

El experimento QUIJOTE: análisis de separación de componentes con datos del MFI y resultados del comisionado del TFGIs

Autor: Mateo Fernández Torreiro
(mateo@fernandeztorreiro.com)

Tesis doctoral dirigida por: José Alberto

Rubiño Martín y Rafael Rebolo López

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)

Fecha de lectura: 13 de noviembre de 2023

Tras los despliegues de los satélites WMAP y *Planck* cobran fuerza dos motivaciones entre la comunidad científica centrada en el estudio del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) de cara a futuros experimentos. La primera es una mayor atención en la componente polarizada del CMB, ya que la detección de los modos-B de dicha componente tendría importantes implicaciones cosmológicas (principalmente, la presencia de ondas gravitacionales primordiales durante la época inflacionaria de nuestro Universo). La segunda es la correcta caracterización de los llamados *foregrounds* del CMB, aquellas señales astrofísicas coincidentes con este en el espectro electromagnético y que entorpecen su detección.

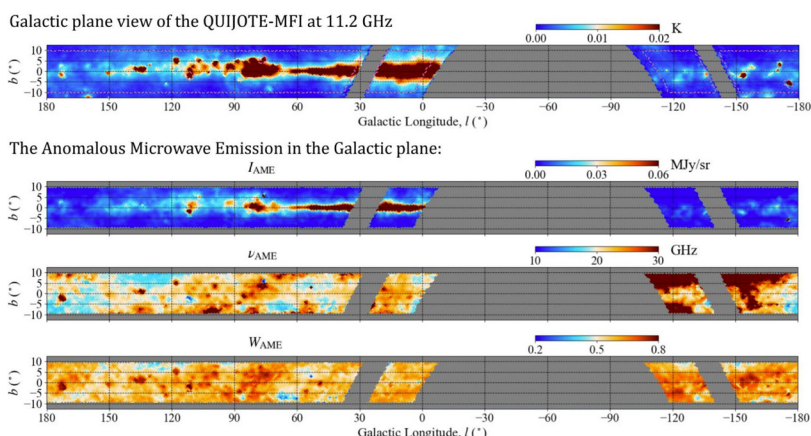
Cada uno de estos puntos se puede relacionar con los dos primeros instrumentos instalados en el experimento Q-U-I JOint Tenerife Experiment (QUIJOTE): el Multi Frequency Instrument (MFI) y el Thirty-and-Forty Gigahertz Instrument (TFGI). El MFI estuvo instalado en el Observatorio del Teide (OT) entre 2012 y 2018, observando el cielo entre 10 y 20 GHz a escalas de un grado. En este rango espectral se solapan tres de los principales *foregrounds* del CMB: las emisiones sincrotrón, libre-libre y anómala de microondas (AME). El MFI es el único instrumento que ha observado el cielo completo en este rango espectral, por lo que sus datos en la caracterización de estos *foregrounds* resultan de gran importancia. Por su parte, el TFGI está instalado en el OT desde 2019, y observa el cielo a 31 y 41 GHz con una resolución de ~ 20 arcmin. En este caso, el TFGI se centra en el estudio con alta sensibilidad de campos cosmológicos. Al igual que el MFI (y al contrario que WMAP o *Planck*) el TFGI está centrado en la medición de la componente polarizada del CMB, y por diseño minimiza significativamente la contribución del ruido $1/f$.

En esta tesis utilizamos los datos del MFI junto con un nuevo

método de separación de componentes para obtener mapas de los parámetros que describen los *foregrounds* del CMB a lo largo del plano Galáctico ($|b| < 10^\circ$). En total se han obtenido diez mapas distintos asociados a dichos parámetros. La AME todavía no se ha conseguido caracterizar totalmente dentro de la literatura, por lo que aquellos parámetros que la describen se discuten en mayor detalle. Hemos encontrado que el mejor trazador de la AME es la radianza del polvo, y que la AME correla de forma más importante tanto con los granos pequeños (< 1 nm) y grandes (> 10 nm) de polvo, mientras que la correlación con aquellos de tamaños intermedios (1-10 nm) no es tan buena. Por lo tanto, resulta menos probable que estos últimos sean los responsables de la AME. También encontramos que la cantidad de AME esperada disminuye significativamente cuando los datos del MFI no se utilizan en el análisis: ello prueba la importancia de contar con datos en esta zona del espectro, como los que proporciona QUIJOTE-MFI, a fin de evitar sesgos. También hemos utilizado cerca de 600 horas de observación de la galaxia de Andrómeda (M31) por parte del MFI para intentar caracterizar una componente extragaláctica de AME. Recuperamos dicha componente con una significación mayor que 3σ , mientras que distintos tests estadísticos muestran una importante preferencia por aquellos modelos que consideran la AME. Hemos encontrado además que el cociente entre la AME y la emisión térmica del polvo es similar en ambas galaxias, lo que sugiere un comportamiento de la AME similar entre M31 y la Vía Láctea. Además, por primera vez se ha obtenido una cota para la polarización de la AME en un objeto extragaláctico ($\leq 40\%$). Finalmente, en esta tesis presentamos el comisionado del TFGI, con datos tomados entre 2021 y 2022 con siete (de 29) píxeles instalados en el instrumento. Se ha preparado el modelo de apuntado del instrumento, con una precisión < 1 arcmin, al tiempo que se han caracterizado los haces, siendo sus anchuras a media altura (FWHM) consistentes con las esperadas: 22 y 18 arcmin (a 31 y 41 GHz, respectivamente). Se ha establecido un modelo de la ganancia mes a mes, ya que se han detectado variaciones temporales significativas, con un incertidumbre total en torno al 10%. La sensibilidad instantánea también ha sido estimada a partir de observaciones de Tau A, alcanzando unos valores por píxel de 0,75–1,5 mK/vs y 0,25–0,5 mK/vs en intensidad y polarización, respectivamente. A partir de las observaciones de verificación científica realizadas en las regiones del Cisne y W44, alcanzamos sensibilidades en polarización de 8–10 $\mu\text{K deg}^{-1}$. Al extrapolar este resultado, encontramos que para un campo cosmológico típico de 1200–1300 deg^2 alcanzaríamos un nivel de 1 $\mu\text{K deg}^{-1}$ tras ~ 3000 horas de observación (1 año asumiendo una eficiencia de un 30%), una vez los 29 detectores estuvieran instalados. Con esta sensibilidad sería posible establecer una cota en la ratio entre los modos-B y modos-E del CMB, r , de $< 0,05$. Será la primera vez que un experimento en el Hemisferio Norte alcance tal precisión.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mos-trarRef.do?ref=2478447>

Arriba: el plano Galáctico visto por el instrumento QUIJOTE-MFI a 11.2 GHz. Abajo: los mapas reconstruidos de los parámetros (amplitud, frecuencia de pico y anchura espectral) que describen la emisión Anómala de Microondas (AME).



Explorando el ciclo bariónico de las galaxias a través del análisis de poblaciones estelares

Autora: Laura Scholz Díaz

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Martín Navarro y Jesús Falcón Barroso

Centro: Instituto de Astrofísica Canarias y Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 9 de mayo de 2024

Como primera aproximación, el crecimiento de los halos de materia oscura es el principal motor de la formación de galaxias en nuestro modelo cosmológico estándar. Sin embargo, procesos bariónicos complejos y altamente no lineales toman el control en los centros de estos halos, dando lugar a la diversidad de galaxias que observamos en el Universo hoy en día. El acoplamiento entre la física bariónica y la materia oscura es fundamental para nuestra comprensión de las galaxias y, sin embargo, sigue siendo un desafío tanto para modelos teóricos como para trabajos observacionales. Particularmente, si, cómo y por qué las propiedades observadas de galaxias están influenciadas por las propiedades de sus halos de materia oscura siguen siendo preguntas abiertas en el campo. El objetivo principal de esta tesis es explorar la formación y evolución de las galaxias en su contexto y entorno cosmológico, respondiendo a estas preguntas fundamentales observacionalmente, principalmente a través del análisis de poblaciones estelares. Las poblaciones estelares dentro de galaxias son registros fósiles que contienen información sobre su pasado evolutivo, que tradicionalmente solo se han estudiado en términos de propiedades bariónicas. Nuestro trabajo combina medidas detalladas de poblaciones estelares con diferentes caracterizaciones de halos para investigar el papel que tienen los halos de materia oscura en la modulación de las propiedades observadas y de relaciones de escala claves de galaxias en el Universo local.

Hemos investigado cómo las propiedades de las poblaciones estelares y las historias de formación estelar dependen de la masa del halo para las galaxias centrales del gran cartografiado espectroscópico SDSS. Mapeamos las edades y las metalicidades de las galaxias a lo largo de la relación de escala entre la masa estelar y la masa del halo y sobre la relación entre la dispersión de velocidades y la masa del halo, utilizando sus espectros ópticos de absorción. Descubrimos que estos observables correlan con la dispersión de ambas relaciones, pero la dispersión de velocidad es un mejor predictor de estas propiedades que la masa estelar. Lo más interesante es que nuestros hallazgos indican que, para una masa estelar o una dispersión de velocidades dada, las galaxias tienen diferentes poblaciones estelares según la masa de sus halos anfitriones. Las galaxias en halos menos masivos son más viejas y más ricas en metales a una masa estelar fija, y también encontramos que forman la mayor parte de sus estrellas temprano y en períodos cortos de tiempo según sus historias de formación estelar. Además, introdujimos un nuevo enfoque observacional utilizando galaxias del cartografiado de espectroscopía de campo integral CALIFA para evaluar el papel de la masa total dinámica como una métrica alternativa sensible a su contenido de materia oscura. Estas masas totales se derivan a través de un detallado modelado dinámico de Jeans de la cinemática estelar de las galaxias, e incorporan tanto una componente

estelar como una de materia oscura para poder reproducir los movimientos estelares. Además de las poblaciones estelares, también investigamos el momento angular estelar, las tasas de formación estelar y la morfología de las galaxias a lo largo de la relación de escala entre la masa estelar y la masa total dinámica. De manera similar a la relación entre la masa estelar y la masa del halo, observamos que todas estas propiedades de las galaxias, sensibles a diferentes escalas de tiempo del proceso de formación de galaxias, dependen tanto de la masa estelar como de la masa total, con estas dos cantidades habiendo sido derivadas de manera completamente independiente. Las galaxias se vuelven más viejas, más ricas en metales y menos soportadas por rotación, tienen menores tasas de formación estelar y morfologías de tipo temprano a medida que disminuye su masa total, a una masa estelar fija.

Además, investigamos el origen de la relación de escala entre las tasas globales de formación estelar y las masas estelares de las galaxias, la secuencia principal de formación estelar. Exploramos la conexión entre la dispersión de esta relación y las historias de formación estelar para galaxias centrales de SDSS, utilizando sus espectros ópticos de absorción. Observamos que, para una masa estelar dada, las galaxias han experimentado diferentes historias de formación estelar según sus tasas de formación estelar actuales. Las galaxias con tasas de formación estelar más altas hoy en día tienen historias de formación estelar más extendidas, mientras que las que tienen tasas de formación estelar más bajas han formado la mayor parte de sus estrellas más temprano y más rápido.

Interpretamos nuestros resultados en el contexto de la evolución de los halos de materia oscura a lo largo del tiempo cósmico. Especulamos que los tiempos de formación de los halos son el origen de las tendencias observadas a lo largo de la relación entre la masa estelar y la masa del halo, la relación entre la masa estelar y la masa total dinámica y la secuencia principal de formación estelar, con la dispersión de estas relaciones mapeando galaxias/halos en diferentes etapas evolutivas.

Además, investigamos si las simulaciones cosmológicas hidrodinámicas numéricas a gran escala pueden reproducir la relación fundamental de la metalicidad observada localmente, es decir, la anti-correlación entre las metalicidades del gas y las tasas de formación estelar observadas en galaxias de baja masa a escalas locales. Generamos mapas resueltos espacialmente de la metalicidad del gas y tasa de formación estelar para galaxias espirales de EAGLE. Las galaxias de baja masa muestran que regiones con bajas tasas de formación estelar tienen altas metalicidades del gas, mientras que esta tendencia se invierte para galaxias masivas, en acuerdo con observaciones espectroscópicas de campo integral. Por último, también exploramos el origen del gas que alimenta la formación estelar en las galaxias de EAGLE en dos épocas cósmicas, el día de hoy y el mediodía cósmico, rastreando el gas que forma estrellas y las estrellas formadas recientemente hacia atrás en el tiempo. La mayoría del gas que sostiene la formación estelar en las galaxias en ambas épocas ya estaba en las galaxias aproximadamente un gigaaño antes de la formación estelar. Encontramos que la contribución del gas acretao proveniente de fusiones de galaxias aumenta al mediodía cósmico con respecto al día de hoy. Sin embargo, la contribución del gas de origen cosmológico (por ejemplo, de fusiones con halos oscuros y luminosos) es relevante para las galaxias de baja masa hoy en día, mostrando que la acreción de gas cosmológico es una fuente importante para alimentar la formación estelar en estos halos de baja masa no solo en el Universo temprano.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/implimirFichaConsulta.do?idFicha=839524>

Explotando el ultravioleta cercano como herramienta de diagnóstico de composición en el material primitivo del Sistema Solar

Autor: Fernando Tinaut Ruano
(1b.ftinaut@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Julia de León Cruz y Eri Tatsumi

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias y Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 11 de junio de 2024

Los asteroides son los restos de la formación planetaria en el Sistema Solar, por lo que su estudio nos ayuda a entender las condiciones en las primeras etapas de formación de nuestro sistema planetario. Los asteroides primitivos son aquellos con espectros similares a los de las condritas carbonáceas, ricos en compuestos de carbono, orgánicos, y silicatos alterados por la presencia de agua líquida (filosilicatos). Los asteroides primitivos están bien caracterizados en diversas regiones del espectro, mostrando su absorción más diagnóstica en la región de las $3\ \mu\text{m}$. Sin embargo existe una escasez de información sobre la región del ultravioleta cercano (NUV, entre $0,35$ y $0,5\ \mu\text{m}$) debido, entre otras cosas, a la baja sensibilidad de los detectores CCD y a la absorción de la atmósfera terrestre en estas longitudes de onda. A pesar de todo esto, el NUV ha sido propuesto en estudios de laboratorio anteriores como candidato para proporcionar información composicional.

Así pues, el objetivo de esta tesis doctoral es explorar el potencial del NUV como herramienta de caracterización de material primitivo en el Sistema Solar. Para ello hemos usado datos espectroscópicos y espectrofotométricos desde telescopios terrestres y espaciales que proporcionan información en este rango de longitud de onda, resultando un estudio sistemático de esta región en distintos ambientes y escalas en el Sistema Solar.

Esta tesis es un compendio de cuatro artículos y un capítulo no publicado. En primer lugar hemos inspeccionado imágenes de la superficie del planeta enano Ceres tomadas por la sonda Dawn de NASA. El equipo perteneciente a esta misión nos facilitó los datos sobre pendientes espectrales en toda su superficie, incluyendo la región del NUV. Esto nos permitió hacer un estudio extensivo de su superficie llegando a la conclusión de que las variaciones espectrales en el visible estaban correlacionadas con la edad de la superficie, mientras que la dispersión en los datos no nos permitió confirmar una correlación similar para el NUV. Tras este primer contacto con material primitivo, realizamos un estudio espectroscópico de dos familias colisionales de asteroides, también primitivos. Estas son: el complejo Polana-Eulalia y la familia Themis. Para ello obtuvimos espectros hasta $0,35\ \mu\text{m}$ utilizando telescopios localizados en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma, España) y revisamos datos ya publicados. En este estudio también detectamos que algunas estrellas clasificadas como análogas solares en el rango visible e infrarrojo cercano ($0,5$ - $2,5\ \mu\text{m}$) introducían una pendiente en el NUV. Tras pro-

poner un método para corregir esta pendiente y corregir los datos ya existentes concluimos, entre otras cosas, que no hay diferencias apreciables en la absorción del NUV entre los miembros de Polana y los de Eulalia. Además, están en buen acuerdo con la absorción en los asteroides primitivos visitados por sondas recientemente Ryugu y Bennu, cuyo origen más probable es el complejo Polana-Eulalia.

En junio de 2022 se hizo público el catálogo Gaia DR3 con 60 000 asteroides observados en el NUV. Esto nos ofreció una gran oportunidad para inspeccionar esta región sobre una gran cantidad de asteroides. Concienciados del mal funcionamiento de algunas análogas solares en el NUV, decidimos revisar la muestra de estrellas utilizadas en el catálogo de Gaia para generar los espectros de los asteroides, descubriendo que estaban afectando a la pendiente espectral por debajo de $0,5\ \mu\text{m}$. Tras cuantificar y corregir este efecto pudimos explorar el catálogo, encontrando resultados nuevos para la comunidad: (i) una correlación entre la absorción en el UV y la única absorción que podemos encontrar en el visible para asteroides primitivos, una banda débil a $0,7\ \mu\text{m}$, relacionada con minerales hidratados ricos en hierro; (ii) dos grupos de asteroides diferenciados por la longitud de onda donde comienza la absorción en el UV; (iii) haciendo uso del NUV en algoritmos de reducción dimensional encontramos una separación entre los asteroides primitivos con banda en $0,7\ \mu\text{m}$ y aquellos que no muestran dicha banda. Por otro lado, hemos confirmado resultados de trabajos anteriores usando una muestra mucho mayor.

Finalmente estudiamos la superficie de Japeto, un satélite regular de Saturno cuya bimodalidad en albedo ha causado controversia desde hace décadas. Es la mayor del Sistema Solar, con un hemisferio de material oscuro y otro cubierto de hielo. Usando imágenes de alta resolución espacial de la sonda Cassini, encontramos dos poblaciones de material primitivo en su superficie, diferenciadas por la absorción en el NUV. En este trabajo proponemos dos orígenes distintos para estas poblaciones. Una de ellas parece pertenecer a la litosfera de Japeto, mientras que la otra tiene un origen exógeno. Además, la población exógena muestra una correlación entre la absorción en el UV y la banda de absorción en $3\ \mu\text{m}$. Esta última contiene mucha información relacionada con la presencia de minerales hidratados y compuestos orgánicos.

Los resultados de esta tesis constituyen las primeras evidencias observacionales de la capacidad del NUV como herramienta de caracterización de los materiales primitivos, remarcando el papel crucial que toma la absorción en el UV para la identificación de dicho material en el Sistema Solar. Nuestros resultados serán especialmente relevantes para las próximas liberaciones de datos de Gaia, para la interpretación de las primeras observaciones de asteroides primitivos a $3\ \mu\text{m}$ con el JWST y para remarcar la importancia de observar el UV en futuros estudios de materiales primitivos.

Tesis disponible bajo solicitud por correo: 1b.ftinaut@gmail.com

Análisis de cúmulos de galaxias modelados teóricamente

Autora: Ana Contreras Santos
(ana.contreras@uam.es)

Tesis doctoral dirigida por: Alexander Knebe
Centro: Universidad Autónoma de Madrid
Fecha de lectura: 18 de junio de 2024

Los cúmulos de galaxias son las estructuras conocidas ligadas gravitacionalmente más grandes del Universo, con masas de hasta unas 10^{15} masas solares. Dentro del modelo jerárquico de formación de estructuras, los cúmulos están en la cúspide de la jerarquía. Su crecimiento y evolución se han producido a través del colapso de regiones inicialmente más densas y la posterior acreción de material y procesos de fusión con otros sistemas. Por consiguiente, el estudio de cúmulos de galaxias proporciona conocimientos valiosos sobre los procesos de formación de estructuras a gran escala en el Universo, lo que los convierte en pruebas cosmológicas indispensables. Los cúmulos también ofrecen un entorno excelente para investigar la formación y evolución de galaxias, a partir de los distintos procesos astrofísicos que tienen lugar en su interior. Desde una perspectiva teórica, debido a la gran complejidad que subyace en su evolución, la mejor manera de modelar los cúmulos de galaxias es mediante simulaciones numéricas. Las simulaciones hidrodinámicas, en particular, siguen el comportamiento de la materia oscura, las estrellas y el gas resolviendo numéricamente las ecuaciones correspondientes. Esto permite un estudio detallado de cómo los cúmulos de galaxias y su contenido evolucionan de forma natural dentro del contexto más amplio de la red cósmica.

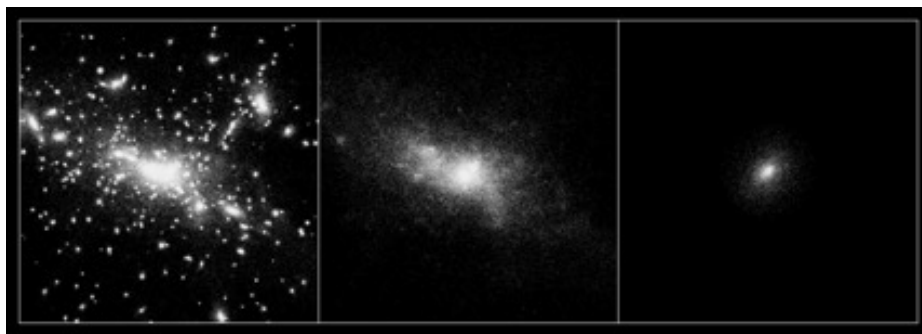
En esta tesis utilizamos un conjunto de simulaciones cosmológicas del proyecto THE THREE HUNDRED. Esta colección de datos consta de 324 resimulaciones hidrodinámicas de halos del tamaño de cúmulos y las regiones de radio 15 h-1Mpc que los rodean. Estas regiones, tomadas de una simulación previa con solo materia oscura, han sido resimuladas con diferentes códigos hidrodinámicos e implementaciones de física por debajo de la resolución de la simulación, permitiendo la identificación y el análisis de las diversas estructuras.

A lo largo de los diferentes capítulos de la tesis, utilizamos estas simulaciones para estudiar distintos aspectos de los cúmulos de galaxias. Comenzamos analizando las fusiones de cúmulos de galaxias dentro de su historia de acreción de masa, identificando las fusiones como aumentos significativos de masa que se producen en un periodo breve de tiempo.

Utilizando indicadores teóricos, medimos el estado dinámico de los cúmulos en torno al momento de las fusiones y, basándonos en esto, definimos una fase de fusión, durante la cual el estado del cúmulo se ve afectado por la fusión. A continuación, investigamos las galaxias más brillantes de los cúmulos que se fusionan. Comparando las propiedades antes y después de la fusión, mostramos cómo crecen principalmente por acreción de estrellas, con una pequeña contribución de un estallido de formación estelar inducido por la fusión, que afecta a la luminosidad y el color de las galaxias centrales.

El segundo enfoque tomado en la tesis involucra a la población de galaxias dentro de las regiones simuladas y, en particular, a las parejas de galaxias cercanas. Nuestro estudio se centra en comprobar si las parejas observadas están próximas también físicamente, así como si están ligadas gravitacionalmente. En cuanto al primer propósito, mostramos que seleccionar las parejas de galaxias en base a la masa estelar, metalicidad, color, forma y relación masa estelar-masa del halo de las galaxias implicadas puede mejorar significativamente la probabilidad de que las parejas observadas estén también próximas en distancia física. Para el segundo propósito, demostramos cómo se puede entrenar un algoritmo de aprendizaje automático para identificar parejas ligadas gravitacionalmente únicamente a partir de propiedades observables de las galaxias implicadas.

La última parte de la tesis explora la luz intracúmulo de los cúmulos de THE THREE HUNDRED, una componente difusa procedente de estrellas del cúmulo que no pertenecen a ninguna galaxia individual. Dada la mejora en los recursos procedentes tanto de observaciones de bajo brillo superficial como de simulaciones, se trata de un tema de actualidad en el campo de los cúmulos de galaxias. En nuestro trabajo mostramos que, aunque existe una dispersión notable entre los cúmulos, esta componente nunca es despreciable y contiene información sobre la historia evolutiva del cúmulo. También investigamos la relación entre la luz intracúmulo y la componente de materia oscura de los cúmulos, mediante el cálculo y la comparación de sus perfiles de densidad y de dispersión de velocidades. De esta forma, contribuimos a determinar cómo las observaciones de la componente difusa pueden desvelar información sobre la distribución de masa total subyacente en los cúmulos. A lo largo de esta tesis, hemos desarrollado nuevos métodos para identificar, en las simulaciones, los distintos componentes objeto de estudio: las fusiones de cúmulos, la galaxia más brillante del cúmulo, la luz intracúmulo y los pares de galaxias satélite. Además de obtener una comprensión más profunda de los procesos físicos que los dominan, caracterizamos sus propiedades y utilizamos sus propiedades observables para proporcionar nuevas herramientas útiles para analizar las observaciones. Nuestro trabajo ha inspirado otros estudios que se describen en el último capítulo. También ilustramos en este capítulo cómo las tres partes del trabajo están interconectadas y se afectan mutuamente, destacando así la importancia de adoptar distintos enfoques para el estudio de los cúmulos de galaxias.



Para uno de los cúmulos de las simulaciones de THE THREE HUNDRED, seleccionado como ejemplo, proyección en 2D de sus estrellas. De izquierda a derecha se muestran: todas las estrellas en el cúmulo, solo las que pertenecen a la luz intracúmulo (no ligadas a ninguna galaxia) y solo las de la galaxia central.

Machine Learning aplicado a datos de archivos astronómicos

Autor: Pablo García Martín

Tesis doctoral dirigida por: Bruno Merín

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 28 de junio de 2024

En este proyecto examinamos todo el archivo del Telescopio Espacial Hubble buscando objetos del Sistema Solar en sus imágenes. Analizamos aproximadamente 40 000 imágenes de los instrumentos ACS/WFC y WFC3/UVIS. Para llevar a cabo esta tarea, utilizamos un algoritmo de *machine learning* basado en la nube combinado con un proyecto de ciencia ciudadana online, lo que nos permitió obtener un conjunto de entrenamiento para nuestra herramienta de *machine learning*.

Encontramos un total de 1701 objetos: 670 de ellos ya identificados en la base de datos del *Minor Planet Center* y 1031 objetos nuevos y potencialmente desconocidos. Estos potencialmente nuevos objetos varían de 15 a 25 en magnitud aparente (H).

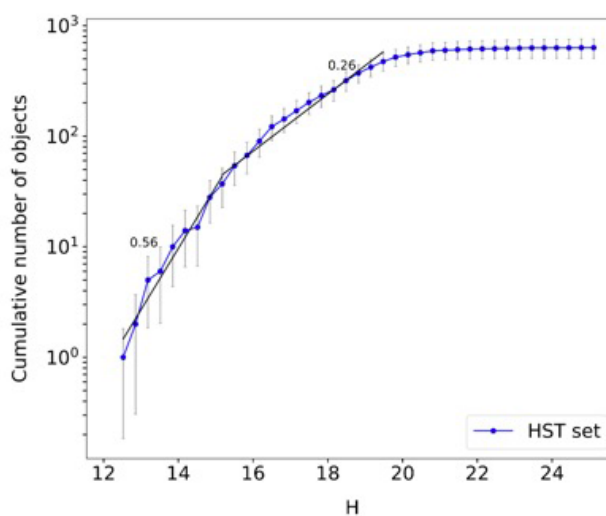
Este conjunto de datos se puede utilizar como un modelo de la población de asteroides teniendo en cuenta que cubre un largo período de tiempo (2002-2021) y que las imágenes tienen una distribución estadísticamente aleatoria en el cielo. Para obtener la distancia de un asteroide utilizando solo una imagen del archivo, usamos un método basado en la curvatura generada en las trazas de asteroides por el paralaje creado por el movimiento de Hubble al tomar la imagen. La precisión de este método se probó utilizando el conjunto de objetos conocidos. Usando la distancia podemos obtener la magnitud absoluta y presentar un modelo de distribución del tamaño de los asteroides.

La mayoría de los objetos que recuperamos son asteroides pequeños del cinturón principal (<1 km). Nuestra distribución de población acumulada (imagen) confirma el cambio de pendiente previamente publicado por otros trabajos, pasando a un valor más bajo a partir de magnitud absoluta 15 (H) y mantenido hasta magnitudes absolutas 19-20 (H), donde nuestro estudio alcanza su límite de detección. También encontramos 45 potenciales cometas y 74 candidatos a *Near Earth Object* (NEO).

Como proyecto anexo relacionado con la preservación del cielo, usamos nuestra herramienta de *machine learning* (y un algoritmo complementario adicional) para identificar trazas de satélites que contaminan las imágenes de Hubble en los archivos de los dos instrumentos considerados. Utilizamos este conjunto de datos para estudiar su crecimiento y el potencial impacto en las imágenes de Hubble de las constelaciones de satélites actuales y futuras en órbita baja terrestre. Encontramos una fracción promedio de $2,7 \pm 0,2\%$ de las imágenes individuales de HST entre 2002-2021 que contienen al menos una traza de satélite, con un crecimiento de $2,8 \pm 0,2\%$ en 2002-2005 a $4,3 \pm 0,4\%$ en 2018-2021 para ACS/WFC, y de $1,2 \pm 0,1\%$ en 2009-2012 a $2,0 \pm 0,2\%$ en 2018-2021 para WFC3/UVIS. Teniendo en cuenta las previsiones de futuros lanzamientos de constelaciones de satélites, nuestras estimaciones indican una probabilidad del 20-50% de que una imagen del Telescopio Espacial Hubble contenga una traza de satélite durante la década de 2030.

Trabajo principal de la Tesis publicado en:
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346771>

Distribución de población acumulada para el total de los asteroides recuperados del archivo de Hubble. Las líneas y cifras en negro representan las pendientes aproximadas.



Estudios de movimientos propios en el disco estelar nuclear

Autor: Álvaro Martínez Arranz

(amartinez@iaa.csic.es)

Tesis doctoral dirigida por: Rainer Schödel

Centro: Universidad de Granada

Fecha de lectura: 23 de julio de 2024

El centro de la Vía Láctea, situado a 8,25 kpc de la Tierra, es una región crucial para la astrofísica debido a su contenido único. En esta área se encuentra el agujero negro supermasivo más cercano, además de cúmulos estelares masivos y grandes concentraciones de gas y polvo. La densidad estelar en el centro galáctico es miles de veces mayor que en el disco galáctico, y aunque solo ocupa el 0,1% de la superficie total de la galaxia, emite el 10% del flujo de Lyman continuo. Sin embargo, la tasa de formación estelar es un orden de magnitud menor de lo esperado dada la alta densidad de gas presente en la región.

Dentro del centro galáctico se localiza la Zona Molecular Central (ZMC), que contiene el 5% de la reserva de gas de la galaxia en menos del 1% de su volumen. A pesar de su gran cantidad de gas, la formación estelar en esta zona es sorprendentemente baja, lo que desafía las expectativas basadas en la densidad de gas. Otra estructura clave es el Disco Estelar Nuclear (DSN), que tiene un diámetro de 150 pc y ha tenido una alta tasa de formación estelar en los últimos 30 millones de años. Sin embargo, solo se han identificado tres cúmulos estelares en esta región, representando menos del 10% de la masa estelar esperada, lo que plantea la cuestión de dónde están los cúmulos faltantes.

El estudio de los cúmulos estelares en el centro galáctico ofrece una oportunidad única para investigar la formación estelar en entornos extremos. Por ejemplo, los cúmulos Arches y Quintuplet presentan una función de masa inicial que parece favorecer la formación de estrellas masivas, una diferencia significativa respecto a los cúmulos en el disco galáctico. Determinar si esta discrepancia es común en otros cúmulos jóvenes podría proporcionar información clave sobre los mecanismos de formación estelar en la región.

La ZMC, que contiene nubes moleculares densas, algunas con masas tan grandes como $10^5 M_{\odot}$, presenta otro enigma: la formación estelar en estas nubes es escasa, desafiando las relaciones establecidas entre las propiedades del gas y la formación estelar. Además, estas nubes no están distribuidas uniformemente, mostrando una asimetría hacia las longitudes galácticas positivas. Aunque las simulaciones sugieren que estas asimetrías pueden ocurrir naturalmente, aún se desconoce el mecanismo físico responsable. Comprender la distribución de estas nubes es crucial para avanzar en el estudio de la dinámica del centro galáctico.

El objetivo de esta disertación es destacar la importancia del análisis de los movimientos propios en el centro galáctico, ya que estos datos permiten restringir distancias e identificar nuevas estructuras. En particular, se presenta un nuevo catálogo de movimientos propios en el centro de la galaxia, derivado

del estudio GALACTICNUCLEUS, que ofrece una cobertura detallada del DSN con una precisión sin precedentes. Los resultados principales se han publicado en tres artículos revisados por pares en *Astronomy & Astrophysics* y se resumen a continuación.

Uno de los principales hallazgos ha sido la restricción de la distancia a la nube molecular G0.253+0.016, también conocida como el Ladrillo. Recientes estudios situaban esta nube a unos 2 kpc más cerca de la Tierra de lo que se pensaba, lo que implicaba que estaba fuera del centro galáctico. Sin embargo, utilizando imágenes de alta resolución obtenidas con el HAWK-I en el *Very Large Telescope* (VLT), se ha demostrado que el Ladrillo se encuentra efectivamente dentro del DSN y, por tanto, en el centro galáctico. Además, este análisis ha revelado la rotación del DSN, corroborando resultados previos. Estos hallazgos muestran cómo el análisis de movimientos propios es una herramienta válida para estimar distancias y detectar estructuras en este entorno complejo.

A pesar de la alta actividad de formación estelar en el centro galáctico en los últimos treinta millones de años, solo se han identificado dos cúmulos jóvenes masivos: Arches y Quintuplet. Su masa combinada representa menos del 10% de lo que debería haber, lo que ha dado lugar al "problema de los cúmulos faltantes". Esto puede explicarse en parte por la extrema aglomeración de estrellas en la región, que dificulta la identificación de cúmulos mediante inspección visual. Además, los cúmulos más masivos se disuelven rápidamente debido a las duras condiciones del centro galáctico.

Para abordar este problema, se ha utilizado un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado (DBSCAN) para analizar catálogos de movimientos propios y fotometría en busca de grupos de estrellas con movimientos comunes que podrían indicar la presencia de cúmulos estelares. Este análisis ha identificado tres grupos de estrellas con movimientos comunes y empaquetamiento espacial denso, lo que los convierte en sólidos candidatos para ser cúmulos estelares.

En un análisis posterior, se ha confirmado espectroscópicamente que uno de estos grupos es un cúmulo joven en el centro galáctico, que ha sido nombrado Candela 1. Este hallazgo es significativo, ya que hasta ahora se habían identificado muy pocos cúmulos jóvenes en esta región.

La metodología utilizada ha demostrado ser eficaz en la búsqueda de cúmulos estelares jóvenes en el centro galáctico. En un área relativamente pequeña se han encontrado tres posibles cúmulos, y uno ha sido confirmado. Con el desarrollo de un nuevo catálogo de movimientos propios, que cubrirá un área más amplia del centro galáctico, se espera identificar más cúmulos jóvenes y continuar investigando la función de masa inicial en esta región, para comprender si difiere fundamentalmente de la del disco galáctico.

Tesis disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/366986>

Mejorando las simulaciones cosmológicas: modelos semianalíticos, estructura interna de los halos y técnicas de aprendizaje automático

Autor: Daniel López-Cano

(daniellopezcano13@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Raúl E. Angulo

Centro: Donostia International Physics Center (DIPC) y U. Autónoma de Madrid (UAM)

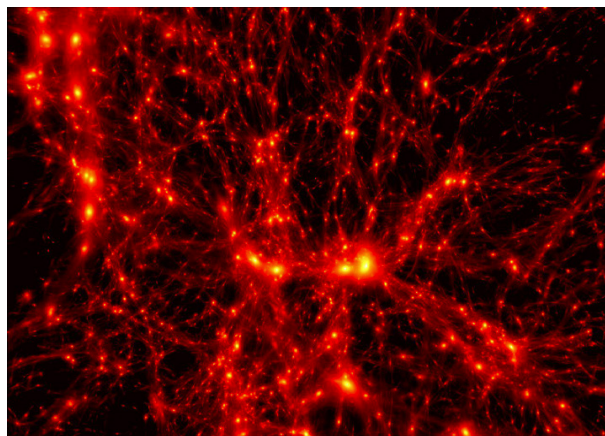
Fecha de lectura: 6 de septiembre de 2024

En el campo de la cosmología moderna, las simulaciones cosmológicas se han consolidado como herramientas esenciales para comprender la formación y evolución de estructuras en el Universo a gran escala. Estas simulaciones permiten estudiar el comportamiento de múltiples partículas bajo la influencia de la gravedad, conectando las predicciones teóricas con las observaciones realizadas por telescopios que detectan las posiciones y propiedades de millones de galaxias. Sin embargo, la creciente complejidad de las observaciones actuales realizadas por nuevas y ambiciosas campañas de observación ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar tanto la precisión como la eficiencia de estas simulaciones. Mi investigación doctoral se desarrolla en este contexto y tiene como objetivo el mejorar distintos aspectos de las técnicas actuales para acercar más las simulaciones cosmológicas al Universo que observamos.

En la primera parte de mi trabajo, empleo un modelo semianalítico para poblar simulaciones de materia oscura con galaxias con el fin de reproducir la población de galaxias que se espera observar con la misión *Euclid* (telescopio desarrollado por la ESA, en activo desde verano de 2023). El modelo semianalítico SAGE se emplea junto con otros códigos sobre las simulaciones de materia oscura UNITSIM para generar catálogos de galaxias que incluyen predicciones para la intensidad de sus líneas de emisión (en particular $H\alpha$). Estos catálogos de galaxias pueden utilizarse para predecir la población de galaxias que la misión *Euclid* será capaz de detectar. Nuestros catálogos sintéticos de galaxias permiten estudiar cómo se distribuyen las galaxias en el espacio y cómo evolucionan sus propiedades a lo largo del tiempo.

En la segunda parte de la tesis, presento un modelo que permite predecir con gran precisión la estructura interna de los halos de materia oscura, estructuras gravitacionalmente ligadas que generan los pozos de potencial dentro de los cuales se forman las galaxias. Este modelo tiene en cuenta cómo la estructura interna de los halos depende de su instante de formación, una variable que a su vez depende de propiedades como la masa final del halo estudiado, el tiempo cósmico en el que se observa, y la cosmología asumida. Esta contribución es fundamental para entender la distribución de materia a pequeñas escalas y mejorar la correspondencia entre halos y galaxias en las simulaciones.

La tercera parte de la tesis explora el uso de técnicas de aprendizaje automático para predecir qué regiones de las condiciones iniciales de una simulación terminarán formando halos de materia oscura. Este enfoque emplea redes neuronales para modelar



Proyección de la densidad de materia oscura mostrando las estructuras que se han formado en una simulación cosmológica debido al efecto de la gravedad.

procesos complejos de formación de halos, permitiendo realizar predicciones rápidas y analizar cuáles son los aspectos de las condiciones iniciales que desempeñan un papel clave en la formación de estas estructuras. Las técnicas de aprendizaje automático, tal como se presentan en esta tesis, ofrecen una perspectiva innovadora que complementa los métodos tradicionales para estudiar la formación de estructuras en el Universo.

En conjunto, los trabajos presentados en esta tesis amplían nuestra comprensión sobre la formación de estructuras en el Universo y cómo modelarlas con mayor precisión dentro del marco de las simulaciones cosmológicas. Además, muestran cómo el uso de técnicas innovadoras, como el aprendizaje automático, puede integrarse eficazmente con los métodos tradicionales para ofrecer nuevas perspectivas en el estudio de la formación y evolución de halos de materia oscura. Estos avances son de suma importancia en el contexto actual, dado que las simulaciones cosmológicas son la principal herramienta para interpretar los datos obtenidos por las nuevas campañas observacionales que mapean la estructura a gran escala del Universo.

En el futuro, la sinergia entre el aprendizaje automático, la formación y evolución de galaxias, y la teoría de formación de estructuras, permitirá desarrollar nuevas metodologías que integren estas áreas, proporcionando una visión más completa y detallada de la evolución del Universo. Estas técnicas combinadas no solo mejorarán la precisión de las simulaciones actuales, sino que también facilitarán la identificación de patrones y relaciones complejas en los datos observacionales, abriendo nuevas vías para la exploración y la investigación la estructura a gran escala de nuestro Universo.

Cuásares magnificados gravitatoriamente: desde estrellas a cúmulos de galaxias

Autora: Raquel Forés Toribio

Tesis doctoral dirigida por: José Antonio

Muñoz Lozano

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 10 de septiembre de 2024

El fenómeno lente gravitatoria ocurre cuando un objeto masivo se encuentra entre el observador y una fuente emisora. Tal como describe la Relatividad General, el objeto masivo deforma el espacio-tiempo y curva los rayos de luz procedentes de la fuente. Esta deflexión de la luz puede producir un incremento del brillo y múltiples imágenes de la fuente. Por este motivo, el efecto lente gravitatoria se ha convertido en una gran herramienta para estudiar fuentes distantes, pero también para caracterizar el objeto deflector (o lente), puesto que la deflexión de la luz depende de su distribución de masa. Esta tesis se centra en el escenario donde un cuásar distante es magnificado por una galaxia o un cúmulo de galaxias. Los cuásares se observan como fuentes puntuales, luminosas y variables, y son el resultado de la acreción de material alrededor de un agujero negro supermasivo en el centro de su galaxia anfitriona. Las condiciones físicas y las estructuras formadas a partir de este proceso son todavía objeto de intensa investigación, donde el efecto lente gravitatoria es de gran utilidad.

En esta tesis, presentamos un nuevo modelo de la distribución de masa del sistema lente SDSS J1004+4112 (cuya imagen se muestra en la figura). El deflector es un cúmulo de galaxias, con un desplazamiento al rojo de $z=0,68$, que curva la luz de un cuásar, con un corrimiento al rojo de $z=1,73$, y otros tres grupos de galaxias de fondo. Para restringir el modelo de masa, se utilizan los observables de las cuatro imágenes del cuásar formadas por el efecto lente como son las posiciones de las imágenes, los cocientes de magnificación y los retrasos temporales. Además, se incluyen otros parámetros medidos como la posición de las galaxias del cúmulo, su elipticidad, luminosidad, la dispersión de velocidades de la galaxia más brillante del cúmulo y las posiciones de las imágenes de las otras galaxias de fondo. De este modo se han podido restringir los parámetros del modelo. Es de especial interés la pendiente interna del perfil de masa del halo de materia oscura, la cual es compatible con la del perfil Navarro-Frenk-White. También se ha encontrado una pequeña separación entre la galaxia más brillante del cúmulo y el centro del potencial gravitatorio del halo de materia oscura, así como cierto alineamiento en la dirección de la elipticidad de las dos componentes. A partir del modelo se ha inferido una estimación para el cuarto retraso temporal que todavía carece de determinación observacional y los parámetros de magnificación en las posiciones de las imágenes del cuásar.

Debido a la compacidad del disco de acreción del cuásar, objetos de masa estelar en la lente principal curvan los rayos de luz del orden de microsegundos de arco produciendo cambios en el brillo de la fuente. Esta variabilidad es independiente en cada imagen del cuásar y se superpone a la propia variabilidad intrínseca del cuásar. Puesto que la variabilidad intrínseca es común a todas las imágenes, pero con un tiempo de llegada

al observador diferente, se puede extraer la variación debida al efecto microlente restando pares de curvas de luz de distintas imágenes desplazadas por su retraso temporal. Hemos estudiado este efecto para SDSS J1004+4112 modelando la ocurrencia de efecto microlente en las seis posibles diferencias de las curvas luz observadas durante catorce años y medio. A partir del ajuste de los modelos a las observaciones, hemos inferido el tamaño del disco de acreción del cuásar en la banda fotométrica r y las fracciones de masa estelar del medio intracúmulo en las cuatro posiciones de las imágenes del cuásar. El tamaño del disco es compatible con la mayoría de las determinaciones previas para este sistema. La fracción estelar en la imagen más brillante del cuásar es ligeramente mayor que la esperada y podría indicar la presencia de una componente estelar todavía sin detectar.

Las deflexiones debidas a las microlentes desvían, del orden de microsegundos de arco, el centroide de las imágenes múltiples de cuásares afectados por el efecto lente gravitatoria. En esta tesis proponemos y estudiamos la viabilidad de medir estos desplazamientos con una única observación seleccionando como referencia una componente grande del cuásar que no esté afectada por el efecto microlente. Para ello, se ha realizado un estudio exhaustivo de la dependencia del desplazamiento del centroide con los parámetros involucrados en el efecto microlente (el macromodelo, la fracción de microlentes y el tamaño de la fuente). Gracias a las dependencias obtenidas, estimamos las desviaciones astrométricas de 79 imágenes de cuásares múltiples conocidos. Esto permite seleccionar los candidatos más adecuados para observarlos con la siguiente generación de espectrógrafos de campo integral como HARMONI en el ELT que tendrá la precisión astrométrica suficiente como para detectar estos desplazamientos y así generar una nueva metodología para estudiar la estructura no resuelta de los cuásares y la abundancia de microlentes en los sistema lente.

Tesis disponible en: <https://roderic.uv.es/items/1daa9156-4e33-4ee2-aa93-a241a051c3a2>

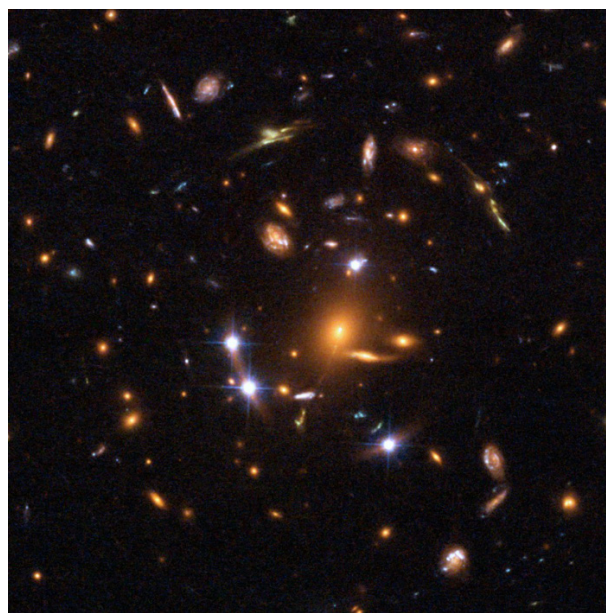


Imagen del sistema lente SDSS J1004+4112 tomada por el Telescopio Espacial Hubble (GO-9744, IP: C. Kochanek). La galaxia más brillante del cúmulo se muestra en el centro y las cuatro imágenes del cuásar se observan como puntos brillantes blancos. También se aprecian galaxias de fondo magnificadas en forma de arcos.

Estudio bidimensional del mecanismo de ionización del gas difuso en galaxias del Universo local con MUSE

Autor: Raúl González Díaz

(raulghuelma@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Fernando Fabián

Rosales Ortega y Lluís Galbany González

Centro: Inst. Nacional de Astrofísica, Óptica y

Electrónica y U. Autónoma de Barcelona

Fecha de lectura: 10 de septiembre de 2024

En este trabajo, presentamos el proyecto *Bidimensional Exploration of the warm-Temperature Ionised gas* (BETIS), enfocado en el estudio del gas ionizado difuso (DIG) en galaxias espirales cercanas utilizando el espectrógrafo de campo integral MUSE. El objetivo principal es comprender los diversos mecanismos de ionización que dan lugar al DIG. Esto implica un análisis espacialmente resuelto de especies de alta y baja ionización en espectros ópticos. Hemos introducido un nuevo método para definir espectroscópicamente el DIG, adaptable a diferentes resoluciones de galaxias.

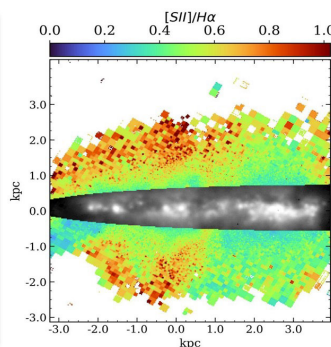
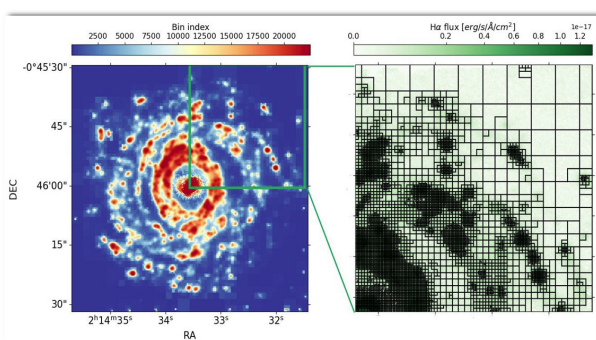
Inicialmente, hemos utilizado una técnica de *binning* adaptativo basada en la relación señal-a-ruido (S/N) de la línea [SII] para mejorar la S/N de otras líneas. Posteriormente creamos una máscara para eliminar regiones HII brillantes y débiles. También hemos evaluado la idoneidad de usar el ancho equivalente de H α (EWH α) para definir el DIG y su régimen de ionización. Hemos encontrado que para EWH α < 3 Å, esperado para estrellas evolucionadas de baja masa y alta temperatura (HOLMES), el valor depende de la técnica de síntesis de poblaciones utilizada. El análisis de la muestra revela una fracción de DIG consistente del 40%-70% en todas las galaxias. Las tendencias de los cocientes [NII]/H α , [SII]/H α , [OI]/H α y [OIII]/H β indican una correlación entre la ionización en el DIG y las regiones HII vinculada al brillo superficial de H α (SBH α).

Los diagramas de diagnóstico muestran que el DIG generalmente cae dentro de los cocientes de línea correspondientes

a la fotoionización debida a la formación estelar (FE), con un desplazamiento que sugiere ionización debido a choques rápidos. Sin embargo, el análisis individual de las galaxias indica que dicho desplazamiento es atribuido a galaxias *Seyfert* en la muestra. Esto sugiere que las galaxias con núcleo activo deben ser analizadas por separado, ya que su emisión es indistinguible del DIG de alta excitación.

En un segundo estudio dentro del proyecto BETIS, el enfoque está en el gas ionizado difuso extraplano (eDIG), una componente clave para entender los procesos de retroalimentación entre los discos y halos galácticos. Hemos aplicado la metodología de *binning* del primer estudio de BETIS a una muestra de ocho galaxias observadas con MUSE. Los cocientes [NII]/H α , [SII]/H α , [OI]/H α y [OIII]/H β muestran una estructura de ionización compleja en los halos galácticos, influenciada por la distribución espacial de las regiones HII. Hemos identificado el escape de fotones del continuo de Lyman de las asociaciones OB como la principal fuente de ionización, con la temperatura electrónica y el cociente de ionización S $^+$ /S dependiendo de la distribución de las regiones HII dentro de los discos galácticos. El análisis excluye a los HOLMES como fuentes significativas de ionización para explicar los inusuales cocientes de línea a mayores distancias del plano medio galáctico. En cambio, hemos identificado los choques de los mecanismos de retroalimentación relacionados con la FE como fuentes de ionización secundarias prometedoras para el eDIG. Presentamos un conjunto de modelos que integran mecanismos de ionización que surgen de choques rápidos y fotoionización asociada con la formación de estrellas. Los modelos que incorporan ionización por choques rápidos y fotoionización por FE sugieren que la contribución de choques rápidos a la ionización del eDIG varía del 20% al 50% en la muestra, con variaciones locales de hasta el 20% dentro de los halos individuales de las galaxias. Esto se correlaciona con la presencia de filamentos y componentes estructurales en los halos galácticos. Las altas densidades, dadas por una disminución del cociente del doblete de [SII], y los altos cocientes de [OI]/H α (ambos correlacionados con la distancia al plano medio, y característicos del gas ionizado comprimido por choques), respaldan la presencia de choques, ya que es característico del gas ionizado comprimido por choques y probablemente provenientes de la retroalimentación en regiones de intensa FE dentro del disco galáctico. Estos resultados son consistentes en todas las galaxias analizadas en esta muestra.

Tesis disponible en: https://drive.google.com/file/d/11H_cpvdUVRsKp2O6288DS4k4KPBvIloq/view?usp=drive_link



La primera figura es el mapa de segmentación obtenido de nuestro algoritmo de *binning* para NGC863, cuyos índices van de 1 al número de bins. El panel central es un zoom del mapa de segmentación donde se trazan los bordes de los bins sobre el mapa H α de la galaxia. Es notable que las regiones HII, cuya S/N es mayor, no están bineadas, manteniendo la estructura píxel a píxel, y los bins se hacen más grandes a medida que nos alejamos de las regiones HII. A la derecha se muestra el mapa del cociente [SII]/H α para la galaxia ESO157-49, con el plano galáctico enmascarado en H α . El mapa muestra la compleja estructura del eDIG en el halo de la galaxia, cuyo cociente depende notablemente de la distribución de regiones HII en el plano.

Desentrañando la complejidad de los flujos cósmicos: gradientes fuertes, ondas de choque y turbulencia

Autor: David Vallés Pérez

(david.valles-perez@uv.es)

Tesis doctoral dirigida por: Susana Planelles

Mira y Vicent Quilis Quilis

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 26 de septiembre de 2024

La formación y evolución de las estructuras cósmicas procede a través del colapso gravitacional de fluctuaciones de densidad primordiales, en un proceso no lineal que da lugar a la aparición de la telaraña cósmica y una rica jerarquía de estructuras (White & Rees, 1978). Además de la gravedad, dominada por la materia oscura, muchos otros fenómenos asociados con la física de los bariones intervienen en esta evolución, moldeando las propiedades físicas y observacionales de las galaxias, cúmulos de galaxias y los entornos que habitan (Vogelsberger, 2020). Los procesos de formación de estructuras cosmológicas son complejos, en el sentido de ser altamente no lineales, e involucran una amplia gama de escalas físicas, lo que hace que las simulaciones numéricas sean una herramienta indispensable para su comprensión (p. ej., Kravtsov & Borgani, 2012).

Los objetivos científicos de esta tesis doctoral se han orientado principalmente hacia el estudio numérico de la formación de cúmulos de galaxias, en primer lugar, y de vacíos cósmicos, en segundo lugar, como dos extremos complementarios del amplio rango de estructuras cósmicas. En los cúmulos de galaxias, la agitación del gas debido a acreción desde regiones menos densas y fusiones de cúmulos, junto con otros procesos, genera dos importantes fenómenos de física fundamental en fluidos astrofísicos que no han sido plenamente descritos hasta ahora en este contexto: ondas de choque y turbulencia. Estos fenómenos tienen un impacto decisivo en las propiedades dinámicas y termodinámicas del medio intracumular (ICM; Vazza et al. 2009) y serán objeto de observatorios punteros y futuros (p. ej., XRISM o *Athena* en rayos X, Zhang et al. 2024; o SKA, en radio, Ascaso et al. 2015). En cuanto a los vacíos cósmicos, aunque gran parte de su interés proviene de su papel como entornos prístinos para la evolución de las galaxias debido a su campo de velocidades predominantemente saliente, la situación puede ser más compleja en un contexto cosmológico.

Los principales resultados de esta tesis se pueden desgranar en cuatro líneas, estrechamente relacionadas, que se describen a continuación.

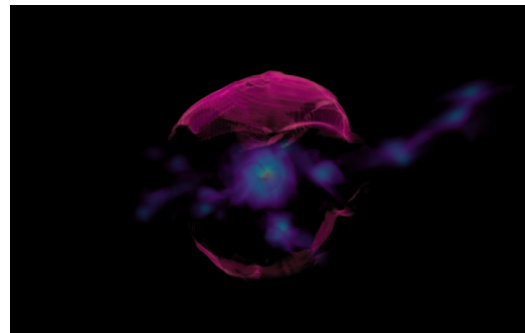
1. El desarrollo de herramientas para posibilitar el análisis de simulaciones (cosmológicas y/o hidrodinámicas) de alta resolución, que implican estructuras de datos altamente no triviales para resolver con un muy amplio rango dinámico las ecuaciones de la evolución de estructuras. Los resultados han incluido tres códigos que se han puesto a disposición de la comunidad, posibilitando el análisis cuantitativo de los campos de velocidad turbulentos y altamente compresivos que surgen durante la evolución cosmológica (vortex y vortex-p) y la identificación de halos de materia oscura, galaxias y sus subestructuras (ASOHF).
2. El estudio acerca de la formación de cúmulos de galaxias. En las regiones más externas de los cúmulos, que serán objeto

de estudio por futuros observatorios en radio (p. ej., SKA) y rayos X (p. ej., ATHENA), el gas y la materia oscura están en proceso de ser acretados y entrar en equilibrio con el potencial gravitatorio del cúmulo. En esta línea, se han estudiado la caracterización de estos procesos de acreción y fusiones de cúmulos y sus efectos sobre el ICM y el *Warm-Hot Intergalactic Medium* (WHIM), para contribuir al modelado teórico que permitirá obtener la máxima información posible de futuras observaciones. En particular, entre otros aspectos se ha hecho especial hincapié en la distribución espacial –altamente anisótropa– de flujos de acreción y en la posibilidad de determinar propiedades evolutivas de los halos de materia oscura a partir de cantidades potencialmente observables.

3. La caracterización de fenómenos hidrodinámicos, como ondas de choque y turbulencia, que son centrales para las propiedades de los bariones en los cúmulos de galaxias. Se ha investigado la generación y distribución de movimientos turbulentos o a pequeña escala del ICM, aportando pistas para interpretar las inminentes observaciones de XRISM y futuros observatorios en rayos X y radio. En cuanto al estudio de los choques de acreción, que delimitan el contenido bariónico de los cúmulos de galaxias, se ha hallado una nueva relación de escala que permitirá, una vez estas características sean observadas y caracterizadas sistemáticamente, determinar la masa total de los cúmulos en grandes aperturas, con precisiones comparables a otros métodos actuales. Estos resultados, que se han publicado en *Nature Astronomy*, podrán ser cruciales para afianzar las medidas de masa de los cúmulos (frecuentemente, discrepantes entre sí) y, por tanto, contribuirán a seguir poniendo a prueba el modelo Λ CDM.
4. El estudio de los vacíos cósmicos en el régimen no lineal, usando simulaciones especialmente diseñadas para describir estas regiones. En esta dirección, se han obtenido por primera vez resultados indicando que el campo de velocidades de estos vacíos es complejo y puede presentar, en una buena fracción de los vacíos, una considerable entrada de materia desde regiones más densas. Estos resultados, recogidos en *The Astrophysical Journal Letters*, disienten de la asunción habitual y podrían incluso explicar resultados observacionales punteros, como la aparente falta de diferencias entre galaxias en vacíos y en entornos densos (Dominguez-Gómez et al. 2022).

Los resultados inmediatos de esta tesis se recogen en un total de ocho publicaciones, que pueden encontrarse incluidas y referenciadas en el documento de la tesis doctoral.

Tesis disponible en: <https://hdl.handle.net/10550/101072>



Renderización tridimensional mostrando la densidad de materia bariónica alrededor de un cúmulo de galaxias de $3 \times 10^{14} M_{\odot}$, extraído de una simulación cosmológica. Más allá de una forma aproximadamente esférica, permeada por un par de filamentos cósmicos que alimentan al cúmulo y varias subestructuras, el choque externo de acreción de este cúmulo está representado en color magenta.