

CARTOGRAFIANDO EL UNIVERSO

La cartografía es la ciencia que se encarga de la realización e interpretación de medidas de regiones de la Tierra con el fin de elaborar mapas. Su nombre proviene del griego, *χάρτης*, *chartēs* = mapa y *γραφειν*, *graphein* = escrito, y significa escritura de mapas. La creación de mapas es seguramente tan antigua como el ser humano, ligada inherentemente a la localización de elementos básicos para la supervivencia como el agua y el alimento. Sin embargo, no es hasta la época de la antigua Grecia cuando ésta se desarrolla como ciencia, y posteriormente entre los siglos XVI y XVIII cuando la cartografía de mapas terrestres tiene su máximo esplendor, propiciada por la navegación marítima y la necesidad de agregar el descubrimiento de nuevos territorios a los mapas. Actualmente toda la superficie de la Tierra goza de una cartografía de alta precisión gracias a la tecnología aero-espacial, y los ojos de los nuevos cartógrafos se centran ahora en el cielo.



Licia Verde

liciaverde@icc.ub.edu

Hector Gil-Marín

hectorgil@icc.ub.edu

Instituto de Ciencias del Cosmos
Universitat de Barcelona

Análogamente a la cartografía terrestre, los cartografiados del cosmos tienen como objetivo realizar e interpretar medidas que nos permitan obtener una imagen de cómo es nuestro universo. El objetivo es entender las propiedades de sus constituyentes y las leyes físicas que lo rigen. Seguramente el primer "mapa cosmográfico" de precisión se le puede atribuir al satélite Cosmic Background Explorer que midió las anisotropías del fondo de radiación de microondas (CMB por su acrónimo en inglés) en 1992. Estas anisotropías representan pequeñas diferencias en temperatura y densidad en el universo, cuando éste tan solo tenía 380,000 años de edad, y son las semillas a partir de las cuales se formarán estrellas y galaxias miles de millones de años después. En este sentido, la energía de los fotones provenientes del CMB es un trazador de la distribución de materia en esa época. La medición y detección de estas anisotropías ha sido refinada posteriormente por medidas realizadas por los experimentos como el Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic (BOOMERanG) o el Atacama Cosmology Telescope (ACT), y el South Pole Telescope (SPT), así como telescopios en órbita, el Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) y más recientemente Planck, que se han beneficiado de mejoras en la tecnología de detectores para obtener una imagen del universo con cada vez más precisión. Sin embargo con Planck hemos llegado al límite en el que una mejora de la determinación de la temperatura no nos proporcionará más información acerca del universo en las escalas de interés. Por esta razón los futuros experimentos de CMB, como por ejemplo, Quijote, CMB-Stage 4, Simons Observatory (SO) o Litebird se centrarán en la detección de la polarización de esta radiación.

Cabe recordar que el CMB representa una imagen de nuestro universo cuando tan solo tenía 380,000 años de edad. Para obtener un mapa completo del universo es necesario además cartografiar las regiones desde la época del CMB hasta el día de hoy. Para realizar esta titánica tarea no nos podemos valer de la radiación de fondo cósmico, sino que hay que usar un trazador de materia distinto: las galaxias y el gas intergaláctico. A diferencia del CMB, el uso de las galaxias y gas nos permite realizar un mapa del universo en 3 dimensiones, ya que estos elementos son observables desde que el universo tenía una edad de 2,000 millones de años, hasta la actualidad, con 13,800 millones de años de edad, complementando así la información que se obtiene únicamente a partir del CMB. A esta rama de la cosmología que usa la localización de miles de galaxias y gas intergaláctico para la elaboración

y el estudio de mapas se la conoce como estructura a gran escala del universo (LSS por sus siglas en inglés), y representa una de las fuentes de información cosmológica más importantes a día de hoy.

UNA REGLA PARA MEDIR EL COSMOS

Una de las dificultades más importantes en astronomía es determinar con precisión la distancia a los objetos de estudio, en el caso de la LSS, las galaxias. Este es el principal reto en la elaboración de mapas de galaxias, donde la posición angular de éstas puede medirse con relativa facilidad, pero no así su distancia radial.

En el caso de galaxias suficientemente lejanas (fuera del llamado Grupo Local) la luz que observamos fue emitida hace mucho tiempo, y durante su viaje la expansión del universo ha provocado que su longitud de onda se estire. Por esta razón, el espectro electromagnético de las galaxias que observamos aparece desplazado hacia el rojo. Este desplazamiento se conoce con el nombre de *redshift*, y nos permite medir la velocidad de recesión de la galaxia debida a la expansión del universo. Por otro lado, la ley de Hubble nos ofrece un marco teórico para poder transformar estas velocidades de recesión en distancias, siempre que se conozca la historia de expansión cósmica. Así, una medida de precisión del espectro de las galaxias es clave para determinar su *redshift*, usarlo como indicador de su distancia radial, y elaborar el mapa. Sin embargo, el desconocimiento *a priori* de la historia de expansión cósmica, no nos permite conocer con precisión las distancias de las galaxias a partir de sus espectros, lo que nos urge a encontrar una vía alternativa para determinar las distancias.

Una de las técnicas para determinar distancias en el cosmos es identificar estructuras con un tamaño físico conocido, y a la vez suficientemente grande como para que puedan ser identificadas a escalas cósmicas. Es lo que se conoce como "regla estándar". Midiendo el tamaño aparente en el cielo de estas estructuras permite inferir su distancia a través de argumentos puramente geométricos. En cosmología este tipo de regla la proporcionan las oscilaciones acústicas de bariones (BAO por sus siglas en inglés).

Las BAO tienen su origen justo después del Big Bang, cuando el universo estaba formado por un plasma muy denso y caliente compuesto por materia ordinaria (los bariones en la jerga astronómica) y radiación. En esa época, estas dos especies estaban acopladas

mediante interacciones gravitatorias y electromagnéticas, que produjeron unos vaivenes (las oscilaciones) que a su vez se propagaron a través del plasma de manera análoga a las ondas sonoras (o acústicas). Esta propagación se mantuvo hasta que la temperatura del universo fue suficientemente baja (unos 3000K) como para que los protones y electrones empezaran a formar átomos de hidrógeno neutro (proceso conocido como recombinación), precisamente en el momento en que el universo se torna transparente a la radiación electromagnética y se emite la radiación del CMB que hoy detectamos. La recombinación propició la desaparición de este plasma, congelando así las ondas acústicas, incapaces de seguir propagándose en el vacío. La distancia que recorrieron estas ondas hasta ese instante se conoce como "horizonte de sonido" y dejó una impronta en la distribución de materia y radiación en esa época. A medida que el universo se fue expandiendo y enfriando este patrón acabó también reflejándose en la distribución de las galaxias que se iban formando. Actualmente esta regla tiene un tamaño de 480 millones de años luz, lo que implica que dos galaxias cualesquiera tienen una probabilidad ligeramente superior de estar separadas por esa distancia, que por otra ligeramente superior o inferior. Las BAO pueden visualizarse de forma idealizada como esferas (o círculos en 2 dimensiones) donde la densidad de galaxias es mayor que el promedio (ver figura 1). Sin embargo, dicho patrón no puede ser identificado por una inspección visual de los catálogos y requiere de sofisticadas técnicas estadísticas para su identificación.

El mayor mapa espectroscópico de galaxias y gas hasta la fecha es el producido por el Cartografiado Digital del Cielo Sloan (SDSS por sus siglas en inglés), situado en el Observatorio Punto Apache (APO, Nuevo México, EEUU), y en particular de sus experimentos de detección de oscilaciones acústicas de bariones (BOSS y eBOSS). Durante 20 años, el SDSS logró determinar con precisión más de 2 millones de espectros de galaxias y nubes de gas, a un ratio de unos 5,000 objetos por noche, obteniendo así su *redshift* y su velocidad de recesión. Gracias a la técnica de las BAO estas medidas han permitido caracterizar la expansión cósmica durante los últimos 11,000 millones de años, con una precisión sin precedentes (ver figura 2). Ha sido gracias a experimentos como estos que la cosmología, históricamente una ciencia más cualitativa que cuantitativa, se ha transformado en una disciplina científica de alta precisión en poco menos de 20 años.

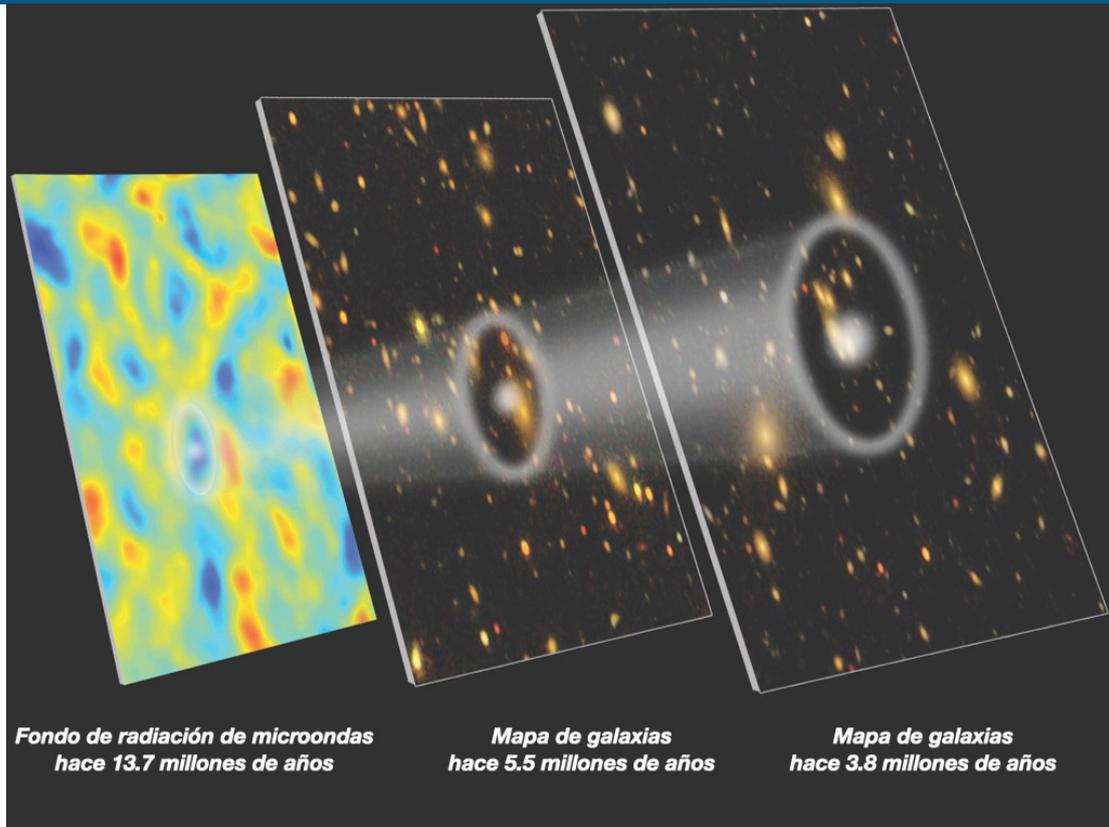
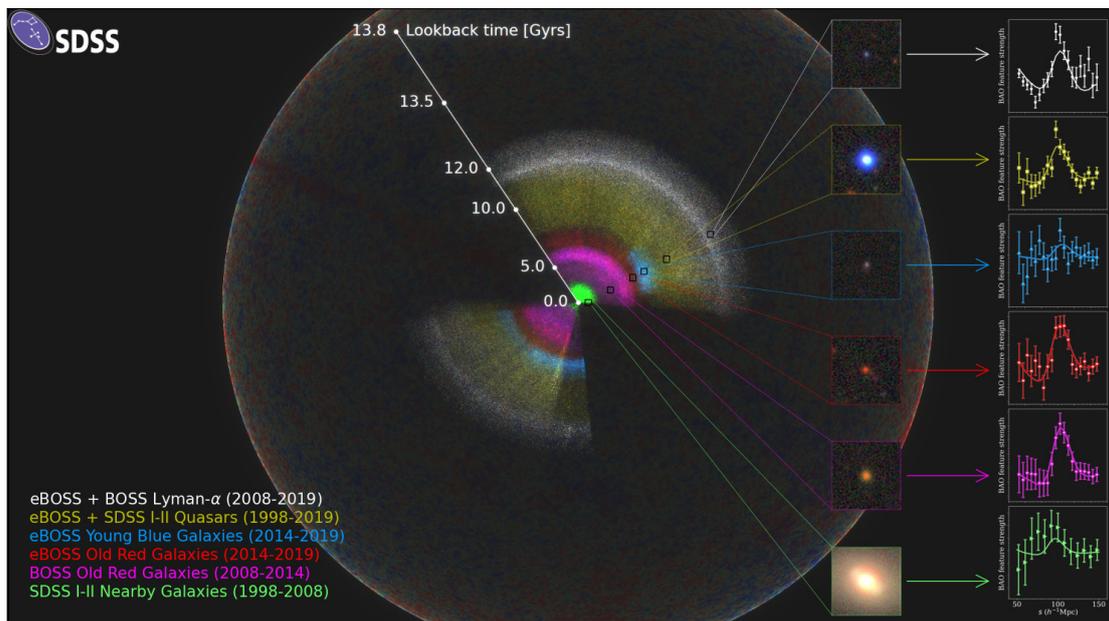


Figura 1: Visualización esquemática de las oscilaciones acústicas de bariones (círculo blanco) como regla estándar, establecida por la física del plasma primordial e impresa en las propiedades estadísticas del CMB en el Universo temprano (rebanada izquierda) y posteriormente en la distribución de galaxias (rebanadas central y derecha). Créditos: E. M. Huff, la colaboración SDSS-III, y la colaboración del South Pole Telescope. Graficos: Zosia Rostomian).

Figura 2: Mapa del Cartografiado Digital del Cielo Sloan (SDSS) donde se muestran más de dos millones de galaxias pertenecientes a los últimos 11,000 millones de años. En este esquema nuestra galaxia se encuentra en el centro de la esfera, y el CMB en la superficie. Los puntos de colores representan conjuntos de galaxias de diferentes épocas. Los paneles de la derecha muestran la señal estadística asociada a la BAO que ha servido para calibrar la distancia a estas galaxias y reconstruir la expansión cósmica. Crédito: Anand Raichoor, Escuela Politécnica Federal de Lausanne y SDSS.



El relevo de SDSS lo ha tomado el Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) instalado en el Telescopio Mayall en el observatorio Kitt Peak de Arizona, EEUU, que gracias a su nueva tecnología de fibras robóticas, permite la observación simultánea de hasta 5,000 objetos, y es capaz de medir hasta 100,000 espectros en una sola noche. Las observaciones de DESI se iniciaron a principios de 2021 y se espera que para 2026 llegue a medir 40 millones de espectros, 20 veces mayor que el mapa de SDSS.

EL MODELO COSMOLÓGICO Y LA ENERGÍA OSCURA

El modelo estándar de la cosmología, fue propuesto en los años 90 del siglo pasado y con tan solo 6 parámetros proporciona una descripción de la evolución cósmica del universo a lo largo de 13,800 millones de años, así como de procesos físicos tales como las oscilaciones acústicas en el plasma primordial. Han sido precisamente los datos aportados por las observaciones del CMB, y posteriormente los cartografiados de galaxias, los que lo han establecido como una piedra angular de nuestro conocimiento científico actual. Además, este modelo tiene profundas implicaciones sobre física de partículas y relatividad general. Por un lado, establece la existencia de la materia oscura, con propiedades tales que ponen de manifiesto la necesaria existencia de partículas exóticas más allá de las que describe el modelo estándar de física de partículas. Por otro lado, también establece la existencia de la energía oscura, un misterioso componente o propiedad del mismo espacio-tiempo sin la que no podría explicarse la expansión acelerada del universo a lo largo de los últimos 7000 millones de años detectada por las observaciones de las BAO en los mapas de SDSS. Además, las observaciones del aglutinamiento de galaxias proporcionadas por estos mismos mapas han permitido corroborar la validez de la teoría de la relatividad de Einstein a escalas inter-galácticas, del orden de decenas de millones de años luz, miles de órdenes de magnitud superiores a las del sistema solar.

A pesar de su tremendo éxito en hacer encajar las observaciones del CMB y de mapas de galaxias dentro de un mismo marco teórico, el modelo estándar de la cosmología dista mucho de ser un modelo fundamental. Nos describe de forma fenomenológica una serie de elementos tales como la materia y la energía oscura, pero no nos ofrece una comprensión a nivel teórico de éstos, ni cómo están conectados con la relatividad general o con el modelo estándar de partículas. No sabemos qué tipo de partículas podrían realizar

el rol de materia oscura, ni tampoco conocemos la naturaleza de la energía oscura, si es por ejemplo una energía asociada al vacío, o si bien está ligada a las propiedades de un campo escalar similar al Higgs; ni siquiera si esta expansión tardía del universo está o no relacionada con otra expansión acelerada mucho más rápida que se cree que pudo tener lugar unos instantes después del Big Bang. Por esta razón, este modelo cosmológico tiene necesariamente que ser un modelo efectivo con piezas puestas *ad hoc* y por construcción no puede ofrecer una respuesta perfecta a nuestras observaciones. El hecho paradójico de que éstas encajen tan bien podría deberse a que, a día de hoy, las observaciones no son lo suficientemente precisas para detectar las grietas por las que el modelo se acabará rompiendo. Si fuéramos capaces de detectar tales grietas nos daría pistas sobre el modelo fundamental subyacente que se esconde detrás del actual modelo cosmológico. Por esta razón es tan importante una mejora en la precisión de los mapas de galaxias que cartografiados como DESI prometen alcanzar durante esta década. Sin embargo, cabe destacar que tan importante es la mejora en la precisión de un experimento, como la mejora de la exactitud de los métodos y modelos usados para extraer e interpretar la información que la nueva generación de cartografiados nos brindará durante los próximos años.

Los autores, hemos tenido el gran privilegio de estar implicados en la creación e interpretación de los mapas de SDSS. Actualmente como miembros de la colaboración DESI, estamos involucrados en el desarrollo de herramientas y metodologías para lograr una interpretación óptima de los resultados venideros de DESI, pero también aplicables a otras campañas de observación como la del satélite de la agencia espacial europea Euclid. Estas herramientas permiten una interpretación de datos de forma agnóstica, fuera del marco que proporciona el modelo estándar de la cosmología. Por otro lado, la identificación de señales características en los mapas de galaxias, más allá de las comúnmente utilizadas como las BAO, que permitan realizar pruebas de consistencia y tests de estrés del modelo cosmológico. Animados por los éxitos iniciales en esta dirección, los dos autores estamos convencidos que es posible, y que esto nos permitirá entender el Universo más allá de la interpretación dentro de un modelo efectivo, y quizá descubrir grietas que sienten las bases para un modelo que nos ofrezca explicaciones más profundas acerca de los componentes y las leyes del universo.