

II - Desplazamiento hacia el rojo (Redshift). Ley de Hubble y expansión del Universo.

Javier Zorzano

Departamento de Física Aplicada a la Ingeniería Industrial

U.P.M.

Setiembre 2008

1	Desplazamiento hacia el rojo (Redshift)	2
2	El efecto Doppler.....	2
2.1	Doppler clásico.....	2
2.1.1	Redshift 'z'	3
2.2	Doppler relativista.....	3
2.3	Redshift gravitatorio.....	4
3	La Ley de Hubble y el 'redshift' cosmológico.....	4
3.1	La ley de Hubble.....	4
3.1.1	El factor h de incertidumbre en H_0	6
4	La expansión del Universo.....	7
4.1	La expansión del espacio.....	7
4.2	Notas a la expansión del espacio.....	8
4.3	La expansión y el Principio Cosmológico.....	8
5	Magnitudes características de la expansión.....	9
5.1	Tiempo y radio de Hubble.....	9
5.2	El factor de escala $a(t)$	9
5.3	El marco 'comóvil'	10
5.4	El efecto sobre la temperatura.....	11
6	Alternativas a la expansión.....	12
6.1	La hipótesis de la expansión.....	12
6.2	'Tired Light'. Luz cansada.....	12
6.3	Redshift intrínseco. La hipótesis de Arp.....	13
6.4	El efecto Compton.....	13
7	Métodos de determinación de la constante de Hubble.....	14
7.1	La importancia de la determinación del parámetro de Hubble.....	14
7.2	Discrepancias y dificultades.....	15
7.3	Dos tipos de métodos: relativos y directos.....	15
7.4	1°.- Métodos de medición relativa de distancias. El proyecto del telescopio espacial Hubble. (HST key project).....	16
7.4.1	Los 5 indicadores secundarios.....	16
7.4.2	Valores obtenidos.....	17
7.4.3	Incertidumbres en las medidas.....	17
7.4.4	Otros métodos de medición relativa de distancias.....	18
7.5	2°.- Métodos de Física Fundamental.....	18
7.5.1	El método del ^{56}Ni radiactivo para la determinación de H_0 usando Supernovas Tipo Ia.....	18
7.5.2	Método de la expansión de la fotosfera.....	18
7.5.3	El efecto Sunyaev-Zeldovich.....	18
7.5.4	Lentes gravitacionales de cuasars.....	19
7.6	Conclusiones sobre H_0	20

1 Desplazamiento hacia el rojo (Redshift)

El desplazamiento hacia el rojo (redshift) es un fenómeno muy importante tanto en cosmología como en astrofísica. Se produce cuando la radiación electromagnética que ha sido emitida o reflejada por un objeto se desplaza hacia la zona menos energética del espectro, esto es hacia longitudes de onda mayores. Se pueden aducir diversas causas para explicar el fenómeno.

2 El efecto Doppler

En 1842 Christian Doppler ofreció la primera explicación física del fenómeno del desplazamiento de la frecuencia de las ondas debido al movimiento de la fuente o del receptor. Originalmente se aplicó a ondas sonoras, pero el mismo Doppler predijo que podría aplicarse a todas las ondas. En 1848 Fizeau comprobó el desplazamiento Doppler en las líneas espectrales de las estrellas y en 1868 Huggins calculó en base al mismo la velocidad de una estrella respecto a la tierra. En 1871 se observó la rotación solar aplicando el efecto Doppler sobre las líneas de Fraunhofer. Y en 1901 Belopovsky observó el efecto en laboratorio usando espejos giratorios. Fue Slipher quien en 1912 descubrió que la mayor parte de las ‘nebulosas’ espirales presentaban considerables desplazamientos al rojo.



2.1 Doppler clásico

La fórmula del efecto Doppler clásico

$$f_r = \frac{v \pm v_r}{v \pm v_e} f_e \quad [2.1]$$

se convierte en el caso particular en que la onda sea electromagnética y que el receptor sea la Tierra en:

$$f_r = \frac{c}{c \pm v_e} f_e, \quad [2.2]$$

siendo f_e y f_r las frecuencias de emisión y recepción, v_r y v_e las velocidades del emisor y el receptor y v y c las velocidades de una onda en general y una onda electromagnética en particular. Expresado en longitudes de onda el efecto Doppler es para este caso:

$$\lambda_r = \frac{c \pm v_e}{c} \lambda_e = \left(1 \pm \frac{v_e}{c}\right) \lambda_e \quad [2.3]$$

El signo + expresa que el emisor se aleja de la Tierra, lo que supone un desplazamiento hacia el rojo (redshift) y el signo – que el emisor se acerca a nosotros, lo que significa un desplazamiento hacia el azul (blueshift). En adelante y mientras no se indique lo contrario suponemos que las fuentes se separan de nosotros, por lo que utilizaremos las fórmulas correspondientes al ‘redshift’.

Por ejemplo el cúmulo de galaxias de Virgo se aleja de nuestra Galaxia a $\sim 10^3$ km/s lo que se traduce en que la longitud de onda λ_r para cualquier línea espectral del cúmulo de galaxias de Virgo es 1,0033 veces mayor que su λ_e normal de emisión.

2.1.1 Redshift 'z'

Se define el redshift 'z' como:

$$z \equiv \frac{\lambda_r - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} \quad [2.4]$$

con lo que utilizando la expresión de Doppler clásica [2.3] se obtiene:

$$1 + z = \frac{\lambda_r}{\lambda_e} = 1 + \frac{v_e}{c} \quad [2.5]$$

2.2 Doppler relativista.

En Relatividad Especial, utilizando la transformación de Lorentz, se obtiene para el efecto Doppler, en el caso de 'redshift', las expresiones:

$$f_r = \sqrt{\frac{1 - v_e/c}{1 + v_e/c}} f_e \quad \lambda_r = \sqrt{\frac{1 + v_e/c}{1 - v_e/c}} \lambda_e$$

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v_e/c}{1 - v_e/c}} = \left(1 + \frac{v_e}{c}\right) \gamma \quad [2.6]$$

siendo $\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}}$ el factor de la transformación de Lorentz.

Estas fórmulas fueron comprobadas experimentalmente en 1938 por Ives y Stilwell.

Como se ve en la expresión anterior, la corrección relativista γ es independiente de la orientación del emisor, y es función solamente del módulo de su velocidad. Sin embargo la 'parte clásica' de la expresión depende de la proyección del movimiento de la fuente sobre la línea de visión observador-fuente, y será diferente para diferentes orientaciones.

Ahora bien, en la Relatividad Especial aparece también un Doppler 'transversal', esto es un desplazamiento Doppler para movimientos perpendiculares a la línea que une emisor y receptor, con valor:

$$f_r = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} f_e = \frac{f_e}{\gamma} \quad \lambda_r = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \lambda_e = \gamma \lambda_e$$

$$1 + z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \quad [2.7]$$

Ambas expresiones Doppler, longitudinal y transversal, pueden resumirse en la fórmula:

$$1 + z = \frac{1 + \frac{v \cos \theta}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(1 + \frac{v \cos \theta}{c}\right) \gamma \quad [2.8]$$

donde θ es el ángulo de la proyección del movimiento de alejamiento de la fuente, sobre la línea de visión del observador a la fuente. Nótese en la fórmula, que aunque la fuente se moviera hacia el observador podría compensarse su desplazamiento hacia el azul con el desplazamiento hacia el rojo debido al movimiento transversal y dar como resultante un ‘redshift’.

2.3 Redshift gravitatorio

En Relatividad General, en un pozo gravitatorio, existe también una ‘dilatación’ del tiempo. Este es un fenómeno bien conocido: el ‘redshift’ gravitacional. Precisamente este ‘redshift’ de las líneas espectrales debido a la gravitación es uno de los tests de la Relatividad General y tiene amplio uso en Cosmología y Astrofísica.

3 La Ley de Hubble y el ‘redshift’ cosmológico

3.1 La ley de Hubble

Las interpretaciones iniciales de los redshifts y blueshifts de los objetos interestelares, más allá de la Vía Láctea, se basaron exclusivamente en la idea de que el desplazamiento se debía al efecto Doppler.

En un universo estático las galaxias deberían moverse aproximadamente al azar, pero las primeras observaciones de las galaxias habían mostrado que las líneas espectrales atómicas de longitudes de onda conocidas exhibían un ‘redshift’ sistemático que mostraba que las galaxias se alejaban de nosotros con velocidad $v = cz$, lo que estaba de acuerdo con [2.5]



En los años 20 del pasado siglo, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble emprendió el proyecto de medir la distancia a las ‘nebulosas’ espirales, tal como entonces se llamaban, y en las que ya había observado Slipher un desplazamiento hacia el rojo. Utilizando el telescopio de 100 pulgadas de Monte Wilson midió los redshifts de 18 galaxias espirales (aunque curiosamente la más cercana de todas ellas, Andrómeda, ofrecía un blueshift). El método que utilizó para medir las distancias a las galaxias fue el de calcular las distancias a aquellas estrellas variables del tipo ‘cefeidas’ que poseen las galaxias. (Las cefeidas se llamaban así porque la estrella Delta Cefeida era el miembro mejor conocido de esta clase, aunque no la más cercana, que lo es la estrella Polar). Las **cefeidas variables** tienen la propiedad de que su período de variación, normalmente entre 10 y 100 días, está correlacionado con su luminosidad absoluta. Midiendo la luminosidad aparente y el período de una cefeida se puede determinar su luminosidad

absoluta y por tanto su distancia $l = \frac{L}{4\pi r^2}$.

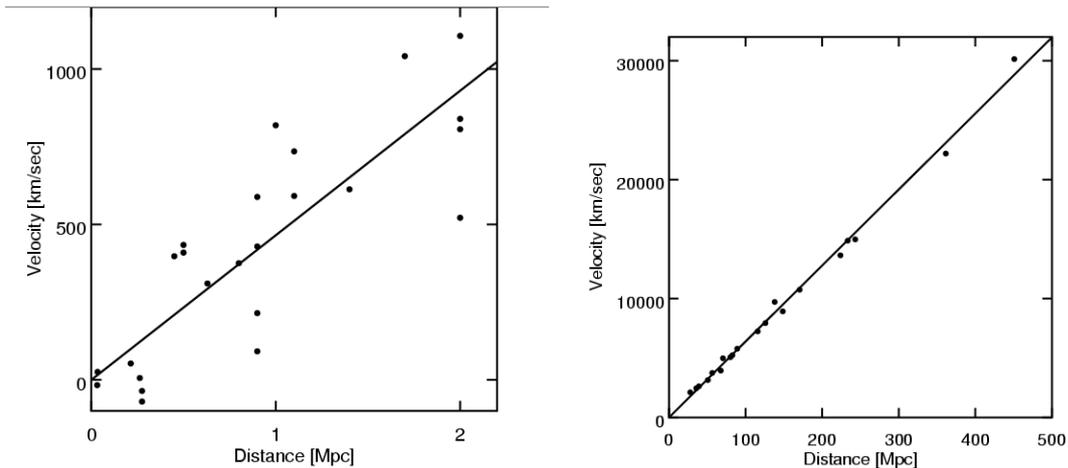
Hubble aplicó este método en 1929 a galaxias cercanas, descontó la contribución del movimiento solar a la velocidad radial y comprobó una relación aproximadamente lineal entre el redshift y la distancia

$$z = \frac{H_0}{c} d \quad [3.1]$$

Donde H_0 es una constante, c es la velocidad de la luz y d la distancia a la galaxia. Como para velocidades pequeñas ($v \ll c$) el redshift Doppler es, según [3.5], $z = v/c$ se obtiene que:

$$\boxed{v = H_0 d} \quad [3.2]$$

La conclusión es que cuanto más lejos están las galaxias de la Tierra, más rápidamente se alejan de ella. Esta es la famosa Ley de Hubble y la constante H_0 es conocida como constante de Hubble. En realidad se trata de un parámetro: **el parámetro de Hubble $H(t)$** . Los valores actuales se indican normalmente con el subíndice 0.



Hubble: datos de 1929 y datos con supernovas SNIa en 1998

El valor original que Hubble asignó a H_0 fue de aproximadamente 500 km/s/Mpc, donde

$$1 \text{ Mpc (megaparsec)} = 10^6 \text{ pc (parsec)} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ años luz.}$$

Ahora bien, si las galaxias se alejaban de nosotros a esa velocidad eso implicaba que el universo tendría una edad de $\sim 10^9$ años, en abierta contradicción con las estimaciones geológicas de la edad de la Tierra, de $\sim 10^{10}$ años. Este fue el primer gran **problema de 'edad'** para la Cosmología: el universo no podía ser más joven que sus constituyentes. Posteriormente se descubrió que en realidad existían dos tipos distintos de cefeidas, que Hubble había mezclado, y una vez que se tuvo en cuenta esta discrepancia la constante de Hubble cayó por debajo de los 100 km/s/Mpc con lo que se solucionaba el problema de momento.

3.1.1 El factor h de incertidumbre en H_0

Posteriormente veremos otros muchos métodos para medir H_0 llegando a distancias enormemente mayores. En Cosmología se utiliza normalmente un factor h para estimar la incertidumbre sobre el valor de H_0 :

$$h \equiv \frac{H_0}{100}, \quad [3.3]$$

cuando se usan las unidades estándar para H_0 de km/s/Mpc.

Así por ejemplo, si una galaxia tiene una velocidad de recesión de 1500 km/s su distancia será de $15/h$ Mpc.

Como ya veremos, la mejor estimación actual de H_0 es para $h = 0,705$ con lo que $H_0 = 70,5 \pm 1,3$ km/s/Mpc

El parámetro de Hubble tiene dimensiones de la inversa del tiempo. La conversión es simple:

$$H_0 = h \text{ 100 km / s / Mpc} = h \frac{10^7 \text{ cm / s}}{3,085678 \times 10^{24} \text{ cm}} = h \text{ 3,2} \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} = h \frac{1}{9,78 \times 10^9 \text{ años}}$$

4 La expansión del Universo

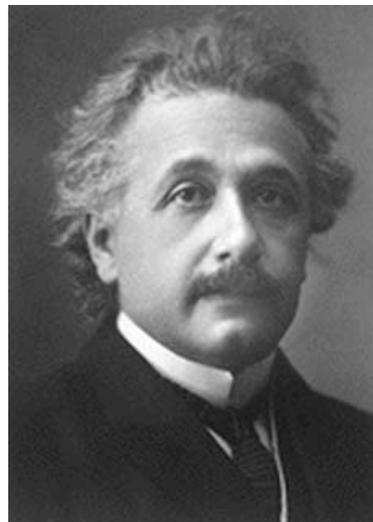
4.1 La expansión del espacio

En realidad la ley de Hubble [3.2] afirma simplemente que el redshift de la luz que proviene de una galaxia distante es proporcional a su distancia. Su interpretación vía Doppler u otros efectos es un tema distinto.

Los teóricos comprobaron inmediatamente que estas observaciones podían ser explicadas por un mecanismo distinto para producir el redshift. Estas observaciones corroboraban el trabajo de Alexander **Friedmann**, que en 1922 había establecido las famosas ecuaciones que llevan su nombre, un conjunto de ecuaciones que gobierna la expansión del espacio en modelos homogéneos e isotrópicos del universo dentro del contexto de la Relatividad General. En estos modelos el espacio-tiempo es dinámico; el universo no es estático: o bien se expande o bien se contrae. La ley de Hubble que correlacionaba los redshifts y las distancias era precisamente la requerida por esos modelos de cosmología derivados de la relatividad general, los modelos con métrica FRW (Friedmann-Robertson-Walker).

Esta se considera, aún hoy en día, la primera base observacional para el paradigma de la expansión del espacio y es la evidencia más citada en soporte de **la teoría del Big Bang**. Esta idea difiere de la interpretación del redshift vía efecto un Doppler puro, en que los fotones aumentan su longitud de onda y su redshift conforme se expande el espacio a través del cual viajan.

En cualquier caso la ley de Hubble era exactamente la que debería esperarse de las ecuaciones de Friedmann. La expansión del universo, predicha y rechazada a su vez por Einstein, había sido detectada y observada solo unos pocos años después del establecimiento de la Relatividad General. Einstein hasta entonces había creído en un universo estático. Para rechazar la idea de un universo en expansión había tenido que introducir en sus ecuaciones la llamada **constante cosmológica**. Cuando en 1929 conoció las observaciones de Hubble, Einstein quedó consternado. Posteriormente se refirió a esta introducción como ‘el mayor error de su vida’. Sin embargo la historia ha vuelto a darle la razón tras el reciente descubrimiento de la ‘aceleración’ en la expansión del universo, que se explica precisamente mediante la introducción de la constante cosmológica.



4.2 Notas a la expansión del espacio

- La expansión afecta a las longitudes de onda de la radiación y a las distancias entre galaxias, pero no afecta a las dimensiones y a las distancias internas de los cuerpos unidos gravitacionalmente, tales como el Sistema solar, la Vía Láctea u otras galaxias.
- Las galaxias no se alejan simplemente de nosotros mediante una velocidad física en la dirección radial del observador, sino que es el espacio intermedio el que se está expandiendo de acuerdo con la isotropía a gran escala que exige el Principio Cosmológico. Para redshifts de $z < 0,1$ los efectos de la expansión espaciotemporal son mínimos y los redshifts observados están dominados por las velocidades peculiares de movimiento de cada galaxia en su relación unas con otras; esto causa redshifts y blueshifts adicionales, esta vez sí, por efecto Doppler.
- Los redshifts por efecto Doppler obedecen las leyes de la Relatividad Especial que impide que ningún objeto pueda moverse más rápido que la velocidad de la luz en el vacío. Así que para ellos $v > c$ es imposible. Pero en el caso de los redshifts cosmológicos $v > c$ es posible porque es el espacio que separa los objetos (por ejemplo un quasar en relación con la Tierra) el que puede expandirse más rápido que la velocidad de la luz. El espacio, como no está compuesto de ningún objeto, de ningún material, no está sujeto al límite máximo de la velocidad de la luz. Matemáticamente el punto de vista de que 'las galaxias lejanas se alejan' y el punto de vista de que 'el espacio entre las galaxias se está expandiendo' están relacionados por sistemas de coordenadas que cambian, lo que requiere trabajar con la métrica FRW
- La expansión aparece como si todos los objetos astronómicos estuvieran alejándose de nosotros y nosotros estuviéramos en el centro del Universo. Pero el Principio Cosmológico no permite ese centro y por tanto cada observador, sin tener en cuenta su posición, tiene que tener la misma impresión respecto al Universo. La recesión observada es realmente una expansión general

4.3 La expansión y el Principio Cosmológico

Como a menudo ocurre en ciencia esta relación puede tomarse en ambos sentidos. Hubble al observar la proporcionalidad entre las distancias de las galaxias y sus velocidades de recesión estaba verificando indirectamente el Principio Cosmológico. Pero, a su vez y de forma contraria, podemos partir a priori del Principio Cosmológico fundamentándolo en razonamientos más básicos y deducir de él la proporcionalidad entre distancia y velocidad. De esta forma, por medio de mediciones relativamente fáciles de los desplazamientos Doppler podríamos encontrar las distancias de objetos muy lejanos a partir de sus velocidades.

En efecto, el campo de velocidades [3.2]: $\vec{v} = H_0 \vec{r}$, tiene una propiedad muy importante: que *su forma se mantiene inalterada a través de cualquier rotación o traslación del sistema de coordenadas*. A esta propiedad en las transformaciones se le llama **isomorfismo**. El isomorfismo bajo rotaciones es obvio. Para ver el isomorfismo bajo traslaciones consideremos las observaciones hechas por un astrónomo en la galaxia

A, situada en la posición \vec{r}_A y con una velocidad $\vec{v}_A = H_0 \vec{r}_A$ relativas a nosotros. Los astrónomos en A medirían las posiciones y velocidades de otra galaxia relativas a ellos mismos como \vec{v}' y \vec{r}' . La relación de estos últimos valores con las posiciones \vec{r} y velocidades \vec{v} de esa otra galaxia relativas a nosotros sería:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{r}_A \quad \text{y} \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_A.$$

Ahora bien:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_A = H_0 \vec{r} - H_0 \vec{r}_A = H_0 (\vec{r} - \vec{r}_A) = H_0 \vec{r}'$$

con lo que los astrónomos en A verían la misma ley de Hubble que nosotros vemos.

Así, aunque veamos que todas las galaxias se alejan de nosotros, esto no significa que nosotros estemos en el centro de la expansión. Los observadores en otra galaxia verían exactamente lo mismo. La ley de Hubble no define un centro para el universo. Se mantiene el Principio Cosmológico. Y sin embargo otras formas para la relación velocidad – distancia sí definirían un centro para la expansión. Por ejemplo, ni una velocidad constante $\vec{v} = v_0 \vec{u}_r$, ni una ley cuadrática $\vec{v} = Q r^2 \vec{u}_r$ son isomórficas bajo traslaciones.

Al usar el Principio Cosmológico para derivar la relación entre velocidades galácticas y las distancias hemos usado la típica regla de adición de velocidades. En la época de Hubble en 1929, esto no suponía problema alguno ya que $v \ll c$, ninguna de las galaxias conocidas tenía una velocidad cercana a la velocidad de la luz. Pero cuando se trabaja realmente con las grandes distancias características del Universo como un todo se debe utilizar un marco teórico capaz de contar con velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

5 Magnitudes características de la expansión

5.1 Tiempo y radio de Hubble

El parámetro de Hubble, como se ve en la propia ley [3.2], tiene la dimensión del inverso del tiempo. Así que una escala temporal característica para la expansión del universo es el llamado ‘Tiempo de Hubble’:

$$t_H = \frac{1}{H_0} \quad [5.1]$$

Y una escala característica de la dimensión espacial del Universo es el ‘Radio de Hubble’:

$$r_H = c t_H \quad [5.2]$$

Una radiación viajando a la velocidad de la luz alcanzaría r_H en un tiempo t_H .

5.2 El factor de escala $a(t)$

Consideremos el redshift cosmológico de los fotones. Normalmente, si lo hubiéramos atribuido al efecto Doppler hubiéramos interpretado la ley de Hubble, que los objetos lejanos se alejan a velocidad $v = H r$, diciendo que los fotones que emite el objeto son desplazados hacia el rojo debido a la velocidad de la fuente. Pero la manera de ver el

mismo efecto mediante la expansión del espacio es que debido a ella la longitud de onda de un fotón aumenta con un factor de escala $a(t)$ de forma que $\lambda \propto a(t)$. De esta forma cuando el Universo se expande, un fotón propagándose por el espacio se desplaza a longitudes de onda cada vez mayores.

El redshift z de un fotón está dado en consecuencia, a través de [2.5], por la relación entre el factor de escala a_0 hoy y el factor de escala a_{em} en el momento en que fue emitido:

$$\boxed{1 + z = \frac{a_0}{a_{em}}} \quad [5.3]$$

Aun siendo desconocidas e inconmensurables las dimensiones propias del Universo, pueden expresarse las relaciones entre las distancias en términos del factor de escala $a(t)$. Normalmente se toma para la época actual $a(t_0) = a_0 = 1$.

La tasa de cambio del factor de escala puede identificarse (hasta las derivadas de primer orden) con el parámetro de Hubble

$$\boxed{H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}} \quad [5.4]$$

5.3 El marco 'comóvil'

El desplazamiento hacia el rojo debido a la expansión se aplica también a otras partículas además de a los fotones. Un cuerpo con masa que se mueva con relación al propio espacio en expansión, y que tenga una cierta cantidad de movimiento p , sufrirá también, debido a la expansión, un 'desplazamiento al rojo', un 'redshift', sobre su cantidad de movimiento

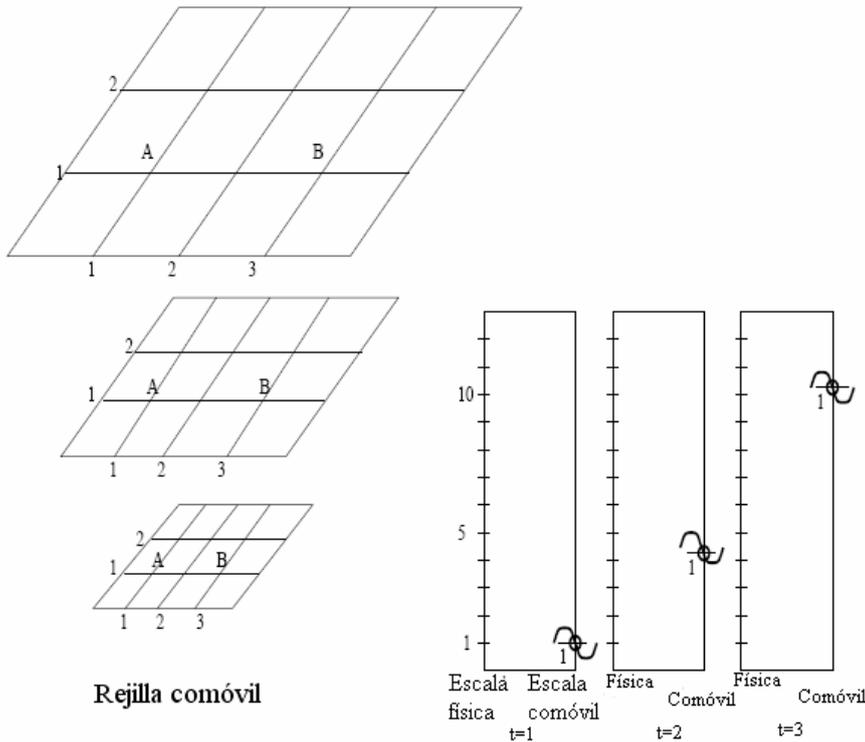
$$p \propto \frac{1}{a(t)} \quad [5.5]$$

Llegamos entonces a una consecuencia notable: *los cuerpos en movimiento libre en un universo en expansión alcanzarán con el tiempo el reposo relativo al sistema de coordenadas en expansión, el llamado marco 'comóvil'*. La expansión del Universo crea por tanto una especie de fricción dinámica para todo lo que se mueva en él. Por esta razón es por la que conviene definir un sistema de variables comóviles sobre las que se afecte la expansión como un factor exterior.

La distancia física $R(t)$ entre dos puntos en el espacio en expansión es proporcional a $a(t)$. Pues bien, definimos la **distancia 'comóvil'**, constante en el tiempo, entre esos dos puntos, como:

$$x_{com} \equiv \frac{R_{fis}(t)}{a(t)}$$

$$\boxed{R_{fis}(t) = a(t) x_{com}} \quad [5.6]$$



De forma similar podemos definir la longitud de onda comóvil de un fotón como:

$$\lambda_{com} = \frac{\lambda_{fis}}{a(t)}$$

y la cantidad de movimiento comóvil como:

$$p_{com} = p_{fis} a(t)$$

5.4 El efecto sobre la temperatura.

Esta pérdida de energía con la expansión tiene un efecto predecible en los sistemas en equilibrio térmico. Si tomamos un conjunto de partículas, por ejemplo fotones con la distribución térmica de un cuerpo negro, en equilibrio térmico con temperatura T , los momentos de todas esas partículas decrecerán linealmente con la expansión y el sistema se enfriará. Si un sistema comienza a expandirse con una distribución de cuerpo negro, se mantendrá con esa misma distribución durante la expansión, pero su temperatura bajará. Para un gas en equilibrio térmico la temperatura, decrecerá con la energía, será inversamente proporcional al factor de escala

$$\boxed{T(t) \propto \frac{1}{a(t)}} \quad [5.7]$$

La temperatura actual del Universo es de $2,725 \pm 0,005$ K. Puesto que se ha estado enfriando con la expansión, podemos sacar la conclusión de que el universo primitivo tuvo que haber tenido una temperatura mucho más alta. Este es el marco de la representación de la 'gran explosión caliente' (el '**Hot Big Bang**'): un universo muy caliente expandiéndose en equilibrio térmico y enfriándose con el tiempo.

Nótese que aunque el Universo tuviera en la singularidad del Big Bang una temperatura infinita y una densidad infinita, no tendría por qué tener necesariamente dimensión nula. Por ejemplo un universo plano puede ser infinito espacialmente, una infinitésima fracción de tiempo después de un Big Bang, que ocurra simultáneamente en todas las partes del espacio infinito. El universo observable tiene un horizonte cuya dimensión tiende a cero cuando $t = 0$, pero el universo observable representa solamente una pequeña región del espacio total.

6 Alternativas a la expansión

6.1 La hipótesis de la expansión

El mismo Hubble tenía sus dudas sobre la expansión. En 1934 escribía "...el universo continuamente expandiéndose...me parece más bien dudoso" "...si se quitara el factor de la recesión, si los desplazamientos al rojo no fueran debidos a velocidades, el cuadro sería simple y plausible. No hay evidencia de expansión y no hay restricción de la escala temporal, no hay trazas de curvatura espacial y no hay limitaciones a las dimensiones espaciales"

¿En qué se basa esta arriesgada suposición de la expansión del Universo? Porque no hay ninguna evidencia científica directa sino que más bien se trata de una inferencia. Hay algunas ideas básicas que pueden explicar la aparición de esa hipótesis.

- Nuestra visión antropomórfica de todo lo que nos rodea. Creemos que si no podemos ver, oír, sentir, oler, gustar algo...es que no existe. De acuerdo con esa idea el espacio intergaláctico está vacío, es un hueco. Un vacío impide cualquier posibilidad de interacción de la luz con un medio intergaláctico y por eso provoca la arriesgada suposición de la expansión.
- Nuestra falta fundamental de conocimiento de la física.
- El argumento de la navaja de Occam "lo que puede hacerse con pocas suposiciones es vano el hacerlo con más".

6.2 'Tired Light'. Luz cansada

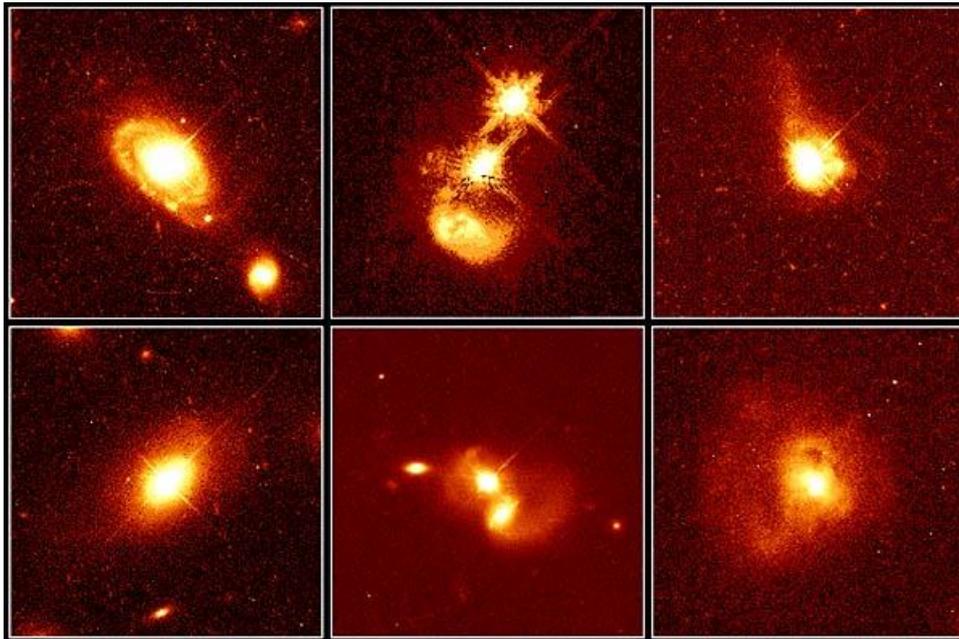
Las teorías de 'luz cansada' no operan sobre las premisas de que el 'redshift' sea causado por el efecto Doppler o por la expansión del Universo. El concepto fue propuesto en 1929 por el astrónomo suizo Fritz Zwicky quien sugirió que los fotones perdían energía con el tiempo mediante su interacción con la materia, con otros fotones o mediante algún nuevo y desconocido fenómeno físico. Incluso llegó a predecir una temperatura de 2,8 °K para la radiación de fondo cósmico.

Se han propuesto algunos modelos tratando de explicar tanto el redshift cosmológico como los de las líneas espectrales solares o los redshifts anómalos de estrellas. Pero lo más difícil es identificar el mecanismo físico (se ha propuesto por ejemplo que los fotones interactúan con el vacío) por el que los fotones pierden energía.

6.3 Redshift intrínseco. La hipótesis de Arp.

La idea del redshift intrínseco es la hipótesis de que una parte significativa del redshift observado de objetos extragalácticos, tales como cuasars o galaxias pueda ser causada en ellos mismos por un fenómeno distinto al efecto Doppler clásico o al gravitatorio.

El defensor más reputado en la actualidad de esta hipótesis es Halton Arp quien notó que muchas de las radio fuentes astronómicas cercanas a radio galaxias eran **quasars**, objetos de alto redshift, algunos de los cuales son altamente radio energéticos. Arp propuso la hipótesis de que los quasars deberían estar asociados físicamente a las radio galaxias. A los quasars que siguen este modelo se les llama ‘locales’ y por extensión sus redshifts no seguirían la ley de Hubble.



Si tal evidencia fuera correcta, esto mostraría que el redshift de los quasars, que es significativamente mayor que el de la galaxia misma, no podría ser debido únicamente a las velocidades de recesión sino que debería haber una contribución intrínseca al redshift. La naturaleza de este redshift intrínseco es desconocida, aunque se ha sugerido que pudiera ser debido al efecto Compton

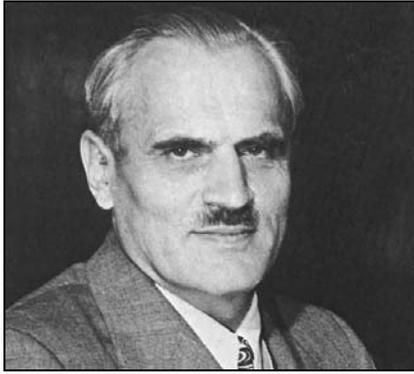
Sin embargo la hipótesis de Arp de que los quasars son locales y presentan grandes redshifts intrínsecos ha obtenido poco apoyo en la comunidad astronómica porque se estima que el número de asociaciones quasar – galaxia es limitado y que pueden ser debidas simplemente a la casualidad.

6.4 El efecto Compton

Compton observó y describió este efecto en 1923. El efecto explica cómo los fotones pierden energía cuando interactúan con la materia, causando así un aumento en la longitud de onda del fotón.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \varphi)$$

Por lo general la dispersión Compton se refiere solamente a la interacción que sufren los electrones de un átomo, aunque también existe la dispersión Compton nuclear.



Hay autores que han propuesto este efecto como responsable del redshift cosmológico, a fin de explicar las observaciones de ondas de radio extragalácticas, muy brillantes y de longitud de onda muy grande. La misma explicación se ha dado al redshift del Sol o al de los cuasars, sugiriendo que los cuasars pudieran estar mucho más cerca de lo que su redshift – Hubble indica. Si los cuasars estuvieran rodeados por una atmósfera borrosa conteniendo electrones libres y otro material, esta concentración de electrones produciría un redshift inusual cuando la luz les atraviesa y les cede energía por efecto Compton, con lo que los cuasars presentarían un ‘redshift intrínseco’. Pero, en su contra, si los cuasars están cercanos, podrían exhibir un movimiento propio en el firmamento cuando la Tierra viaja alrededor del Sol y esto podría confirmarse.

También se ha utilizado el efecto Compton como posible explicación, dentro de nuestra Galaxia, para la transmisión de la energía de los fotones del espectro visible provenientes de las estrellas a un gas de electrones que actúa de transductor de energía a otras longitudes de onda.

Hay tres predicciones de las transiciones Compton que deberían verificarse para aceptar plenamente esta hipótesis:

- el desplazamiento al rojo de las líneas espectrales
- la dispersión en ángulo, que explicaría por qué las galaxias distantes pierden su estructura y son fotográficamente más borrosas e incluso parecerían mayores
- y la dispersión en la propia longitud de onda. Una fuente originalmente monocromática presentaría una cierta anchura tras atravesar una nube de electrones.

7 Métodos de determinación de la constante de Hubble.

7.1 La importancia de la determinación del parámetro de Hubble.

La constante de Hubble, la tasa actual de expansión del universo, es uno de los parámetros más críticos en la cosmología del Big Bang.

- Junto con la densidad de energía ρ determina la edad t y las dimensiones del universo observable ($R_{obs} = ct$).
- El cuadrado de la constante de Hubble relaciona la densidad total de energía del Universo con su geometría.
- La densidad de los elementos ligeros (^1H , ^2D , ^3He , ^4He y ^7Li) sintetizados después del Big Bang también dependen de la tasa de expansión.
- Y las determinaciones de la masa, luminosidad, densidad de energía y otras propiedades de las galaxias y los cuasars también requieren el conocimiento de la constante de Hubble.
- Además, la constante de Hubble define la densidad crítica del Universo $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$.

La densidad crítica, y por tanto H , determina la época del Universo en la que la densidad de la materia y la radiación eran iguales. De aquí que el crecimiento de la estructura en el Universo también dependa de la tasa de expansión. En efecto, durante la era de la radiación, estaba suprimido el crecimiento de la materia a pequeñas escalas y el cambio en la producción corresponde al punto en el que el Universo pasó de estar dominado por la radiación a serlo por la materia. Esta característica, determinada por la densidad crítica, se usa para normalizar los modelos de formación de la estructura cósmica.

7.2 Discrepancias y dificultades

Durante décadas el parámetro de Hubble $H_0 \equiv 100 h$ km/sec/Mpc, ha mantenido su incertidumbre, aunque nunca mayor que un factor de 2, ya tradicional. El rango de las determinaciones se ha ido estrechando con el tiempo. Mientras que De Vacouleurs mantenía un valor de $h \approx 1$, Sandage sostenía un $h \approx 0.5$ (ó $h \approx 0.6$ en un reciente análisis de Sandage y Tamman sobre las supernovas tipo SNIa). La historia de esta controversia es una de las historias más apasionantes de la astronomía. Mientras ha persistido esa discrepancia la constante de Hubble ha oscilado entre 50 y 100 km/sec/Mpc

¿Por qué es tan difícil la medición de H_0 ? Porque requiere la medición de las velocidades de recesión a distancias lo suficientemente grandes para que los movimientos de las galaxias puedan despreciarse comparados con la expansión general de Hubble. La determinación es aún más difícil por el hecho de que a esas grandes distancias, las desviaciones de la suave curva de expansión de Hubble son pequeñas.

7.3 Dos tipos de métodos: relativos y directos.

Hay dos vías básicas para medir el parámetro de Hubble:

1.- Midiendo la distancia a algunas galaxias cercanas, normalmente midiendo en ellas los períodos y las luminosidades de las **Cefeidas variables** y usando luego estas ‘galaxias de luminosidad patrón’, ya calibradas, a fin de definir el punto cero en cualquiera de los variados métodos de medición de distancia a las galaxias. Estos métodos usan o bien ‘patrones estándar de luminosidad’ o relaciones empíricas entre dos propiedades medibles de una galaxia, una independiente de la distancia y otra dependiente de ella. En suma es un **método de escalado entre los diferentes tipos y patrones**.

2.- Usando **relaciones de física fundamental para medir directamente la distancia** a algún objeto distante, evitando por lo menos algunas de las incertidumbres del método de escalado en la medición de distancias cósmicas.

La dificultad del primer método era que había solamente un puñado de galaxias calibradoras lo suficientemente cercanas para que pudieran ser resueltas las Cefeidas en ellas. Sin embargo el proyecto llevado a cabo con el telescopio espacial Hubble ('HST Key Project on the Extragalactic Distance Scale') ha aumentado significativamente el conjunto de galaxias calibradoras.

La dificultad del segundo método está en que en cada caso estudiado hasta el momento, permanecen inciertos algunos aspectos del sistema observado o de la física subyacente. Sin embargo es remarcable que los resultados obtenidos con los distintos métodos del segundo tipo son bastante similares entre sí y realmente no muy apartados de los resultados del primer método. Esto motiva la esperanza en la convergencia de todos los valores.

7.4 1º.- Métodos de medición relativa de distancias. El proyecto del telescopio espacial Hubble. (HST key project)

El proyecto con el Telescopio Espacial Hubble (HST key project) consistía en la medición de distancias a una muestra de galaxias cercanas usando las **Cefeidas variables**. Estas son estrellas intrínsecamente brillantes que presentan una relación bien definida entre luminosidad y período de variación. Midiendo su luminosidad aparente y su período pueden establecerse sus distancias aplicando la ley del cuadrado de la inversa de la distancia.

El objetivo del proyecto era usar las distancias calculadas por la luminosidad de las Cefeidas en 25 galaxias diferentes localizadas a menos de 25 megaparsec, a fin de calibrar varios métodos independientes de indicadores secundarios, que a su vez podrían usarse para determinar las distancias de objetos mucho más lejanos con redshift conocido. Esto proporciona en principio una medida de la relación distancia – redshift y por tanto de la constante de Hubble, en escalas en las que sean insignificantes las velocidades peculiares de las galaxias.

7.4.1 Los 5 indicadores secundarios

Los cinco indicadores de distancia así delimitados fueron:

(1) La **relación Tully Fisher (TF)**. Una relación, bien conocida por los astrofísicos, apropiada para las galaxias espirales, entre la luminosidad de una galaxia espiral y su velocidad de rotación.

(2) La **relación del Plano Fundamental (FP)**, apropiada para galaxias elípticas, que relaciona la luminosidad con la velocidad de dispersión.

(3) Las **Fluctuaciones de Luminosidad Superficial (SBF)** que al corresponderse con fluctuaciones de densidad permiten estimar las dimensiones de una galaxia. (Esta medida da un valor ligeramente mayor para la constante de Hubble). $H_{SBF} = 74 \pm 4$ $ks^{-1}Mpc^{-1}$

(4) La **medición de distancias a Supernovas Tipo Ia (SNIa)**, método que se extiende, dada la extrema luminosidad de las supernovas, a distancias mayores, del orden de 400 Mpc.

(5) La **medición de distancias a Supernovas Tipo II (SNI)**

El número de calibradores por Cefeidas utilizados para las medidas secundarias incluía 21 para la relación Tully-Fischer y 6 para cada una de las Tipo Ia y medidores de fluctuación en superficie. Y se llegaron a distancias hasta 500 Mpc.

7.4.2 Valores obtenidos

Freedman reportó en el 2001 los valores obtenidos para la constante de Hubble por cada uno de estos métodos. Cuatro de los métodos daban un valor de H_0 entre 70 y 72 km s⁻¹ Mpc⁻¹, mientras que el método del plano fundamental daba $H_0 = 82$ km s⁻¹ Mpc⁻¹

Son los siguientes (la primera cifra para la incertidumbre es estadística y la segunda sistemática (proveniente de cosas tales como el punto cero de distancia a la Gran Nube de Magallanes (LMC), incertidumbres de fotometría, flujos de conjunto residuales de las galaxias etc)

$$H_0^{TF} = 71 \pm 3 \pm 7$$

$$H_0^{FP} = 82 \pm 6 \pm 9$$

$$H_0^{SBF} = 70 \pm 5 \pm 6$$

$$H_0^{SNIa} = 71 \pm 2 \pm 6$$

$$H_0^{SNI} = 72 \pm 9 \pm 7$$

Sobre la base de estos resultados el valor promedio dado por el proyecto fue:

$$H_0^{WA} = 72 \pm 3 \pm 7 \text{ km/s/Mpc}$$

Recordamos que debido a la importancia de este valor para muchas cantidades cosmológicas y debido a la incertidumbre que históricamente ha habido sobre él, H_0 se escribe normalmente como $H_0 = 100 h$ km/s/Mpc, así que $h = 0.72 \pm 0.03 \pm 0.07$

7.4.3 Incertidumbres en las medidas

Las mayores fuentes de error sistemáticas que quedan, provienen de las incertidumbres en:

- la distancia a la Gran Nube de Magallanes (LMC), que se supuso tener una distancia modular de $\mu_0 = 18,45$.
- la calibración fotométrica del HST
- la calibración de metalicidad de la relación período – luminosidad de las Cefeidas
- y la dispersión cósmica en el campo de densidades y por tanto de velocidades, que podría conducir a variaciones en H_0 a grandes escalas.

El proyecto HST incluyó una muestra mayor para la calibración de LMC, una nueva calibración fotométrica y correcciones para la metalicidad. Un nuevo resultado arrojó el valor de $\mu_0 = 18.50 \pm 0.10$. También se ha podido utilizar un método externo para chequear la escala de distancia de las Cefeidas mediante un indicador independiente de distancia a la NGC 4258, corroborando el resultado.

7.4.4 Otros métodos de medición relativa de distancias

Están basados en:

- Viejas poblaciones estelares: la punta de la curva de la rama de las estrellas gigantes rojas (TRGB)
- La función de luminosidad de las nebulosas planetarias (PNLF),
- La función de luminosidad de las agrupaciones globulares (GCLF),

7.5 2º.- Métodos de Física Fundamental

Los métodos de medición por física fundamental comprenden: supernovas tanto de Tipo Ia como de tipo II, el efecto Sunyaev-Zeldovich (S-Z) o lentes gravitacionales de quasars. Todos ellos son muy prometedores, pero en cada caso la física fundamental que compete a los mismos permanece incierta.

7.5.1 El método del ^{56}Ni radiactivo para la determinación de H_0 usando Supernovas Tipo Ia

Este método evita las incertidumbres del calibrado por escalas calculando la luminosidad absoluta de las supernovas tipo Ia usando modelos físicos plausibles, pero todavía no comprobados, para la producción de ^{56}Ni . Los primeros resultados arrojaron un $h = 0.61 \pm 0.10$ pero posteriores estudios encontraron incertidumbres en la extinción por absorción de la luz. Haciendo que el método concuerde con el de expansión de la fotosfera, esta aproximación conduce a $h = 0.60 \pm 0.14 - 0.11$

7.5.2 Método de la expansión de la fotosfera

Este método compara la tasa de expansión de la envoltura de la supernova medido por su desplazamiento al rojo con el aumento de dimensiones que se deduce de su temperatura y magnitud. Esta aproximación se aplicó primero en supernovas tipo SN II dando valores de $h = 0.73 \pm 0.06 \pm 0.07$.

7.5.3 El efecto Sunyaev-Zeldovich.

Este efecto se produce por el desplazamiento en el espectro de la Radiación de Fondo Cósmico de Microondas (CMB), debido a que cuando la radiación pasa a través de agrupaciones de galaxias que se interponen en su camino hacia la Tierra, sus fotones sufren la dispersión Compton por electrones de alta energía. Como la temperatura de los electrones excede a la del CMB, la radiación se desplaza sistemáticamente a frecuencias más altas, produciendo un déficit en la intensidad por debajo de una frecuencia característica, y un exceso por encima de ella. La amplitud del efecto depende de la sección cuadrada de la dispersión Thompson y de la densidad de electrones en el camino del fotón.

$$SZ \approx \int \sigma_T n_e dl$$

Por otra parte, los electrones en el gas caliente en los grupos de galaxias, emiten también Rayos X, y la intensidad global de los Rayos X es proporcional al cuadrado de la densidad electrónica a lo largo de la línea de paso a través del grupo de galaxias.

$$\text{Rayos - X} \approx \int n_e^2 dl$$

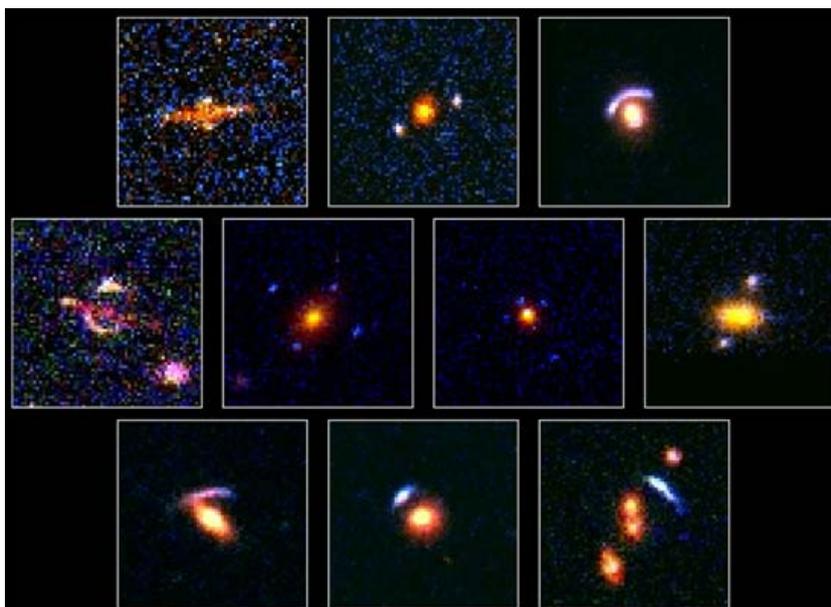
El uso de modelos para la curva de densidad del grupo de galaxias puede utilizarse entonces para que de la diferente dependencia de n_e en las dos integrales anteriores pueda extraerse la longitud del camino que la luz atraviesa a través del grupo. Suponiendo una extensión radial similar para el mismo, puede compararse la dimensión física del grupo con su dimensión angular y determinar de esa manera su distancia. Evidentemente, esta suposición solamente es buena en sentido estadístico, por lo que el uso de las observaciones del efecto S-Z y Rayos X para determinar la constante de Hubble no puede hacerse con fiabilidad sobre una sola observación de un grupo, sino más bien de un conjunto.

Los últimos análisis de Birkinshaw sobre varias agrupaciones dan un valor para el parámetro Hubble de $h = 0.6 \pm 0.1$ esto es $H_0^{SZ} = 60 \pm 10 \text{ km/s/Mpc}$

7.5.4 Lentes gravitacionales de quasars

Se han observado varios quasars que tienen múltiples imágenes separadas por unos pocos segundos de arco; este fenómeno se interpreta que está producido por lentes gravitacionales sobre el quasar fuente realizadas por una galaxia que se encuentra a lo largo de la línea de visión del quasar.

Una de las más notables observaciones asociadas con imágenes múltiples de quasars lejanos originadas por lentes gravitacionales de galaxias intermedias ha sido la medición del retraso temporal en las variaciones de luminosidad de dos imágenes del quasar Q0957+561. Este retraso temporal de 417 ± 3 días, es debido a dos factores: la diferencia de longitud en el camino entre el quasar y la Tierra de las dos imágenes por caminos diferentes, y el retraso gravitacional Shapiro debido a que los rayos de luz atraviesan pozos de potencial gravitatorio ligeramente diferentes. Si no fuera por este segundo factor, la medición del retraso temporal podría usarse directamente para determinar la distancia a la que se encuentra la galaxia intermedia. Esto introduce en el análisis una incertidumbre adicional dependiente del modelo. Dos análisis diferentes dan los valores: $H_0 = 69 \text{ km/s/Mpc}$ y $H_0 = 79 \text{ km/s/Mpc}$



Estimaciones en el primer sistema descubierto, QSO 0957+561 ($z = 1.41$) dan un $h = 0.64 \pm 0.13$. En diferentes sistemas cuádruples de lentes gravitacionales de quasars se han estimado parámetros de h entre 0,42 y 0,59. Y en sistemas similares con un anillo de Einstein la estimación ha sido de $h = 0,69$

Debido principalmente a las incertidumbres sistemáticas en los modelos de distribución de masas en los sistemas de lentes, la incertidumbre en la determinación de h por el retardo temporal en lentes gravitacionales sigue siendo grande. Pero da confianza el que este método, completamente independiente, dé resultados coherentes con otras determinaciones.

7.6 Conclusiones sobre H_0

Para resumir, tanto los métodos de distancia relativa como los métodos de física fundamental conducen a valores entre $h \approx 0.6 - 0.8$. Entre los métodos de física fundamental ha habido progresos importantes recientes, pero sus incertidumbres permanecen mayores que las de los métodos de distancias relativas.

Si adoptáramos un valor de $h = 0.705$ correspondería, por ejemplo, una edad para el Universo de $t_0 = 13,7 \cdot 10^9$ años que estaría de acuerdo con estimaciones por medio de la edad de las agrupaciones globulares. Esto además es coherente con un bajo valor para la densidad Ω_m de la materia en el Universo y una constante cosmológica Λ no nula.

Finalmente el WMAP reporta en marzo de 2008 un valor para $H = 70 \pm 5$ km/s/Mpc