

# MEDIR EL UNIVERSO

Julián Salas Camarero

Hasta principios del siglo XX sólo se disponía de un método para saber a qué distancia se encuentran los objetos celestes: el paralaje astronómico. Pero este método no puede aplicarse más allá de quinientos años-luz, distancia que astronómicamente hablando es muy pequeña. Con el fin de saber dónde se encuentran objetos más lejanos, algunos a enormes distancias, se han desarrollado a lo largo de este siglo más de quince métodos, varios de ellos muy ingeniosos.

## 1. - Introducción

Saber a qué distancia de nosotros está un objeto no es difícil: se sujeta un extremo de la cinta métrica en la posición de partida y caminamos, extendiendo la cinta, hasta el punto donde está colocado el objeto del que queremos conocer la distancia a la que se encuentra. Así de fácil.

El asunto se complica si no podemos llegar hasta donde se encuentra el objeto distante; un barco en alta mar, o la cumbre de una montaña inaccesible. Pero cuando se riza el rizo es si el objeto no sólo es inalcanzable, sino que además está a una distancia inmensa. Ese es el caso de los cuerpos celestes, donde salvo los del sistema solar, que se encuentran a distancias relativamente pequeñas, el resto: estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias y cúasares, están a distancias tales que es imposible siquiera imaginarlas. ¿Cómo se resuelve en ese caso el problema? ¿De qué forma podemos saber a qué distancia se encuentran esos cuerpos a los que no sólo es imposible llegar, sino que además están a distancias inmen-

sas? En este artículo se verán los principales métodos que hay para resolver esta cuestión.

Saber la distancia a la que está un objeto es esencial para conocer su luminosidad, masa y tamaño, y conocida esa información, entender qué son y cómo son esos objetos. La distancia interviene en leyes tan importantes como la de la Gravitación Universal y en la fórmula que hay que resolver para saber cuál será el destino del universo.

### Unidades de medida

- Metro (distancia elegida como unidad patrón de medida.)

- Kilómetro = 1000 metros.

- Unidad astronómica (distancia media de la Tierra al Sol) = 149.597.892 Km

- Año-luz (distancia que recorre la luz en un año) = 945.425.628.000 Km.

- Pársec (distancia desde la cual el radio de la órbita de la Tierra se vería con un ángulo de un segundo de arco) =  $3,26 \text{ años-luz} = 3 \times 10^{13} \text{ Km}$

## 2. - Principales métodos de medición de distancias

Sería ideal disponer de un único método de medida que fuese aplicable para todo el universo, que sirviese tanto para los objetos cercanos (los planetas), como los más remotos (cuásares). Pero no lo hay y para poder medir cada vez más lejos, han ido apareciendo diversos métodos. A continuación se rela-

cionan los más importantes, clasificados en métodos galácticos y extragalácticos.

### Métodos galácticos.

Son los utilizados para medir distancias dentro de nuestra galaxia, cosmológicamente hablando distancias muy cortas.

- Método del paralaje (*sección 3.1*)

- Movimiento propio en cúmulos (*sección 3.2*)

- Espectroscopía estelar (*sección 3.3*)

- Estrellas RR Lyrae (*sección 3.4*)

### Métodos extragalácticos

Son los utilizados para medir distancias a objetos que están más allá de nuestra galaxia. Estos métodos a su vez se clasifican en dos tipos: Primarios y Secundarios

#### Métodos extragalácticos Primarios

Son los métodos que pueden calibrarse a partir de observaciones en nuestra galaxia o a partir de consideraciones teóricas.

- Estrellas cefeidas (*sección 4.2*)

- Supernovas (*sección 4.5*)

- Efecto Sunyaev-Zel'dovich (*sección 4.6*)

- Lentes gravitacionales (*sección 4.7*)

Métodos extragalácticos Secundarios

Son métodos cuya calibración se hace a partir de galaxias del grupo Local y otros grupos cercanos de galaxias, cuyas distancias se han conocido a partir de los métodos primarios.

- Nebulosas planetarias (*sección 4.1*)

- Luminosidad de los cúmulos globulares (*sección 4.3*)

- Método de Tully-Fisher para galaxias espirales (*sección 4.4*)

Ciertamente no hay una barrera nítida en la que un método deja de ser útil y pasa a usarse otro. Hay algunos que se solapan para ciertas distancias, esto es, dos o más métodos sirven para estimar la distancia a un mismo objeto. Esto, lejos de ser un inconveniente, es una ventaja, ya que permite contrastar los resultados obtenidos de diferentes formas, ayudando a mejorar la medida y calibrar los métodos.



**Figura 1. - Resumen de todos los métodos que se ven en este artículo.**

A continuación se describe cada método para tratar de conocer en qué principio se fundamentan y hasta qué distancia es aplicable. Se empieza por los métodos galácticos para pasar después a los extragalácticos. Se explican once de ellos. Pero no es necesario entender, ni siquiera leerlos todos, para comprender los fundamentos de la medida de distancias en el universo. Salvo el hecho de que los métodos están descritos de menor a mayor distancia, no están relacionados unos con otros, por lo que se pueden leer en cualquier orden o dejar alguno sin hacerlo. Los únicos métodos que aconsejo leer y mínimamente entender son dos: el del paralaje y el de las cefeidas. El primero por ser el de partida para todos los demás y el segundo por ser esencial para medidas extragalácticas. Las personas interesadas en otros métodos o en ampliar información sobre los que se explican, pueden hacerlo consultando la bibliografía que se relaciona al final.

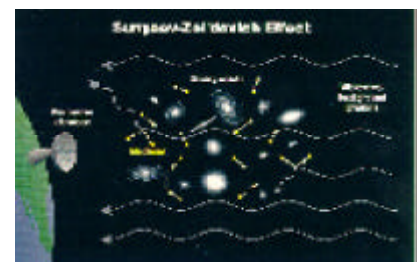
3. - Métodos galácticos

3.1. - Método del Paralaje

¿Qué es el paralaje? Es el desplazamiento observado en la posición de un cuerpo cuando el observador lo mira desde dos puntos diferentes. Esto lo podemos comprobar estirando nuestro brazo y observando cómo cambia la posición aparente de un dedo al observarlo primero con un ojo y luego con el otro (se debe cerrar el ojo con el que no se mira.)

Aplicado a la astronomía, el paralaje se puede definir como el desplazamiento observado en la posición de una estrella cuando se observa desde dos puntos diferentes de la órbita de la Tierra.

Si enfocamos una misma estrella con medio año de intervalo (para que el efecto sea el máximo), se puede notar un débil desplazamiento de su posición respecto al fondo de las estrellas lejanas, que en apariencia no se han movido. La mitad del ángulo bajo el cual se observa este desplazamiento es el paralaje anual de la estrella.



**Figura 2. - El método del paralaje.**

Conocido este ángulo y el radio de la órbita terrestre, un simple cálculo trigonométrico permite obtener la distancia.

Dado que incluso las estrellas más cercanas ya distan de nosotros grandes distancias, el ángulo de paralaje es ínfimo (Próxima Centauri, la estrella más cercana a nosotros que está a 4,3 años-luz, presenta un paralaje de 1,5 segundos de arco, - el ángulo con el que se vería un pelo a un kilómetro de distancia -.)

A pesar de ello se ha conseguido medir el ángulo de paralaje de estrellas hasta una distancia de 500 años-luz gracias al satélite Hipparcos (figura 2).

Este método es muy importante porque casi todos los demás se apoyan en él. Por lo tanto los errores cometidos en estas medidas se propagan a las medidas realizadas por otros métodos.

## Hipparcos

Matemático, filósofo y astrónomo del siglo II antes de Cristo.

Usando el único instrumento astronómico disponible que tenía (¡sus ojos!), midió la posición de las estrellas y planetas que pasaban cada noche sobre

su cabeza, llegando a hacer un catálogo de 1.080 estrellas.

...y su satélite

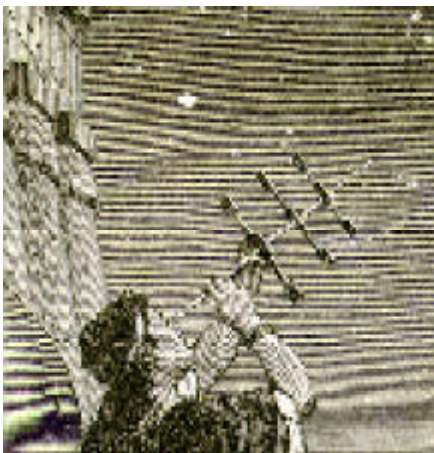
### High Precision Parallax Collecting Satellite (HiPParCos).

Ha estado tres años y medio midiendo el paralaje de más de un millón de estrellas (hasta la magnitud 12,5.) Con una resolución que en algunos casos ha alcanzado 0,001 arcosegundo (mil veces mejor que la de los mejores telescopios terrestres).

¡1 milisegundo de arco (0,001) es lo que crece el pelo de una persona situada a un metro de distancia en un segundo!

Ha realizado medidas precisas hasta 500 años-luz.

Además del paralaje ha medido el brillo de estrellas variables y la posición de muchas estrellas en sistemas múltiples.



**Figura 3. - Hipparcos y su satélite**

### 3.2. - Movimiento propio en cúmulos

En cúmulos cercanos de estrellas (en las Hyades, por ejemplo), puede verse el movimiento propio de las estrellas dentro del cúmulo. Este desplazamiento aparente, muy débil pero continuo, de la posición relativa de las estrellas en la bóveda celeste es diferente del cambio de posición debido al paralaje.

Combinando esta velocidad aparente de la estrella, con la velocidad radial del cúmulo (derivada de su corrimiento al rojo gracias a la espectroscopía), se puede decir la distancia al cúmulo.

Con esta técnica se alcanzan distancias de 50.000 años-luz, aproximadamente la mitad del tamaño de nuestra galaxia.

### 3.3. - Espectroscopía estelar

Es sabido que a cada color (temperatura) de una estrella corresponde un brillo intrínseco determinado. No se trata de su brillo aparente, que varía con la distancia, sino del brillo tal y como sería observado si viéramos todas las estrellas a la misma distancia (por acuerdo se ha elegido como distancia estándar 10 pársecs). El brillo que presentaría la estrella a esa distancia se conoce como magnitud absoluta. Las magnitudes absolutas correspondientes a cada tipo de estrella (el tipo de estrella se sabe por espectroscopía) han sido determinadas gracias a un muestreo de estrellas cuyas distancias se conocen por el método del paralaje.

Como el brillo de cualquier objeto decrece en función inversa al cuadrado de la distancia, ésta se obtiene fácilmente. (Si el objeto debe brillar cierta cantidad a distancia de 10 pársecs y brilla cuatro

veces menos, es que está el doble de ellos, a 20 pársecs; si brilla nueve veces menos, está el triple de lejos; y si brilla cuatro veces más, es que está a la mitad de distancia, a 5 pársecs.)

Por tanto, la diferencia entre su *brillo intrínseco* (magnitud absoluta) y su *brillo aparente* revela su distancia.

Con este método se ha podido llegar hasta las Nubes de Magallanes.

### 3.4. - Variables RR Lyrae

Las estrellas variables RR Lyrae son un tipo especial de estrella que suele encontrarse en cúmulos globulares. Estas estrellas tienen aproximadamente la misma magnitud absoluta, así que son útiles como indicadores de distancia. Como en el caso anterior, una vez conocida la magnitud aparente (el brillo como se ve la estrella en el cielo) se calcula la distancia, puesto que la magnitud absoluta también la conocemos. (Recordar que la luminosidad decrece de forma continua a medida que aumenta la distancia.)

El principal problema de este método es que este tipo de estrellas no son muy luminosas y por ello son difíciles de encontrar en otras galaxias (hasta 1987 no se había encontrado ninguna en la galaxia de Andrómeda). Otro problema es que sus curvas de luz no son muy estables.

Gracias a este método pudo Harlow Shapley, a principios de siglo, medir por primera vez el tamaño de nuestra galaxia, la Vía Láctea.

## 4. - Métodos extragalácticos

### 4.1. - Nebulosas planetarias

Es un método secundario que se fundamenta en el nuevo y sorprendente descubrimiento de que todas las nebulosas planetarias tienen aproximadamente el mismo brillo intrínseco. Las nebulosas planetarias se forman cuando estrellas de masa comparable a la del Sol se aproximan al fin de su vida.

Este indicador de distancia es aplicable a galaxias cercanas (hasta el cúmulo de Virgo, a unos 50 millones de años-luz.) Particularmente útil para galaxias que tienen poco polvo (elípticas) y en las que por tanto pueden verse fácilmente las nebulosas planetarias.

Sabemos que este método es válido porque se ha medido la distancia a las nebulosas planetarias por otros métodos (el de las Cefeidas y el de Tully-Fisher, que se explican a continuación.)

#### 4.2. - Variables Cefeidas

Las Cefeidas son estrellas jóvenes cuyo comportamiento se conoce muy bien teóricamente. Reciben el nombre de cefeidas en honor de la estrella de cuarta magnitud Delta de Cefeo, prototipo de este tipo de estrella. Son diez mil veces más brillantes que el Sol y tienen la particularidad de que su luminosidad varía periódicamente a lo largo del tiempo (porque se contraen y se dilatan.) Si una estrella es o no una cefeida se sabe analizando su espectro.

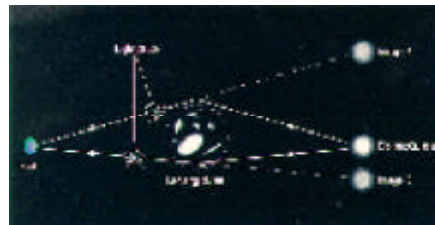
En 1914 Henrietta Leavitt descubrió la correlación entre el periodo y la luminosidad intrínseca de este tipo de estrella. Leavitt observó que cuanto mayor es el periodo de variación mayor es la luminosidad. Este fenómeno se debe a que el brillo es proporcional al área su-

perficial (al dilatarse -más área, más brillo -, y al contraerse a la inversa.)

Como en los casos anteriores, una vez conocida la luminosidad absoluta se compara con la aparente y se obtiene la distancia.

Gracias a que las estrellas de este método es aplicable hasta decenas de millones de años-luz, algo más allá del grupo Local de galaxias (lo más remoto la galaxia M101.)

Este método es otro de los pilares para medir distancias en astronomía, ya que gracias a él se han podido calibrar varios métodos extragalácticos.



**Figura 4. - Gráfico en el que se observa como varía la magnitud absoluta (el brillo) de las variables cefeidas en función de los días que tarda la estrella en completar un periodo (llegar al máximo de brillo, bajar al mínimo y volver al máximo)**

#### 4.3. - Luminosidad de los Cúmulos globulares

Es otro de los métodos secundarios. Su principio es suponer que los cúmulos globulares de dos galaxias distintas son iguales entre sí.

Al ser los cúmulos globulares objetos muy luminosos se reconocen fácilmente en otras galaxias, en especial en las galaxias elípticas gigantes, donde abundan los cúmulos globulares.

Si suponemos esa igualdad, podemos saber el brillo esperado del cúmulo, y comparándolo con el real obtener la distancia.

El primer intento de inferir distancias cósmicas por este método lo hizo William Baum en 1955. Determinó la distancia al cúmulo de Virgo asumiendo que los cúmulos globulares de la galaxia M87 eran de igual brillo a los de M31 (la galaxia de Andrómeda).

Este método es aplicable hasta 160 millones de años luz.

#### 4.4. - Método de Tully-Fisher para galaxias espirales

Tully y Fisher encontraron que hay una correlación entre la velocidad de rotación de una galaxia y su luminosidad (a más brillo mayor velocidad de rotación y viceversa.) Esto viene a decir que la dinámica interna de una galaxia está relacionada con su luminosidad y tamaño. Y aunque no se conoce la razón teórica de este hecho, está bien comprobado que la relación se mantiene en cúmulos de galaxias muy poblados y en galaxias más o menos solitarias.

Gracias a que la velocidad de rotación de galaxias puede medirse a grandes distancias se puede utilizar este método hasta unos 300 millones de años-luz, mucho más allá del cúmulo de Virgo.

Es uno de los indicadores secundarios más precisos que existen. Se ha calibrado a partir del método de las Cefeidas.

#### 4.5. - Supernovas

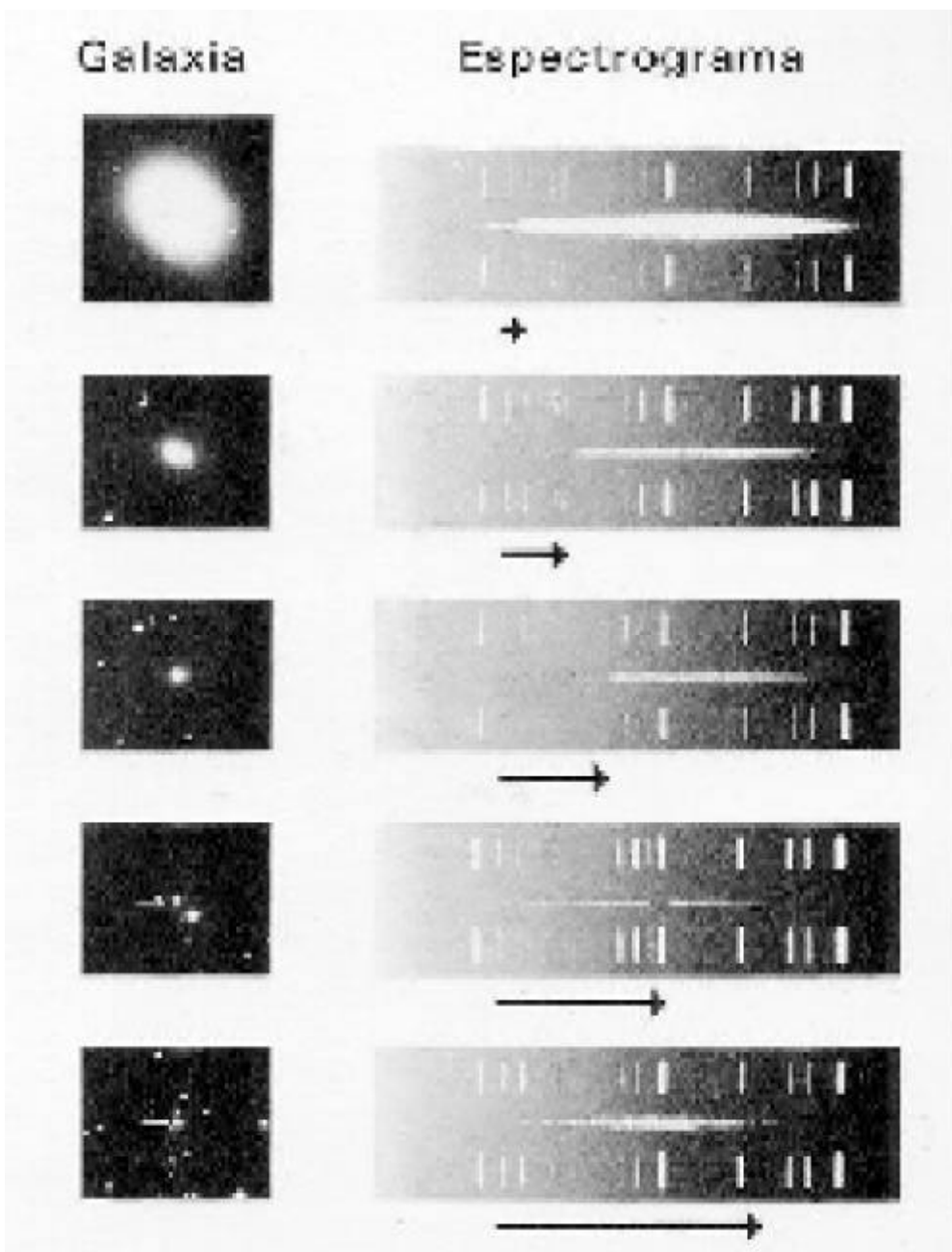
Si hasta ahora hemos sido capaces de medir distancias hasta 300 millones de años-luz, con el método de las supernovas alcanzaremos los 5.000 años-luz (un tercio del tamaño total del universo.)

Cuando mueren cierto tipo de estrellas se produce una explosión violenta, una supernova. En algunos casos la luminosidad de esta supernova rivaliza con la de la galaxia donde está, por lo que puede verse a grandes distancias.

Aunque hay varios tipos de supernovas, los astrónomos han encontrado que todas las de tipo Ia (muerte de enanas blancas por acreción de materia) tienen un espectro similar y siempre alcanzan la misma magnitud absoluta en el máximo de brillo (-18,8), por lo que son luces estándar perfectas. Sin embargo, el método aún no es preciso porque hasta ahora sólo se ha podido estudiar una supernova de este tipo en una galaxia de la que se haya medido su distancia con Cefeidas.

#### 4.6. - Efecto Sunyaev-Zel'dovich

Recibe este nombre en honor de los científicos soviéticos Rasheed A. Sunyaev y Yakov B. Zel'dovich, que hace unos 20 años se dieron cuenta de que cuando los fotones procedentes del fondo cósmico de microondas atraviesan cúmulos galácticos deberían aumentar su energía al chocar con los electrones de plasma caliente (rayos X muy energéticos) que se encuentran en esos cúmulos. De la colisión resultaría una merma del fondo de microondas en la dirección del cúmulo. Este proceso está causado por el efecto Compton inverso. (El efecto Compton se produce cuando un fotón choca con un electrón a baja energía. La radiación resultante de la colisión tiene menor energía - mayor longitud de onda- que la inicial.)



Sabremos la lejanía del cúmulo galáctico por comparación entre las distribuciones de microondas y de rayos X. Para determinar esa distancia, sin embargo, debe también conocerse la densidad media exacta de la disminución de la temperatura del fondo de microondas.

Es una de las técnicas más modernas y, aunque se desconoce su grado de precisión, merece un voto de confianza. Si se confirma su validez podrá llevarnos hasta distancias del orden de la mitad del tamaño del universo.

**Figura 5. - Efecto Sunyaev-Zel'dovich.** La colisión fortuita en los fotones procedentes del fondo de radiación de microondas con electrones en rápido movimiento que han quedado atrapados en cúmulos de galaxias, crea un déficit de longitud de onda larga en el espectro de radiación de microondas. Combinando estos datos con imágenes en rayos X del gas de electrones que hay en esas regiones, se puede estimar la distancia al cúmulo de galaxias.

#### 4.7. - Lentes gravitacionales

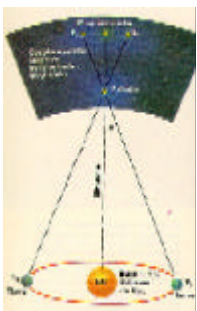
El efecto de lente gravitacional fue predicho por la Teoría General de la Relatividad de Albert Einstein en 1915, aunque las primeras lentes gravitacionales reales no fueron descubiertas hasta 1979. Una lente gravitacional se produce cuando una galaxia masiva curva la luz de un objeto situado detrás, formando una o varias imágenes desplazadas del objeto. (Una lente gravitacional, como su nombre indica, actúa de forma semejante a una lente de cristal.)

Los objetos que más sufren este efecto son los cuásares, por estar muy lejanos (situados detrás de las galaxias), ser muy brillantes y de pequeño tamaño angular, lo que hace que sus imágenes distorsionadas se puedan reconocer fácilmente.

La distancia a la galaxia que produce este efecto de lente se determina a partir de la diferencia en el tiempo de llegada de cada imagen (diferente camino). Para ello el cuasar debe producir destellos, algo que hacen habitualmente.

La primera medida realizada con este método se hizo en 1991. El objeto fue el cuasar (QSO 0957+561) que exhibía una diferencia de tiempo entre parpadeos de un año y medio.

**Figura 6. - Lente gravitacional** formada por un conjunto de galaxias.



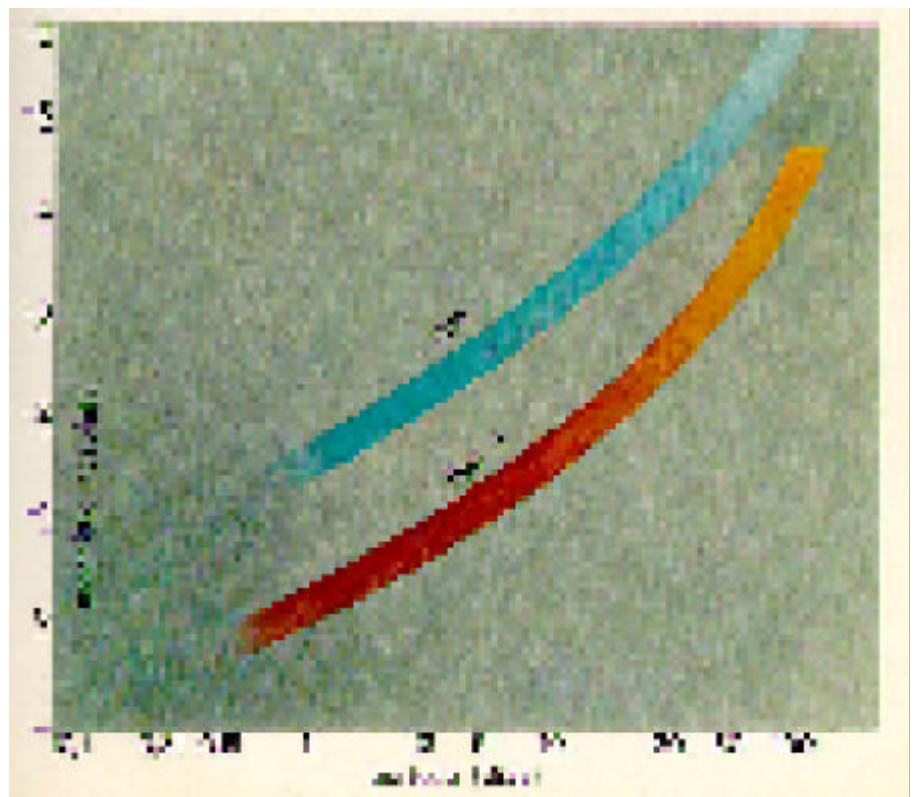
La imagen del cuásar distante se convierte en dos imágenes virtuales.

5. - Constante de Hubble

En 1928, Edwin P. Hubble descubrió que las galaxias se alejaban unas de otras. Tras analizar la luz procedente de esas galaxias también descubrió que las líneas del espectro estaban despla-

zadas hacia el rojo (hacia longitudes de onda mayores) y que lo estaban más cuanto más lejos estaba el objeto. Es decir, las galaxias se alejan unas de otras y lo hacen a mayor velocidad cuanto mayor es la distancia a la que están.

**Figura 7. - Corrimiento al rojo en galaxias.** A mayor distancia mayor velocidad de alejamiento y mayor corrimiento al rojo en la luz que se recibe.



La relación entre la distancia a la que se encuentra la galaxia y la velocidad a la que se aleja es lineal, esto es, proporcional a una constante (la constante de Hubble). Al ser una constante se cumple que a doble distancia doble velocidad de recesión, a triple distancia triple velocidad, y así sucesivamente. Por tanto, una vez se conozca la velocidad de recesión del objeto, si conocemos el valor de la constante de Hubble, podremos saber su distancia.

Conocer la velocidad a la que se aleja una galaxia es fácil (análisis espectroscópico). La dificultad es conocer con exactitud el valor de la constante de Hubble, ya que para determinarla es necesario primero saber la distancia exacta a objetos de los que conozcamos la velocidad de expansión. Es la pescadilla que se muerde la cola. Saber distancias es muy fácil a partir de la ley de Hubble, pero para conocer la constante de Hubble hay

que saber la distancia a algunos objetos que nos permitan calibrarla.

Para que el corrimiento al rojo indique la distancia, la galaxia ha de estar lo suficientemente lejos para que sea aplicable esta técnica. Si la velocidad de recesión del objeto es menor de unos cientos de kilómetros por segundo, no vale la medición a través de la constante de Hubble porque los movimientos aleatorios de las galaxias son

de ese valor y no permiten diferenciar si la velocidad es debida a la expansión del universo o a su propio movimiento local. Es útil a partir de objetos cuya velocidad radial esta dominada por la expansión del universo.

En última instancia, el objetivo final de medir distancias que hemos examinado es determinar la constante de Hubble, porque una vez bien determinada, esta técnica sería la definitiva para hacer medidas de distancias cosmológicas. Por desgracia, el error con el que se conoce aún esta constante es grande (por el error cometido en los métodos de medir distancias.) Mezclando todas las técnicas vistas en este artículo, se llega a un valor de la constante de Hubble de entre 69 y 86 Km/s\* Megaparsec.

#### 6. - Resumen

El esfuerzo por conocer dónde se encuentran las galaxias y demás objetos ha llevado a desarrollar muchos métodos de medir las distancias. El

esfuerzo vale la pena. Cuestiones fundamentales acerca del Cosmos dependen de ello.

Si no conocemos la distancia a la que están los objetos no podremos saber la edad del universo. No podremos saber su historia, ni su pasado ni su futuro. Ni conocer la geometría del espacio (si es plana o tiene curvatura positiva o negativa.) Ni conocer la velocidad a la que se expande el universo.

Cuando sepamos con precisión la distancia a la que se encuentran los cuerpos celestes estaremos en condiciones de decir mucho acerca de cómo y cuando nació el Universo; y cómo y cuándo morirá, tal vez las preguntas más importantes que puede hacerse un ser humano.

#### 7. - Bibliografía

*From Hipparchus to Hipparcos.*  
Catherine Turon. Sky & Telescope.  
July 1997. pp. 28-34.

*Cosmology: all sewn up or coming apart at the seams?* Joshua Roth and Joel R. Primack. Sky & Telescope. January 1996. pp. 20-27.

*The Extragalactic Distance Scale: Agreement at Last?* Paul Hofge. Sky & Telescope. October 1993. pp. 16-21.

*Velocidad de expansión y tamaño del universo.* Wendy L. Freedman. Investigación y Ciencia. Enero 1993. pp. 12-19.

*Los límites del universo.* Conocer. Julio 1985. pp. 44-50 y poster central.

### SOBRE CASI TODO HABLARON...

Un conservador es un hombre demasiado cobarde para luchar y demasiado gordo para huir.

#### **Elbert Hubbard.**

La adulación es como la sombra, no hace al hombre ni mas grande ni mas pequeño.

#### **Proverbio danés.**

Por qué, nos alegramos en las bodas y lloramos en los funerales?. Porque no somos la persona involucrada.

#### **Mark Twain.**

Donde la pobreza entra por la puerta, el amor sale por la ventana.

#### **Proverbio rumano.**

El arte de dirigir, consiste en saber cuando hay que abandonar la batuta para no molestar a la orquesta.

#### **Von Karajan.**

La pintura es poesia muda, la poesia, pintura ciega.

#### **Leonardo da Vinci.**

Todo lo que una persona puede imaginar, otras personas podrán hacerlo realidad.

#### **Julio Verne.**