

## COSMOLOGÍA

Actividades Guiadas

*La constante de Hubble*



**Máster en Astronomía y Astrofísica**  
**Profesor VIU:** Pascual D. Diago Nebot  
**e-mail:** [pascualdavid.diago@campusviu.es](mailto:pascualdavid.diago@campusviu.es)



## Índice

<b>1. Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>1</b>
2.1. Evidencias observacionales del Big Bang . . . . .	1
2.2. Distancias en Cosmología . . . . .	2
<b>3. Tamaños de galaxias</b>	<b>5</b>
<b>4. Tarea para el Portafolios</b>	<b>6</b>
<b>A. Apéndice: Tabla de las galaxias estudiadas</b>	<b>9</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>10</b>



## 1. Objetivo

El objetivo de la actividad es la medida del tamaño físico de galaxias situadas a diferentes distancias (*redshifts*), con el fin de ilustrar la dependencia de la distancia con el valor de la constante de Hubble,  $H_0$ , y la relación entre distancia angular y redshift.

## 2. Introducción

### 2.1. Evidencias observacionales del Big Bang

Dentro del modelo cosmológico aceptado hoy en día (conocido habitualmente como Big Bang, “Gran Explosión”), asumimos que el Universo se encuentra en expansión a partir de un estado inicial de gran densidad y temperatura. Son tres las observaciones principales que sostienen este modelo, todas ellas descubiertas a lo largo del siglo XX:

- *La Ley de Hubble*, enunciada por el astrónomo que le da nombre en 1929. Esta ley observacional afirma que todos los cuerpos libres en el espacio se alejan unos de otros a una velocidad que es directamente proporcional a la distancia entre ellos. La constante de proporcionalidad ( $H$ ) que aparece en la ecuación  $v = H \cdot d$  entre la velocidad y la distancia es la constante de Hubble. Su valor actual (porque, de modo absolutamente equívoco, no es una constante en el tiempo) se denota como  $H_0$ , y su valor actual está entre 50 y 100 kilómetros por segundo por megaparsec.
- *El Fondo Cósmico de Microondas (CMB)*, que es la radiación de fondo que permea el Universo, y es el eco remanente de la altísima temperatura inicial del Universo, que se ha enfriado con la expansión hasta alcanzar el nivel actual de 2,7K. Su casi completa homogeneidad se utilizó desde los años 60 para demostrar su origen, y el nivel de las inhomogeneidades medidas desde 1992 (aproximadamente una parte en

cientmil) coincide con las necesarias para formar las galaxias tal como las vemos hoy, según los modelos de colapso gravitatorio.

- *La Nucleosíntesis Primordial*, que da lugar a las abundancias de los elementos en el Universo primitivo: aproximadamente tres cuartas partes de hidrógeno, una parte de helio, y trazas de elementos como deuterio, litio, o berilio. Los cálculos de física nuclear basados en las condiciones de densidad, presión y temperatura predichos por el modelo reproducen con gran precisión las observaciones.

Un observable básico de la Cosmología es el corrimiento al rojo o *redshift*. Viene dado por la fracción de “estiramiento” hacia el rojo que la luz procedente de un objeto lejano ha sufrido al viajar hacia nosotros. Se representa como  $z$ , y cumple que la relación entre la longitud de onda observada y la original (en reposo) de la radiación es  $\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\text{rep}} \cdot (1 + z)$ . Así, si observamos una línea de emisión a  $3750 \text{ \AA}$  en el espectro de un objeto lejano, y de algún modo la identificamos como correspondiente a la línea Lyman  $\alpha$  del hidrógeno (en reposo a  $1216 \text{ \AA}$ ), podemos determinar un corrimiento al rojo tal que  $3750 = 1216 \cdot (1 + z)$ , es decir  $z = 2,084$ .

Además, se demuestra que el factor  $(1 + z)$  da también la razón entre el tamaño o escala del Universo en un instante del pasado, cuando era más pequeño, y en la actualidad.

## 2.2. Distancias en Cosmología

La definición del concepto de “distancia” es muy difícil en Cosmología. Ello es debido a que el propio espacio se encuentra en expansión continua, y el efecto de esta expansión es diferente para cada tipo de medida que se tome. Una de las definiciones más habituales es la de la **distancia comóvil**, que es la que se obtiene al integrar las distancias infinitesimales que van de un extremo al otro de nuestra “regla de medida”. Para calcularla debe tenerse

en cuenta que la “constante” de Hubble varía según:

$$H = H_0 \cdot E(z), \quad (1)$$

donde

$$E(z) = \sqrt{\Omega_M \cdot (1+z)^3 + \Omega_k \cdot (1+z)^2 + \Omega_\Lambda} \quad (2)$$

siendo  $\Omega_M$ ,  $\Omega_k$  y  $\Omega_\Lambda$  los parámetros que representan la densidad de materia, la curvatura y la energía oscura del Universo, descritos anteriormente.

Con ello se define la distancia comóvil utilizando la integral:

$$D_C(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}. \quad (3)$$

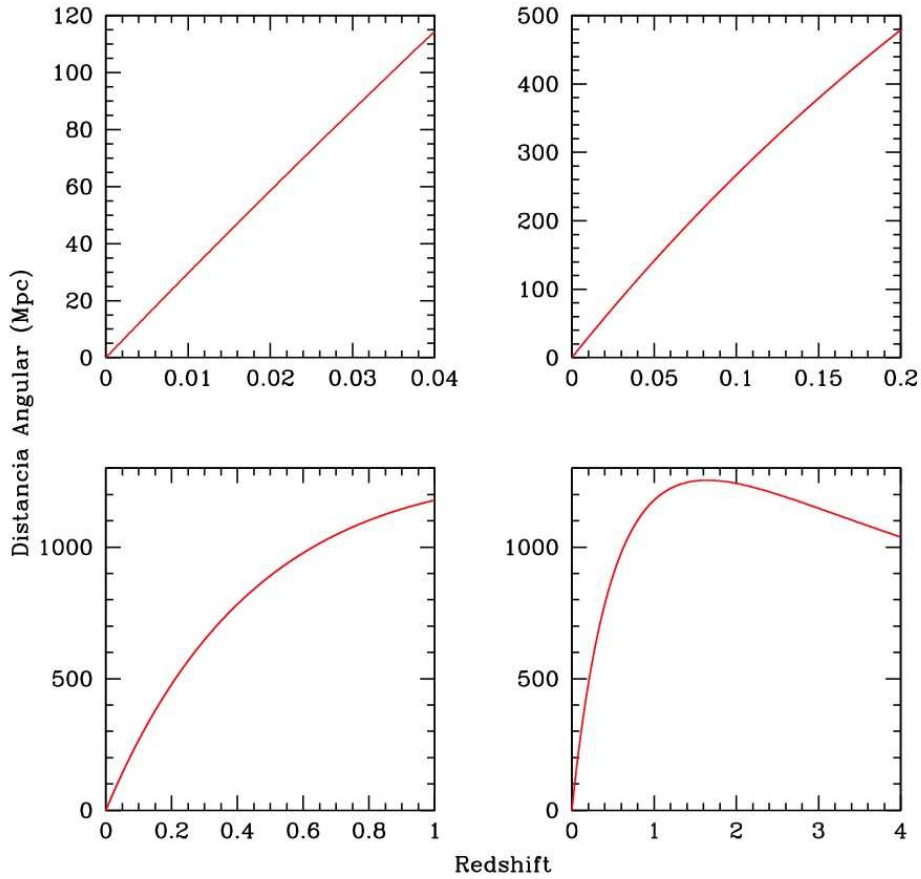
A partir de la distancia comóvil se definen otras, como la **distancia luminosidad**, que es la distancia que relaciona la luminosidad ( $L$ ) y el flujo ( $f$ ):

$$f = \frac{L}{4\pi D_L^2} \quad (4)$$

o la **distancia angular** (o **distancia tamaño angular**), que es la que relaciona el arco o tamaño físico de una galaxia ( $d$ ) y el ángulo con que la observamos ( $\theta$ ):

$$\theta = \frac{d}{D_A}. \quad (5)$$

Se puede probar que estas tres definiciones de distancia cumplen una relación



**Figura 1:** *Distancia angular en función del redshift en cuatro rangos diferentes, para  $H_0 = 100$  km/s/Mpc. Utiliza esta figura para medir  $D_A(z)$  para los valores que necesites.*

simple:

$$D_A(z) \cdot (1 + z) = D_C(z) = D_L(z)/(1 + z). \quad (6)$$

Es posible integrar de modo numérico sencillo la fórmula de la distancia comóvil que acabamos de ver, para el modelo habitual con  $\Omega_M = 0,27$ ,  $\Omega_k = 0$ ,  $\Omega_\Lambda = 0,73$ ,  $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . En la Fig. 1 representamos los valores de  $D_A$  en función de  $z$ . Se puede comprobar que para valores bajos de  $z$  (es decir, para objetos cercanos) la distancia angular crece de modo lineal, pero que posteriormente se separa de esa linealidad. De hecho, para objetos con



$z > 1$  aparece un efecto peculiar: la distancia angular disminuye para objetos cada vez más lejanos. Como el tamaño angular viene dado por la Ec. 5, un objeto parecerá *más grande* cuanto más se aleje de nosotros.

### 3. Tamaños de galaxias

Vamos a medir ahora el tamaño angular de muchas galaxias en el Universo, en cuatro regímenes de distancia diferentes. Utilizaremos los dos grandes cúmulos de galaxias más cercanos a la Tierra (Virgo a redshift  $z = 0,0036$  y Coma a  $z = 0,0231$ ) y un cúmulo algo más lejano (Abell2734 a  $z = 0,0625$ ). A continuación daremos un salto hasta el Universo más lejano observado, utilizando galaxias del *Hubble Deep Field* (HDF).

Antes de comenzar, debes descargarte las imágenes de las cuatro regiones citadas, que te servirán para medir los tamaños de algunas galaxias en cada campo descrito. También deberás abrir la página del “clickable map” del HDF en un navegador. La URL es:

[http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Deep\\_Fields/mirror/hdfn/frindex.html](http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Deep_Fields/mirror/hdfn/frindex.html)

El procedimiento que seguiremos será el siguiente:

1. Usando la herramienta *Aladin* para ver las imágenes de los cúmulos (Virgo, Coma y Abell2734), debes identificar en cada una de ellas cinco galaxias que forman parte del cúmulo. ¿Cómo las reconoceremos? Es fácil para las más grandes, pues los cúmulos suelen estar dominados por una o dos galaxias gigantes que ocupan su centro. No es evidente para el resto, pero puedes elegir algunas que tengan tamaños parecidos y que aparenten estar a la misma distancia. Para cada una de ellas debes medir su posición (X, Y) y su tamaño en píxeles en la imagen.
2. En el caso del HDF no se cumple en absoluto que todos los objetos estén a la misma distancia. En este caso deberás elegir al menos 15 objetos de tipos y tamaños variados, y utilizar el “clickable map”, que

proporciona información sobre las galaxias con solo pulsar sobre su imagen. Para cada una de las galaxias que selecciones deberás anotar su posición (X,Y), redshift (espectroscópico si existe, fotométrico en caso contrario), y tamaño en píxeles.

3. A continuación debes convertir el tamaño de cada galaxia a segundos de arco en el cielo, utilizando la escala dada en la Tabla 1, que relaciona píxeles y escala angular en el cielo. Apunta también el *redshift* de cada galaxia, teniendo en cuenta que todos los objetos de un cúmulo están (aproximadamente) al mismo  $z$  del cúmulo, dato que ya se ha mencionado.
4. Utilizando ahora los datos presentados en la Fig. 1, o el fichero en columnas con los datos de la Fig. 1, puedes escribir la distancia angular que corresponde al redshift de cada galaxia ( $D_A(z)$ ).

**Tabla 1:** *Tamaños de placa*

<b>Imagen</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Escala</b>
Virgo	60' × 60'	4"/pix
Coma	60' × 60'	4"/pix
Abell 2734	30' × 30'	2"/pix
HDF	3' × 3'	0.1"/pix

5. Con ello es fácil convertir el tamaño de cada galaxia medido en segundos de arco en una escala física en kiloparsecs empleando la Ec. 5. **Atención a las unidades:** El ángulo  $\theta$  debe escribirse en radianes ( $2\pi$  radianes equivalen a 360 grados). Para los tamaños de galaxias conviene convertir los Mpc a kpc, son más adecuados).

#### 4. Tarea para el Portafolios

- Una vez que completes los cálculos anteriores tendrás una estimación del tamaño físico de cada una de las galaxias que has observado. ¿Cómo se comparan esos valores con los de las galaxias cercanas incluidos en la Tabla 2? Ten en cuenta a la hora de obtener la comparación que tanto Andrómeda como la Vía Láctea son galaxias grandes, pero no

tan grandes como las galaxias centrales típicas en los cúmulos. Por su parte, las Nubes de Magallanes son galaxias enanas.

- Posiblemente encuentres que los tamaños calculados son razonables. Pero piensa que al inicio de la práctica comentamos que la distancia escalaba con el valor de  $H_0$ , de modo que todos los tamaños que has calculado son inversamente proporcionales a  $H_0$ . En todos nuestros cálculos hemos usado  $H_0 = 100$ . ¿Qué ocurriría si  $H_0 = 25$ ? ¿Y si  $H_0 = 500$ ? Discute los resultados.
- Intenta definir un rango de valores de  $H_0$  permitido por tus medidas. ¿Qué valores de  $H_0$  son los permitidos por el ejercicio? Comprueba con algún libro de texto la calidad de tu medida en comparación con las que se obtienen en la actualidad por métodos mucho más complejos.

**Tabla 2:** *Datos de algunas galaxias cercanas*

<b>Galaxia</b>	<b>Diámetro (kpc)</b>
M31 (Andrómeda)	40
Vía Láctea	30
M33 (satélite de M31)	15
Nube Mayor de Magallanes	9
Nube Menor de Magallanes	5

Recuerda que la tarea se ha de entregar en formato pdf y que las rúbricas de evaluación se pueden consultar en la sección *Guía Didáctica* del Campus Virtual.

**Créditos:** Esta actividad está basada en la práctica *Medida de la constante de Hubble*, realizada por el Dr. Alberto Fernández-Soto para el Laboratorio de Fundamentos de Astronomía y Astrofísica de la Universitat de València.

A. Apéndice: Tabla de las galaxias estudiadas

Imagen	Posición (X,Y)	Tamaño (pixels)	Tamaño (arcsec)	Redshift	Tamaño (kpc, $H_0 = 100$ )	Notas Tipo
Virgo Virgo Virgo Virgo Virgo						
Coma Coma Coma Coma Coma						
ABELL2734 ABELL2734 ABELL2734 ABELL2734 ABELL2734						
HDF HDF HDF HDF HDF						
HDF HDF HDF HDF HDF						
HDF HDF HDF HDF HDF						
HDF HDF HDF HDF HDF						

## Bibliografía

Cepa, J.: 2007, *Cosmología Física*, Akal

Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., y Donner, K.: 2007, *Fundamental Astronomy, Fifth Edition*, Springer-Verlag

Martínez, V., Miralles, J., Marco, E., y Galadí-Enríquez, D.: 2005, *Astronomía Fundamental*, Publicacions de la Universitat de València

Software, ALADIN, *está disponible en <http://aladin.u-strasbg.fr/>. Es software libre mantenido por el Centre de Données astronomiques de Strasbourg.*

UDS/CNRS: 1999, *The ALADIN User Manual, disponible en la web <http://aladin.u-strasbg.fr/>*