Universiteit Leiden
The Netherlands

X-ray spectroscopy of merging galaxy clusters

Urdampilleta Aldema, I.

Citation
Urdampilleta Aldema, I. (2019, November 13). *X-ray spectroscopy of merging galaxy clusters*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/80400

Version:	Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/80400

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page

Universiteit Leiden

Leiden University Repository

The handle http://hdl.handle.net/1887/80400 holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Urdampilleta Aldema I.
Title: X-ray spectroscopy of merging galaxy clusters
Issue Date: 2019-11-13

Resumen

Los cúmulos de galaxias son los mayores objetos virializados en el Universo, compuestos de centenares a miles de galaxias. Estas galaxias están rodeadas de un plasma caliente ionizado conocido como medio intracumular (ICM) y es observado en rayos-X. Las galaxias constituyen sólo un $\sim$5% de la masa total del cúmulo, mientras que el ICM el $\sim$15%. El resto de la masa, $\sim$80%, está dominada por la materia oscura. Los cúmulos de galaxias pueden observarse en diferentes longitudes de onda, aunque las más relevantes para este estudio son las asociadas al espectro visible, rayos-X y radio (ver Fig. A). Las observaciones en el óptico proporcionan información sobre las galaxias individuales y su sobredensidad a distancias similares. Las propiedades espectrales (tales como la temperatura, densidad o abundancia) pueden derivarse en rayos-X. Por otra parte, las observaciones en radio muestran objetos radio discretos y extensos, trazan los rayos cósmicos y la aceleración de partículas energéticas. Los cúmulos de galaxias se clasifican en diferentes grupos basados en su estado dinámico: cúmulos relajados o 'cool-core' (CC), cúmulos distorsionados o 'non-cool-core' (NCC) y cúmulos extremádamente distorsionados o cúmulo de galaxias en colisión .

Los cúmulos de galaxias crecen jerárquicamente via acreción o colisión de grupos o subcúmulos menos masivos. La colisión de cúmulos es el evento más energético en el Universo desde el Big Bang. Turbulencias, ondas de choque y frentes fríos emergen en el ICM como resultado de una fuerte colisión . Las ondas de choque son estructuras de gran escala que se propagan desde el centro a la periferia de los cúmulos, donde normalmente se observan. Pueden ser detectados por discontinuidades en la temperatura y la densidad en el ICM a través del análisis espectral y la detección de saltos en el brillo superficial, respectivamente. Se cree que estas ondas de choque (con un número de Mach $\mathcal{M} \leq$ 3–5) (re)aceleran electrones, en presencia de un campo magnético amplificado, vía el mecanismo de Fermi de primer orden, la aceleración difusa de onda de choque (DSA). Hoy en día han sido propuestos nuevos mecanismos de aceleración como la re-aceleración de rayos cósmicos preexistentes, entre otros. Estas partículas relativistas pueden producir emisión sincrotrón formando estructuras alargadas, polarizadas y de espectro inclinado o 'steep-spectrum', conocidos como 'radio relics'. En algunos cúmulos esta emisión en radio ('radio relics') aparece asociada a una emisión en rayos-X (ondas de choque en rayos-X).

Figure A: Imagen compuesta (óptico, rayos-X en naranja y radio en azul) del cúmulo de galaxias Abell 3376. Créditos: Rayos-X (NASA/CXC/SAO/A. Vikhlinin; ROSAT), Óptico (DSS), Radio (NSF/NRAO/VLA/IUCAA/J. Bagchi).

El ICM de los cúmulos de galaxias son ricos en metales que se originan principalmente de las supernovas de colapso gravitatorio (SNcc), supernovas de tipo Ia (SNIa) y estrellas de baja masa de la rama asintótica gigante (AGB). Las SNcc liberan metales ligeros (O, Ne, Mg, Si and S), mientras que los metales pesados son expulsados por las SNIa. La principal contribución de C y N proviene de las AGB. Una vez que los metales son depositados en el ICM, éstos son posteriormente transportados, mezclados y redistribuidos. En los últimos años, la distribución radial de la abundancia (Fe) de los cúmulos relajados y distorsionados ha sido analizada extensamente. Sin embargo, pocos estudios se han centrado en los cúmulos de galaxias en colisión. Una mayor comprensión de la distribución de metales a lo largo del eje de colisión podría revelar la evolución química de estas estructuras de gran escala. La distribución radial del Fe en los cúmulos relajados presenta un gran pico central rico en metales comparado con los cúmulos distorsionados. Este pico disminuye a radios lejanos hasta alcanzar un valor uniforme cercano a $\sim$0.2–0.3 $Z_\odot$. Este mismo comportamiento puede observarse en los cúmulos distorsionados, lo que indicaría un enriquecimiento temprano del ICM ($z \sim$ 2–3).

La espectroscopía de rayos-X es una herramienta útil para determinar las propiedades termodinámicas y químicas del ICM mencionadas anteriormente. Por esta razón los códigos espectrales de gran precisión son completamente necesarios para modelar y ajustar los espectros de cúmulos de galaxias en rayos-X. SPEX es uno de los programas utilizados

para el modelado, ajuste y análisis de espectros. SPEX ha sido recientemente actualizado a v3.0 debido a los requisitos de las observaciones de alta resolución esperadas por el satélite *Hitomi* y las futuras misiones, *XRISM* y *Athena*. Las mejoras de la nueva versión se han centrado en la actualización de los procesos radiativos como la recombinación radiativa, la ionización colisional, intercambio de carga y la fotoionización, y la incorporación de un extenso número de líneas de emisión y transición.

Esta tesis se centra en el análisis espectral de cúmulo de galaxias en colisión y el desarrollo de un código para futuras observaciones espectroscópicas de rayos-X de alta resolución. Este trabajo está dedicado a una mejor comprensión de dos aspectos concretos de estos cúmulos en colisión: uno, la correlación entre la componente térmica (rayos-X) y la no-térmica (radio), y dos, su historia sobre el enriquecimiento de metales. El primer tema puede revelar la asociación física de las componentes de rayos-X y radio. El segundo puede arrojar luz sobre la historia dinámica de las colisiones y su papel en el enriquecimiento en metales de los cúmulos.

En el Capítulo 2, mostramos el estudio en rayos X del cúmulo de galaxias en colisión Abell 3376 observado con *Suzaku*. Estudiamos la distribución espacial de la componente térmica del ICM incluyendo la periferia de los cúmulos. Para este propósito obtenemos la distribición de la temperatura en cuatro direcciones radiales (norte, sur, este y oeste). Comparamos estas distribuciones con el perfil universal para cúmulos relajados y encontramos una desviación para todas las direcciones excepto para el sur, sugiriendo la posible presencia de ondas de choque en esas direcciones. Sin embargo, sólo encontramos evidencias de dos ondas de choque al oeste y este. Una está asociada al 'radio relic' del oeste con un $\mathcal{M} \sim 2.8$ y la otra al 'notch' del este con un $\mathcal{M} \sim 1.5$. Detectamos además un frente frío al este del pico de emisión de rayos-X. El número de Mach de la onda de choque del este es consistente con las observaciones de radio previas, mientras que el 'radio relic' del oeste presenta un número de Mach ligéramente inferior, probablemente debido a los efectos de envejecimiento. Finalmente, estimamos el escenario de la colisión, el cuál sugiere una colisión cerca del plano del cielo con una edad dinámica de $\sim$0.6 Gyr después de cruzar el núcleo del subcúmulo principal.

En el Capítulo 3, investigamos las propiedades termodinámicas del plasma caliente en el cúmulo de galaxias en colisión Abell 3365 usando observaciones de *XMM-Newton*. Para este propósito, en primer lugar, buscamos discontinuidades en el brillo superficial y temperatura en las regiones periféricas y centrales del ICM. En segundo lugar, obtenemos las distribuciones de temperatura, abundancia (Fe) y pseudo-entropía a lo largo del eje de colisión en la region central. Encontramos dos ondas de choque prominentes ($\mathcal{M} > 3$) asociadas al 'radio relic' del este y al candidato de 'radio relic' del oeste además de un frente frío al oeste del pico de emisión de rayos-X. La eficiencia de aceleración de la onda de choque en el 'radio relic' del este es consistente con el mecanismo DSA, sugiriendo que es un escenario favorable para ondas de choque con $\mathcal{M} > 3$. La distribución de abundancia presenta signos de dos picos de valor $\sim$0.6 $Z_{\odot}$. Uno corresponde con la localización del subcúmulo principal y el otro está desplazado del pico de emisión hacia el frente frío. Además encontramos un mínimo de entropía que sugiere que el núcleo o 'cool-core' del cúmulo progenitor ha sobrevivido partial o totalmente a la colisión.

En el Capítulo 4, presentamos el análisis espectral en rayos-X de seis cúmulos de

galaxias en colisión (CIZA J2242.8+5301, 1RXS J0603.3+4214, Abell 3376, Abell 3667, Abell 665 and Abell 2256) observados con *XMM-Newton*. Obtenemos las distribuciones de temperatura, abundancia (Fe) y pseudo-entropía a lo largo del eje de choque hasta r_{500}. De estas distribuciones derivamos el perfil promedio de Fe que presenta un pico moderado central, menor que los cúmulos relajados, seguido de una disminución hasta un valor uniforme de $\sim$0.2–0.3 $Z_{\odot}$ para radios lejanos. Además, las distribuciones de pseudo-entropía sugieren que en algunos casos el núcleo de baja entropía relativa puede sobrevivir a colisiones mayores. También estudiamos la correlación entre la abundancia y la pseudo-entropía. Encontramos que existe una leve correlación para las regiones centrales, probablemente debido a que la actividad de la colisión esparce los metales. Sin embargo, no hay evidencias de ninguna correlación a radios lejanos, en la periferia de los cúmulos. Este resultado junto con la uniformidad de la abundancia parece aportar una evidencia adicional en favor del escenario de enriquecimiento temprano.

Por último, en el Capítulo 5, actualizamos las secciones cruzadas de ionización para iones desde H a Zn con 45 nuevas bases de datos, teniendo en cuenta los nuevos cálculos teóricos y nuevas medidas de laboratorio. Las secciones cruzada del resto de iones que no tengan una base de datos han sido interpoladas o extrapoladas. En este estudio somos capaces de obtener por primera vez no sólo la sección total, sino la sección de cada celda interna. Estas secciones cruzadas incluyen dos procesos radiativos diferentes: la Ionización Directa (DI) y la Excitación-Autoionización (EA). Modelamos y ajustamos estos procesos de DI y EA con las ecuaciones extendidas de Younger y Mewe, respectivamente, para obtener los coeficientes de ajuste. Derivamos los coeficientes del ratio de ionización aplicando la integral a la distribución de velocidades Maxwelliana de estas ecuaciones. Finalmente, hemos incorporado los coeficientes de DI, EA y el ratio de ionización a SPEX v3.0.