

Ley de Hubble

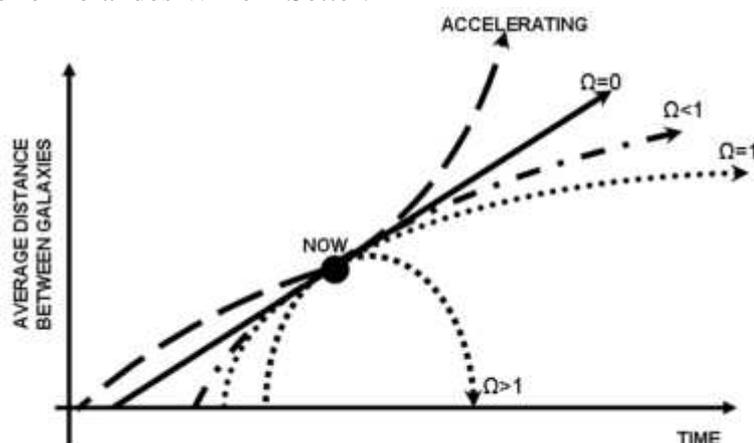
Trabajo de Monitoreo – Física Moderna – IPA 2008

Marcos Guartes

Antecedentes históricos.

Previo a la formulación de la ley que relaciona corrimientos espectrales de galaxias observadas con la distancia a las mismas por Edwin Hubble y Milton Humanson en 1929; existían dos fuentes importantes de antecedentes.

La primera, proveniente de la física teórica, en la cual Alexander Friedmann encontró en 1922 una serie de soluciones a las ecuaciones de Einstein que predecían universos dinámicos en expansión o contracción. Estas soluciones fueron exploradas y encontradas por el belga Georges Lemaître en 1926 y por los norteamericanos Robertson y Walter, que habían tomado en cuenta el modelo cosmológico planteado en 1917 por el holandés Willem Setter.



La segunda fuente proviene exactamente de las observaciones experimentales de Setter, en las cuales se encuentra un corrimiento sistemático de los espectros de las galaxias observadas al rojo, y en donde progresivamente el corrimiento aumenta con la distancia.

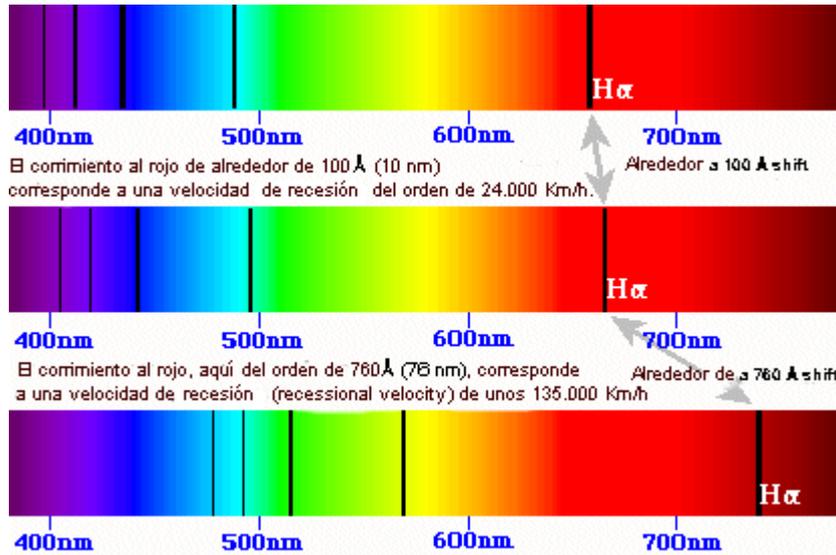
En 1925 ya instalado el gran telescopio sobre el monte Willson, Hubble realiza una serie de observaciones sobre la nebulosa de Andrómeda, efectuando uno de los más importantes descubrimientos astronómicos de la época.

Hubble encuentra en sus observaciones evidencia empírica, que la misma era en realidad una galaxia en toda su propiedad y al mismo tiempo reafirma el modelo de un universo particionado en galaxias. Es así, que el mismo Hubble luego de este descubrimiento decide retomar con las observaciones de su colega Lowell sobre el corrimiento al rojo de algunas galaxias midiendo las velocidades radiales de estas, para luego concluir con su ley.

Observaciones experimentales.

Corrimiento al Rojo.

Al tomar los espectros visibles de galaxias o estrellas se puede apreciar claramente un corrimiento al rojo de las bandas de absorción para algunos elementos atómicos conocidos y que formarían parte constitutiva del objeto observado.



La explicación al corrimiento de las bandas de absorción encuentra lugar en la aplicación del efecto Doppler relativista a las longitudes de onda obtenidas por un observador en movimiento relativo con la fuente emisora.

El período de una señal emitida por una fuente alejándose del observador puede

ser expresada de la siguiente manera:
$$T'_0 = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} T_f$$

De la misma manera la longitud de onda observada al ser c la misma en

distintos referenciales, sería:
$$\lambda = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \lambda_0$$

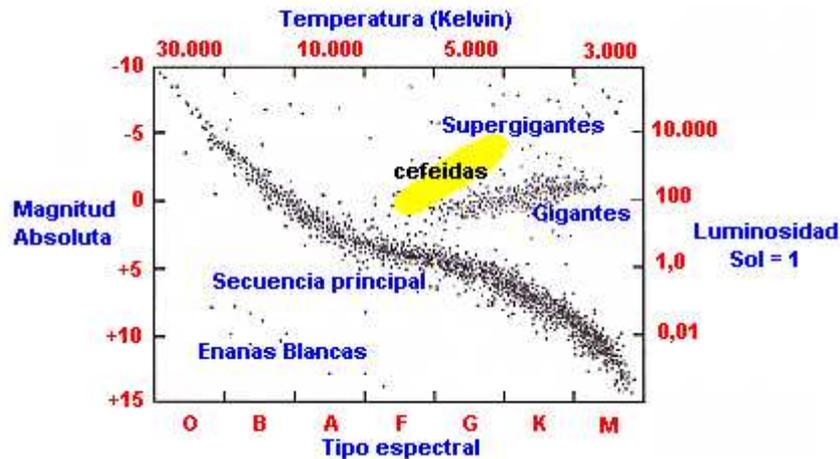
Lo anterior aplicado para el caso concreto de un corrimiento al rojo de 100 Å, se obtiene una velocidad correspondiente de $0,017c$.

Por otra parte la hipótesis inicial sobre el corrimiento al rojo fundado sobre el efecto Doppler, encuentra sustento empírico en la observación del periodo de oscilación de las bandas de absorción en estrellas de sistemas binarios; coincidiendo estos periodos de oscilación con el periodo mismo del sistema estelar y descartando otra posible explicación.

Dependencia de la velocidad con la distancia.

En 1912 tras las observaciones de Leavitt de estrellas variables se logra construir un vínculo entre magnitudes aparentes y relativas de estrellas, aún para las que no pertenecen a nuestra galaxia, significando el primer mapa de la evolución estelar.

El mapa queda presentado visualmente en el diagrama H-R, vinculando temperatura y magnitudes absolutas de las estrellas, datos útiles para determinar distancias mediante paralajes espectroscópicos.



El poder determinar la distancia a objetos observables es el otro paso fundamental para formular la ley de Hubble, que encuentra al corrimiento al rojo relativo de las galaxias observadas, en dependencia directa con la distancia: $Z = D \cdot H_0$.

$$Z = (\lambda_0 - \lambda_e) / \lambda_e .$$

Lo que sabemos en primera instancia es que el corrimiento depende directamente de la velocidad y que la misma es linealmente dependiente de la distancia, por lo tanto deberíamos realizar un pequeño cálculo previo:

Sí $v \ll c$ desarrollamos a primer orden.

$$\left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$\lambda_e \approx \sqrt{\left(1 + \frac{v}{c}\right)\left(1 + \frac{v}{c}\right)} \lambda_0$$

Sustituyendo en la expresión de Z en función del corrimiento se obtiene que $Z \propto v$, $Z \propto D$.

Un nuevo modelo cosmológico.

La dependencia lineal de los corrimientos con la distancia deriva sí mismo en la dependencia lineal entre velocidad de alejamiento y distancia, reforzando la hipótesis de un universo en expansión. Al menos en primera instancia conjeturamos el alejamiento de las galaxias de la nuestra.

$$v = D \cdot H_0.$$

Cabría preguntarnos ahora, si ese alejamiento es observable desde otro referencial de la misma manera.

Para ello consideramos el campo de velocidades observable desde nuestro referencial: $v_x = H_0 x$ $v_y = H_0 y$ $v_z = H_0 z$

Y en consecuencia:

$$\frac{y}{x} = \frac{v_y}{v_x} \quad \frac{y}{z} = \frac{v_y}{v_z} \quad \frac{z}{x} = \frac{v_z}{v_x}$$

Transformando las coordenadas del cuadrivector a un sistema O`

$$x' = \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{-\frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

y luego las velocidades mediante las transformaciones de velocidad:

$$\begin{aligned} v'_{x'} &= \frac{v_x - V}{1 - \frac{v_x V}{c^2}} & v_x &= \frac{v'_{x'} + V}{1 + \frac{v'_{x'} V}{c^2}} \\ v'_{y'} &= \frac{v_y \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}} & v_y &= \frac{v'_{y'} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{1 + \frac{v'_{x'} V}{c^2}} \\ v'_{z'} &= \frac{v_z \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_x V}{c^2}} & v_z &= \frac{v'_{z'} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{1 + \frac{v'_{x'} V}{c^2}} \end{aligned}$$

Se obtiene:

$$x'_{t=0} = \frac{v_x}{H_0} \frac{v'_y}{v_y} = \frac{v'_x + V}{H_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y'_{t=0} = \frac{v'_y}{H_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Corriendo el origen:

$$x' - \frac{V}{H_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = X'$$

Llegamos así a la siguiente expresión para el corrimiento observado en el segundo referencial: $V = H_0 YD$.

En consecuencia:

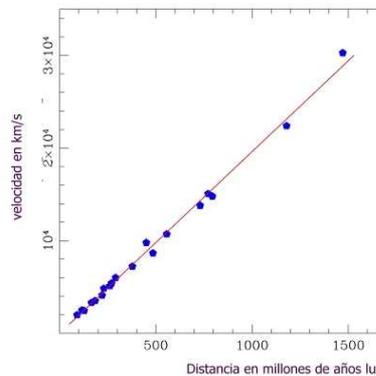
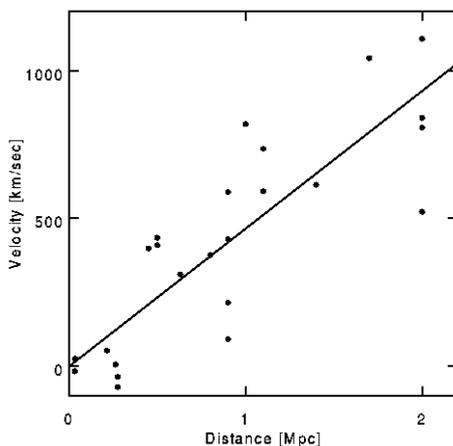
- 1) El universo conserva una simetría esférica en expansión en todos los sistemas inerciales.
- 2) La constante de Hubble es dependiente del sistema de referencia, así como la velocidad máxima de expansión o la antigüedad del universo.
- 3) El centro de simetría del universo se encuentra desplazado según la velocidad relativa entre sistemas.

Algunas consideraciones finales.

Las primeras observaciones de Hubble destinadas a elaborar una explicación cualitativa del universo no produjeron resultados cuantitativos precisos.

De hecho determino un valor aproximado para su constante de 500 km/s/Mpc, cuando hoy aceptamos un valor cercano a 70 Km/s/Mpc.

Estudio original realizado por Hubble en 1929 comparado con uno actual (1996) :



El considerar como hipótesis adicional al universo en expansión una velocidad constante nos lleva a concluir luego de una regresión, que la edad del universo (o tiempo de Hubble) para una constante H_0 de 70 (Km/s)/Mpc es próxima a 20.000 millones de años ($t_H = 1/H_0$). Un tanto mayor a la edad estimada a través de la edad máxima de las supernovas más antiguas que se encuentran alrededor de 14.000 millones de años; lo último nos lleva a cuestionar la hipótesis velocidad de expansión constante e incluir la desaceleración por retención gravitatoria considerada dentro de la relatividad general.

Otro aspecto a cuestionar es la misma isotropía del universo, sí observamos atentamente al corrimiento del centro que tuvimos que efectuar para obtener la ley de Hubble en un referencial O' , damos cuenta que ese desplazamiento depende de la velocidad relativa entre los sistemas.

En el caso que nos estemos acelerando, al mismo tiempo que dejemos de ser un sistema inercial arrastramos el centro del universo con nosotros; y las transformaciones de campos no son simétricas. Así el universo pierde su simetría esférica para pasar a ser uno con simetría cilíndrica teniendo como eje la dirección de desplazamiento.

Una posible consecuencia de constatación empírica sería la anisotropía de la Radiación de Fondo asociada al BigBang que percibimos; aunque los resultados no serían de sorprender dentro del marco de la teoría general de la relatividad.

Bibliografía :

Gatreu. Ronald, Savin. William; Física Moderna; Mc Graw Hill.

Abell. George; Exploration of the universe; holt, rinehart and winston.

Apuntes de astrofísica del profesor Rafael Gonzáles Farfán, Instituto de Educación Secundaria "Luis Vélez de Guevara", Ecija, Sevilla.

Enlaces Web:

<http://www.fisica-relatividad.com.ar>

<http://www.astrocosmo.cl>

<http://www.astrored.org>