

SEMBLANZAS DE LOS PREMIOS NOBEL

EN FÍSICA 2011

INTRODUCCIÓN

El Premio Nobel de Física de 2011 [1] fue para tres investigadores agrupados en dos proyectos de investigación independientes. Uno de ellos, liderado por SAUL PERLMUTTER (EE.UU., 1959), Supernova Cosmology Project que comenzó en 1988, y el otro liderado por

BRIAN P. SCHMIDT (EE.UU., 1967, nacionalizado australiano), High- z Supernova Search Team, con participación decisiva del tercer premiado, ADAM G. RIESS (EE.UU., 1969). La cuantía del premio se repartió al 50% entre los dos grupos de investigación, y no de forma alicuota entre los tres premiados.

La razón del premio fue por el hallazgo de la expansión acelerada del Universo mediante la medida de distancias usando supernovas del tipo Ia (SN-Ia) como velas estándar.

*Adam G. Riess**Brian P. Schmidt**Saul Perlmutter*

Figura 1. Los Dres. S. Perlmutter, A.G. Riess y B.P. Schmidt con sus medallas Nobel de Física 2011.

ANTECEDENTES: LA COSMOLOGÍA A FINALES DE LOS AÑOS 80

El estado de la Cosmología a finales de los años 80 estaba marcado por el modelo de Universo en expansión surgido a partir de la Teoría de la Relatividad General (TRG) de ALFRED EINSTEIN [2] y desarrollado por otros físicos como GEORGE LEMAÎTRE y ALEXANDER FRIEDMANN en los años 20 del pasado siglo. De sus trabajos se concluía que el Universo tuvo un principio en forma de gran explosión (posteriormente Fred Hoyle acuñó el término *Big Bang* para referirse a este suceso, con gran éxito de acogida incluso fuera del ámbito académico) a partir del cual el Universo se expande.

Esta expansión fue medida, también en esa época, por EDWIN HUBBLE, apoyándose en el descubrimiento de HENRIETTA LEAVITT de que el brillo absoluto de las estrellas variables Cefeidas estaba vinculado a su periodo de rotación [3]. Esto hacía que éste tipo de estrellas se convirtiera en la candela estándar, a partir de cuyo periodo y brillo relativo, determinar con precisión su distancia,

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}} \quad (1)$$

donde L es la luminosidad absoluta de la Cefeida –determinada a partir de su periodo– y l la luminosidad relativa observada desde la Tierra. Leavitt había encontrado la regla de medir cósmica.

Hubble ya había descubierto que muchas nebulosas eran realmente galaxias como la Vía Láctea [4], en las que, gracias al poder de resolución del nuevo telescopio de 2,5 m de Monte Wilson, era posible distinguir estrellas individuales. Estas galaxias presentaban espectros que correspondían a elementos habituales en las estrellas de nuestra galaxia, pero en muchas de ellas los espectros estaban ligeramente desplazados hacia el rojo, lo que implicaba que las galaxias se alejaban de nosotros, tanto más rápidamente cuanto mayor era el desplazamiento¹.

¹ En aquella época se atribuía el desplazamiento al rojo al efecto Doppler de una fuente luminosa –la galaxia observada– alejándose de nosotros; actualmente se interpreta que es la misma textura del espacio-tiempo la que se está expandiendo, separando los objetos que sobre ésta se asientan igual que dos marcas pintadas en un globo que se hincha se van separando entre sí.

Hubble encontró que el desplazamiento al rojo era tanto mayor cuanto mayor era la distancia a la galaxia observada –distancia medida con el método de las Cefeidas–, siguiendo un comportamiento aproximadamente lineal [5]:

$$z = H_0 d_L \quad (2)$$

donde H_0 es la constante de proporcionalidad, llamada obviamente *constante de Hubble* y z es el desplazamiento al rojo (*redshift*) que se expresa de la siguiente forma:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (3)$$

donde λ_0 es la longitud de onda de una determinada línea del espectro y λ la longitud de onda de esa misma línea emitida por la galaxia bajo observación.

La pregunta que se planteaba entonces era si nos encontrábamos en un Universo que se expandiría indefinidamente (Universo abierto), o bien se frenaría en algún momento bajo la acción de la gravedad si hubiera suficiente densidad de masa-energía (Universo cerrado); o bien, si la densidad tendría un valor crítico que hiciera ese frenado asintótico (Universo plano). En cualquiera de los tres escenarios la expansión del Universo debería estar frenando con una cierta tasa, q_0 , a partir del impulso inicial del Big Bang.

La constante cosmológica

El propio Einstein [6] fue de los primeros en explorar la evolución del Universo a partir de las ecuaciones de la TGR; las soluciones a las que llegó mostraban un Universo inestable que era contrario al paradigma de lo que se pensaba en aquella época, y contrario a las propias convicciones de Einstein, el cual introdujo la constante cosmológica, λ , para “equilibrar” el Universo. Pero Friedmann [7] demostró que las ecuaciones obtenidas por Einstein seguían siendo inestables, aún con la constante cosmológica en juego, de acuerdo con su propia línea de investigación. Posteriormente, Einstein llegó a renegar de su constante cosmológica, como dijo en una carta a Lemaître: *soy incapaz de creer que una cosa tan fea pueda ser real en la Naturaleza*².

² A este respecto, Einstein no llegó nunca a expresar esa idea en términos de “el mayor error de su vida”, como le atribuye la cultura popular. Fue el físico y divulgador científico GEORGE GAMOW quien, a modo de hipérbolo, puso en su boca esas palabras (“the biggest blunder”) en un artículo publicado

Pero, muy a su pesar, la constante cosmológica entró definitivamente en las ecuaciones como un parámetro más, ajustable a las evidencias experimentales.

En 1934 Lemaître [8] sugirió que la constante cosmológica se podía interpretar como una densidad de energía que permeaba todo el Universo, $\rho_\Lambda = \Lambda/(8\pi G)$ (G es la constante de gravitación universal, introducida por Newton). Fue el primero en acuñar el término “energía del vacío” para referirse a ella.

Podemos establecer que existen distintos tipos de energía y la fracción de la densidad de cada una de ellas nombrarla como Ω_i ,

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

donde ρ_c sería la densidad crítica necesaria para cerrar el Universo, de forma que en un modelo de Universo plano $\sum \Omega_i = 1$

El Principio Cosmológico

Einsten, Friedmann y Lemaître estaban aplicando implícitamente la suposición de que, en la escala de distancias cosmológicas, el universo es esencialmente homogéneo e isótropo y que la Tierra –volviendo de nuevo a Copérnico– no ocupa un lugar privilegiado en él. Esta asunción fue formulada con rigor por HOWARD ROBERTSON [9–11] y ARTHUR WALKER [12] en 1936 y se la llamó Principio Cosmológico. A partir de entonces, la evidencia acumulada en favor del Principio Cosmológico fue creciendo hasta que en 1964, el descubrimiento del extremadamente regular e isótropo fondo cósmico de radiación microondas (Cosmic Microwave Background, CMB) por ARNO PENZIAS y ROBERT WILSON [13], asentó definitivamente esta cuestión.

Además, el Principio Cosmológico permite asimilar la forma del tensor energía-momento del Universo, $T_{\mu\nu}$, al de un fluido relativista de cierta densidad ρ y presión p , o a una mezcla de distintos tipos de fluido. La relación entre presión y densidad se establece a partir de una ecuación de estado, $\omega_i = p_i/\rho_i$, donde ω_i vale 0 para la materia ordinaria no relativista (llamada “cold matter”, materia fría, en el argot), $1/3$ si se trata de fotones y -1 si se trata de energía del vacío ligada a la constante cosmológica.

Bajo el Principio Cosmológico, y asumiendo provisionalmente la hipótesis de Universo plano, el infinitesimal

en Scientific American en el año 1956 (Einstein murió en 1955) y repetido posteriormente en otras publicaciones suyas.

mal de línea invariante, ds , se puede expresar en coordenadas esféricas de la siguiente forma (tomamos la velocidad de la luz $c = 1$):

$$ds^2 = dt^2 - a(t) \left[dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2 \right]$$

donde $a(t)$ es un factor de escala adimensional cuya evolución recoge la evidencia del Universo en expansión. De esta forma, la distancia cosmológica entre dos galaxias separadas por r en un cierto tiempo t es $a(t) r$. El desplazamiento al rojo se puede escribir en términos del factor de escala como:

$$z = \frac{a(t_1)}{a(t_0)} - 1$$

donde t_1 es el tiempo actual y t_0 el tiempo cuando fue emitido el fotón; de hecho, se está manifestando la misma relación entre las longitudes de onda que vimos en la ecuación (3). La constante de Hubble expresa la tasa de crecimiento del factor de escala,

$$H_0 = \frac{\dot{a}}{a}$$

(el punto indica derivación respecto al tiempo) y la deceleración del Universo se puede definir también en términos del factor de escala como:

$$q_0 = -\frac{\ddot{a} a}{\dot{a}^2} = -\frac{\ddot{a}}{a H_0^2}$$

A partir de las soluciones de Friedmann a la ecuación del Einstein, aplicada a todo el Universo con las aproximaciones y suposiciones que se han descrito, el factor de deceleración viene dado por:

$$q_0 = \frac{1}{2} \sum_i \Omega_i (1 + 3\omega_i) \tag{4}$$

donde las mayores contribuciones se esperan que sean la materia ordinaria, Ω_M , y la energía del vacío –cuya denominación reciente había pasado a ser energía oscura– asociada a la constante cosmológica, Ω_Λ .

Medir la deceleración del Universo

A partir de la ecuación (4) es evidente que si se consigue estimar la tasa de deceleración q_0 , se podrá establecer una aproximación de las distintas contribuciones al tensor energía-momento del Universo, Ω_i . De las medidas de distancia por luminosidad, d_L , ver ecuación (1),

se puede inferir q_0 a través de una complicada relación con el desplazamiento al rojo, cuyo desarrollo en serie es más fácil de entender:

$$d_L = \frac{1}{H_0} \left[z + \frac{1}{2}(1-q_0)z^2 + \dots \right] \quad (5)$$

Obsérvese que para desplazamientos al rojo pequeños recuperamos la ley de Hubble (2). Pero para que los cálculos tengan precisión se necesitaban medidas de d_L de galaxias cuyos desplazamientos al rojo fueran significativamente más altos que los que se habían medido hasta el momento. Las nuevas técnicas de captación de imagen con CCD, junto con otros avances técnicos y fundamentales, iban a permitir dar el salto.

LA CONTRIBUCIÓN DE LOS PREMIADOS

Ésta era la situación a finales de los años 80, cuando varios equipos de investigación se pusieron a la tarea de

intentar medir galaxias con un desplazamiento al rojo suficientemente elevado ($z > 0,3$) para poder medir la deceleración del Universo. El problema más inmediato era encontrar una nueva candela estándar, puesto que el método de Leavitt de las Cefeidas dejaba de ser efectivo a unos 10 Mpc debido a la disminución de la luminosidad relativa.

Las supernovas como candelas estándar

En 1938, los astrónomos WALTER BAADE [14] y FRITZ ZWICKY propusieron usar supernovas como estándar de luminosidad debido a que, por su potencia, podían ser medidas a grandes distancias. Pero, por el momento, sólo un tipo de supernovas cumplen con la premisa de ofrecer el mismo brillo absoluto y la misma curva de evolución de luminosidad, independientemente de su origen: son las llamadas supernovas de tipo Ia (SN-Ia).

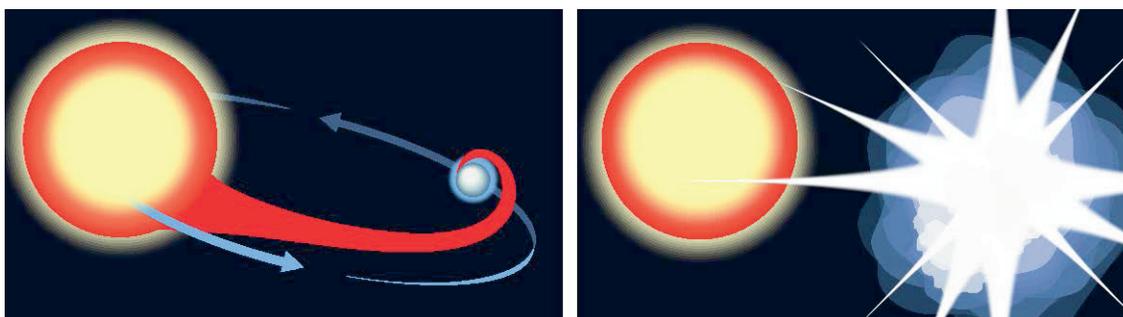


Figura 2. Mecanismo de formación de SN-Ia.

Las supernovas SN-Ia se producen en sistemas binarios en los que una de las estrellas ha evolucionado hacia la condición de enana blanca. En cierto momento, la acompañante entra en fase de gigante roja, creciendo en tamaño de tal forma que parte de su materia queda fuera del lóbulo de Roche y empieza a acretarse en torno a la enana blanca. Cuando la masa de la enana blanca, enriquecida por el material de la compañera, supera el límite de Chandrasekhar (1,4 masas solares) se produce una explosión que libera gran cantidad de energía en el espectro visible.

La SN-Ia se distingue bien de otros tipos de supernova por su espectro, que muestra una línea característica del silicio ionizado. Además, sirve como candela estándar, puesto que su máximo de luminosidad es siempre el mismo, con muy poca variación de una supernova a otra. Como se ve en la Figura 3, la curva de luminosidad tiene un ancho de varias semanas.

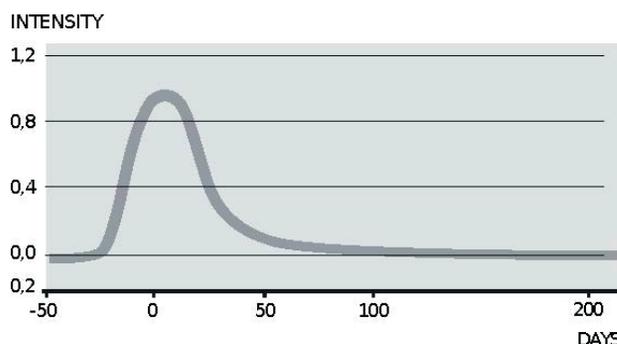


Figura 3. Curva de luminosidad de SN-Ia.

Supernovas a la carta

Las SN-Ia son sucesos poco frecuentes. Típicamente tienen lugar dos sucesos de este tipo por milenio en cada galaxia. Por lo tanto, no es fácil *a priori* saber dónde buscar.

En 1988, y como investigador del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), SAUL PERL- MUTTER inició el proyecto Supernova Cosmology Project (SCP), con el que pretendía localizar SN-Ia en galaxias con elevado z ($z > 0,3$), mediante una estrategia novedosa que llamó “supernova on demand” y que podemos traducir como “supernovas a la carta”.

Usando un telescopio de 4 m y una cámara CCD de gran campo, los investigadores del SCP registraban miles de galaxias durante las dos o tres noches posteriores a la luna llena; pasadas tres semanas, volvían a registrar las mismas galaxias y, usando técnicas avanzadas de procesado de imagen, encontraban unas docenas de supernovas, algunas de las cuales cumplían el requerimiento de ser SN-Ia y estar cerca del pico de luminosidad. Entonces, se programaba su seguimiento con los grandes telescopios de Chile, Hawai y La Palma. La primera SN-Ia de alto z fue descubierta en 1992 y hacia 1994 se habían contabilizado 7 SN-Ia. Los primeros resultados fueron publicados en 1995 [15].

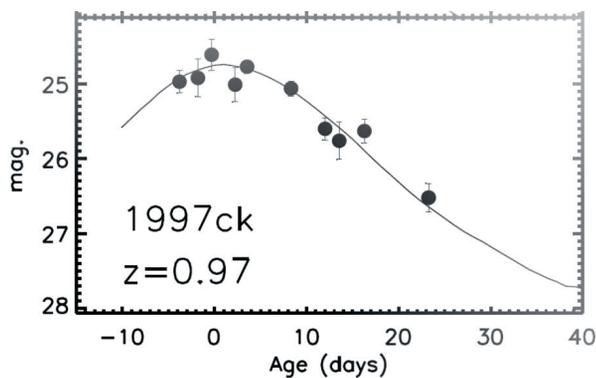


Figura 4. Curva de luminosidad de una de las supernovas medidas por el HZT.

Espoleado por el éxito de de la estrategia “supernovas a la carta”, así como por la importancia de establecer el valor de q_0 , BRIAN SCHMIDT, del observatorio de Mount Stromlo (Australia) comenzó en 1994 un proyecto competidor con el SCP, *High-z Supernova Search Team*, HZT, en colaboración con investigadores del Observatorio Interamericano en Cerro Tololo, Chile. Éstos llevaban ya unos años calibrando las SN-Ia como candelas estándar [16].

El HZT tuvo tanto éxito en la aplicación de la estrategia “supernovas a la carta” como su competidor, el SCP. En 1998 ambos grupos ya divulgaban sus resultados en conferencias internacionales, lo que culminó con la publicación de sus respectivos artículos, que incluían 42 supernovas, en el caso del SCP [17] y 16 supernovas,

analizadas principalmente por ADAM RIESS –entonces investigador postdoctoral en la Universidad de California, en Berkeley–, en el caso del HZT [18].

Universo acelerado

Las medidas de ambos grupos arrojaban unos resultados sorprendentes. El brillo aparente de las supernovas era bastante inferior al esperado, hasta un 25% inferior, considerando el modelo de Universo “todo materia” ($\Omega_A = 0$); incluso entre un 10% y 15% considerando un modelo de Universo en expansión constante ($\Omega_A = \Omega_M = 0$).

Aplicando la fórmula elemental de distancia en función de luminosidad (1) resultaba que las galaxias estaban más lejos de lo previsto y, de acuerdo con la aproximación (5), la conclusión evidente era que el factor deceleración q_0 es negativo, por lo tanto, no sólo el Universo no frena su expansión, sino que ésta se ve acelerada.

Además, a partir de la ecuación de la deceleración (4), este hecho traería como consecuencia que la composición del Universo se decantaría por abrumadora mayoría hacia la enigmática energía oscura.

Esta sorprendente conclusión fue aceptada por la comunidad científica con relativa rapidez, considerándose un factor decisivo en esa aceptación que dos grupos independientes llegaron a resultados muy similares.

CONCLUSIÓN

Los trabajos realizados por los tres premiados y sus colaboradores han permitido profundizar en la historia de nuestro Universo y atisbar su sorprendente dinámica. El escenario que dejan sus investigaciones –en conjunción con los datos obtenidos del CMB y de otra línea de investigación cosmológica, *Barion Acoustic Oscillations* (BAO)– es el de un Universo donde la materia ordinaria³ es minoritaria, $\Omega_M \approx 0,25$, frente a la energía oscura, $\Omega_A \approx 0,75$.

A cambio nos han dejado sin resolver la incógnita de qué es exactamente la energía oscura y cómo relacionarla con el conocimiento fundamental de la materia a través de la física de partículas.

³ Se incluye aquí también la denominada *materia oscura*, otra misteriosa sustancia que mantiene unidas las galaxias.

REFERENCIAS

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/.
- [2] A. Einstein: *Die Feldgleichungen der Gravitation*. Sitzungsber Preuss. Akad. Wiss., 844–847, Berlin (1915).
- [3] H.S. Leavitt: *1777 variables in the magellanic clouds*. Annals of Harvard College Observatory, **60**, 87–108 (1908).
- [4] E.P. Hubble: *Extragalactic nebulae*. Astrophys. J., **64**, 321–369 (1926).
- [5] E.P. Hubble: *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*. Proc. Nat. Acad. Sci., **15**, 168–173 (1929).
- [6] A. Einstein: *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsber Preuss. Akad. Wiss., 142–152, Berlin (1917).
- [7] A. Friedmann: *Über die Möglichkeiten einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*. Zeitschrift für Physik, **21**, 326–332 (1924).
- [8] G. Lemaitre: *Evolution of the expanding universe*. Proc. Nat. Acad. Sci., **20**(1), 12–17 (1934).
- [9] H.P. Robertson: *Kinematics and world structure*. Astrophys. J., **82**, 284–301 (1935).
- [10] H.P. Robertson: *Kinematics and world structure II*. Astrophys. J., **83**, 187–201 (1936).
- [11] H.P. Robertson: *Kinematics and world structure III*. Astrophys. J., **83**, 257–271 (1936).
- [12] A.G. Walker: *On the milne's theory of world-structure*. Proc. Lond. Math. Soc. (2), **42**, 90–127 (1936).
- [13] A.A. Penzias & R.W. Wilson: *A measurement of excess antenna temperature at 4080 mc/s*. Astrophys. J., **142**, 419–421 (1965).
- [14] W. Baade: *The absolute photographic magnitude of supernovae*. Astrophys. J., **88**, 285–304 (1938).
- [15] S. Perlmutter et al.: *A supernova at $z = 0.458$ and implications for measuring the cosmological deceleration*. Astrophys. J., **440**, L41–L44 (1995).
- [16] M. Hamuy et al.: *The 1990 Calán/Tololo Supernova Search*. Astron. J., **106**, 2392–2407 (1993).
- [17] S. Perlmutter et al.: *Measurement of O and A from 42 high-redshift supernovae*. Astrophys. J., **517**, 565–586 (1999).
- [18] A.G. Riess et al.: *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. Astron. J., **116**, 1009–1038 (1998).

Manuel Pancorbo Castro
Dpto. de Física de los Materiales