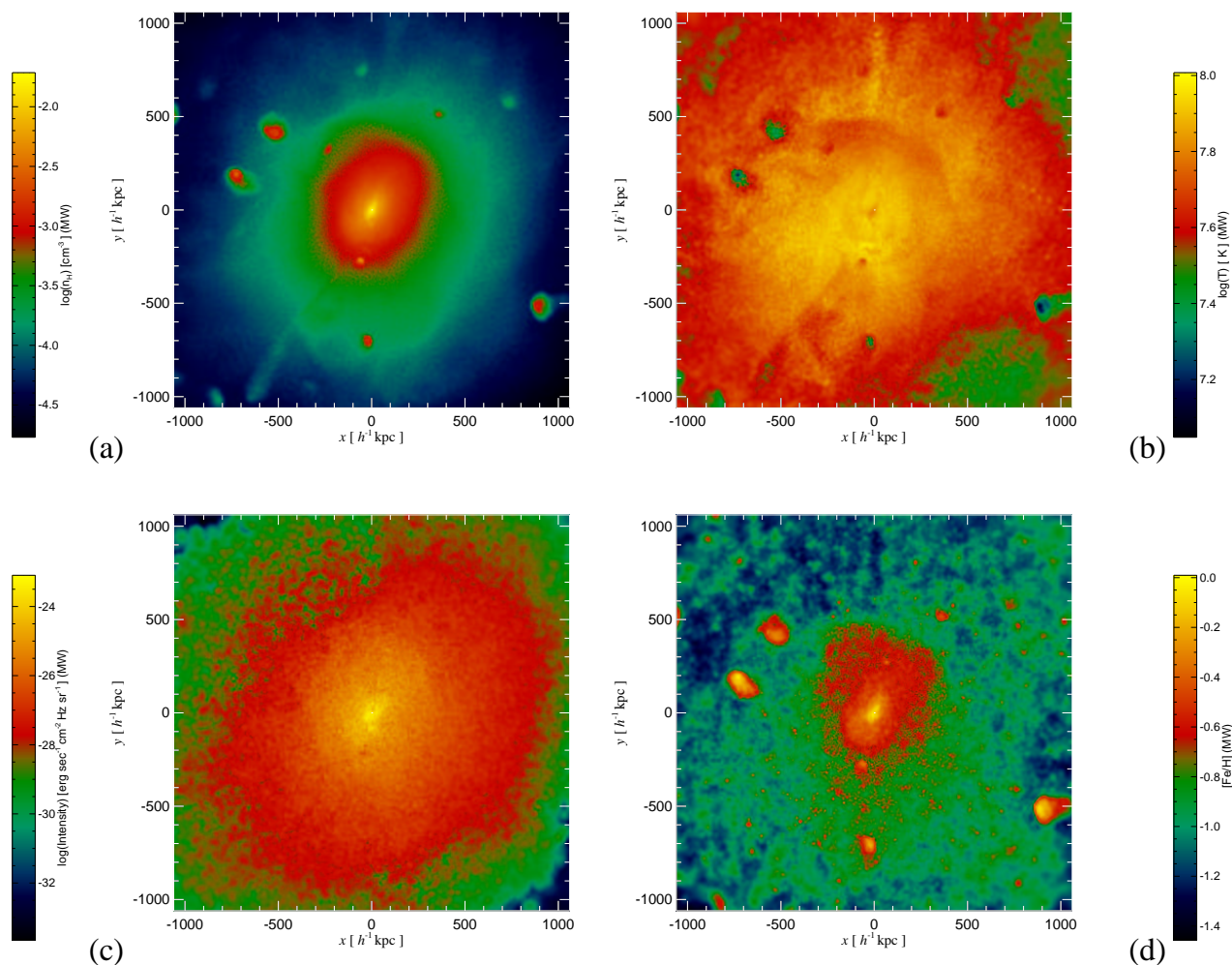


Figure 5: Propiedades proyectadas del gas intracúmulo dadas por las partículas de gas contenidas dentro del radio virial del cúmulo: (a) densidad numérica de átomos de hidrógeno; (b) distribución de temperatura; (c) intensidad de emisión de las líneas de hierro ionizado en la banda de rayos X del espectro electromagnético; (d) distribución de la abundancia de hierro respecto del hidrógeno referida al valor solar ( $[\text{Fe}/\text{H}] = \log(\text{Fe}/\text{H}) - \log(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}$ ).

## REFERENCES

- [1] P. Madau, L. Pozzetti, and M. Dickinson. On the evolution of the cosmic supernova rates. *MNRAS*, **297**, L17–L22 (1998).
- [2] L.L. Cowie, A. Songaila, and A.J. Barger. Evidence for a gradual decline in the universal rest-frame ultraviolet luminosity density for  $z < 1$ . *AJ*, **118**(2), 603–612 (1999).
- [3] M. Giavalisco, M. Dickinson, H.C. Ferguson, S. Ravindranath, C. Kretchmer, L.A. Moustakas, P. Madau, S.M. Fall, J.P. Gardner, M. Livio, C. Papovich, A. Renzini, H. Spinrad, D. Stern, and A. Riess. The rest-frame uv luminosity density of star-forming galaxies at redshifts  $z > 3.5$ . *astro-ph/0309065*, (2004).
- [4] J. Brinchmann, R. Abraham, D. Schade, L. Tresse, R.S. Ellis, S. Lilly, O. Le Fevre, K. Glazebrook, and 4 coauthors. Hubble space telescope imaging of the cfrs and lds



- redshift surveys. I. morphological properties. *ApJ*, **499**, 112 (1998).
- [5] S. Lilly, D. Schade, R. Ellis, O. le Fevre, J. Brinchmann, L. Tresse, T. Abraham, and 6 coauthors. Hubble space telescope imaging of the cfrs and ldss redshift surveys. II. structural parameters and the evolution of disk galaxies to  $z = 1$ . *ApJ*, **500**, 75L (1998).
- [6] C.L. Bennett, B.M. Halpern, G. Hinshaw, C. Jackson, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S.S. Meyer, L. page, and 5 coauthors. The microwave anisotropy probe mission. *ApJ*, **583(1)**, 1–23 (2003).
- [7] A. Kogut, D.N. Spergel, C. Barnes, C.L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, M Limon, S.S. Meyer, L. Page, and 3 coauthors. First-year wilkinson microwave anisotropy probe (wmap) observations: Temperature-polarization correlation. *ApJS*, **148**, 135–159 (2003).
- [8] N. Yoshida, A. Sokasian, L. Hernquist, and V. Springel. Early structure formation and reionization in a cosmological model with a running primordial power spectrum. *ApJ*, **598**, 73–85 (2003).
- [9] A.G. Riess, A.V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti, A. Diercks, P.M. Garnavich, R.L. Gilliland, and 13 coauthors. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *AJ*, **116**, 1009–1038 (2002).
- [10] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R.A. Knop, P. Nugent, P.G. Castro, S. Deustua, S. fabbro, and 25 coauthors. Measurements of  $\omega$  and  $\lambda$  from 42 high-redshift supernovae. *ApJ*, **517**, 565–586 (1999).
- [11] W.H Press and P. Schechter. Formation of galaxies and clusters of galaxies by self-similar gravitational condensation. *ApJ*, **187**, 425 (1974).
- [12] J.C. Mihos and L. Hernquist. Gasdynamics and starbursts in major mergers. *ApJ*, **464**, 641 (1996).
- [13] P.B. Tissera. Analysis of star formation in galaxy-like objects. *ApJ*, **534**, 636–649 (2000).
- [14] J.E. Barnes and L. Hernquist. Transformations of galaxies. II. gasdynamics in merging disk galaxies. *ApJ*, **471**, 115 (1996).
- [15] M.B. Mosconi, P.B. Tisera, D.G. Lambas, and S.A. Cora. Chemical evolution using smooth particle hydrodynamical cosmological simulations - I. implementation, tests and first results. *MNRAS*, **325**, 34–48 (2001).
- [16] V. Springel and L. Hernquist. The history of star formation in a  $\lambda$  cold dark matter universe. *MNRAS*, **339**, 312–334 (2003).
- [17] S.D.M. White and M.J. Rees. Core condensation in heavy halos - a two-stage theory for galaxy formation and clustering. *MNRAS*, **183**, 341–358 (1978).
- [18] S.D.M. White and C.S. Frenk. Galaxy formation through hierarchical clustering. *ApJ*, **379**, 52–79 (1991).
- [19] G. Kauffmann, B. Guiderdoni, and S.M.D. White. Faint galaxy counts in a hierarchical universe. *MNRAS*, **267**, 981 (1994).
- [20] R.S. Somerville, J.R. Prmack, and S.M. Faber. The nature of high-redshift galaxies. *MNRAS*, **320**, 504–528 (2001).
- [21] C.L. Sarazin. Using x-ray absorption lines to determine the distances to clusters of galax-

- ies. *ApJ*, **345**, 12 (1989).
- [22] A. Renzini. Iron as a tracer in galaxy clusters and groups. *ApJ*, **488**, 35 (1997).
- [23] T.M. Heckman, M.D. Lehnert, D.K. Strickland, and L. Armus. Absorption-line probes of gas and dust in galactic superwinds. *ApJS*, **129**, 493–516 (2000).
- [24] M. Mori and A. Burkert. Gas stripping of dwarf galaxies in clusters of galaxies. *ApJ*, **538**, 559 (2000).
- [25] M. Loewenstein. The contribution of population III to the enrichment and preheating of the intracluster medium. *ApJ*, **557L**, L35–L38 (2001).
- [26] A. Finoguenov, M. Arnaud, and L.P. David. Temperature and heavy-element abundance profiles of cool clusters of galaxies from ASCA. *ApJ*, **555**, 191–204 (2001).
- [27] F. Gastaldello and S. Molendi. Abundance gradients and the role of supernovae in M87. *ApJ*, **575**, L15–L19 (2002).
- [28] T. Tamura, J.S. Kaastra, J.W.A. den Herder, J.A.M. Bleeker, and J.R. Peterson. The elemental abundances in the intracluster medium as observed with XMM-Newton. *astro-ph/0403058*, (2004).
- [29] B.W. O’Shea, K. Nagamine, V. Springel, L. Hernquist, and M.L. Norman. Comparing AMR and SPH cosmological simulations: I. dark matter and adiabatic simulations. *astro-ph/0312651*, (2003).
- [30] V. Springel, N. Yoshida, and S.D.M. White. Gadget: a code for collisionless and gas-dynamical cosmological simulations. *New Astronomy*, **6**, 79–117 (2001).
- [31] J.J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *ARA&A*, **30**, 543–574 (1992).
- [32] V. Springel, S.D.M. White, G. Tormen, and G. Kauffmann. Populating a cluster of galaxies - I. results at  $z=0$ . *MNRAS*, **328**, 726–750 (2001).
- [33] A. Klypin, S. Gottlger, A.V. Kravtsov, and A.M. Khokhlov. Galaxies in n-body simulations: Overcoming the overmerging problem. *ApJ*, **516**, 530–551 (1999).
- [34] C.S. Frenk, A.E. Evrard, S.D.M. White, and F.J. Summers. Galaxy dynamics in clusters. *ApJ*, **472**, 460 (1996).
- [35] G. De Lucia, G. Kauffmann, and S.D.M. White. Chemical enrichment of the intracluster and intergalactic medium in a hierarchical galaxy formation model. *MNRAS*, **349**, 1101–1116 (2004).
- [36] S.A. Cora, S.D.M. White, and V. Springel. Chemical enrichment of the intracluster medium. *En prep*.
- [37] L. Portinari, C. Chiosi, and A. Bressan. Galactic chemical enrichment with new metallicity dependent stellar yields. *A&A*, **334**, 505–539 (1998).
- [38] P. Marigo. Chemical yields from low- and intermediate-mass stars: Model predictions and basic observational constraints. *A&A*, **370**, 194–217 (2001).
- [39] T. Dahlen, L.-G. Strolger, A.G. Riess, B. Mobasher, R.-R. Chary, C.J. Conselice, H.C. Ferguson, A.S. Fruchter, M. Giavaliso, M. Livio, P. Madau, and N. Panagia and J.L. Tonry. High redshift supernova rates. *astro-ph/046547*, (2004).
- [40] K. Iwamoto, F. Brachwitz, K. Nomoto, N. Kishimoto, H. Umeda, W.R. Hix, and F.-K. Thielemann. Nucleosynthesis in Chandrasekhar mass models for type Ia supernovae and

- constraints on progenitor systems and burning-front propagation. *ApJS*, **125**, 439–462 (1999).
- [41] S. Boissier, A. Boselli, N. Prantzos, and G. Gavazzi. Chemo-spectrophotometric evolution of spiral galaxies - IV. star formation efficiency and effective ages of spirals. *MNRAS*, **312**, 733–742 (2001).
- [42] A. Finoguenov, L.P. David, and T.J. Ponman. An asca study of the heavy-element distribution in clusters of galaxies. *ApJ*, **544**, 188–203 (2000).
- [43] S. De Grandi and S. Molendi. Metallicity gradients in x-ray clusters of galaxies. *ApJ*, **551**, 153–159 (2002).
- [44] E. Cappellaro, M. Riello, G. Altavilla, M.T. Botticella, S. Benetti, A. Clocchiati, J.I. Danziger, P. Mazzali, A. Pastorello, F. Patat, M. Salvo, M. Turatto, and S. Valenti. Death rate of massive stars at redshift 0.3. *astro-ph/0407216*, (2004).
- [45] L.-G. Strolger, A.G. Riess an T. Dahlen, M. Livio, N. Panagia, P. Challis, J.L. Tonry, A.V. Filippenko, R. Chornock, H. Ferguson, A. Koekemoer, B. Mobasher, M. Dickinson, and 23 coautores. The hubble higher-z supernova search: Supernovae to  $z=1.6$  and constraints on type Ia progenitor models. *astro-ph/0406546*, (2004).
- [46] R. Giovanelli, M.P. Haynes, L.N da Costa, W. Freudling, J.J. Salzer, and G. Wegner. The tully-fisher relation and  $h_0$ . *ApJ*, **477**, L1–L4 (1997).
- [47] R. De Propris, M. Colless, S.P. Driver, W. Couch, J.A. Peacock, and 24 coautores. The 2df galaxy redshift survey: the luminosity function of cluster galaxies. *MNRAS*, **342**, 725–737 (2003).
- [48] P.Rosati, S. Borgani, and C. Norman. The evolution of x-ray clusters of galaxies. *ARA&A*, **40**, 539–577 (2002).
- [49] M.L. Norman. Cosmological simulations of x-ray clusters: the quest for high resolution and essential physics. *astro-ph/0403079*, (2004).