

Este artículo se publicó en el Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2021.

MIDIENDO EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

Miguel Querejeta

Observatorio Astronómico Nacional

Cuando miramos el firmamento en una noche despejada, tenemos la sensación de que las estrellas son puntos luminosos situados sobre una esfera. Podemos describir la posición de cada punto mediante dos ángulos, al igual que la latitud y la longitud nos permiten describir nuestra posición sobre la Tierra. Sin embargo, algunos de esos puntos de la “esfera celeste” están miles o millones de veces más alejados de nosotros que otros. Uno podría pensar que las estrellas más brillantes son las más cercanas, pero no siempre es así: por ejemplo, Betelgeuse está a 640 años-luz de nosotros y, sin embargo, es mucho más brillante que ϵ Eridani, que está a tan solo 10 años-luz de nosotros. Esto desencadena una de las preguntas más fundamentales en astrofísica: ¿cómo podemos medir la distancia a las estrellas?

Desvelar la distancia que nos separa de los astros es notablemente difícil, pero es un paso fundamental para conocer sus propiedades físicas, como la luminosidad, la masa o el tamaño, y juega un papel clave para entender la evolución del universo. Cuando observamos objetos lejanos, inevitablemente estamos mirando al pasado como consecuencia de la velocidad finita con la que se propaga la luz. Las galaxias más lejanas emitieron los fotones que hoy recogen nuestros telescopios hace más de diez mil millones de años, cuando el universo aún estaba en su más tierna juventud.

En este artículo nos proponemos hacer un pequeño recorrido por la aventura histórica de desarrollar estrategias para medir distancias en el universo. A lo largo de este viaje, descubriremos que el cosmos está compuesto por un sinfín de estructuras jerárquicas, con unos asombrosos rangos de tamaños. Este viaje comienza en Alejandría, hace más de dos mil años.

250 000 estadios para rodear la Tierra

Estamos en el siglo III a.C. y Eratóstenes de Cirene, uno de los grandes sabios de la Antigüedad, era el tercer director de la Biblioteca de Alejandría. Fundada por Alejandro Magno, Alejandría era parte del mundo helenístico y uno de los mayores centros de saber del momento. Por aquel entonces, los sabios como Eratóstenes ya tenían claro que la Tierra no es plana, sino esférica. Para ello, no tenían más que observar la sombra circular de la Tierra proyectada sobre la Luna durante un eclipse. O bien un experimento más cercano: al mirar atentamente las embarcaciones que se alejaban por el Mediterráneo, los griegos habían observado que las velas eran lo último que desaparecía, poniendo de manifiesto la curvatura de la Tierra.

Al parecer, Eratóstenes había oído que, durante el solsticio de verano, los rayos de sol alcanzaban el fondo de un pozo en Siena (actual Asuán), al sur de Egipto, lo cual quería decir que esos rayos incidían de forma perpendicular a la superficie de la Tierra. Sin embargo, Eratóstenes había observado que, ese mismo día, un obelisco en Alejandría creaba una pequeña sombra, por lo que a esa latitud los rayos no incidían perpendicularmente, sino con un cierto ángulo, tal y como se esperaba por la curvatura de la Tierra esférica. La genial idea de Eratóstenes consistió en medir ese ángulo y darse cuenta de que era exactamente el mismo ángulo que separaba Alejandría de Siena visto desde el centro de la Tierra (ver figura 1). Midiendo la sombra y el tamaño del obelisco, determinó que ese ángulo era $1/50$ de círculo, lo cual implicaba que el perímetro de la Tierra debía de contener 50 veces la distancia que separaba a ambas ciudades.

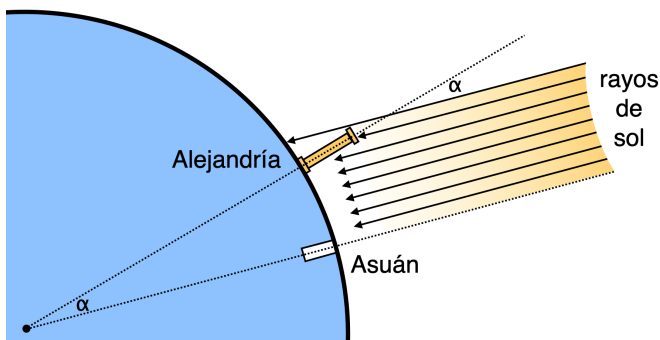


Figura 1: Diagrama que ilustra el método de Eratóstenes para medir la circunferencia de la Tierra.

Por suerte, la distancia entre Alejandría y Siena era conocida, ya que había sido medida cuidadosamente con fines administrativos (¡contando pasos!): la separación era de 5 000 estadios. Así, pues, era inmediato derivar a partir de ese experimento el tamaño de la Tierra. Este método asume que Siena está en el trópico de Cáncer, de manera que el Sol incide perpendicularmente en el solsticio de verano, lo cual es aproximadamente cierto; también asume que ambas ciudades están sobre el mismo meridiano, lo cual no es totalmente exacto, pero es una aproximación suficiente como para obtener una estimación más que razonable del tamaño de la Tierra. El resultado de Eratóstenes de 250 000 estadios para la circunferencia terrestre corresponde a unos 39 000 km, mientras que el valor real es unos 40 000 km. Es una precisión impresionante para tratarse de un cálculo realizado hace más de dos mil años contando pasos y midiendo sombras.

La distancia al Sol

Una vez conocido el tamaño de la Tierra, es natural preguntarse cómo de lejos están el Sol o la Luna y, por lo tanto, cuáles son sus tamaños. Los antiguos griegos ya habían deducido, de forma correcta, que el Sol estaba mucho más lejos de nosotros que la Luna, por lo que debía de ser también mucho más grande. Aristarco de Samos fue un adelantado a su tiempo por proponer casi dos milenios antes que Copérnico que la Tierra gira alrededor del Sol, entre otras cosas. Intentó medir el ángulo que forman el Sol y la Luna en el momento de cuarto creciente (o menguante), puesto que en ese precioso momento, argumentaba Aristarco, la Tierra y el Sol vistos desde la Luna forman ángulo recto (ver figura 2). El ángulo Sol-Luna visto desde la Tierra será mayor cuanto mayor sea la distancia de la Tierra al Sol respecto a la distancia a la Luna. Así, Aristarco dedujo que el Sol debía de estar 19 veces más lejos de nosotros que la Luna. Esto implicaría de forma automática que el Sol es 19 veces mayor que la Luna, ya que ambos tienen un tamaño angular similar (pensemos en los eclipses totales de Sol, donde la Luna cubre por completo el disco solar).

Una vez conocida la proporción de distancias y tamaños entre la Luna y el Sol, ¿cómo determinar cuál es la relación con el tamaño de la Tierra, para obtener así las distancias absolutas? Aristarco utilizó otro procedimiento geométrico, basado en el tamaño de la sombra de la Tierra durante un eclipse de Luna. Los eclipses lunares ocurren porque la Luna cruza la sombra que la Tierra proyecta en el espacio, y así lo reconocían ya los sabios de la Antigüedad. Según Aristarco, la sombra de la Tierra durante un eclipse de Luna parece dos veces mayor que el disco lunar a esa distancia. A partir de esos datos, y utilizando argumentos puramente geométricos, Aristarco pudo resolver todas las incógnitas del problema y obtener las distancias y tamaños del Sol y la Luna: estimó que la Tierra era unas tres veces más grande que la Luna y el Sol, casi siete veces mayor que

la Tierra. Su estimación del tamaño de la Luna es bastante correcta (la Luna es unas 3,7 veces más pequeña que la Tierra), pero subestimó el tamaño del Sol notablemente (es más de 100 veces mayor que la Tierra). Este último error se debe a que la determinación del ángulo entre el Sol y Luna en cuarto creciente es extraordinariamente difícil. Por eso, a pesar de numerosos intentos de medir ese ángulo con precisión en los siglos siguientes, la distancia al Sol estuvo fuertemente subestimada hasta bien entrado el siglo XVIII, incluso a pesar de la invención del telescopio.

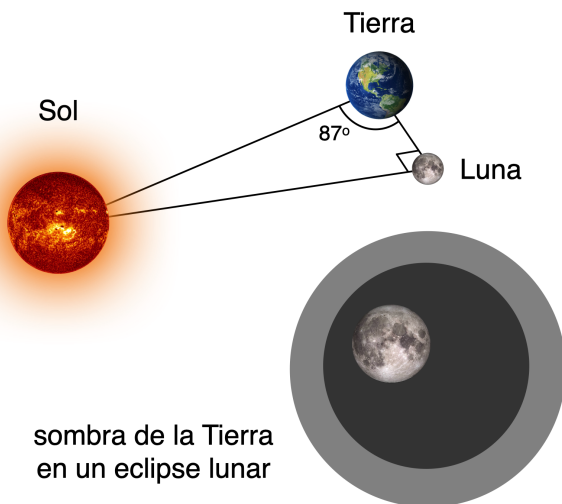


Figura 2: Aristarco de Samos estimó la distancia a la Luna y al Sol midiendo el ángulo entre ambos astros cuando la Luna está en fase de cuarto, y considerando también el tamaño relativo de la Luna respecto a la sombra de la Tierra durante un eclipse lunar.

Otro ingenioso método debería acudir en socorro de la difícilísima tarea de estimar la distancia al Sol. Había buenas razones que, ya en el siglo XVII, hacían sospechar que el Sol se encuentra mucho más lejos de nosotros que lo deducido por Aristarco de Samos y sus sucesores. El gran astrónomo inglés Edmund Halley fue uno de los grandes impulsores de un nuevo método para determinar la distancia al Sol: la observación de tránsitos de Mercurio y Venus. Por la inclinación de las órbitas de esos dos planetas interiores, es relativamente infrecuente que Mercurio o Venus pasen por delante del disco solar, lo que se conoce como un tránsito. Pero, cuando ocurre, ofrece una clave esencial para medir distancias a partir de medidas de tiempo. Si el mismo tránsito se observa desde distintas latitudes, su duración será diferente en cada lugar, ya que Mercurio o Venus

realizarán un recorrido mayor o menor al cruzar el Sol (por la mayor o menor elevación aparente sobre el disco solar). Por su mayor cercanía, la diferencia es más pronunciada en el caso de Venus, lo que hace preferible observar este tipo de tránsitos: los intentos de medir la distancia al Sol mediante tránsitos de Mercurio resultaron infructuosos. La propuesta de Edmund Halley creó una gran expectación de cara al tránsito de 1761; el propio Halley se encargó de planificar las observaciones a modo de testamento, ya que era seguro que el anciano astrónomo no viviría para ver el tránsito. Se llevaron a cabo numerosas expediciones internacionales para observar el tránsito desde los confines del mundo, con grandes odiseas marinas para ir y volver y con astrónomos que arriesgaron su vida por realizar estas observaciones en un contexto de guerra entre las principales potencias europeas. Es lo que podría considerarse el primer gran proyecto de colaboración internacional de la historia. Todas estas dificultades, unidas a las incertidumbres en la medida de la longitud geográfica de los puntos de observación, hicieron que los resultados del tránsito de 1761 fueran relativamente pobres. Pero, por suerte, un segundo tránsito tan solo ocho años después hizo que muchas de estas dificultades pudieran superarse y obtener así el primer valor acertado y razonablemente preciso de la distancia que separa la Tierra del Sol: unos 153 millones de kilómetros.

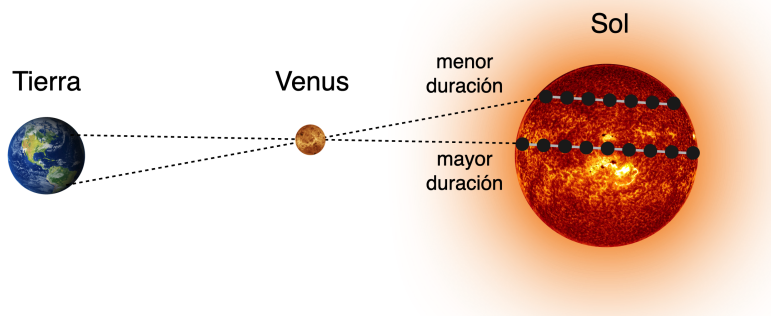


Figura 3: La duración de un tránsito de Venus varía en función de la latitud desde la que se observa, y esto permite estimar distancias a partir de la medida de tiempos.

El tamaño del sistema solar

El siglo XVII vivió una auténtica revolución científica: las observaciones que Galileo realizó al apuntar por primera vez el telescopio a los cielos permitió demostrar que no todo gira alrededor de la Tierra,

sino que nuestro planeta se mueve alrededor del Sol, tal y como había conjeturado Copérnico. Un apasionado admirador de Galileo y de la teoría copernicana, Johannes Kepler, se encargaría de deducir la forma matemática de esos recorridos alrededor del Sol: se trataba de elipses, y no círculos, como se pensaba hasta entonces. De pronto, esta nueva posibilidad hacía que todo encajara: las observaciones del movimiento planetario, incluso los caprichosos vaivenes de Marte, se volvían meridianamente claras a la luz de la nueva teoría del gran astrónomo alemán. Las dos primeras leyes de Kepler nos indican que las órbitas de los planetas son elípticas y que, en su recorrido, los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales (de manera que, al acercarse al Sol, los planetas se desplazan más rápidamente). La tercera ley de Kepler, de capital importancia para la ciencia moderna, establece una proporcionalidad entre el cubo de las distancias de los planetas al Sol y el cuadrado del período orbital. Por supuesto, la formulación de estas leyes no fue carente de esfuerzo, ya que Kepler empleó largos años de trabajo para desvelar esta regularidad a partir de las meticulosas observaciones que Tycho Brahe había acumulado a lo largo de su vida.

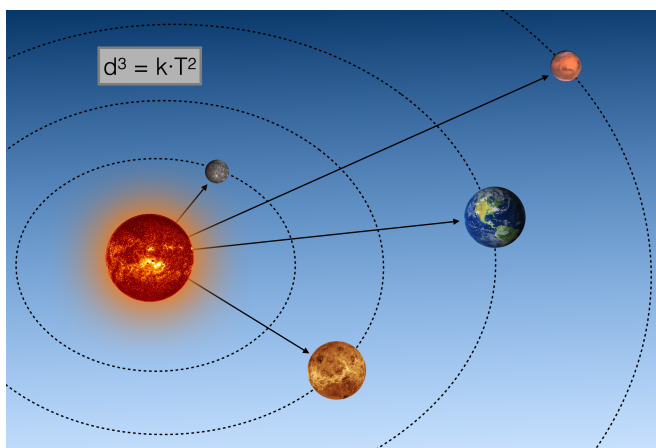


Figura 4: Según la tercera ley de Kepler, el cubo de la distancia media de un planeta al Sol es directamente proporcional al cuadrado del tiempo que tarda en completar una órbita.

La tercera ley de Kepler, al relacionar el tiempo que un planeta necesita para dar una vuelta alrededor del Sol con la distancia que lo separa del mismo, nos da la clave para deducir, inmediatamente, la distancia a cada uno de los planetas, sus satélites y, en definitiva, el tamaño del sistema solar. Los períodos orbitales de los planetas eran bien conocidos, ya que

bastaba con observar cómo se movían en el cielo y anotar las fechas correspondientes. Lo único que faltaba para conocer las distancias era la calibración inicial, una única distancia de separación para poder deducir a partir de esa todas las demás. De ahí la importancia de medir la separación Tierra-Sol de forma correcta, ya que acarrearba la implicación de conocer la distancia a todos los planetas. Las medidas de los tránsitos de Venus de 1761 y 1769 permitieron, por fin, contar con una calibración adecuada de esa distancia; así, un siglo y medio después de que Kepler enunciara sus leyes, fue posible deducir que el planeta más externo del sistema solar conocido entonces, Saturno, estaba situado ni más ni menos que a 1 340 millones de kilómetros del Sol. Poco después le seguiría el descubrimiento de Urano por parte de William Herschel, para el cual la tercera ley de Kepler implicaría una distancia de casi 3 000 millones de kilómetros. Y, en 1846, se anunciaría el descubrimiento de un nuevo planeta, Neptuno, a más de 4 000 millones de kilómetros del Sol. Nuestro hogar, el sistema solar, no paraba de crecer.

La distancia a las estrellas próximas: la paralaje

Si algunas estrellas se encuentran lo suficientemente cerca de nosotros, su posición aparente respecto a las estrellas más lejanas debería cambiar a lo largo del año, ya que nuestro punto de observación en la Tierra varía su posición como resultado de la traslación alrededor del Sol. Es algo similar a lo que ocurre cuando levantamos un dedo ante nosotros, cerrando alternativamente un ojo y después el otro: el dedo parece moverse respecto al fondo. En el caso de una estrella, la máxima separación se esperaría cuando se observa con seis meses de diferencia, de manera que la Tierra se encuentre en puntos diametralmente opuestos en su órbita en torno al Sol, tal y como se ilustra en la figura 5.

Durante siglos, este movimiento que conocemos como paralaje no pudo medirse, y, de hecho, esa falta de paralaje llegó a utilizarse como argumento en contra del modelo heliocéntrico. Por ejemplo, según Tycho Brahe, la ausencia de paralaje observable implicaría una distancia inconcebiblemente grande a las estrellas más próximas, y esto parecía apoyar la teoría geocéntrica que situaba a las estrellas en una esfera perfecta que giraba alrededor de la Tierra. En efecto, las distancias estelares son tan grandes que el ángulo de paralaje es muy pequeño y, por lo tanto, difícil de medir. Sin ir más lejos, Próxima Centauri, la estrella más cercana al Sol, solo se desplaza como máximo 0,77 segundos de arco respecto a su posición central cuando la Tierra ha completado media órbita alrededor del Sol. Este desplazamiento es menor que una millonésima de círculo y equivale al tamaño de una pelota de tenis vista desde 18 km de distancia, lo que explica la dificultad de poder medirlo.

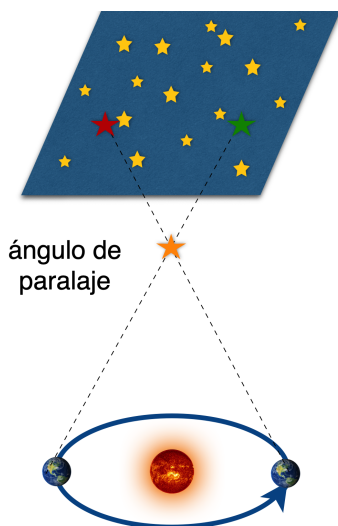


Figura 5: El método de la paralaje permite determinar la distancia a una estrella próxima midiendo su desplazamiento respecto a las estrellas más lejanas observado desde dos puntos diferentes de la órbita de la Tierra alrededor del Sol; por ejemplo, con seis meses de diferencia.

En definitiva, la paralaje anual era muy difícil de medir como consecuencia de las ingentes distancias que nos separan de las estrellas. Tras varios intentos infructuosos, Friedrich Bessel consiguió por primera vez en 1838 medir la paralaje a una estrella, 61 Cygni. En los albores del siglo XX se habían podido medir menos de un centenar de paralajes; durante el siglo XX, las placas fotográficas y, después, los detectores digitales permitieron acelerar el proceso, pero siempre con dificultad. Hoy en día, misiones especiales como Hipparcos, y más recientemente Gaia, son capaces de determinar con precisión exquisita la paralaje de más de mil millones de estrellas en nuestra galaxia. Además de ser una hazaña impresionante que nos ayuda a comprender mejor la estructura de nuestra Vía Láctea, la determinación de paralajes con precisión tiene grandes implicaciones a mayores escalas, ya que los métodos para determinar distancias a otras galaxias se basan, indirectamente, en la calibración que realicemos primero mediante la paralaje a estrellas próximas.

Como curiosidad, y quizá como recordatorio de la fundamental importancia de la paralaje, los astrónomos habitualmente medimos las distancias en pársec: un pársec (pc) es la distancia a la cual un objeto presenta una paralaje de un segundo de arco y corresponde a 3,27 años-luz. La distancia a la estrella más próxima al Sol es de 4,2 años-luz; el

centro de nuestra galaxia se encuentra a unos 28 000 años-luz (8 500 pc). Como referencia, esta última escala es casi 2 000 millones de veces mayor que la distancia que separa la Tierra al Sol, lo que nos puede dar una idea del descomunal tamaño de la galaxia en la que vivimos.

Un puente a otras galaxias: las variables cefeidas

A finales del siglo XVIII, John Goodricke había observado que una estrella relativamente insignificante, δ Cephei, cambiaba su brillo de forma periódica. No era la primera estrella variable que se descubría, pero sí que fue el prototipo de un nuevo grupo de estrellas pulsantes conocido como “variables cefeidas” en honor a aquella. Este tipo de estrellas muestran un aumento pronunciado de luminosidad seguido por una atenuación más lenta del brillo; este patrón se repite regularmente, con períodos típicos de varios días.

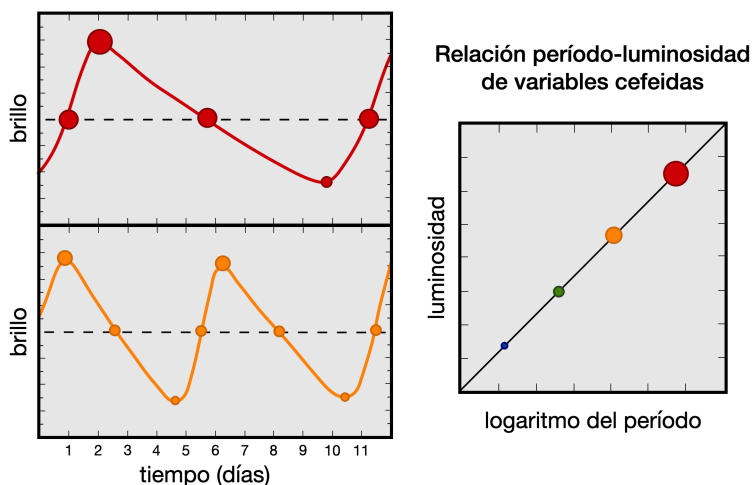


Figura 6: Estudiando estrellas variables cefeidas, Henrietta Leavitt descubrió que existe una estrecha relación entre el período y la luminosidad, de forma que las cefeidas más luminosas son las que presentan una variación de brillo más lenta.

Henrietta Swan Leavitt, una de las astrónomas más brillantes de la historia, dedicó gran parte de su vida a clasificar estrellas y a medir cuidadosamente sus propiedades. Así, a partir de sus observaciones de un grupo de variables cefeidas en la Pequeña Nube de Magallanes, llegó a una conclusión con implicaciones de enorme trascendencia para nuestro

conocimiento del cosmos: las magnitudes aparentes de esas estrellas variables parecían proporcionales al logaritmo del período con el que cambiaban su brillo. Como todas las estrellas de este grupo se encontraban en la misma región, la Pequeña Nube de Magallanes, podía suponerse que estaban aproximadamente a la misma distancia de nosotros; eso quería decir que las estrellas intrínsecamente más luminosas presentaban períodos de oscilación de luminosidad más prolongados. Dándole la vuelta a esto, si fuéramos capaces de calibrar esta relación con la distancia conocida a alguna cefeida concreta, podríamos estimar la luminosidad intrínseca de cualquier otra simplemente a partir de la medida de su período. Finalmente, conociendo su luminosidad intrínseca y su brillo al observarla desde la Tierra, sería posible deducir la distancia a la que se encuentra.

Como las cefeidas son estrellas muy brillantes, la gran ventaja de este método es que permite calcular distancias no solo dentro de nuestra Vía Láctea, sino también a otras galaxias próximas. En 1924, Edwin Hubble consiguió resolver mediante un telescopio estrellas individuales en la galaxia de Andrómeda (M31), y varias de esas estrellas resultaron ser variables cefeidas. Así, Edwin Hubble pudo determinar la distancia a la galaxia de Andrómeda y demostrar de forma concluyente que se encuentra mucho más lejos de nosotros que las estrellas individuales que podemos ver en una noche despejada. Hasta ese momento, y sobre todo en las primeras décadas del siglo XX, existió un acalorado debate en la comunidad astronómica sobre si las “nebulosas espirales” que se venían observando con distintos telescopios formaban o no parte de nuestra galaxia. Había quienes defendían que eran pequeñas nubecillas con forma espiral que flotaban en el medio interestelar, mientras que otros argumentaban que se trataba de verdaderos “universos isla”, galaxias similares a nuestra Vía Láctea que se encontraban a enormes distancias de nosotros. Gracias a Henrietta Leavitt y las variables cefeidas, supimos que esta segunda opción era la correcta: de pronto, el universo conocido pasaba de tener unas decenas de miles de años-luz a extenderse al menos un millón de años-luz. Como veremos a continuación, el universo conocido seguiría creciendo vertiginosamente según avanzaba el siglo XX.

El universo en expansión: galaxias cada vez más lejanas

Cuando un coche de bomberos se nos acerca por la calle, notamos un cambio de tono en la sirena en el momento en que pasa junto a nosotros y empieza a alejarse. Este cambio de tono se debe al llamado efecto Doppler: las ondas sonoras tienden a acumularse y parecer de una frecuencia mayor cuando el objeto que las emite se acerca y, por el contrario, los frentes de onda tienden a estar más separados unos de otros cuando el emisor se aleja de nosotros, resultando en una frecuencia percibida menor. Lo mismo ocurre con la luz, y midiendo el efecto

Doppler de cierta galaxia podemos determinar la velocidad con la que se acerca o aleja de nosotros. Las observaciones revelaron que las galaxias se alejan sistemáticamente, y lo hacen con una velocidad relativa mayor cuanto más lejos se encuentran. Esto es algo que Edwin Hubble pudo determinar combinando la información de velocidades de las galaxias con las distancias a ellas cuidadosamente medidas gracias a las variables cefeidas y otros métodos. Según lo que hoy conocemos como ley de Hubble, la velocidad aparente a una galaxia es directamente proporcional a su distancia. La espectacular conclusión de esto es que el universo se está expandiendo. Estas nociones revolucionarias, junto a la teoría de la relatividad general de Einstein, llevó a desarrollar el modelo cosmológico del Big Bang, según el cual el universo tuvo su origen en una colosal explosión que ocurrió hace unos 13 800 millones de años.



Figura 7: Esta es la imagen más profunda del universo obtenida hasta hoy en luz visible, y se conoce como “campo ultra profundo del Hubble” (Hubble Ultra Deep Field). Combina observaciones del telescopio espacial Hubble entre 2003 y 2004; la luz de algunas de las estructuras que se aprecian fue emitida hace más de 13 000 millones de años, durante la infancia del universo | NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), HUDF Team.

A lo largo del siglo XX, hemos podido medir el efecto Doppler de objetos cada vez más distantes. Gracias a los espectaculares avances técnicos de las últimas décadas, los astrónomos observamos hoy en día de forma relativamente rutinaria galaxias que presentan desplazamientos al rojo en torno a 4 o incluso superiores; esto quiere decir que dichos objetos emitieron la radiación que hoy reciben nuestros detectores hace más de 12 mil millones de años, cuando el universo tenía tan solo un 10% de su edad actual. Observando galaxias situadas en un amplio rango de distancias de nosotros y comparando sus propiedades podemos inferir cuáles han sido los procesos que han determinado la evolución de esas galaxias.

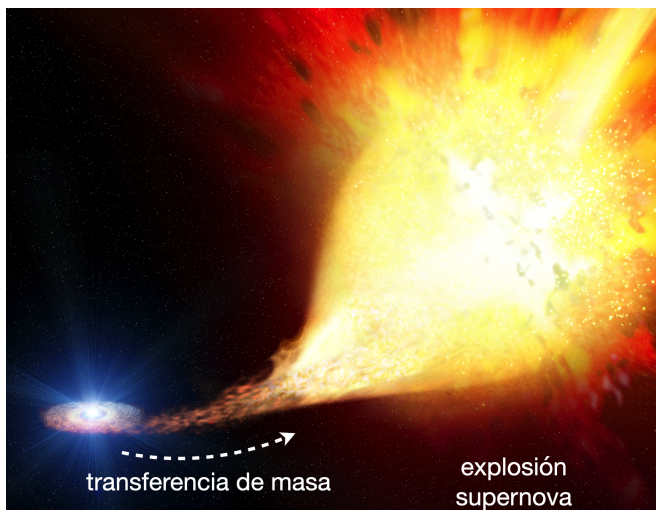


Figura 8: Imagen artística que recrea la explosión de una supernova de tipo Ia, donde un sistema binario cuenta con una enana blanca que transfiere masa a una compañera gigante | Agencia Espacial Europea (ESA) y Justyn R. Maund (Universidad de Cambridge).

Explosiones de estrellas como candelas estándares

Cuando las estrellas suficientemente masivas llegan al final de su vida y agotan su combustible nuclear, dan lugar a una explosión de supernova. Las supernovas son uno de los fenómenos más energéticos que conocemos en el universo, y en este rápido y espectacular proceso se sintetizan algunos de los elementos químicos característicos de la Tierra. Una supernova también puede producirse en un sistema binario de estrellas cuando existe transferencia de materia de una a otra. Las estrellas binarias son muy

comunes en el universo; cuando en esta especie de danza cósmica una de las participantes es una estrella de neutrones y recibe de la otra suficiente materia, se produce una explosión como supernova. Lo interesante de estas explosiones, conocidas como supernovas de tipo Ia, es que por las propiedades cuánticas de sus constituyentes, siempre ocurren cuando la enana de neutrones alcanza una masa específica y, consecuentemente, estas supernovas siempre presentan la misma luminosidad intrínseca. Esto quiere decir que, si observamos una supernova Ia en una galaxia lejana y medimos su brillo, inmediatamente podemos deducir cuál es la distancia a la que se encuentra. Podríamos decir que se trata de poderosos faros cósmicos que nos permiten desvelar la estructura del universo a gran escala.

Distancias cósmicas en la astrofísica actual

La medida de distancias precisas a un número cada vez mayor de estrellas y galaxias juega un papel fundamental en la astrofísica contemporánea. Tal y como comentábamos, hoy en día se siguen calibrando y refinando medidas de la paralaje gracias a misiones espaciales como Gaia. El estudio de variables cefeidas también es un área activa de investigación, y estos resultados sirven para calibrar otros indicadores de distancias a objetos más lejanos, como si de una escalera se tratara: es necesario recorrer los peldaños inferiores para poder alcanzar los niveles más elevados. Por eso, a menudo nos referimos a esta sucesión de métodos interdependientes como la “escalera cósmica de distancias”.

Las últimas fases de la evolución estelar también proporcionan una llave útil para determinar distancias. En concreto, las estrellas de masa similar al Sol aumentan su tamaño y se vuelven rojas al final de su vida, poblando lo que conocemos como “rama de gigante roja”. Esta rama presenta un pico característico justo antes de que la estrella empiece a quemar helio en su núcleo, y es posible calibrar su luminosidad absoluta conociendo algunas propiedades básicas de la estrella, como su metalicidad.

Varios astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional (IGN) estamos fuertemente involucrados en la colaboración internacional PHANGS, donde se estudia en gran detalle el proceso de formación estelar a partir de gas molecular en varias decenas de galaxias cercanas. Para ello, combinamos observaciones en diferentes rangos de longitud de onda de los telescopios ALMA y VLT, en Chile, y el telescopio espacial Hubble. En concreto, como parte de las observaciones con Hubble, hemos podido determinar la distancia a algunas galaxias con la precisión más alta alcanzada hasta ahora, usando para ello el método del pico de la rama de gigante roja que acabamos de describir. Desvelar las estructuras del universo y sus tamaños reales depende críticamente de este sucesivo refinamiento de medidas a diferentes escalas, afianzando cada uno de los peldaños de la escalera cósmica.

Uno de los resultados más espectaculares de los últimos años como consecuencia directa de la medida de distancias astronómicas es la presencia de una gran cantidad de materia oscura en el universo. Mediante mediciones de supernovas de tipo Ia ha sido posible determinar que el universo no solo está expandiéndose, sino que lo hace de forma acelerada: esta es la prueba más sólida de la existencia de energía oscura, una forma misteriosa de energía que, al contrario que la gravedad, produce la repulsión de la materia. Hoy en día, nuestras estimaciones apuntan a que el 70% del universo está compuesto por energía oscura. Sumando a esto la materia oscura, llegamos a la asombrosa conclusión de que todos los protones, neutrones y electrones de los que están compuestos los átomos y moléculas que conocemos cuentan solo el 5%.

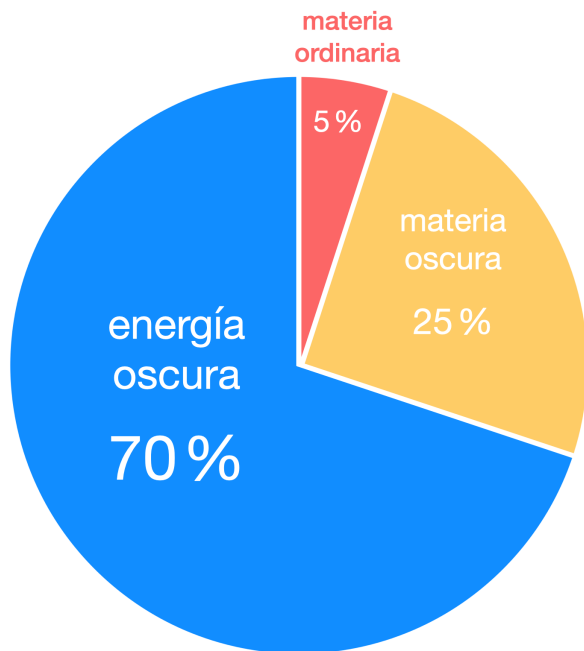


Figura 9: Distribucion de materia y energia en el universo segun nuestro conocimiento actual.

En definitiva, como hemos visto a lo largo de este artículo, la escalera cósmica de distancias es una conquista intelectual que se prolonga a lo largo de varios milenios. Sin embargo, en muchos sentidos constituye un emocionante punto de partida, ya que la determinación de distancias cada vez más precisas no para de arrojar nuevas preguntas. Por ejemplo, en

el caso de la expansión acelerada del universo que desvelan las medidas mediante supernovas de tipo Ia, podemos preguntarnos: ¿qué es la energía oscura y cuál es su origen? La ciencia es una aventura sin fin.

Bibliografía

- [1] M. Hoskin, 2016, “Breve historia de la astronomía”, Madrid: Alianza.
- [2] J. D. North, 2001, “Historia Fontana de la astronomía y la cosmología”, México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- [3] A. Pannekoek, 1989, “A History of Astronomy”, Nueva York: Dover Publications.
- [4] P. Planesas Bigas, 2019, “Tránsitos. La medida del Sistema solar y de otros sistemas planetarios”, Madrid: CNIG-IGN.