

Saber

y

Hacer



La determinación de la edad del Universo involucra el análisis físico-matemático de su realidad. El modelo depende básicamente de la densidad actual de materia y de la densidad crítica.

¿Cómo se ha llevado a cabo la explotación de productos forestales en México y cuáles son sus perspectivas? Durante siglos el país fue un proveedor importante a nivel mundial de recursos forestales maderables y no maderables. Hoy vivimos su devastación. Así que es necesario revisar cuantitativa y cualitativamente las actuales condiciones para hallar alternativas.



La edad del Universo

Manuel G. Corona Galindo*,
Héctor Vázquez Briones**

¿Cuánto tiempo más podremos vivir tranquilamente en este mundo?, ¿cómo va a evolucionar el Universo?, ¿cuál fué su origen?; estas son algunas de las interrogantes que han inquietado al hombre desde épocas inmemoriales. Aunque para resolver estos problemas se han inventado a lo largo del tiempo respuestas míticas, religiosas o pseudocientíficas, se pretende aquí echar un vistazo a una de las teorías más aceptadas en el medio científico que pretende responder las preguntas formuladas arriba. Desde luego que no de manera absoluta ni dogmática, porque dejaría entonces de ser científica. La intención es sencillamente mostrar que existen soluciones científicas para problemas que aparentan ser solamente filosóficos o religiosos.

Conceptos cosmológicos básicos

El principio de la cosmología moderna, que tiene como objetivo la descripción físico-matemática del cosmos, se puede datar casi exactamente. En 1917, un año después de completar su teoría general de la relatividad, Einstein trató de hallar una solución a sus ecuaciones que describiera la geometría espacio-temporal de todo el Universo. Siguiendo las ideas cosmológicas, que eran corrientes por entonces, Einstein buscó una solución que fuese homogénea, isotrópica y estática. Para encontrar un modelo que se adecuase a estas presuposiciones

cosmológicas se vio obligado a modificar sus ecuaciones introduciendo un término, la llamada *constante cosmológica*, que empañó en gran medida la elegancia de la teoría original, pero que sirvió para contrarrestar la idea de una fuerza atractiva de la gravitación a grandes distancias y a la concepción de un universo estático.

El marco teórico de la relatividad general consiste básicamente en atribuirle propiedades geométricas a la materia: El espacio-tiempo es curvo en las proximidades de la materia gravitacional. Este concepto de geometrización cambió por completo la visión del mundo físico que se tenía hasta principios de siglo, pues según la teoría de Newton (la dominante hasta entonces) los cuerpos gravitacionales se atraen entre sí debido a una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En cambio, en la teoría general de la relatividad hay que describir el

campo gravitatorio en función de la geometría del espacio-tiempo. Esta teoría afirma que la materia comba el espacio y que un cuerpo sigue una cierta trayectoria en su derredor debido a que el espacio se ha curvado, más no porque esté presente una fuerza de atracción a distancia.

Para visualizar esta afirmación recurramos a la figura 1 que representa una sábana soportando una canica grande C_1 . Es obvio que la sábana se ha combado por la presencia de C_1 así como que la tendencia de la canica pequeña C_2 es caer hacia C_1 pero porque la superficie de la sábana ha sido curvada por la presencia de la C_1 , no porque exista atracción entre las canicas. Esta es precisamente la afirmación contenida en la teoría de la gravitación de Einstein. Si C_2 no experimenta la acción de ninguna otra fuerza (otra comba), caerá inmediatamente hasta donde se encuentra C_1 ; pero si otra fuerza, como la *centrífuga*, está actuando, C_2 girará, tal como realmente lo

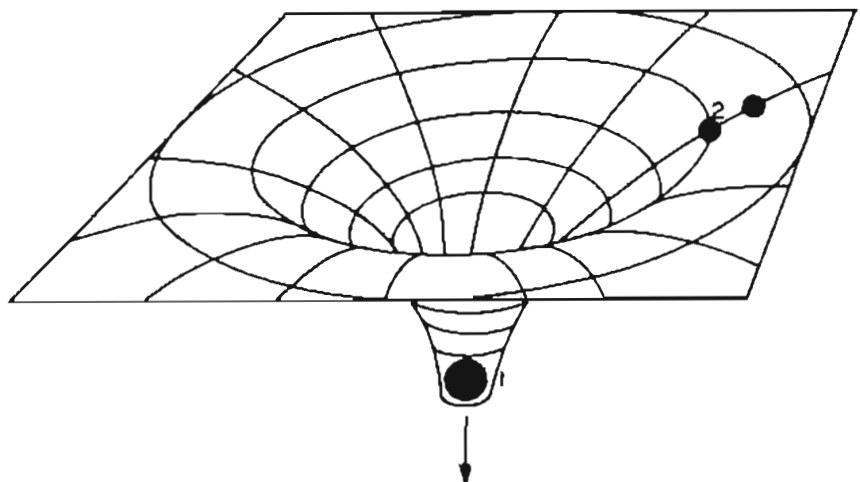


Figura 1. Sábana combada por una canica. Analogía de la curvatura del espacio-tiempo por la presencia de la materia.

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica Tonantzintla, Puebla, y ESFM, UAP.

** Universidad de las Américas. Puebla.

hacían nuestras canicas antes de caer al hoyito. Cuando esa fuerza centrífuga desaparezca o sea menor que la gravitacional, la canica caerá. Si las fuerzas entran en equilibrio, C_2 permanecerá girando alrededor del hoyo mientras se mantenga dicho estado.

A fin de completar la especificación de la teoría, se debe tipificar la geometría espacio-temporal que está asociada a una determinada configuración de la materia. Einstein hizo esto al postular un sistema de ecuaciones que en esencia dicen:

$$\boxed{\text{Curvatura (del espacio-tiempo)}} = \boxed{\text{Densidad energética de la materia}} \quad (1)$$

Esta relación geometría-materia nos proveyó de una teoría de la gravitación verdaderamente notable y hermosa, en la cual los efectos de la gravitación se expresan plenamente desde el punto de vista de la estructura del espacio tiempo.

El lado izquierdo de la relación (1) se refiere a entes puramente geométricos, concretamente a la curvatura. Expliquemos esto. Si dibujamos un círculo sobre una superficie y su circunferencia es exactamente $2\pi r$; entonces diremos que la superficie tiene curvatura cero; diremos que su curvatura es positiva si la circunferencia es menor de $2\pi r$ y negativa si es mayor. A través de artilugios matemáticos válidos se puede lograr asignar a la curvatura κ de la superficie los valores 0, 1 y -1 para estos tres casos respectivamente. Al dibujar un círculo sobre una superficie de papel se tiene el primer caso. Para el segundo, tendría que hacerse el dibujo sobre una pelota. Si después la rompieran para extenderla sobre una mesa, veríamos que la circunferencia no se cierra porque es menor que $2\pi r$. El tercer caso es un poco más complicado, pues se tendría que dibujar el círculo sobre una silla de montar. Si la proyectamos sobre una superficie plana comprobaremos la nece-

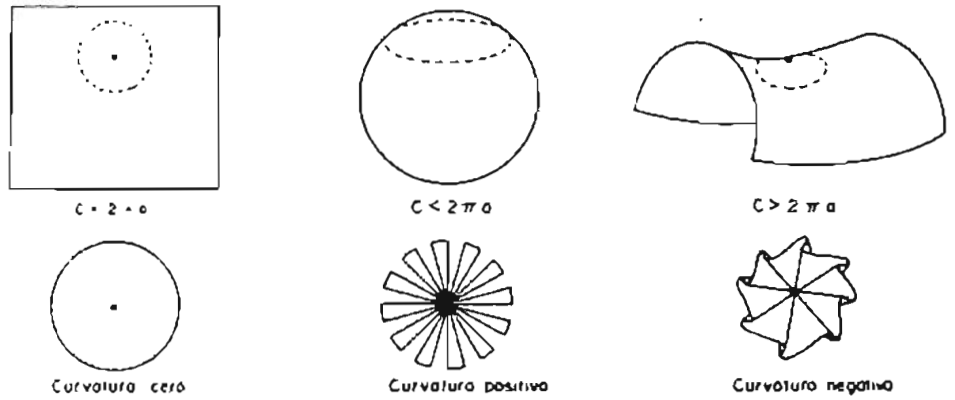


Figura 2. Círculos dibujados sobre superficies curvas que muestran los casos en que la circunferencia es igual a $2R$, y cuando es diferente (figura tomada de Berry M., 1981).

sidad de plegar el círculo, y así formar la circunferencia, quedando de manifiesto que su valor es mayor de $2\pi r$ (fig. 2).

Esta misma tipificación de geometrías se puede asignar a nuestro Universo. Determinar exactamente cual de las tres le corresponde es un problema muy complejo y ese es precisamente el motivo de investigación de muchos cosmólogos. Por lo pronto, atribuyámosle a nuestro Universo una geometría plana, otra curvada negativamente y una tercera curvada positivamente y sustituyámoslas en el lado izquierdo de la ecuación (1). Por otro lado asumamos que ese universo está lleno de materia distribuida uniformemente, de manera que, para todo

punto de su interior el cosmos aparezca igual en cualquier punto y en cualquier dirección en que se sitúe y mire el observador. Con estas condiciones geométricas y físicas se pueden resolver las ecuaciones de Einstein (1) y el resultado son los tres modelos de Universo mostrados en la figura 3.

En la figura 3, $R(t)$ es el radio del Universo como función del tiempo.

En los modelos con $\kappa = -1$ y $\kappa = 0$, el universo se expande indefinidamente y para siempre, mientras que para el modelo de $\kappa = 1$ la expansión tiene lugar hasta alcanzar un radio máximo y después comienza a contraerse nuevamente hasta lograr el punto original $R(t) = 0$. Este último

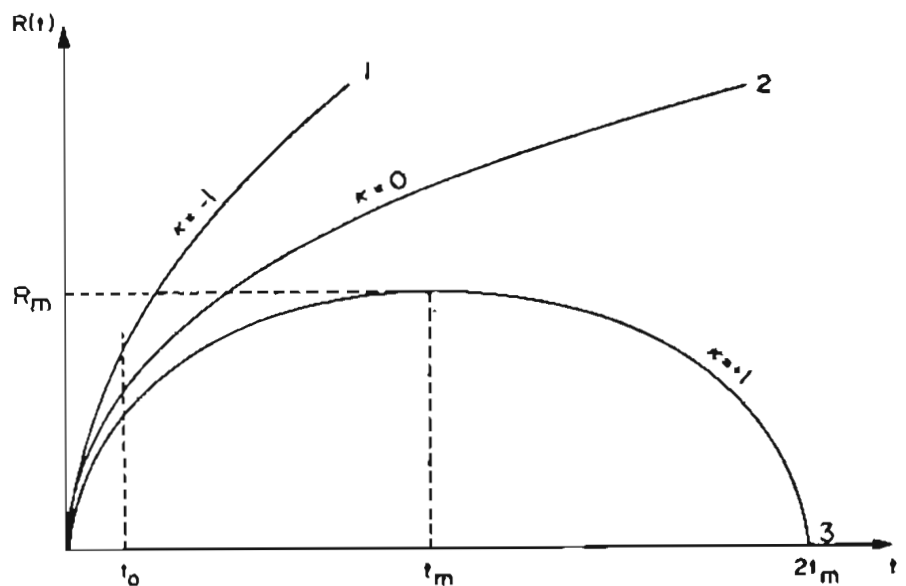


Figura 3. Modelos de Universo en expansión con una constante cosmológica igual a cero.

caso corresponde al de un Universo cerrado.

Estas ideas de la expansión del Universo aparecieron en 1922 y fueron desarrolladas por los astrónomos y matemáticos W. Sitter de Holanda, A. Friedmann de la URSS, G. Lemaitre de Bélgica y A. S. Eddington de la Gran Bretaña. Inmediatamente después los astrónomos se dieron a la búsqueda de los fenómenos físicos que la evidenciaran.

El estudio del movimiento de los sistemas estelares remotos—galaxias y cúmulos de galaxias—sirvió de base para la exploración de la cinemática del Universo. Las velocidades de objetos distantes en movimiento hacia el observador, o alejándose de él, pueden ser medidas con ayuda del *efecto Doppler*. Debido a este efecto todas las ondas que emanen de una fuente que se aproxima al observador se acortan, es decir, se corren hacia la parte violeta del espectro, mientras que la luz proveniente de una fuente que se aleja se enrojece, esto es, se detecta con longitudes de onda más largas. La magnitud del corrimiento al rojo se denota normalmente por la letra z y es definida por:

$$z = \frac{(\lambda_{obs} - \lambda_{em})}{\lambda_{em}} = \frac{v}{c} \quad (2)$$

Esta ecuación es válida solamente para velocidades v mucho más pequeñas que la velocidad de la luz c , cuando es aplicable la mecánica newtoniana. λ_{em} es la longitud de onda de la luz emitida por la fuente y λ_{obs} es la detectada por el observador.

Midiendo entonces el desplazamiento, debido al *efecto Doppler*, de las líneas espectrales en la radiación de los cuerpos celestes, los astrónomos pueden determinar si esos cuerpos se alejan o se acercan a nosotros.

El trabajo pionero en la medición de las velocidades radiales de las galaxias fué emprendido al comienzo de este siglo por el as-

trofísico V. Slipher. Slipher descubrió que la mayoría de las galaxias estudiadas por él se alejaban de nosotros pues su espectro se corría hacia el rojo.

Por otro lado, las distancias de varias galaxias fueron determinadas por el astrónomo E.P. Hubble y, comparando estas distancias con sus velocidades de recesión (que ya habían sido determinadas antes por Slipher y otros astrónomos), encontró en 1929 una notable correlación: Mientras más alejada es la galaxia, mayor es la velocidad de recesión. Este resultado se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$v = Hr$$

en donde v es la velocidad de recesión, r es la distancia a la galaxia y el coeficiente de proporcionalidad H es conocido como la *constante de Hubble*.

Una de las primeras interrogantes de este descubrimiento fue por qué todas las demás galaxias se alejan justamente de nosotros. ¿Estamos realmente en el centro del universo? la respuesta es no; las galaxias se alejan no solamente de nosotros sino también de cada una de las existentes. Así, si nosotros viviéramos en alguna otra galaxia, veríamos exactamente el mismo patrón: las galaxias se alejarían. Este concepto muy importante en cosmología, conocido como

el principio cosmológico, podría parecer confuso. Sin embargo, no es así si nos olvidamos de privilegios geocéntricos y pensamos en la expansión de la siguiente forma: Asumamos que nosotros, los observadores, nos encontramos en la galaxia A y consideremos que estamos en reposo (figura 4). Para simplificar el argumento miremos solamente a lo largo de una línea horizontal a nosotros. Las galaxias B y C se alejan de nosotros hacia la derecha con velocidades crecientes. Las galaxias D y E lo hacen de la misma forma, pero hacia la izquierda. Ahora situémonos en la galaxia B y consideremos que es ella la que está ahora en reposo (figura 4b). Para encontrar las nuevas velocidades relativas a B , de las otras galaxias debemos sustraer la velocidad de B respecto a A , cuanto ésta estaba en reposo, a todas las velocidades de las galaxias. Ahora A se aleja de B hacia la izquierda con la misma velocidad con que antes se alejaba B de A hacia la derecha. La velocidad de recesión de D se duplica; la galaxia C se aleja de B con la mitad de la velocidad con que se alejaba de A . En su conjunto el patrón de alejamiento visto desde B es justamente el mismo: las velocidades de alejamiento son proporcionales a las distancias, con la misma constante de proporcionalidad. Por razones de simplicidad hemos considerado movimientos a

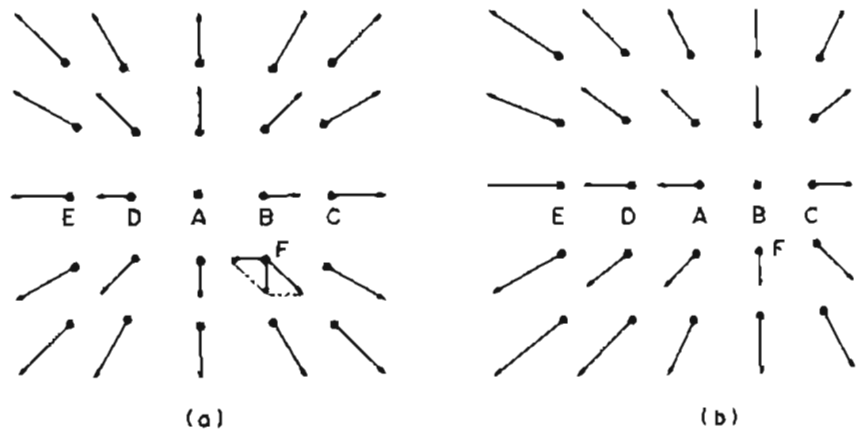


Figura 4. El patrón de recesión según los observadores A y B (de acuerdo a V. A. Bronshtan y tomado de Nowikov I D, 1982).

lo largo de una sola línea, pero se puede verificar –trazando paralelogramos, como se indica en la galaxia F en la figura 4a.– que la conclusión ilustrada permanece válida también en el caso más general.

Implicaciones cosmológicas de la recesión

La primera implicación de este hecho es que el Universo debe estar expandiéndose desde hace mucho tiempo y que, por lo tanto, en el pasado el tamaño del Universo debió ser mucho menor que su tamaño actual. Así que, si seguimos el razonamiento retrospectivamente, llegaremos a la conclusión de que toda la materia que lo constituye debió estar concentrada en un punto (es decir una región del espacio muy pequeña en comparación con las dimensiones cosmológicas conocidas) que puede considerarse el origen del Universo actual. Una consecuencia de establecer el origen del Universo es la posibilidad de calcular el tiempo que lleva expandiéndose. Esto nos proporcionaría obviamente su edad. Este tiempo llamado *tiempo de Hubble*, es el recíproco de su constante:

$$t = \frac{1}{H} \quad (4)$$

De aquí inferimos que, conociendo con exactitud el valor de esta constante, podríamos saber con precisión qué tan viejo o qué tan joven es nuestro cosmos.

Desafortunadamente, hasta la fecha no se tiene la certeza de que los valores encontrados para esta constante sean definitivos. Desde 1929, cuando Hubble anunció su *Ley de expansión*, los astrónomos han dedicado innumerables horas de trabajo a la determinación de esa constante. Algunos de los valores aceptados por la comunidad científica, desde esa fecha, y la correspondiente edad del Universo están dadas en la tabla 1.

La *constante de Hubble* nos permite también encontrar una densidad media crítica del Universo,

Tabla 1

1929,	Hubble,	$H = 530 \frac{km}{Mpc.seg}$;	$t = 1,846.108$ millones de años
1955	Baade & Swope,	$H = 100 \frac{km}{Mpc.seg}$;	$t = 9,784.373$ millones de años
1962,	Sandage,	$H = 98 \frac{km}{Mpc.seg}$;	$t = 9,984.054$ millones de años
1968,	Sandage,	$H = 75 \frac{km}{Mpc.seg}$;	$t = 14,681.564$ millones de años
1975,	Tamann & Sandage,	$H = 50 \frac{km}{Mpc.seg}$;	$t = 19,568.746$ millones de años

para la cual la energía potencial negativa de la masa equilibra la energía cinética positiva de la expansión. Esta cantidad está expresada matemáticamente como:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (5)$$

siendo G la constante gravitacional.

La densidad crítica para los diferentes valores de la constante de Hubble se da en la tabla 2.

Del lado derecho hemos anotado el número de átomos de hidrógeno por m^3 que corresponden a los valores de la densidad crítica, los cuales son pequeñísimos comparados con el número de partículas que se encuentran todavía cuando se logra un ultravacío en el laboratorio: 32 billones de partículas por m^3 .

El signo de la energía total (la suma de la energía potencial y de la energía cinética) está acoplado con el signo que representa la curvatura del espacio a través de la ecuación fundamental de la cosmología:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = H^2 \left[\frac{1}{R} \left(\frac{\rho_0}{\rho_c}\right) \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}\right) \right] \quad (6)$$

En esta ecuación ρ_0 es la densidad de materia actual, t es el tiempo, y todas las demás cantidades ya se han definido con anterioridad.

La ecuación (6) representa el principio de la conservación de la energía. El lado izquierdo representa la energía cinética del sistema físico por unidad de masa; el primer término del lado derecho es la energía potencial y el segundo es la energía total, también por unidad de masa.

Vamos a analizar ahora los tipos de universos surgidos de las posibles soluciones a la ecuación (6), cuando la constante cosmológica es cero.

En el caso en que la densidad actual sea igual o menor que la densidad crítica, la energía total se anula o se hace positiva, respectivamente. Esta afirmación se infiere analizando el lado derecho de la ecuación (6). En estos dos casos, las gráficas de las soluciones de la ecuación (6) son secciones de parábolas con pendiente siempre positiva, representadas por las curvas 1 y 2 en la figura 3. Estas gráficas representan precisamente uni-

Tabla 2

$5,287859 \cdot 10^{-28}$ gr/cm ³	\approx	315.71 H/m ³
$1,88247 \cdot 10^{-29}$ gr/cm ³	\approx	11.23 H/m ³
$1,807923 \cdot 10^{-29}$ gr/cm ³	\approx	10.79 H/m ³
$1,058888 \cdot 10^{-29}$ gr/cm ³	\approx	6.32 H/m ³
$4,706175 \cdot 10^{-30}$ gr/cm ³	\approx	2.81 H/m ³

versos en expansión, pues a medida que crece el tiempo t , a lo largo de las abscisas, va creciendo también el radio del universo $R(t)$ en las ordenadas. La solución de la ecuación (6) con la condición $\rho_c = \rho_0$ fue obtenida por de Sitter en 1922 y se le conoce en la literatura como el universo de Einstein de Sitter.

Por otro lado, si la densidad actual del universo es mayor que la densidad crítica ρ_c , la energía total es negativa, la energía potencial es negativa y la cinética es positiva. Esto significa que la energía potencial es la *dominante*. Ante tal situación, es posible pensar que existe un punto temporal para el cual la energía cinética equilibre a la energía potencial y después la *domine*. Esta situación ocurre precisamente en la solución representada por la curva 3 en la figura 3. Antes del punto t_m la gráfica representa una expansión debida al dominio de la energía cinética sobre la potencial. Después del punto t_m se invertirá la situación, esto es, la energía potencial será mayor que la cinética y comenzará la fase de contracción.

Como se puede deducir del análisis presentado hasta aquí acerca de nuestro Universo, la determinación del modelo depende básicamente de la densidad actual de materia y de la densidad crítica, que está íntimamente relacionada con la *constante de Hubble*. Esta es la razón por la cual se sigue invirtiendo gran cantidad de trabajo y talento en la determinación de estas dos cantidades.

El valor aceptado por la comunidad científica para la densidad actual es de $2 \cdot 10^{-31}$ gr/cm³; esto es, un átomo de H por m³. Este valor es menor que cualesquiera de los valores críticos de la densidad que hemos visto: 2.81 H/m³. Según estos dos valores de ρ_0 y ρ_c nos encontramos ahora a 10,000 millones de años de haber comenzado la expansión (punto t_0 en la figura 3) y así permaneceremos por siempre; pues nuestro universo corresponde al modelo representado por

la curva 2 de la figura 3. Sin embargo, esto no es definitivo, pues desde hace unos 15 años ha aparecido la idea de que el neutrino, una partícula cuya masa se había aceptado que era cero, podría tenerla positiva y aunque ésta fuera 4000 veces más pequeña que la de un electrón, sería suficiente para proporcionarnos una densidad de masa actual mayor a la crítica y entonces tendríamos un Universo cerrado.

Debe mencionarse que hasta el momento el problema de la determinación de la masa del neutrino es un problema abierto, es decir, no se ha confirmado experimentalmente masa alguna para esta partícula, aunque hay grandes grupos de científicos en todo el mundo en su busca.

A pesar de esta indeterminación, vale la pena preguntar cuál es el estado actual de nuestro Universo en el caso en que sea cerrado, ¿no es

cierto?. Pues bien, en este caso, el tiempo máximo de expansión (t_m en la fig. 3) lo alcanzará dentro de 47,000 millones de años y después de allí nos faltarán 57,000 millones de años para que nuestro actual Universo termine su fase de contracción en un punto. ¡Muchos años!, así que por el momento, el fin del Universo no es motivo de preocupación. Aunque puede aparecer otra teoría sobre la historia del Universo que niegue la actual y prediga una contradicción temprana, no sería mañana la vispera...

Bibliografía

Berry M. *Principles of cosmology and gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.

Lang K. R. *Astrophysical Formulae*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.

Novikov I. D. *Evolution des Universums*, BSB B.G.T. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1982.

