

LA EXPANSIÓN ACELERADA Y LOS PREMIOS NOBEL DE FÍSICA 2011

THE ACCELERATED EXPANSION OF THE UNIVERSE AND THE 2011 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

H. PÉREZ ROJAS

Instituto de Cibernética, Matemática y Física,
Calle E 309, 10400 Habana, Cuba.

El premio Nobel de Física 2011 fue concedido a tres investigadores por el descubrimiento de que nuestro Universo se expande aceleradamente. Una posible interpretación es que se debe a la acción de una presión negativa ejercida por la llamada energía oscura, que se supone constiye el 72 % de la energía actual del Universo

The 2011 Nobel prize in Physics was given to three researchers for the discovery of the accelerated expansion of the Universe. A possible interpretation is that it is due to a negative pressure exerted by the so-called dark energy, which is estimated to account for 72% of the current mass of the Universe

Keywords. Origin and formation of the Universe, 98.80.Bp; Big Bang theory, 98.80.Bp; Dark energy, 95.36.+x; Dark matter, 95.35.+d

INTRODUCCIÓN

El Premio Nobel de Física 2011 fue otorgado a Saul Perlmutter (del Supernova Cosmology Project, Lawrence Berkeley National Laboratory and University of California, Berkeley, CA, USA) y la otra mitad conjuntamente a Brian P. Schmidt, (del High-z Supernova Search Team, Australian National University, Weston Creek, Australia) y Adam G. Riess (del High-z Supernova Search Team, John Hopkins University and Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD, USA)

Las razones para este otorgamiento tienen sus raíces en un hallazgo publicado en 1998, y que provocó una sacudida en la cosmología por los descubrimientos realizados por los dos grupos de investigación. El primero de éstos, liderado por Saul Perlmutter, comenzó en 1988. Brian Schmidt encabezó el otro grupo, fundado a fines de 1994, y en el cual Adam Riess fue una figura muy destacada. Ambos grupos competían en hacer un mapa del Universo, ubicando las supernovas más distantes, y usaron un tipo particular de supernova, llamado supernova de tipo *Ia*,



Figura 2. Premios Nobel de Física 2011. De izquierda a derecha, Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess (fotos tomadas de http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/)

que se produce por la explosión de una enana blanca, (una estrella compacta) que transformó todo su hidrógeno en helio y carbono. Las enanas blancas resultan de las evolución de estrellas cuya masa no excede 1:4 veces la masa del Sol $M_{\odot} \simeq 1.99 \times 10^{30}$ Kg. Están compuestas de un gas de electrones completamente degenerado y de núcleos de elementos ligeros, como el carbono. Son muy densas pues su volumen es comparable al de la Tierra, es decir, alcanzan densidades del orden o mayores de 10^7 g/cm³. Son pálidas y muy calientes ($\sim 10^8$ K) y pueden incrementar su masa extrayendo hidrógeno de alguna estrella vecina, reiniciando la fusión. Si el proceso de fusión continúa, a la par que incrementa su masa, la enana blanca sobrepasa su límite de estabilidad y explota en una Supernova tipo Ia, liberando energía del orden de 10^{44} J. Tales supernovas tienen un brillo mayor que toda la galaxia a la que pertenecen, y son tan similares en sus características que han sido tomadas como luminarias patronas para estimar las distancias intergalácticas.

Los dos grupos encontraron unas 50 supernovas cuya luz era mas débil de lo esperado, lo cual indicaba que estaban más lejos y que el Universo se está acelerando. Durante casi un siglo se conocía que el Universo se expande como consecuencia de una Gran Explosión ocurrida unos 14 mil millones de años atrás. El nuevo descubrimiento implicaba que la expansión se produce de forma acelerada. Pero ¿por qué es acelerada?

Intentaremos responder a esta pregunta más abajo. Recordemos antes algunas de las ideas básicas de la relatividad general y de la evolución del Universo.

IDEAS BÁSICAS DE LA RELATIVIDAD GENERAL

Supongamos un elevador que cae libremente. Un observador que viaja en su interior, se sentiría sin peso, en completa ingravidez. Si tiene una pelota en la mano y la suelta, sin impulsarla, la pelota se mantiene en el aire, cayendo junto con el resto del sistema. El hecho de caer libremente, acelerado por la acción de la gravedad, trae como consecuencia que, para el mencionado observador, todo pasa como si se hubiese suprimido la gravedad dentro del elevador. Este mismo efecto produce la sensación de ingravidez dentro de los satélites artificiales. El satélite está cayendo continuamente hacia la Tierra, mientras describe su órbita. Tenemos la equivalencia entre la masa inercial y la gravitacional, expresada mediante la igualdad $m_i = m_g$ y, como consecuencia, la aceleración de la gravedad es la misma para todos los cuerpos, si se desprecia la resistencia del aire. Vemos así que un sistema acelerado y un campo gravitatorio producen efectos similares, o dicho en otros términos, el movimiento en sistemas acelerados equivale al producido por la presencia de un campo gravitatorio. Según lo establecido por el principio de equivalencia fuerte en todo campo gravitacional, un elevador en caída libre se convierte localmente en un sistema en el cual las leyes de la física serían las mismas que en la relatividad especial, es decir,

en un sistema inercial. El caso es idéntico para un satélite artificial, en el cual se produce la ingravidez como consecuencia de que el satélite está cayendo continuamente hacia la Tierra durante el recorrido de su órbita. En Relatividad General se expresa el principio de equivalencia en la forma de covarianza generalizada, lo cual significa que en un campo gravitacional una ecuación es válida si se cumplen dos condiciones: 1) la ecuación se cumple en la ausencia de gravitación, es decir, en el esenario de la relatividad especial, y 2) la ecuación es covariante en general, es decir, preserva su forma ante cualquier transformación de coordenadas.

III. ECUACIONES DE EINSTEIN Y EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Pero la Relatividad General conduce a la formulación de las leyes dinámicas, contenidas en las llamadas Ecuaciones de Einstein, que relacionan la geometría del espacio-tiempo con el llamado tensor de energía-momentum. En otras palabras, establecen la dependencia entre la geometría del espacio-tiempo, que es la nueva forma de describir la gravitación, con respecto a la distribución de masa-energía y la ecuación de estado. Esto la convierte en la teoría física idónea para estudiar al Universo, haciendo la teoría de la gravitación de Newton un caso límite de una teoría más general.

El fisico-matemático ruso Alexander Friedmann (1888-1925) estudió las ecuaciones de Einstein aplicadas al Universo, suponiendo una densidad homogénea e isótropa, y llegó a la conclusión de que eran posibles dos soluciones: el modelo cerrado y el modelo abierto o de expansión perpetua. Físicamente, la condición de universo abierto (de expansión perpetua) o cerrado (universo pulsante) lo determina la densidad de energía o de materia. Si se supone la distancia entre dos galaxias como $d(t) = R(t)d_0$, su velocidad relativa se puede escribir: $v = [\dot{R}(t)/R(t)]d(t)$. Es decir, la velocidad es proporcional a la separación entre las galaxias, con un factor de proporcionalidad $H(t) = \dot{R}(t)/R(t)$: el parámetro de Hubble. Aquí llamamos a $R(t)$ factor de escala cósmico y es adimensional, que mientras que $H(t)$ tiene dimensiones de inverso de tiempo, o bien de velocidad por unidad de longitud. El valor presente se suele designar por H_0 y se le llama constante de Hubble. Diferentes mediciones dan diferentes valores para la constante de Hubble, que oscilan entre 73, 8 y 67, 0 km/s por Megaparsec. Un Megaparsec es aproximadamente 3×10^{19} km, que equivale a unos tres millones de años-luz. Vamos a analizar el problema utilizando la mecánica newtoniana familiar a todos, pero tomando en cuenta la ley de Hubble. Consideremos una galaxia de masa m bajo la atracción gravitacional del resto del universo, de masa M . Como $M \gg m$, se puede considerar $M + m \simeq M$, que resulta en la ecuación

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = E, \quad (1)$$

donde E es la energía total del sistema galaxia escogida en el campo gravitacional del resto del Universo. Sabemos de la mecánica clásica que si el momentum angular no es cero, para $E < 0$ tenemos órbitas cerradas (elípticas), para $E > 0$ órbitas hiperbólicas y para $E = 0$, órbitas parabólicas. Pero aún para momentum angular nulo, si $E = 0$, el cuerpo puede escapar de la atracción gravitacional. Escribamos $v = \dot{R} = HR$ y $r = R$, donde H es el parámetro de Hubble y R el radio del universo (en este caso para simplificar la notación tomamos a R con dimensiones de longitud). Tomemos $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$, donde ρ es la densidad media del universo, y sustituyamos en (1)

$$\frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{4\pi\rho GR^2}{3} = \frac{E}{m} = \frac{-K}{2}. \quad (2)$$

Esta es una forma no-relativista de obtener la ecuación básica de Einstein del modelo de Friedmann para la expansión del universo homogéneo e isótropo, idéntica a la obtenida usando el formalismo relativista, si se parte de la llamada métrica de Robertson-Walker, que es una métrica compatible con las condiciones de homogeneidad e isotropía (a estas condiciones a veces se les llama Principio Cosmológico), que se suponen válidas a una escala superior a los 300 millones de años-luz. Tenemos entonces los casos posibles de universo abierto, hiperbólico y plano ($K \leq 0$) y cerrado ($K > 0$). De acuerdo con (2), la condición crítica para escapar la galaxia en el universo en expansión se tiene cuando $K = 0$, es decir, para la densidad

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \simeq 10^{-29} \text{ g/cm}^3. \quad (3)$$

Pero para obtener la dependencia del factor de escala $R(t)$ con respecto al tiempo, no sólo es necesario resolver las ecuaciones de Einstein, que darían la ecuación (2), sino también las ecuaciones de conservación de la energía y la ecuación de estado.

En los tres casos, para cualquier valor de K, el modelo de universo no es estático y debe estar en expansión o contracción. Inicialmente, ante la idea de un Universo estacionario, Einstein introdujo una constante cosmológica λ que sumó a sus ecuaciones. Pero ésto se hizo a la larga innecesario, pues pronto apareció la idea de la expansión, interpretada como que las galaxias se alejan unas de otras, con velocidad creciente, porque aumenta su separación mutua. Si esto ocurre, debe producirse un fenómeno llamado de corrimiento hacia el rojo para los espectros de la luz proveniente de las galaxias remotas. Este fenómeno fue descubierto en 1925 por el astrónomo norteamericano Edwin P. Hubble (1889-1953), y constituyó una confirmación más de los resultados de la teoría general de la relatividad. (Aunque esto implicó que la constante cosmológica no era necesaria, la idea ha resurgido ante la expansión acelerada, como veremos después).

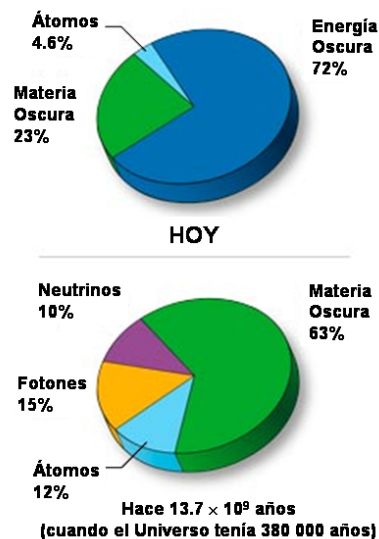


Figura 2. Composición estimada del Universo en dos momentos de su evolución.

Pero si nuestro universo se expande, las galaxias se alejan unas de otras con velocidad creciente y esta expansión sugiere, necesariamente, que hubo un momento inicial en el cual la materia que compone estas galaxias estuvo concentrada en una región pequeña del universo (singularidad inicial). Ello produjo una gran explosión (Big-Bang), que se estima ocurrió hace unos 10 o 20 mil millones de años. En las últimas décadas se ha adoptado un modelo en el que la expansión, en los primeros instantes, se produjo de tal forma que el radio del Universo creció exponencialmente con el tiempo, en un proceso llamado iniciación.

Con respecto a la distribución de estas galaxias que se alejan en todas direcciones del espacio, se ha descubierto en los últimos años que se agrupan en racimos o super-racimos, separados por vacíos, con una distribución celular, que sugiere que a una escala colosal de 390 millones de años-luz, forman una estructura parecida a un panal de abejas.

La temperatura de la bola inicial, donde estaba concentrada la materia que compone nuestro universo visible, era extraordinariamente alta, del orden de 10^{32} K y decreció rápidamente a valores entre 10^{10} y 10^9 K, pocos segundos después de la explosión. Esta etapa se denomina de radiación predominante, porque la densidad de la radiación predominaba sobre la densidad de partículas en muy alto grado. En otras palabras, el número de fotones era mucho mayor que el de otras partículas. Al enfriarse la bola inicial en el proceso de expansión, se produjeron los procesos de la transición de fase electrodébil (por encima de 10^{15} K las interacciones electromagnética y débil se comportarían de manera similar, es decir, las débiles se harían de largo alcance; al bajar la temperatura, las débiles se vuelven de corto alcance, mientras que la electromagnética se mantiene de largo alcance) la generación de bariones (partículas pesadas, como protones), la condensación de átomos de hidrógeno, la formación de estrellas y en ellas, la síntesis del helio y de otros elementos ligeros. Los átomos más pesados se formaron des-

pués en el interior de las estrellas y en las supernovas. Con la expansión del universo, la temperatura media ha disminuido, el sistema se ha enfriado y estamos en la era del predominio de la materia, pues la mayor parte de la energía del universo está concentrada en las masas de las partículas nucleares. Como resultado de este colosal proceso cosmológico, era de esperar que quedase alguna huella de la radiación dominante durante las primeras etapas de la gran explosión. El físico ruso-americano George Gamow (1904-1968), predijo la existencia de esta radiación de fondo, correspondiente a un cuerpo negro, a bajas temperaturas.

En 1965, Arno Allan Penzias (1933-) y Robert Woodrow Wilson (1936 -) descubrieron esta radiación fósil, que recibimos desde todas las direcciones del espacio, y corresponde a una temperatura de unos 2.7 K. Esta radiación tiene una densidad de $4.40 \cdot 10^{-34} \text{ g/cm}^3$, mientras que la densidad de materia es del orden de 10^{-29} g/cm^3 , es decir, 10^5 veces mayor. Esto justifica nuestra afirmación de que vivimos la era del predominio de la materia. En un universo abierto habría expansión infinita y en uno cerrado, las expansiones y contracciones se alternarían sucesivamente. El tiempo que requeriría cada uno de estos ciclos escapa a toda imaginación. La densidad crítica es $\rho_c \simeq 2 \cdot 10^{-29} \text{ g/cm}^3$. Este número se modificaría con mejores aproximaciones de H. Actualmente se estima que la densidad del Universo es menor que la crítica. Esto significaría que para que el universo fuese cerrado (de acuerdo con las ideas anteriores a 1998), debería haber una cierta cantidad de materia oscura, es decir, no identificable o no visible en cantidad suficiente para garantizar $\rho \geq \rho_c$ y que fuese $K > 0$. Pero este no es el modelo aceptado en el presente.

MATERIA OSCURA Y ENERGÍA OSCURA

La materia oscura fue propuesta por Fritz Zwicky (1898-1974) en 1934 para justificar la evidente materia faltante para explicar la velocidad de rotación de las galaxias. Pero existen otros efectos astrofísicos que la justifican.

Se acepta ampliamente la existencia de la materia oscura. En parte, estaría constituida por materia bariónica que emita muy poca radiación, como estrellas oscuras y planetas, pero en su mayor parte se considera compuesta por partículas no bariónicas, que no forman átomos, y que interactúan mediante la atracción gravitacional y la fuerza débil (neutrinos, y otras hipotéticas partículas). Pero no se tiene aún evidencia experimental suficiente de la naturaleza de esta forma de materia oscura.

Pero como señalamos al inicio, de las observaciones realizadas resulta que nuestro Universo no sólo es abierto, sino que se expande aceleradamente, de acuerdo con los trabajos de Perlmutter, Schmidt y Riess. Pero ¿qué cosa provoca la expansión acelerada? Se ha propuesto una causa: la existencia de una energía oscura, que permea todo el espacio.

Hay dos candidatos principales para la energía oscura: la constante cosmológica, constituida por una densidad de energía constante, y la de campos escalares, llamados quintaesencia, cuya densidad de energía variaría en tiempo y espacio.

Se puede demostrar que suponer una constante cosmológica es equivalente a admitir la existencia de una energía del vacío cuántico. En este último caso, si la densidad de energía del vacío es positiva, $\rho > 0$, se puede demostrar que la presión sería negativa, $p = -\rho$. Es interesante considerar la ecuación de Einstein en términos de la aceleración:

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G(\rho + 3p)R}{3} \quad (4)$$

Pero $(\rho + 3p) = -2\rho < 0$ y, en consecuencia, la expansión sería acelerada. Es decir, todo pasa como si el vacío cuántico ejerciera una fuerza gravitacional repulsiva con respecto a la materia, lo cual a corta distancia es insignificante, pero a escala cósmica provoca la expansión acelerada de todo el Universo. La composición del Universo se estima actualmente en un 72 por ciento de energía oscura, un 23 por ciento de materia oscura y un 5 por ciento de la materia que conocemos, compuesta en un 4,6 % de átomos y un 0,4 % de otras partículas, incluyendo radiación electromagnética. Pero estos porcentajes han variado en el tiempo.

La expansión acelerada es aceptada por la comunidad científica de tal modo, que por ello se le otorgó el Premio Nobel a sus descubridores. Ahora bien, la Historia de la Ciencia nos enseña que las ideas y conceptos pueden también cambiar con el tiempo. Puede ocurrir que la aceptación de la expansión acelerada haya sido un paso trascendental en la Ciencia, y que todas las nuevas observaciones la confirmen. Pero también puede ocurrir que no sea la última verdad, sino un paso intermedio. Por ejemplo, se ha propuesto por Christos Tsagas, cosmólogo de la Universidad de Aristóteles en Tesalónica, Grecia, que la expansión acelerada puede ser una ilusión causada por nuestro movimiento relativo con respecto al resto del Universo. Se basa en observaciones recientes de Alexander Kashlinsky, cosmólogo de la NASA, y colaboradores, quienes afirman que la región en que vivimos, una burbuja de 2,5 mil millones de años luz de extensión, se mueve con respecto al resto del Universo a una velocidad de entre 600 y 1000 km/s. Este "flujo oscuro", según Tsagas, puede llevar a la falsa conclusión de que nuestro Universo se acelera, cuando en realidad se esté desacelerando.

Todas estas ideas deben pasar por el tamiz de rigurosos análisis en un escenario en el que el papel del investigador está limitado a la observación (pues la experimentación le es totalmente inaccesible) y generalmente se requieren muchas y diversas observaciones, lo cual implica mucho tiempo y el uso de nuevas tecnologías, para aproximarse a la verdad científica.