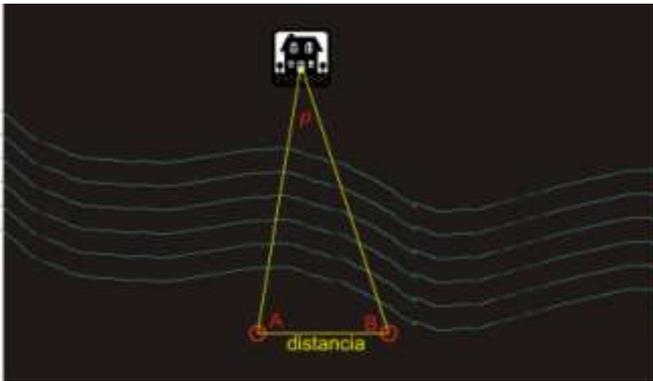


EL CIELO SE MIDE CON UNA CADENA

Tomado del libro *Qué hay a un petámetro del Sol y otros temas de astronomía*, por Antonio Bernal González

La Paralaje

Hace ya unos años, estando de visita en un campamento minero, reunido durante un descanso con varios ingenieros, tocamos el tema de la astronomía. Les expliqué que las distancias a los cuerpos celestes se miden en unidades que por su magnitud son difíciles de aprehender y que la estrella más cercana está a más de 30 billones de kilómetros, tan lejos que la luz tarda más de cuatro años en llegar desde ella hasta nosotros. Uno de los presentes, hombre práctico, acostumbrado a medir distancias con la lienza que lleva siempre al cinto, me dijo: “Eso no lo puedo creer. ¿Cómo pueden medir una distancia a un objeto tan lejano?”. Apabullado por la magnitud de las cifras no se dio cuenta de que por su profesión de topógrafo muchas veces él mismo mide distancias a objetos inaccesibles, por ejemplo de una orilla a otra de un río, sin necesidad de atravesarlo.



Supongamos, por ejemplo, que nuestro amigo quiere medir la distancia desde un punto A hasta una casa situada en la otra orilla del río Ebro, sin atravesarlo.

Lo primero que hace es señalar otro punto B y medir con su lienza la distancia de A a B, que puede ser de algunas decenas de metros.

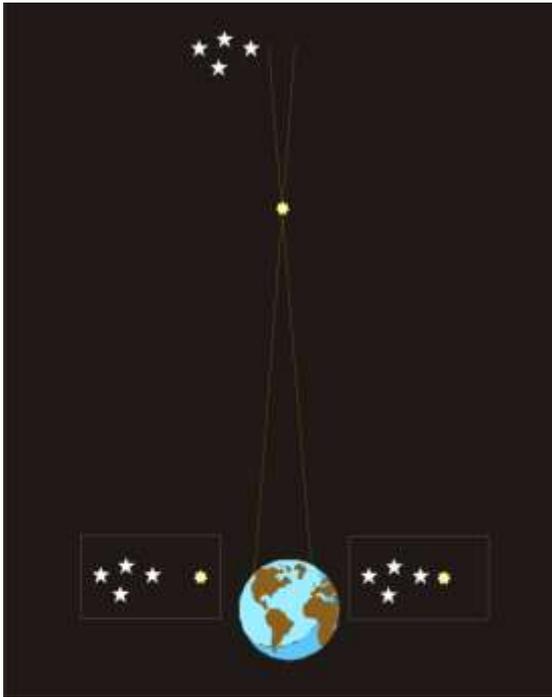
Luego, armado con un instrumento que le permita medir ángulos horizontales, como un teodolito o un tránsito, coloca su aparato en A y mide el ángulo entre B y algún punto visible de la casa, por ejemplo, el pomo de la puerta.

Enseguida desplaza el equipo hasta el punto B y hace lo mismo, a saber, medir el ángulo entre el punto A y el pomo de la puerta.

Lo que ha hecho nuestro amigo es definir un triángulo del que conoce tres de sus seis elementos: un lado y dos ángulos. Quedan faltando por conocer el ángulo opuesto, p y dos de los lados que son las distancias desde A y B hasta el pomo. El cálculo es un simple procedimiento geométrico en el que, no sólo tiene el resultado que quería – la distancia desde A hasta la casa – sino también el ángulo p que en astronomía es muy importante y se llama *paralaje*.

En el cielo se utiliza el mismo procedimiento –llamado precisamente el método de la paralaje–, para medir las distancias a los cuerpos celestes, pero con la salvedad de que como se quieren medir longitudes tan grandes, la separación entre los dos puntos fijos A y B, llamada *línea de base*, debe ser también muy grande, tanto como el diámetro de la Tierra o aún más. Para adaptar el procedimiento del topógrafo a las medidas de los cuerpos celestes más cercanos,

como el Sol, los planetas o los asteroides, hay que cambiarlo un poco pues no se puede pretender que un solo astrónomo tome a un mismo tiempo medidas desde varios puntos de la Tierra. Se hace, entonces, por observación desde varios sitios separados muchos kilómetros entre sí y las mediciones tienen que ser simultáneas a causa de que los cuerpos celestes del Sistema Solar cambian de posición a lo largo del tiempo. Los ángulos que se miden no son entre los dos puntos de la base y el astro, puesto que los observatorios, al estar separados miles de kilómetros, no tienen línea de visión del uno al otro.



Supongamos, entonces que se quiere medir la distancia hasta el asteroide que está en el centro de la siguiente figura.

El astrónomo selecciona dos observatorios, por ejemplo uno en Estados Unidos y otro en España, y desde el primero observa el asteroide contra el fondo estrellado. Lo ve a la derecha y un poco alejado de un cierto grupo de estrellas como se ve en el recuadro de abajo a la izquierda.

Al mismo tiempo que él, un colega suyo observa el mismo asteroide desde el segundo observatorio y toma su distancia al mismo grupo de estrellas, como se muestra en el recuadro de la derecha abajo.

Las distancias medidas no son en unidades de longitud milímetros, metros o kilómetros, sino en unidades angulares que son las que se usan para localizar los cuerpos celestes. Tengamos en cuenta que el cielo es, desde nuestra perspectiva, una gran esfera sobre la cual nos parece que están pegados los cuerpos celestes. Un círculo máximo de esa esfera son 360 grados y la distancia entre dos astros se puede medir desde la Tierra en grados o fracciones de grado. Las distancias que miden nuestros dos astrónomos desde el asteroide hasta el grupo de estrellas son de seguro tan pequeñas que no llegarán más allá de algunos segundos de arco.

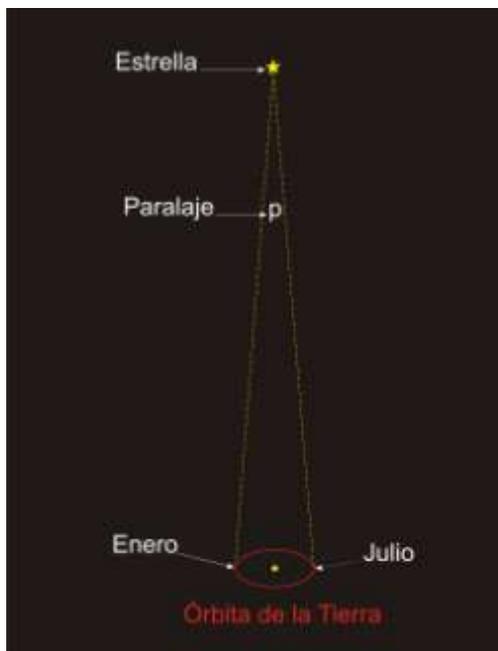
Al comparar las dos observaciones – que pueden ser dos fotografías – el astrónomo nota que el astro se ve a distintas distancias del grupo estelar y la diferencia es la medida angular de la paralaje p . En la práctica es muy fácil porque basta con sobreponer las dos fotografías y medir la distancia entre las dos posiciones del asteroide. Este caso es más fácil que el del topógrafo, porque el triángulo es ahora isósceles, puesto que las distancias desde los dos observatorios hasta el asteroide son iguales. Entonces le basta con conocer el ángulo p y la línea de base para resolver el triángulo.

El método de la paralaje se intentó utilizar desde finales del siglo XVII porque los astrónomos estaban ansiosos por conocer la distancia a cualquier cuerpo del Sistema Solar puesto que sabiendo una cualquiera, se podían conocer las demás. Hasta entonces el estimativo más preciso de la distancia Tierra – Sol era muy deficiente y el método de la paralaje era la

esperanza de conseguir mayor precisión. En 1661, el director del Observatorio de París decidió tomar la paralaje de Marte desde dos observatorios muy apartados, el que dirigía y otro provisional en la Guayana Francesa, en Sur América. El resultado fue bastante satisfactorio pero el planeta Marte, visto a través del telescopio no es un punto de luz sino un disco, por lo que la medida se dificulta y se pierde precisión. Con esta medición se pudo saber el valor de la unidad astronómica (distancia Tierra – Sol) y por primera vez se tuvo una idea de la verdadera magnitud del Sistema Solar.

Pero la precisión no fue suficiente para dejar satisfechos a los astrónomos porque faltaba aún perfeccionar mucho los aparatos, cosa que se logró durante los siglos XIX y XX. Las mediciones paralácticas más precisas jamás realizadas se hicieron midiendo la paralaje de un asteroide llamado Eros, que tiene ventajas con respecto a Marte porque en ocasiones se acerca a la Tierra mucho más que el planeta rojo y también porque se ve en el cielo como un punto de luz y no como un disco.

Para medir esta paralaje se hicieron campañas mundiales en sus acercamientos mínimos al Sol en los años 1901 y 1931, en los que estuvo a una distancia de él que es sólo 1,4 veces la de la Tierra. En la última de las dos campañas el Astrónomo Real Harold Spencer Jones calculó la paralaje basado en más de 2500 fotografías tomadas con 30 telescopios de 14 países, una verdadera cooperación internacional. Los cálculos tardaron 10 años y como resultado de ellos Jones determinó la distancia Tierra – Sol como 149 675 000 km, un valor que está apenas un 0,05% por encima del que hoy conocemos, calculado con procedimientos más precisos.



La distancia a las estrellas es tan grande, que un procedimiento como el descrito no serviría para calcularlas porque una línea de base del tamaño de la Tierra sería insuficiente para mostrar el ángulo de paralaje. Los astrónomos recurren a una línea aún mayor: el diámetro de la órbita terrestre que se deduce del valor calculado por el método anterior y son unos 300 millones de kilómetros. Es lógico que las mediciones no puedan tomarse simultáneamente desde dos puntos separados una distancia tan ingente, por la razón obvia de que la Tierra no puede estar en dos lugares a la vez. Se toma, entonces, la posición de la estrella que se quiere medir, que por alguna razón se cree que está cerca, con relación a las del contorno que se suponen mucho más apartadas. Esta misma medición se

hace seis meses después cuando la tierra ha dado media vuelta alrededor del Sol, o sea que está en el otro extremo de su órbita.

Los astrónomos tienen varios indicios para saber si una estrella está “cerca” o “lejos” pero ninguno es del todo seguro. Uno es el brillo de la estrella pues es lógico suponer que es una medida de la distancia: por término medio las estrellas más cercanas deberían brillar más que

las más apartadas. Sin embargo esta regla no siempre se cumple pues hay algunas estrellas que a pesar de estar cerca son muy débiles, como es el caso de Próxima Centauri que no puede verse a simple vista y es, como su nombre parece indicarlo, la más próxima al Sol. Otro indicio es el de los movimientos propios o movimientos que tienen unas estrellas con respecto a otras y que también puede suponerse, sin que sea necesariamente siempre así, que los mayores movimientos propios corresponden a estrellas que están más cerca.

Otra vara de medir

El método de la paralaje funciona muy bien para estrellas que están a unos cuantos años luz de distancia, pero la mayor parte de ellas están tan lejanas que la diferencia detectada por este método es imposible de evaluar. Sin embargo, a principios del siglo XX una astrónoma apareció como un ángel de la guarda para las mediciones del cielo. Henrietta Leavitt, una de las mujeres que trabajaban con Edward Pickering como calculadoras humanas en el observatorio de Harvard College analizando placas fotográficas del cielo, hizo un descubrimiento sorprendente. En un cierto tipo de estrellas variables – estrellas cuya luminosidad sube y baja periódicamente – llamadas *variables cefeidas*, existe una relación que puede predecirse entre el período de variabilidad y la luminosidad de la estrella. En otras palabras, cuanto mayor es el período, mayor es la luminosidad. En realidad se trata de la luminosidad intrínseca de la estrella, no de la aparente como la vemos nosotros desde nuestro puesto de observación en el Universo, pero cuando todas las estrellas analizadas están a una misma distancia, como por ejemplo en una misma galaxia, la luminosidad propia y la aparente son proporcionales: a mayor valor de la primera, uno más grande de la segunda.

Pues bien, esta relación entre el período y la luminosidad puede usarse como vara de medir para encontrar las distancias hasta las cefeidas, con solo medir el período de variación del brillo. Para calibrar el método se usa la distancia conocida a alguna o algunas de ellas, calculadas por el método de la paralaje. Este sistema resultó especialmente útil para grandes distancias, tanto que con él se calculó por primera vez el tamaño de nuestra galaxia la Vía Láctea en el año 1924, y ha permitido conocer las distancias hasta algunas otras galaxias en las que se han encontrado este tipo de estrellas variables. La galaxia más apartada a la que se le ha medido la distancia por el método de las cefeidas se encuentra a unos 100 millones de años luz de nosotros.

Cien millones de años luz son una distancia muy grande, tanto que es difícil expresarla con palabras y más aún comprender su magnitud (son 940 trillones de kilómetros). Pero podríamos decir que ahí comienza el Universo pues la frontera conocida actualmente se encuentra 140 veces más alejada. ¿Cómo medir, entonces las distancias hasta esos confines?

La respuesta la dio el físico francés Armand Fizeau en 1848 estudiando los espectros de las estrellas.

LA COMPOSICIÓN DE LAS ESTRELLAS

Desde principios del siglo XIX Josep Fraunhofer había notado que en el espectro solar se producían una serie de líneas oscuras posicionadas siempre en el mismo lugar con precisión matemática y después de él varios astrónomos observaron y fotografiaron espectros estelares

en muchos de los cuales descubrieron líneas diferentes a las del Sol. Este descubrimiento daría posteriormente como resultado la clasificación de las estrellas según el tipo de espectro producido. Pocos años después del descubrimiento de Fraunhofer, Gustav Kirchhoff descubrió que las líneas están asociadas a los elementos químicos de tal manera que los mismos elementos producen siempre el mismo conjunto de líneas. Con este insólito descubrimiento se logró lo que sólo unos años antes parecía imposible: conocer la composición química de las estrellas. Pero algunos cuerpos celestes producían espectros que no correspondían a ningún elemento químico conocido, por lo que en un principio se pensó que la química de los cielos era diferente a la de la Tierra. Pronto los astrónomos se dieron cuenta de que las líneas eran en realidad las mismas de los elementos terrestres, pero estaban en un lugar diferente del espectro, desplazadas todas una cantidad igual hacia las ondas más largas que son las rojas. Era un fenómeno inquietante que nadie supo interpretar en su momento y fue entonces cuando Fizeau propuso una solución magistral. Según el físico galo se trataba un fenómeno descrito seis años antes por Christian Doppler para las ondas acústicas, salvo que ahora se aplicaba a las ondas de más alta frecuencia de la luz visible. La solución de Doppler se refería a las ondas producidas por una fuente sonora, por ejemplo una sirena, que son ondas concéntricas similares a las que se producen en la superficie de un lago de aguas tranquilas cuando se arroja un guijarro. Pero, ¿qué pasa – se preguntó Doppler – si la fuente de sonido no está inmóvil sino que se desplaza a una cierta velocidad? Pues que las ondas se comprimen en el lado hacia el que se dirige el movimiento y se separan en el opuesto, como se muestra en la siguiente figura, de tal manera que una persona colocada de tal manera que la fuente venga hacia ella escuchará más ondas por segundo, es decir, una mayor frecuencia y otra que ve alejarse la fuente percibirá una frecuencia más baja.



El fenómeno es perceptible cuando escuchamos la sirena de una ambulancia que se acerca a nosotros y sentimos cómo baja la frecuencia en el momento en que nos sobrepasa. En el caso de las líneas del espectro de los cuerpos celestes, el desplazamiento hacia el rojo indica que la fuente se está alejando y si fuera hacia el azul, o sea hacia las

frecuencias más elevadas, indicaría acercamiento. El propio Doppler había predicho que el fenómeno – llamado hoy *efecto Doppler Fizeau* – podía aplicarse tanto a la acústica como a la óptica.



Ya interpretado el fenómeno, pudo utilizarse para medir velocidades de cuerpos celestes, después de ser calibrado con cuerpos de velocidad conocida que muestran desplazamientos al rojo. En esa tarea de calibración Edwin Hubble descubrió que las galaxias se alejan de nosotros con velocidades que son proporcionales a la distancia y formuló entonces la *Ley de*

Hubble. Con ella, sabiendo la velocidad a la que se aleja una galaxia, se conoce automáticamente su distancia y este método viene a complementar las varas de medir que vimos antes de la paralaje y de las Cefeidas.

Ahora tenemos las cintas métricas adecuadas para medir distancias celestes de todas las magnitudes. Si el cuerpo a medir está cerca, desde millones de kilómetros hasta unos cuantos años luz, se usa la paralaje; si se encuentra desde miles hasta millones de años luz se utilizan las variables Cefeidas y si está desde centenares de años luz hasta los confines del universo, se echa mano del método del corrimiento al rojo. Es una cadena en la que cada método sirve para calibrar el siguiente y es ella la que nos ha permitido conocer nuestra verdadera magnitud de granos de arena en el océano vasto del Universo.

Objetos a medir	Distancias	Método
Cuerpos del Sistema Solar	Millones de km	Paralaje
Estrellas cercanas	Años luz	Paralaje
Estrellas lejanas	Miles de años luz	Cefeidas
Galaxias cercanas	Millones de años luz	Cefeidas
Galaxias lejanas	Centenares o miles de millones de años luz	Corrimiento al rojo