

El más grande mapa del universo en 3D

Dante Virgilio **Gomez Navarro**

Por siglos, los marineros han usado a las estrellas para ubicarse durante un viaje oceánico. Basados en sus observaciones y con el uso de diferentes aparatos, los marineros pudieron construir mapas que les permitían saber dónde estaban, de dónde venían y a dónde iban. Los mapas galácticos continúan con esta tradición a gran escala, permitiendo la ubicación de la Tierra dentro del universo. Además, funcionan como una máquina de tiempo, ya que permiten trasladarnos hasta la época en que el universo era tan solo un niño. Actualmente, el universo se está expandiendo, separando la distancia entre las galaxias. Esta separación ocurre cada vez más rápido. Sabemos que esto pasa, pero no sabemos por qué. Los científicos usan el término energía oscura para explicar la expansión acelerada.

La energía oscura es un gran misterio, constituye el 68 por ciento del cosmos, y para resolver este enigma, los científicos observan el cielo y capturan la luz de las galaxias. La cartografía cósmica nos revela más información sobre la cantidad oscura y nos cuenta la historia y futuro del universo.

DESI, el proyecto Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura, se encuentra en la cima de una montaña en Tucson, Arizona. Medirá la luz de más de 30 millones de galaxias y 4 millones de cuásares durante cinco años a través de sus 5,000 ojos (pequeños robots giratorios). Las galaxias están compuestas de estrellas, polvo cósmico y planetas, mientras que los cuásares se refieren a galaxias

recién nacidas o bien a la radiación emitida por el agujero negro supermasivo localizado en el centro de tales galaxias.

La luz de las galaxias, técnicamente conocida como espectro electromagnético, nos proporciona información sobre qué tan distantes se encuentran los objetos astrofísicos. Los colores del arcoíris representan solo una franja estrecha del espectro electromagnético. Actualmente, los ojos de DESI colectan miles de espectros de colores en tan solo una noche. Esto convierte a DESI en la encuesta de galaxias que construirá el mapa del universo más grande y preciso de la historia.

LOS OJOS DE DESI

Los ojos de DESI pueden vislumbrar 5,000 galaxias cada 20 minutos, el equivalente a observar 100,000 huellas digitales de galaxias durante una noche. La rapidez de estos robots giratorios hace posible esta misión, algo nunca visto con los telescopios previos. Sin embargo, el cielo puede arruinar las observaciones. Las noches de observación rondan entre 8 a 10 horas, dependiendo de las estaciones del año. Cada noche son observadas miles de galaxias y cuásares. Por ejemplo, el día que inició la encuesta principal se recolectaron 60,000 espectros. Aquella noche, cerca de 100 científicos se unieron a la operación para ser testigos del inicio de DESI.

Antes de iniciar la observación principal, la colaboración DESI tuvo que hacer pruebas de observación, un proceso que es llamado “validación de la encuesta”. Esta inició a finales de 2020 y permitió verificar los planes del proyecto con objetivos más tenues y que se extienden sobre regiones más amplias que las que se han observado anteriormente.

DESI tomará diez veces más espectros de luz que los instrumentos anteriores. Por ejemplo, la última encuesta espectroscópica de galaxias, eBOSS, por sus siglas en inglés, comprende un poco más de 2 millones de galaxias y cuásares. La creación de mapas del universo es uno de los intereses científicos que más drásticamente ha cambiado en las últimas

décadas. Para darse una idea, hace 50 años se capturaba la luz de dos mil galaxias; hoy, los mapas que existen tienen millones de galaxias.

MÁQUINA DEL TIEMPO

El mapa del universo contiene millones de galaxias que pueden ser representadas como puntos en el mapa. Cada punto tiene millones y hasta trillones de estrellas. Las galaxias se pueden unir en grupos grandes llamados supercúmulos de galaxias, que son los puntos más grandes. Las galaxias también pueden acomodarse en forma de grandes hilos, los conocidos filamentos cósmicos. La unión de los filamentos con los supercúmulos forma grandes regiones vacías. Estos últimos son conocidos como vacíos cósmicos. Este mapa es conocido como la red cósmica, ya que se asemeja a las telarañas que vemos en los jardines de nuestra casa (Figura 1).

Aunque DESI tiene 5,000 ojos para detectar los espectros simultáneamente, la red cósmica es muy grande para ser observada durante los cinco años de investigación. Así que los científicos llevan a cabo una selección de objetos. El instrumento observará galaxias brillantes que se encuentran relativamente cerca. El telescopio también examinará las galaxias denominadas galaxias luminosas rojas (LRG, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por ser masivas y luminosas, lo cual permite verlas hasta 4 mil millones de años luz. Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año. Andrómeda, la galaxia espiral más cercana a la Vía Láctea, se encuentra a 2.5 millones de años luz. Es decir, las LRG pueden ser encontradas a distancias 1,600 veces la distancia a Andrómeda.

Además, la colaboración observará galaxias distantes y tenues conocidas como galaxias con línea de emisión (ELG, por sus siglas en inglés), localizadas hasta 8 mil millones de años luz y caracterizadas por tener estrellas jóvenes.

Finalmente, el instrumento observará los cuásares que se encuentran a una distancia mayor y que se caracterizan por tener agujeros negros activos en el centro de la galaxia. Estos objetos tan brillantes son observados hasta los 11 mil millones de años luz.

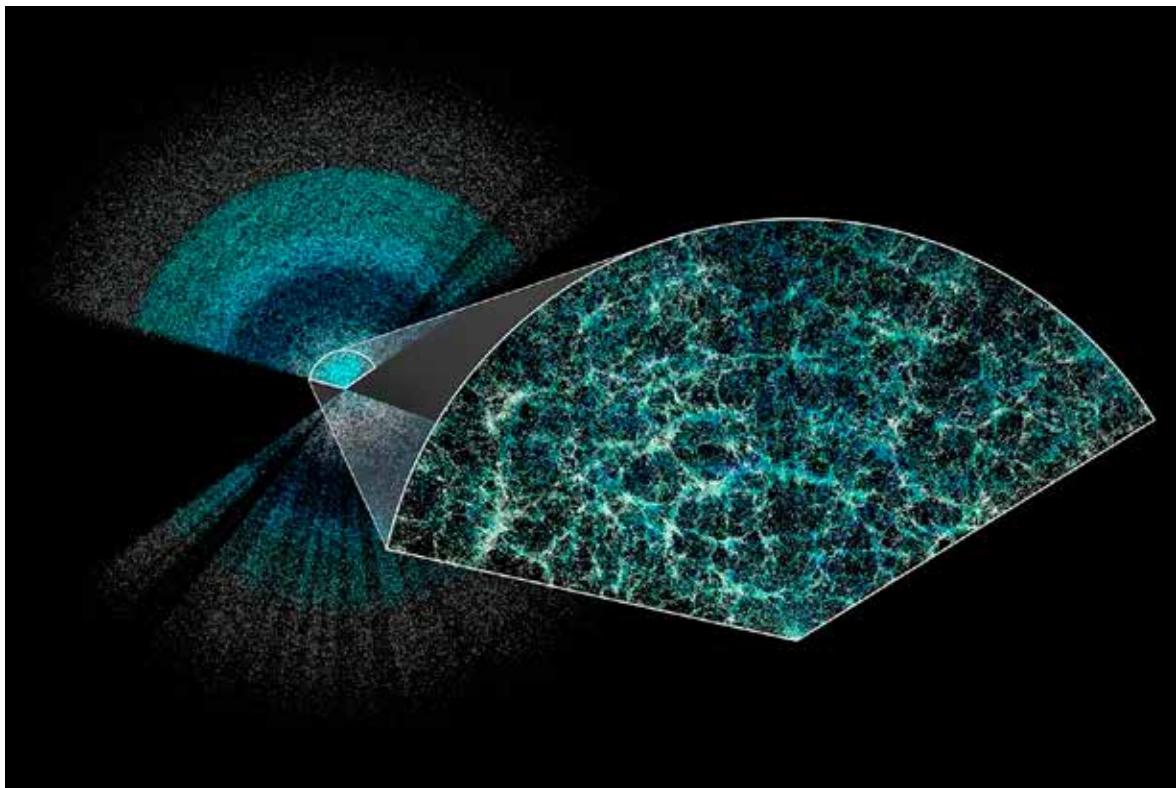


Figura 1. Mapa del universo. La Tierra está en el centro de la estructura con forma de reloj de arena. Del lado derecho, hay una ampliación de la red cósmica. Créditos: Claire Lamman / colaboración DESI.

La observación de distintos objetos cósmicos permite colocarnos en una línea de tiempo que llega tan lejos como 11 mil millones de años luz. Si pensamos al cosmos como una persona de 80 años, con DESI podremos ver cómo era cuando era un joven de 15 años o incluso menor. Por eso decimos que observar galaxias cercanas y distantes es viajar en el tiempo. No es casualidad que el reloj de arena tenga la forma del mapa del universo (Figura 1).

Con la información recolectada por DESI es posible tomar diferentes fotos del universo en diferentes tiempos: de hoy, de ayer, de hace mil millones de años, etcétera. Con esto podemos investigar el contenido de la energía en esas épocas y conocer cómo evoluciona la energía oscura.

¿CÓMO SABEMOS DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS GALAXIAS?

La luz de una galaxia contiene una gran cantidad de información. La medición del espectro de colores de una galaxia proporciona información, tanto de la expansión del universo como del movimiento de las

galaxias, debido a la interacción gravitacional mutua. Las galaxias no se encuentran en el espacio “sin hacer nada”, sino que sienten la influencia de galaxias cercanas. Si una galaxia cercana tiene mucha masa comparada con la galaxia de prueba, entonces la galaxia más grande atraerá a la galaxia menos pesada. A ese movimiento se hace referencia como velocidad peculiar de la galaxia.

Al igual que escuchamos la sirena de la ambulancia con mayor intensidad cuando se acerca, o más débil cuando se aleja, la expansión del universo y las velocidades peculiares de las galaxias provocan que los espectros electromagnéticos de las galaxias se vean más rojas o más azules.

Este fenómeno es conocido como corrimiento al rojo o al azul. Por ejemplo, la galaxia Andrómeda tiene un corrimiento al azul, ya que se está acercando a nosotros. Las galaxias más distantes se ven rojas debido a que se alejan. El corrimiento al azul es raro y se da solo en ciertas galaxias cercanas, mientras que

la mayoría de las galaxias muestran un corrimiento al rojo debido a la expansión del universo.

El instrumento con el que podemos extraer la información de las galaxias se conoce como espectroscopio. El espectroscopio descompone la luz blanca en colores, revelando la “huella digital” del objeto observado. DESI cuenta con espectroscopios de alta tecnología capaces de obtener distancias galácticas muy precisas y que, por tanto, disminuyen tres veces la incertidumbre en comparación con encuestas previas de galaxias, como eBOSS. Se podría decir que el rango de colores de los objetos astrofísicos nos da la tercera dimensión y posibilita la construcción del mapa 3D más grande hasta la fecha.

EL TELESCOPIO DE DESI

La luz de las galaxias golpea al espejo primario y después rebota en una serie de lentes antes de llegar a los 5,000 robots de DESI que se mueven automáticamente. Estos robots son los ojos de DESI. La luz recolectada por ellos se envía a través de fibras ópticas al espectroscopio.

Las fibras ópticas son delgados cables, del grosor de un cabello humano, en los que pasa la luz de tal forma que se pierda la menor cantidad de información y se consiga una mayor velocidad de transferencia de la que tienen los cables eléctricos del hogar.

Por otra parte, el espectroscopio separa la luz en un rango de colores, proporcionando información de la distancia y la velocidad con la que se alejan o se acercan de nuestra galaxia.

Debajo del domo se encuentra una estructura masiva que sostiene un espejo muy pesado de 15 toneladas. Además, hay cámaras CCD en el disco

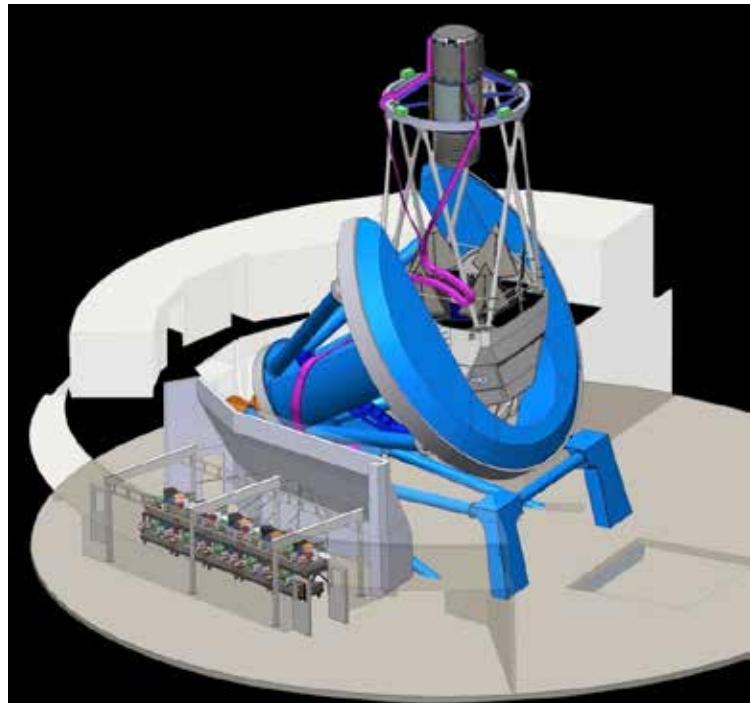


Figura 2. El telescopio Mayall y el instrumento DESI. Obtenida de Miller, TN et al. (2018).

con sus 5,000 ojos de casi un metro de diámetro (consta de 10 rebanadas de pastel, cada una con 500 ojos), y una habitación separada llena de 10 espectroscopios (Figura 2).

DESI cuenta con 10 espectroscopios con los que observará millones de espectros de luz. ¡Todo un desafío tecnológico! Este logro se atribuye al movimiento automatizado de las fibras ópticas, a los espectroscopios y al sistema criogénico que protege a las cámaras CCD.

Para lograr la operación automatizada de las fibras se realizaron distintas pruebas con el objetivo de mantener una alineación adecuada con las galaxias y la estabilidad del sistema.

El sistema criogénico sirve para enfriar a los sensores CCD a una temperatura cercana de 0 °C, ya que los tiempos de observación son largos. Otro reto tecnológico es analizar, calibrar y procesar millones de datos con el fin de obtener cantidades relacionadas con la energía oscura. Para llevar a cabo esta tarea, se requiere de una supercomputadora localizada en el Centro de Cómputo del Departamento de Energía de Estados Unidos (NERSC, por sus siglas en inglés).

¿CÓMO SELECCIONAR LAS GALAXIAS DE DESI?

El mapa más grande del universo no inicia con la medición del espectro de las galaxias; antes de ello se preseleccionan los objetos astrofísicos. En el vasto espacio hay una inmensa cantidad de galaxias, así que para seleccionar los objetivos se tiene que tomar fotos de las galaxias con diferentes filtros. El proceso de tomar fotos de galaxias se conoce como encuesta fotométrica. El catálogo de galaxias es determinado usando diferentes bandas ópticas: en la región de azul-verde, en el rojo, y cuatro bandas en el infrarrojo. Es decir, los telescopios que se usaron para construir el catálogo son capaces de captar la radiación de calor de objetos astrofísicos distantes como luz visible que vemos con nuestros ojos. Las bandas ópticas y del infrarrojo son similares a los filtros que se usan en los celulares para tomar *selfies*. DESI tan solo seleccionará 35 millones de galaxias y 2.4 millones de cuásares entre los miles de millones que hay en el mapa 2D. Para lograr el catálogo de galaxias más grande jamás construido, DESI se apoya de otros dos telescopios: el telescopio Bok, localizado en Arizona, Estados Unidos, y el telescopio Blanco, localizado en Chile. Además, los datos son complementados por el satélite WISE (telescopio satelital), un proyecto de la NASA, el cual observa empleando otros filtros.

La construcción de este mapa bidimensional fue un esfuerzo de más de seis años que cubrió la mitad del cielo. Para darnos una idea sobre el tamaño del mapa de galaxias, es como tomar más de 800 mil fotos de alta resolución con celulares. El equivalente a colocar un mosaico de teléfonos inteligentes en 11 canchas del estadio Azteca.

REVELANDO EL LADO OSCURO Y OTRAS COSAS MÁS CON DESI

Los datos recolectados por el telescopio permitirán medir, por ejemplo, cuánto se está expandiendo el universo actualmente, o explorar la cantidad de energía oscura que hay en el cosmos, que es la responsable de que hoy en día la distancia entre pares de galaxias se esté expandiendo cada vez más rápido, algo contrario a nuestra intuición, ya que la atracción

entre galaxias debería disminuir la tasa de expansión, pero ocurre justo lo contrario: el universo se está expandiendo más rápido debido a la energía oscura.

Se conoce que hace 6,000 millones de años el universo empezó a expandirse aceleradamente y que continúa cada vez más rápido desde entonces. Investigar si esto continuará por siempre es uno de los objetivos de DESI. Con base en otros experimentos astronómicos, hay pistas de que la densidad de energía oscura quizás puede variar en el tiempo, y DESI tiene el reto científico de acotar las propiedades de esta con una mayor precisión y un orden de magnitud más de galaxias observadas. DESI medirá la expansión del universo en siete épocas distintas, cada una con una precisión del 1 al 3 % (DESI Collaboration a, 2024; DESI Collaboration b, 2024).

Para lograr este reto científico, los investigadores proponen y contrastan modelos, discuten los resultados en seminarios y reuniones de la colaboración y llevan a cabo pruebas científicas, un proceso que es conocido como “validación de blindaje”, que consiste en probar códigos y programas tanto con datos no reales y datos de DESI para evitar el sesgo o asegurar que los resultados no sean influenciados por lo que se espera. El proyecto DESI es un paso para comprender qué causa la aceleración cósmica. Este entendimiento revolucionará el modelo estándar de la física de partículas, ya sea por la postulación de una nueva forma de energía más allá del modelo estándar de partículas o por una nueva teoría de la gravedad diferente a la relatividad general.

Otro objetivo es averiguar si las galaxias más pequeñas tienen un agujero negro, como ocurre con las galaxias grandes. Una forma de detectar los agujeros negros es a través del polvo, gas y otros materiales, sin embargo, en galaxias pequeñas es difícil detectar estos objetos astronómicos, algo que con los espectros de DESI será posible. Finalmente, DESI observará las estrellas en nuestra galaxia y ayudará a revelar información sobre la materia oscura, otro componente del cosmos que no sabemos qué es, pero que está ahí presente (Dark Energy Spectroscopic Survey [DESI], 2018).

LA COOPERACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

La historia de DESI se basa en la cooperación y colaboración internacional. Cuenta con más de 500 miembros de más de 15 países, incluyendo países latinoamericanos como Colombia, Brasil y México. Mientras que Chile, Argentina, y nuevamente Brasil, que forman parte del Observatorio Internacional Gemini, participaron en un trabajo previo a DESI que consistió en crear el mapa bidimensional más grande jamás construido, en el que DESI solo seleccionó decenas de millones de galaxias, entre los miles de millones de ellas, para luego observar sus espectros. Los más de 500 miembros lo conforman estudiantes de posgrado, posdoctorantes e investigadores.

La colaboración de México consiste en alrededor de 40 científicos, científicas y estudiantes de posgrado de distintas instituciones del país. También hay científicos mexicanos procedentes de instituciones internacionales. El grupo mexicano está a cargo del análisis estadístico de las galaxias, así como del estudio de modelos de gravedad y de energía oscura, entre otras áreas de investigación (Canal CONAHCyT México, 2024).

LOS LÍMITES DE DESI

Si bien el mapa de DESI contendrá 10 veces más galaxias observadas que la encuesta anterior, aún falta mejorar la precisión de la densidad de energía oscura en la época donde el modelo estándar de la cosmología predice que la densidad de energía oscura oscila entre el 5 % y el 10 % de la densidad de energía del universo. El sondeo realizado por DESI terminará el próximo año y servirá para futuras encuestas, como las del observatorio Vera C. Rubin LSST o el telescopio espacial Nancy Grace Roman (su lanzamiento está planeado en 2027), y preparará el camino para una segunda parte del proyecto, DESI-II, que comprende el periodo de 2025 a 2031.

El objetivo científico de DESI-II es adentrarse en la época del universo cuando dominaba la materia, cuando la expansión estaba desacelerada.

Finalmente, DESI-II es un paso anterior a las encuestas espectroscópicas de generación 5, que iniciarán en 2030 y tienen una mejora entre 3 y 4 veces en acotar las propiedades de la energía oscura (Asai, Shoji, *et al.*, 2024).

Los mapas de galaxias futuros prometen incluir en su estudio otras áreas de la astrofísica, como la inflación cósmica, los neutrinos con masa y la materia oscura con una mayor precisión. La siguiente década se pondrá en marcha estas nuevas encuestas que profundizarán en esa época del universo, al mismo tiempo que permitirán mejoras de un orden de magnitud en la comprensión de la física inflacionaria y de las partículas ligeras creadas en el universo temprano.

La aventura de construir el mapa más grande del universo permite extraer conclusiones acerca de la rapidez de expansión hoy en día, así como sobre la cantidad de energía que hay en el espacio. Dicho de otro modo, para ver el efecto de la energía oscura tenemos que ver el pasado, y para eso se observan las galaxias cercanas y distantes. Y aunque no hay una máquina del tiempo, el viaje existe. Y solo es el comienzo.

R E F E R E N C I A S

- DESI collaboration a (2024). DESI 2024 III: Baryon Acoustic Oscillations from Galaxies and Quasars. arXiv preprint arXiv 2404.03000.
- DESI collaboration b (2024). DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurement of Baryon Acoustic Oscillations. arXiv preprint arXiv 2404.03002.
- Asai S *et al.* (2024). Exploring the Quantum Universe: Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics. *Report of the 2023 Particle Physics Project Prioritization Panel (P5)*. arXiv preprint arXiv:2407.19176.
- Miller TN *et al.* (2018). Fabrication of the DESI corrector lenses. In *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, Vol. 10706, pp. 256-264). SPIE.
- Canal CONAHCyT México (2024). Observaciones DESI 2024: energía oscura y el futuro del universo. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=jlkMF4Q1Xsk>.
- Dark Energy Spectroscopic Survey (2018). El sondeo DESI. Recuperado de: <https://www.desi.lbl.gov/es/the-desi-survey-spanish/>.

Dante Virgilio Gomez Navarro
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería
Campus Palenque
Instituto Politécnico Nacional
dgomezn@ipn.mx