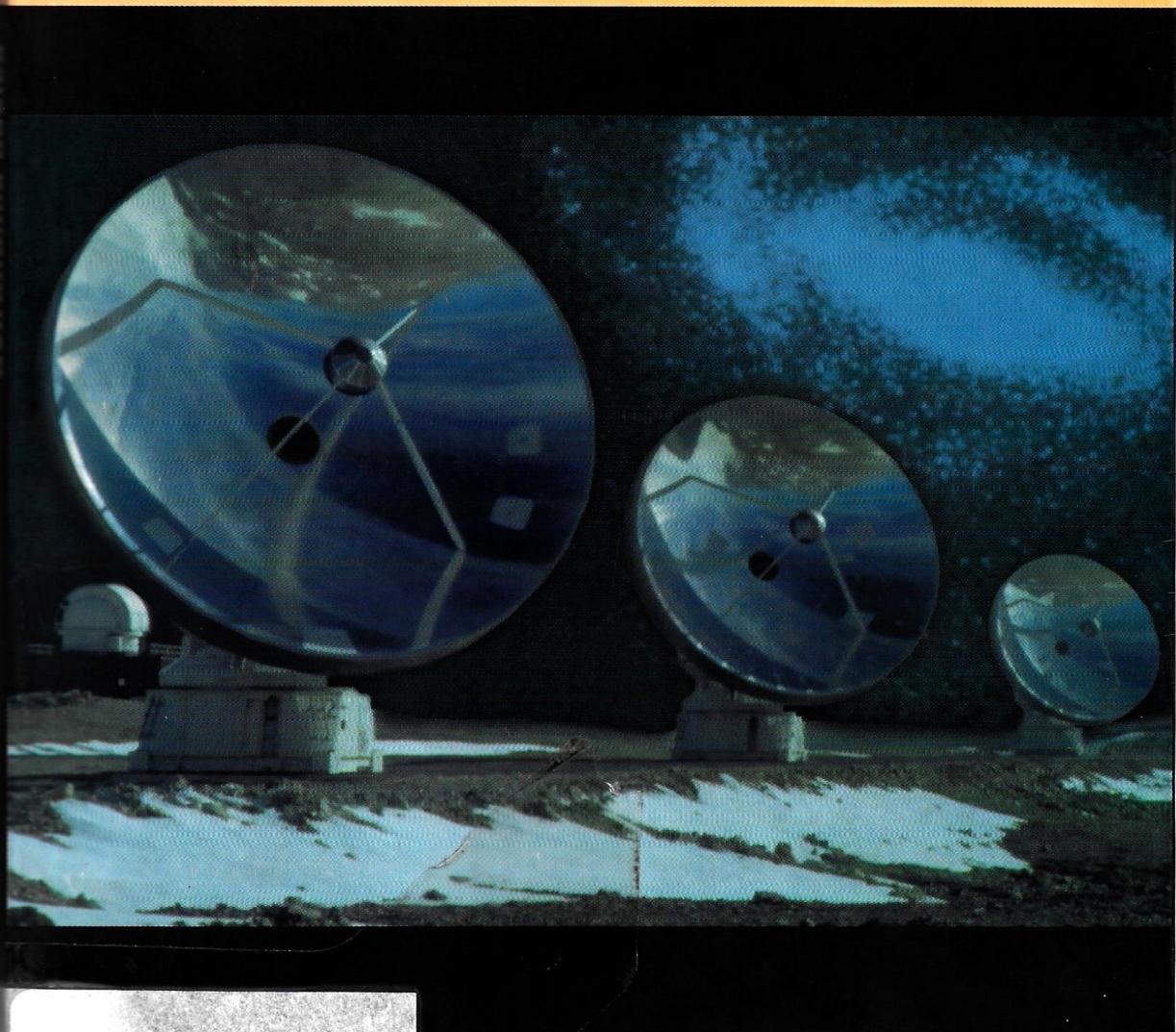


Astronomía básica

JOSÉ ANTONIO GARCÍA BARRETO



QB61/G37



13651

S
AS
ARIAS

TEXTO CIENTÍFICO
UNIVERSITARIO

Asínomia física

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra
—incluido el diseño tipográfico y de portada—,
sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico,
sin el consentimiento por escrito del editor.

D.R. ©, 2000, Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio de la Coordinación Científica, circuito exterior,
Ciudad Universitaria, México, D.F.

D.R. © 2000, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA
Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-6092-7

Impreso en México

X. COSMOLOGÍA

INTRODUCCIÓN

EXISTEN MUCHAS RAZONES para preguntar acerca de la naturaleza del Universo como un todo. Se conoce la existencia del Sistema Solar: la Tierra rota alrededor del Sol; el sistema planetario rota alrededor del centro de la Galaxia; existen otras galaxias además de la nuestra, etc. Cualquier persona interesada desearía saber:

- ¿Cuál es la forma del Universo en su conjunto?,
- ¿qué tan grande es el Universo?,
- ¿qué tanta masa tiene el Universo?,
- ¿cuánto tiempo tiene de vida y cuánto más durará?,
- ¿cuál es su composición química y cuál es su evolución?,
- y otras preguntas más.

OBSERVACIONES ÓPTICAS DE LARGO TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Donde se detectan objetos muy débiles las observaciones revelan la existencia de asociaciones de galaxias en lo que comúnmente se conoce como grupos, asociaciones de grupos en cúmulos y asociaciones de cúmulos en lo que se denomina supercúmulos. ¿Está la materia concentrada en supercúmulos de galaxias? ¿Existen otras estructuras más grandes que los supercúmulos? (figuras X.1, X.2 y X.3) Las preguntas sugieren formularse cuál es el proceso de formación de estructuras con grandes dimensiones:

- ¿primero se formaron las galaxias y la asociación de éstas formó los grupos, la asociación de grupos formó los cúmulos de galaxias y la asociación de cúmulos formó los supercúmulos?, o es que
- ¿se formaron las estructuras de materia de grandes dimensiones que al fraccionarse dieron lugar a otras de menor tamaño como los cúmulos, éstos al fraccionarse formaron los grupos y éstos, al fraccionarse nuevamente, formaron las galaxias?

Han existido varias teorías cosmológicas a través de los años, entre las que se encuentran:

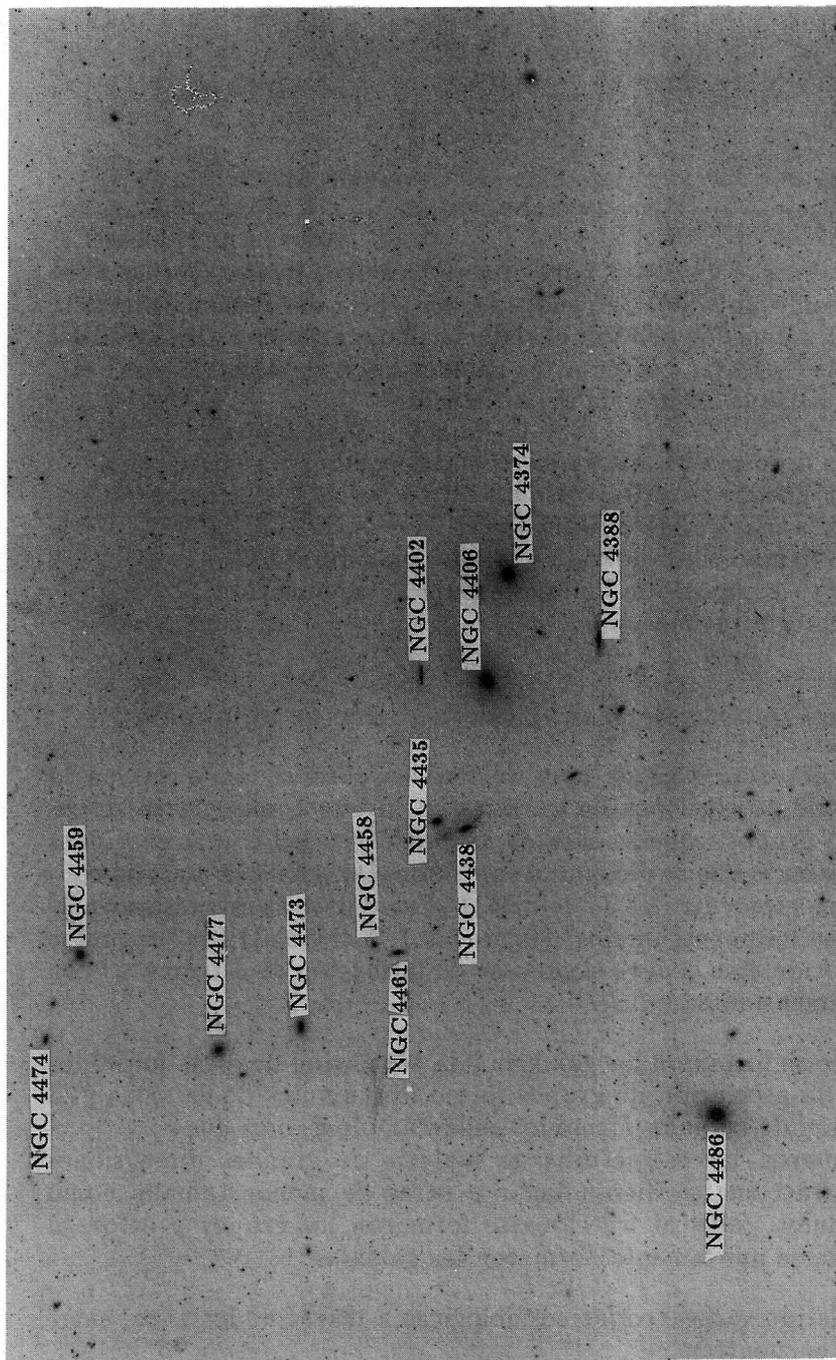


FIGURA X.1. Conjunto de galaxias hacia la región conocida como Virgo. Casi todas las galaxias están a la misma distancia y se cree que pertenecen a una estructura a gran escala conocida como cúmulo de galaxias (© National Geographic Society, Palomar observatory sky survey).

UGC 7438 NGC 4308

NGC 4314

Reiz 2234

NGC 4286

NGC 4283

NGC 4311

NGC 4274

NGC 4245

NGC 4278

FIGURA X.2. Conjunto de galaxias hacia la región conocida como Coma I. Casi todas las galaxias están a la misma distancia y se cree que pertenecen a una estructura a gran escala conocida como *cúmulo de galaxias* (© National Geographic Society, Palomar observatory sky survey).

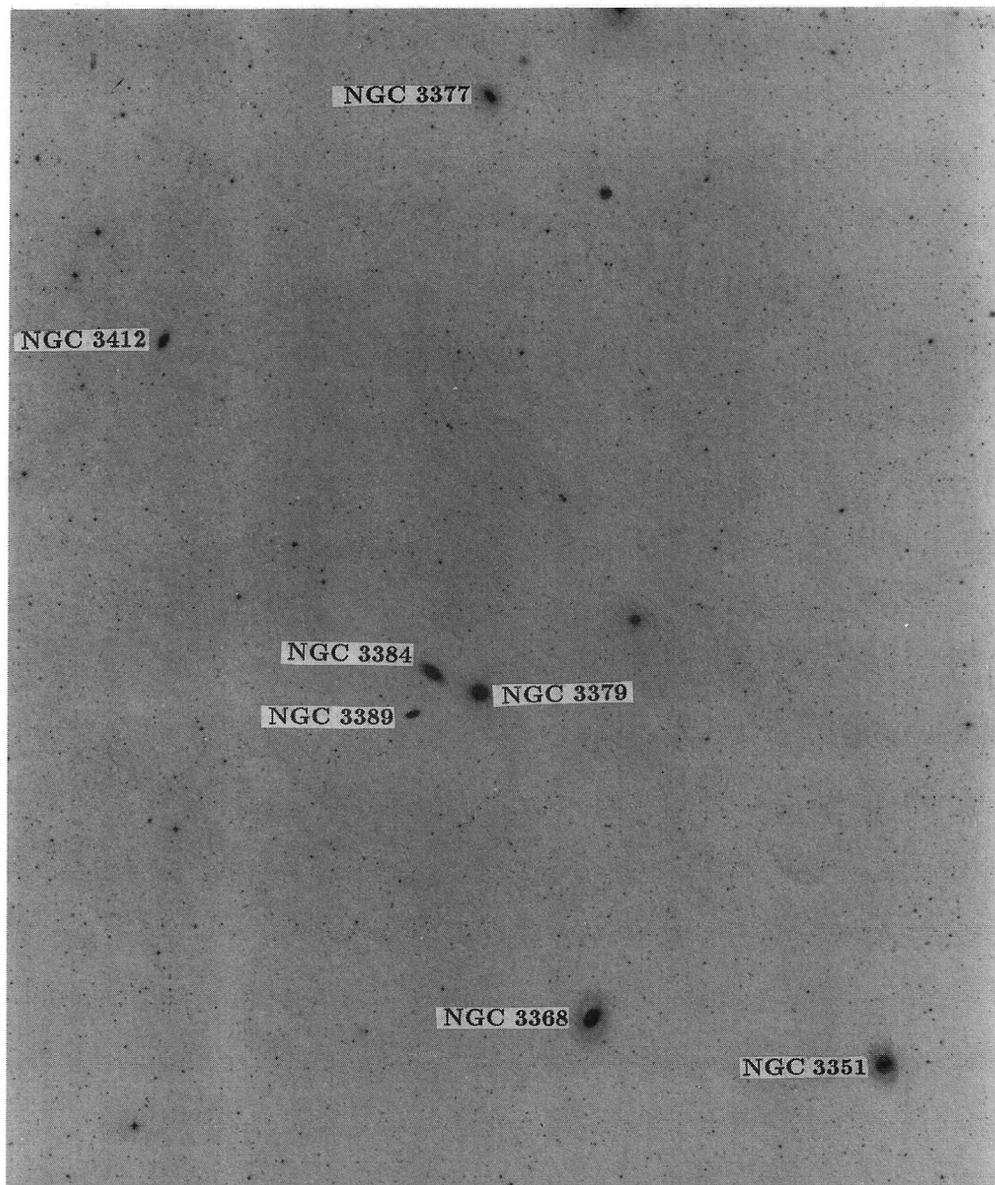


FIGURA X.3. Conjunto de galaxias hacia la región conocida como Leo. Casi todas las galaxias están a la misma distancia y se cree que pertenecen a una estructura a gran escala conocida como *Grupo de galaxias* (© National Geographic Society, Palomar observatory sky survey). La diferencia entre grupo y cúmulo es sólo la densidad de galaxias, pues en un grupo hay menor número que en un cúmulo.

- La *teoría del Estado Estacionario*, en la cual se postula que siempre habrá una mezcla de galaxias nuevas o jóvenes y galaxias viejas en un volumen determinado de espacio, y por lo tanto no importa si se observa una región relativamente cercana o una lejana: cualquier región del Universo siempre se observará similar.
- Otra teoría es la conocida como la *Gran Explosión*, por la que se postula que el Universo que conocemos tuvo su origen en una gran explosión que tenía las siguientes condiciones: alta temperatura, $T \simeq 10^{11}$ grados centígrados en un volumen reducido de espacio, el cual aumentó sus dimensiones, es decir, hubo una gran explosión. Al expandirse el Universo, su temperatura fue disminuyendo más y más hasta llegar al valor actual, que es de solamente $T \simeq 3$ grados absolutos o $T \simeq -270^\circ$ centígrados (Weinberg, 1977).

No son éstas las únicas teorías, sino que existen muchas otras que tratan de explicar la diferencia en la apariencia de las galaxias de acuerdo con su evolución dentro de su vecindad espacial.

PRINCIPIO COSMOLÓGICO

El principio cosmológico dice: Para cualquier observador en cualquier posición arbitraria del Universo, en cualquier época histórica del mismo, el Universo, a gran escala, aparecerá con el mismo aspecto que para otro observador en otra posición del mismo, en otra época histórica (con excepción, claro, de variaciones locales).

CORRIMIENTO AL ROJO: z

Importante en cosmología es determinar la distancia a la que se encuentran los diferentes objetos en el Universo a gran escala, es decir, determinar la distancia entre nuestra galaxia y otras galaxias. La manera de hacerlo observacionalmente es a través de determinar la longitud de onda que emiten esas galaxias, ya sea en luz visible o en ondas de radio. Esa longitud de onda se compara con la longitud de onda esperada para una emisión similar estudiada en el laboratorio, y la diferencia se interpreta como la velocidad que tiene la galaxia. A este efecto se le conoce como el efecto Doppler, cuya descripción consiste en que si un objeto se acerca, la longitud de onda que emite disminuye, mientras que si se aleja, su longitud de onda aumenta (figura X.4).

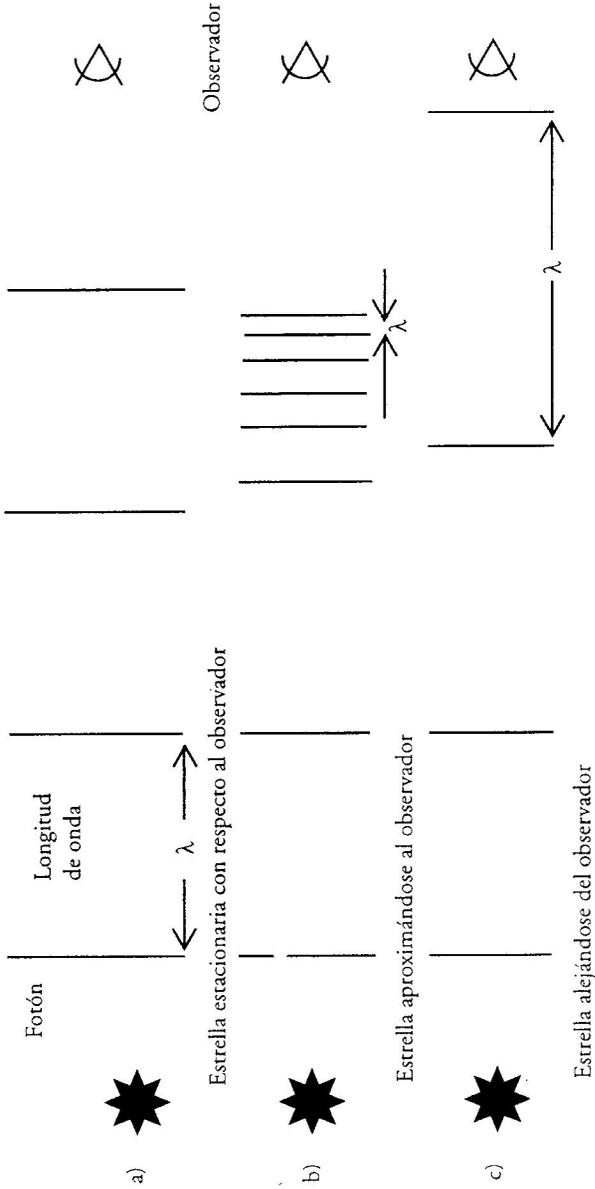


FIGURA X.4. Efecto Doppler. La radiación, representada como un fotón con una longitud de onda determinada. a) La estrella que radia está estacionaria con respecto al observador; b) la estrella se aproxima al observador y la longitud de onda disminuye; c) la estrella se aleja y la longitud de onda aumenta.

CUADRO X.1. Escala cósmica de tiempo.

Tiempo	Era	Z	Evento	Época
0	Singularidad	∞	Big Bang	20×10^9 años
10^{-43} seg	Tiempo Planck	10^{32}	Creación de partículas	20×10^9 años
10^{-6} seg	Hadrón Hadeano	10^{13}	Pares de antiprotón-protón	20×10^9 años
1 seg	Leptones	10^{10}	Pares electrón-positrón	20×10^9 años
1 min	Radiación	10^9	Nucleosíntesis de Helio y Deuterio	20×10^9 años
10 000 años	Materia	10^4	Domina la materia en el Universo	20×10^9 años
300 000 años	Desacople entre materia y radiación	10^3	El Universo se vuelve transparente	19.7×10^9 años
$1 \rightarrow 2 \times 10^9$ años		10-30	Empieza la formación de las galaxias	$18 \rightarrow 19 \times 10^9$ años
4×10^9 años			"Nace" nuestra galaxia	16×10^9 años
5×10^9 años		3	"Nacen" QSO y "nacen" estrellas G, K y M	15×10^9 años
10×10^9 años		1	"Nacen" estrellas O, B y A	10×10^9 años
15.4×10^9 años			Se forman los planetas	4.6×10^9 años
16.1×10^9 años	Arquezoica		Se forman las rocas más viejas de la Tierra	3.9×10^9 años
18×10^9 años	Proterozoica		Se crea una atmósfera terrestre rica en Oxígeno	2×10^9 años
19×10^9 años	Paleozoica		Se forman microorganismos vivos	1×10^9 años
19.75×10^9 años	Mesozoica		Se forman montañas	250×10^6 años
19.85×10^9 años	Cenozoica		Aparecen los dinosaurios	150×10^6 años
20×10^9 años			Aparece el hombre	2×10^6 años

Al observar que la longitud de onda de la emisión de una galaxia aumenta, sabemos que eso indica que esa galaxia se aleja de la nuestra. A este fenómeno se le conoce como *corrimiento al rojo*, es decir, si pensamos que la luz original está en el visible, digamos, luz amarilla, al aumentar su longitud de onda se tendría el color *rojo*. Este concepto es utilizado aun y cuando la longitud de onda de la observación ya no sea en el visible.

En astronomía, al corrimiento al rojo se le denota como z , y está entonces definido como:

$$z = \frac{(\lambda_{\text{observada}} - \lambda_{\text{original}})}{\lambda_{\text{original}}},$$

donde $\lambda_{\text{observada}}$ es la longitud de onda que se determina de las observaciones y $\lambda_{\text{original}}$ es la longitud de onda determinada en el laboratorio.

La velocidad con la que viajan las galaxias se puede determinar con la siguiente expresión

$$v = cz,$$

de donde la longitud de onda observada puede expresarse como

$$\lambda_{\text{observada}} = \lambda_{\text{original}} \left(1 + \frac{v}{c} \right).$$

LEY DE EXPANSIÓN DEL UNIVERSO O LEY DE HUBBLE

La observación de muchas galaxias hecha por E. Hubble (Hubble, 1982) mostraba que la mayoría de ellas se alejaban de nuestra galaxia. La interpretación de esas velocidades de alejamiento fue que el Universo en su totalidad está en expansión. E. Hubble propuso una ley que lleva su nombre para explicar esta expansión. La ley de Hubble nos

indica que para cualquier tiempo, el movimiento de una galaxia con respecto a otra galaxia satisface una relación lineal entre su velocidad y su distancia, es decir,

$$v = f(t)r,$$

donde v es la velocidad de la galaxia, $f(t)$ es una función que sólo depende del tiempo y r es la distancia desde el observador a la galaxia. La distancia r , a su vez, se puede expresar como:

$$r = R(t)r_0,$$

donde r_0 es la posición de la galaxia en el tiempo t_0 y esto automáticamente define el valor de R en ese tiempo t_0 como $R(t_0) = 1$.

Si estudiamos las variaciones de r con respecto al tiempo se tiene la expresión

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} = r_0 \frac{\Delta R(t)}{\Delta t}.$$

Si sustituimos $v = \Delta r / \Delta t$ y $r_0 = r / R(t)$, entonces tenemos la siguiente expresión para la velocidad

$$v = \frac{1}{R(t)} \frac{\Delta R(t)}{\Delta t} r.$$

Comparando las dos expresiones para la velocidad tenemos que la función $f(t)$ quedaría expresada como

$$f(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{\Delta R(t)}{\Delta t},$$

o también

$$f(t) = \frac{1}{\tau(t)},$$

y la velocidad puede expresarse como

$$v(t) = \frac{r}{\tau(t)},$$

donde $\tau(t)$ es *independiente* de la posición r , pero, en cambio, dependiente del tiempo.

A la expresión $1/\tau$ se le conoce como la *constante de Hubble*, H , la cual tiene unidad de velocidad por unidad de distancia y por lo tanto

la ley de Hubble puede escribirse en forma sencilla como:

$$v = Hr.$$

El valor que se ha determinado de las diferentes observaciones para H varía entre 100 y 40 $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, donde Mpc significa millones de parsecs ($1 \text{Mpc} \simeq 3.1 \times 10^{19} \text{km}$). A partir de la ley de Hubble se puede estimar la distancia a la que se encuentra una galaxia; por ejemplo, si la galaxia NGC 4314 tiene una velocidad de $v = 980 \text{km s}^{-1}$ y se toma un valor de $H = 100 \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, su distancia de la nuestra será $d = 9.8 \text{Mpc}$.

Nótese que la ley de Hubble dice que cuanto más distante está el objeto, *mayor* será su velocidad de alejamiento. Esta ley es válida sólo cuando se considera el Universo a gran escala y nunca se puede aplicar para objetos dentro de una galaxia o dentro de un sistema planetario.

EL PARÁMETRO DE DESACELERACIÓN

Una vez definida la constante de Hubble, H , también se define la constante de desaceleración q_0 que indicará si el Universo siempre está en expansión o si llegará el momento en que ya no se expanda (se desacelere) y se contraiga. La expresión sería (Weinberg, 1972):

$$q_0 \equiv -\ddot{R}(t) \left\{ \frac{R(t)}{\dot{R}(t)^2} \right\},$$

en donde $\ddot{R}(t)$ significa la segunda derivada con respecto al tiempo, o sea la aceleración, y $\dot{R}(t)$ significa la primera derivada con respecto al tiempo o velocidad.

COSMOLOGÍA DE NEWTON

La dinámica del Universo puede considerarse en forma sencilla con la teoría de gravitación de Newton. Supóngase que existe un cuerpo de masa m_p a una distancia, R , de un origen o punto central donde se encuentra la masa del Universo, M (figura X.5).

Supóngase que M es la masa de un universo y que se encuentra dentro de la esfera de radio R que tiene una densidad ρ , es decir,

$$M = \left(\frac{4\pi}{3} \right) R^3 \rho.$$

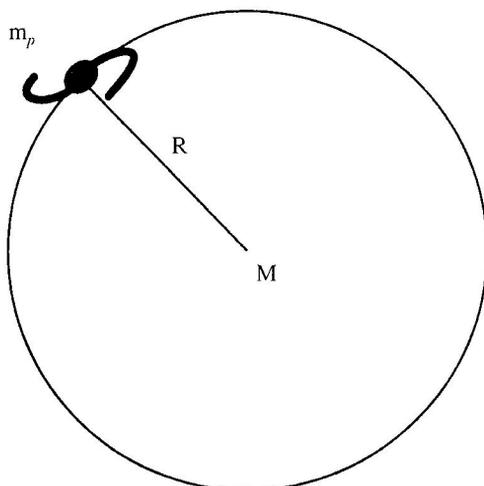


FIGURA X.5. Representación esquemática de una galaxia dentro del Universo, con masa M y a una distancia R del centro.

La expresión para la dinámica de la galaxia en ese universo, suponiendo que la galaxia rota alrededor del centro en una órbita circular, está dada por el equilibrio de fuerzas (véase el capítulo VI) con la expresión para la aceleración

$$\ddot{R} = \frac{GM}{R^2}.$$

Para una masa del Universo, M , constante, nuestro objetivo es determinar finalmente la expresión para la distancia R en función del tiempo. La manera de hacer eso es recurriendo a las matemáticas e integrando la expresión para la aceleración. Esto es,

$$\begin{aligned} \int \frac{d^2R}{dt^2} dt &= -GM \int \frac{1}{R^2} dt, \\ \int \frac{d^2R}{dt^2} dt &= -GM \int \frac{1}{R^2} dR \frac{dt}{dR}, \\ \int \frac{d^2R}{dt^2} dt &= -\frac{2GM}{\frac{dR}{dt}} \int \frac{1}{R^2} dR, \\ \dot{R} + \text{constante} &= -\frac{2GM}{\dot{R}} \int \frac{1}{R^2} dR, \end{aligned}$$

o bien,

$$\dot{R} = -\frac{2GM}{\dot{R}} \int \frac{1}{R^2} dR + \text{constante},$$

y finalmente

$$\dot{R}^2 = \frac{2GM}{R} + 2E,$$

donde el término $2E$ es una constante al evaluar la integración. Si esta constante es igual a cero, entonces la ecuación puede quedar

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\sqrt{2GM}}{\sqrt{R}},$$

o bien,

$$\sqrt{R} dR = \sqrt{2GM} dt,$$

donde finalmente al integrarla nos da la expresión para R en función del tiempo como

$$R(t) = \left(\frac{9GM}{2} \right)^{1/3} t^{2/3}.$$

Esta última expresión nos dice que el radio del Universo, expresado por la letra R , aumenta en cuanto aumenta el tiempo, denotado por t . Con este modelo simple el Universo estaría siempre en expansión. Una gráfica de esto se muestra en la figura X.6.

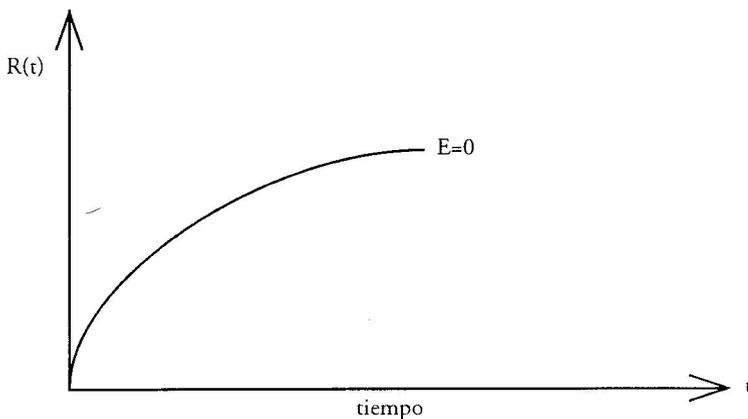


FIGURA X.6. Evolución del radio del Universo (eje vertical) con respecto al tiempo (eje horizontal). Nótese que el radio aumenta, es decir, el Universo se *expande*.