

02

1^{er} semestre 2012

Beauchef

MAGAZINE

Revista de Ingeniería y Ciencias de la Universidad de Chile



Calán-Tololo y la aceleración del **universo**

Adiós
al copy - paste

Tecnología para la
discapacidad

Las verdades de la
Falla San Ramón

El proyecto Calán-Tololo y la aceleración del **universo**

El descubrimiento de la aceleración del Universo ha sido motivo para conceder el Premio Nobel de Física 2011 a los astrónomos Perlmutter, Schmidt y Riess por sus estudios en base a supernovas tipo "Ia". La fundamental contribución científica a este logro del proyecto Calán-Tololo C&T fue reconocida por la Real Academia de Ciencias de Suecia, el 4 de octubre de 2011 a través de su Scientific background del Nobel de Física del año, donde se indica que los datos del proyecto Calán-Tololo «resultaron esenciales para demostrar que las supernovas tipo "Ia" eran útiles como patrones lumínicos».

Por Prof. José Maza y Mario Hamuy*

La cosmología estudia el comportamiento del Universo a grandes escalas. Isaac Newton, luego de enunciar las Leyes de la Mecánica, fue uno de los primeros en abordar el tema y llegó a la conclusión de que el Universo debía ser infinito o de otro modo se colapsaría por su propia gravedad.

Esta disciplina no avanzó prácticamente nada en los siglos XVIII y XIX. No obstante, a principio del siglo XX, Einstein enuncia su Teoría de la Relatividad que cambiaría la percepción del Universo conocido, desarrollando en 1917 el primer modelo cosmológico moderno. En él se asume la existencia de una fuerza repulsiva a gran escala que contrarrestaría la fuerza de gravedad; manteniendo el Universo en un equilibrio estático. Sin embargo, esta solución no encontró eco en la comunidad científica de aquel entonces. Años más tarde incluso, la constante cosmológica Λ que caracteriza la repulsión en la teoría de Einstein, fue considerada el más grande disparate de su carrera científica.

En 1923, Alexander Friedman resolvió las ecuaciones de Einstein, excluyendo la

constante cosmológica, y llegó a la conclusión de que no pueden existir soluciones estáticas: el Universo debe estar en expansión o en contracción. A un resultado similar llegó también en 1927 Georges Lemaître. Dos años después, Edwin Hubble descubrió que las galaxias se alejan de la Vía Láctea y las más distantes lo hacen más rápido. Por ende, la velocidad de recesión va acorde con la distancia. Esta proporcionalidad entre velocidad de expansión y distancia, denominada “ley de Hubble”, constituyó la primera evidencia de que el Universo está en expansión.

A partir de la tercera década del siglo XX se acepta que el Universo se expande bajo la influencia única de la gravitación, lo que conlleva que su proceso de expansión se debe estar desacelerando. La gran pregunta que surgía era si la desaceleración sería (o no) suficiente para detener el Universo en su expansión y producir una contracción. Un Universo con una densidad muy baja (casi nula) no tendría «fuerza» suficiente para frenarse en un tiempo finito. Al contrario, un Universo muy denso sin duda se frenaría hasta detenerse y recolapsaría. De ahí que la cosmología observacional centrara su búsqueda en encontrar la constante de expansión

o constante de Hubble (H_0) y el valor del parámetro de desaceleración (q_0). Ya en la década de los 70, el valor de H_0 se empezó a conocer con bastante precisión. Hoy se acepta un valor de $71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, sin embargo, determinar el valor de q_0 fue más complejo. Serían necesarias casi dos décadas más de investigación (1998) para llegar a un valor que todos los astrónomos aceptaran.

De forma paralela, y especialmente hacia la segunda mitad del siglo XX, la comunidad astronómica trabajó para establecer algún mecanismo confiable y preciso de determinación de distancias extragalácticas, que permitiera alcanzar objetos a distancias cosmológicas. Si bien el método de las estrellas Cefeidas que utilizó Hubble en 1929 cumplía con la condición de ser el más preciso (con un margen de error de 5%), estos objetos son visibles solamente en galaxias muy cercanas. Un tipo de estrellas que cumplía con la condición de ser más luminosas que las Cefeidas eran las supernovas (SNs) o colosales explosiones estelares. En particular, las SNs de tipo “Ia” eran las más atractivas para este propósito por tratarse de las más luminosas y uniformes (Figura 1).



Figura 1. La SN 1994D (esquina inferior izquierda) en la periferia de la galaxia NGC 4526 demuestra la enorme luminosidad de las supernovas de tipo “Ia”, comparable a la de toda una galaxia con unas cien mil millones de estrellas.

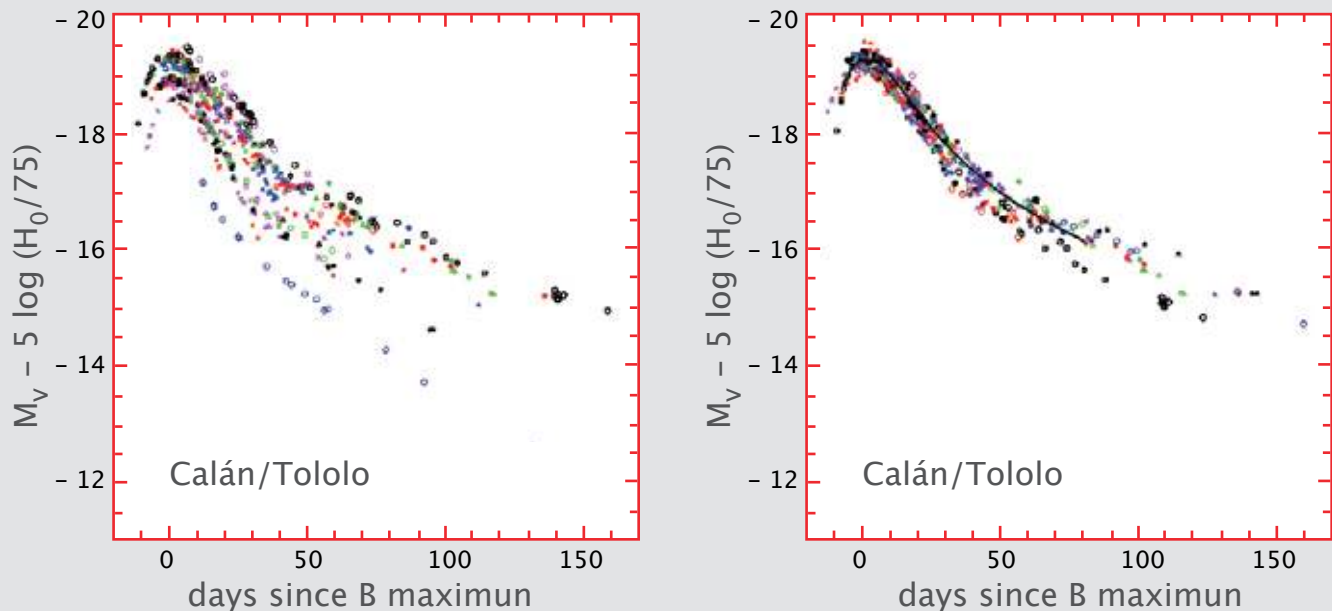


Figura 2. (izq.) Evolución de las luminosidades —curvas de luz— de las 29 supernovas “Ia”. (der.) Curvas de luz corregidas a un patrón fotométrico común (curva negra continua).

Términos Clave

- **Constante de Hubble (H_0):** La constante de Hubble es el número que relaciona la velocidad de expansión con la distancia. Una galaxia a una distancia “d” se aleja de nosotros con una velocidad “v” equivalente a “ $H_0 \times d$ ”. Por lo tanto la constante de Hubble H_0 es la velocidad de recesión de una galaxia a 1 Megaparsec (unidad de distancia equivalente a un millón de parsecs o a 3,26 millones de años-luz).
- **Método de las Estrellas Cefeidas:** Las estrellas cefeidas son estrellas gigantes amarillas que son variables en su luminosidad y que cumplen con una clara correlación entre su luminosidad y su período de oscilación. Determinando el período se puede conocer su luminosidad y con ello su distancia. Las estrellas cefeidas se usan para medir distancias a galaxias relativamente cercanas.
- **Supernovas “Ia”:** Las supernovas son la explosión final de una estrella y vienen en dos variedades: aque-

llas que explotan al final de su vida porque su núcleo (zona central) colapsa, que se las llama supernovas de tipo II y aquellas que habiéndose transformado previamente en enanas blancas sufren una catástrofe termonuclear y se “queman” violentamente en una gran explosión termonuclear. Esas son las supernovas de tipo “Ia” (uno a). Hay otras supernovas que fueron también clasificadas inicialmente de tipo I (uno) que no corresponden a supernovas “termonucleares” por ello se las especifica como de tipo “Ia”.

- **Dispersión:** Rango de valores en torno de un valor medio que puede tomar una variable. Las magnitudes absolutas de las supernovas de tipo “Ia”, cuando se las calibra adecuadamente presentan una baja dispersión y por ello son muy útiles como indicadores de distancias cosmológicas (grandes distancias).

- **Ley del inverso del Cuadrado:** La luz se diluye de tal manera que su brillo aparente disminuye con el

inverso del cuadrado de la distancia a la fuente. Al doble de distancia el brillo es la cuarta parte; a diez veces, es un centésimo.

- **Parámetro de Desaceleración:** Cuando se pensaba que el universo solo podía ser frenado en su expansión se calificó un parámetro para medir la desaceleración del universo; cuánto se frenaba. Ese parámetro quedó ahora obsoleto pues el universo se acelera en su expansión. El parámetro se lo designaba como “ q_0 ” (q cero) y la cosmología distinguía entre q_0 menor mayor o igual al valor $\frac{1}{2}$.

- **Anisotropías de Temperatura:** El fondo de radiación cósmica tiene una temperatura de 2,7 grados Kelvin pero existen ligeras diferencias entre distintas direcciones espaciales que indican milésimas más o menos en la radiación de fondo. Esas variaciones se conocen como fluctuaciones en la radiación de fondo o en la temperatura o como anisotropías en la temperatura.

En 1968, Charles Kowal obtuvo el primer diagrama de Hubble construido con SNs de tipo I. La dispersión alcanzaba 0.6mag lo que corresponde a un 30% en precisión en la determinación de distancias. Este trabajo ya revelaba el gran potencial de las SNs de tipo “Ia”, no obstante, los resultados no eran del todo concluyentes dada la poca precisión de los datos fotográficos de la época, entre otros problemas.

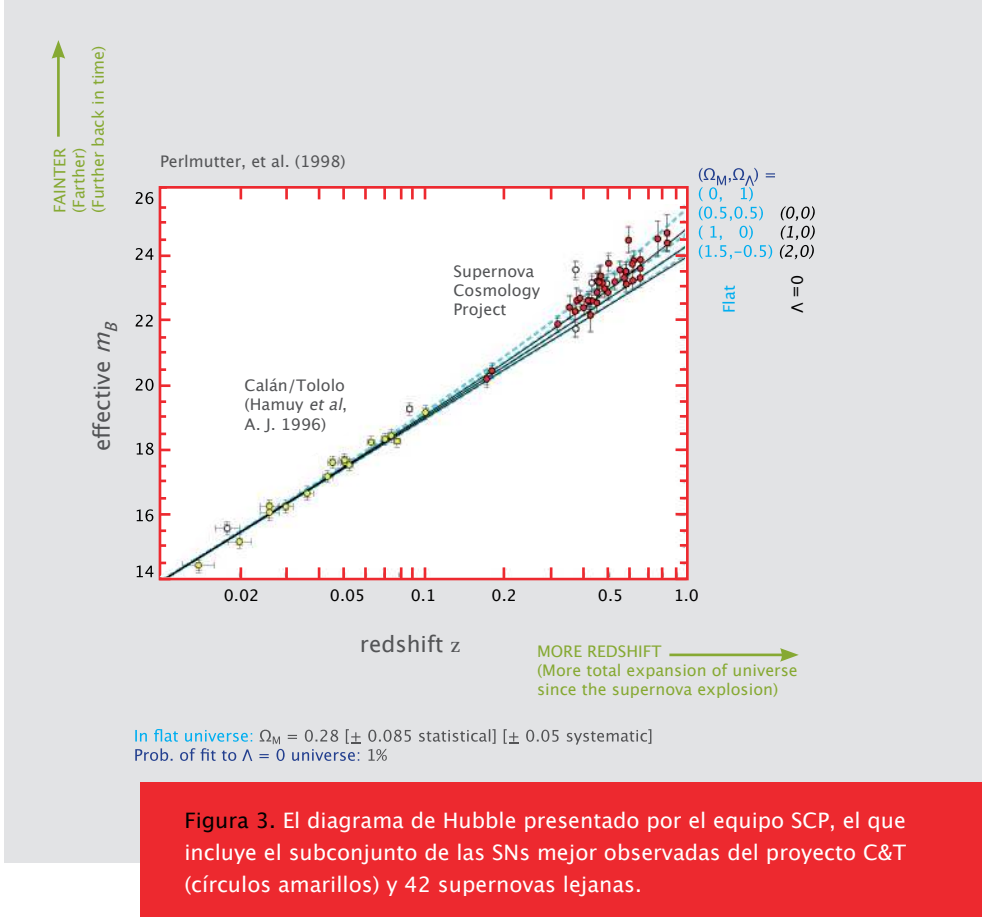
La búsqueda de Supernovas El Roble

En 1979 se inició en el Departamento de Astronomía (DAS) de la FCFM – U. de Chile, una búsqueda de supernovas en Cerro El Roble, ubicado en la cordillera de la Costa entre Santiago y Valparaíso, utilizando el telescopio Maksutov que había allí. El encargado del proyecto era Luis Eduardo González, quien, con la ayuda de Juan Parra, una vez al mes tomaba placas de porciones del cielo durante una semana. Marina Wischnjewsky, era la que miraba en el microscopio comparador todas las placas fotográficas obtenidas.

En 1979 cuando José Maza se integró al DAS, tanto el Director del Departamento, Profesor Hugo Moreno, como el Decano

● **Fondo de Radiación Cósmica:** El Big Bang empieza con una temperatura muy alta que a los 350.000 años hace que el universo tenga unos 3.000 grados Kelvin, momento en que desacoplan la radiación y la materia. Hoy se puede ver esa radiación, muy corrida al rojo, como radiación de fondo cósmico. Se ve en micro-ondas.

● **Principio de Incerteza de Heisenberg:** Se refiere a la imposibilidad de determinar con absoluta precisión dos variables relacionadas como la posición y la velocidad de una partícula. Si el error en la posición se disminuye, el de la velocidad (momentum) aumentará de tal manera que el producto de los errores permanece constante.



Claudio Anguita, brindaron todos los recursos para que el proyecto continuara.

La búsqueda dio sus frutos. Se descubrieron más de 50 supernovas en 6 años. El esfuerzo también permitió la formación de un grupo de científicos que se fueron involucrando cada vez más en el tema. A la cabeza estaba José Maza y le seguían Marina Wischnjewsky, Luis Eduardo González y Juan Parra, hombre clave para la observación de Cerro El Roble. También se contó con la gran ayuda de Pedro Hernández, quien pudo mantener la anticuada electrónica del telescopio Maksutov en perfecto estado de funcionamiento.

Una serie de dificultades crecientes para continuar con la búsqueda, llevó a la suspensión del proyecto en 1984. Tuvieron que pasar varios años para que otro grupo de científicos, esta vez investigadores de los Observatorios Calán y Tololo retomaran la búsqueda de supernovas en el marco del proyecto Calán-Tololo (C&T).

El proyecto Calán-Tololo

Motivados por la necesidad de establecer una técnica confiable para medir distancias extragalácticas, en 1989 nace el proyecto Calán-Tololo, una colaboración

entre los astrónomos del Cerro Calán (Maza) y del Cerro Tololo (Hamuy, Phillips y Suntzeff). El proyecto consistía en realizar una búsqueda sistemática de SNs en el hemisferio austral en galaxias cercanas y su estudio posterior, con el fin de obtener fotometría de calidad superior y determinar si las SNs de tipo “Ia” eran o no patrones lumínicos suficientemente precisos para estudios cosmológicos.

Entre 1990 y 1993, los astrónomos iniciaron la búsqueda, observando 60 campos del cielo. Como las SNs son fenómenos poco frecuentes (una galaxia como la Vía Láctea produce una SN tipo “Ia” cada 200 años), era necesario cubrir un gran campo angular para abarcar un número suficiente de galaxias y establecer una muestra significativa de SNs. Las placas obtenidas eran inmediatamente enviadas a Santiago, donde los «cazadores de SNs» de Cerro Calán comenzaban la carrera contra el tiempo para descubrir SNs lo antes posible, ya que demoran apenas 15 días en alcanzar su máxima luminosidad, parámetro central en la determinación de distancias.

Tan pronto una candidata a SN era detectada en Cerro Calán, se enviaba una alerta a Cerro Tololo, para que el equipo de astrónomos participantes la confirmaran

y estudiaran su evolución. Los tres años de patrullaje dieron sus frutos, además de una gran cantidad de datos, se descubrieron 50 SNs (todo un récord mundial en aquellos años), 29 de las cuales resultaron del tipo “Ia”.

Al comparar las 29 SNs, se pudo constatar una gran variación en la luminosidad en el máximo, algunas SNs aparecían unas 10 veces más luminosas que sus símiles (Figura 2, izq.). Esto constituyó inicialmente un gran revés para la medición de las distancias, pues se requería de un patrón lumínico lo más uniforme posible.

Sin embargo, en aquellos años, Mark Phillips había realizado un estudio paralelo en base a nueve SNs cercanas y había concluido que la luminosidad de las SNs en el máximo, estaba correlacionada con el ancho de la curva de luz. La correla-

ción era en el sentido de que las SNs más luminosas mostraban curvas de luz más anchas, tal como se puede apreciar en la Figura 2 (izq.).

Las 29 SNs C&T confirmaron el resultado de Phillips, lo que permitió corregir las luminosidades a un patrón fotométrico común con una dispersión de solo 14% (Fig 2, der). Esta calibración permitió, por la vía de la ley del inverso al cuadrado, medir distancias con un margen de error de solo 7%. El principal resultado del proyecto C&T fue proveer una regla de medir distancias cósmicas con una precisión que ningún otro método había logrado alcanzar. Esta técnica permitió extender la ley de Hubble a galaxias 30 veces más lejanas que aquellas estudiadas por Hubble en 1929. De esta manera, quedaron establecidas las bases esenciales para poder hacer cosmología de precisión, poner a prueba los modelos cosmológicos de Friedmann y Lemaître y medir finalmente el elusivo parámetro de desaceleración q_0 . No obstante, aún hacía falta una muestra

de SNs para extender el diagrama de Hubble a distancias cosmológicas.

El descubrimiento de la expansión acelerada

La extensión del diagrama de Hubble (la representación gráfica de la ley de Hubble) a distancias cosmológicas fue realizada por dos equipos de astrónomos, uno liderado por Perlmutter, del Laboratorio Lawrence Berkeley en California (SN Cosmology Project, SCP) y otro encabezado por Schmidt desde Mount Stromlo en Australia (High- z SN Search Team, HZST).

En 1988, el SCP comenzó a buscar SNs lejanas usando telescopios de 4 metros y cuatro años después logró la primera detección. El HZST se formó en 1994 motivado por el proyecto C&T. La búsqueda de SNs distantes se hizo desde Cerro Tololo, también usando el telescopio de 4 metros. Ya en 1995 se estaban descubriendo SNs regularmente.

Los primeros resultados concluyentes de estos equipos llegaron hacia 1998–1999. El HZST publicó el diagrama de Hubble con 9 SNs lejanas y 27 cercanas (17 C&T). Para gran sorpresa, el valor del parámetro de desaceleración, q_0 , resultó negativo, lo que implicaba que el Universo se encuentra en un estado de expansión acelerada. El SCP publicó un diagrama de Hubble con una muestra independiente de 42 SNs lejanas junto a 18 SNs cercanas del proyecto C&T (Figura 3). Nuevamente, el parámetro de desaceleración resultó ser negativo.

Un Universo en aceleración no es compatible con los modelos de Friedmann y Lemaître, en que la gravedad asociada a la materia frena la expansión. Fue necesario invocar una componente adicional de energía que contrarrestara el efecto atractivo de la gravedad. Para esto se recurrió a la misma constante cosmológica Λ introducida en 1917 por Einstein, en la Relatividad General, con el propósito de obtener modelos estáticos de Universos.

La constante cosmológica recibió interés científico solo hasta 1929, instante en que cayó en desgracia con el descubrimiento de la expansión del Universo por Hubble. Irónicamente, la constante cosmológica aparece en escena nuevamente hacia fines del siglo XX, como una posible solución para ajustar los datos de las SNs del SCP

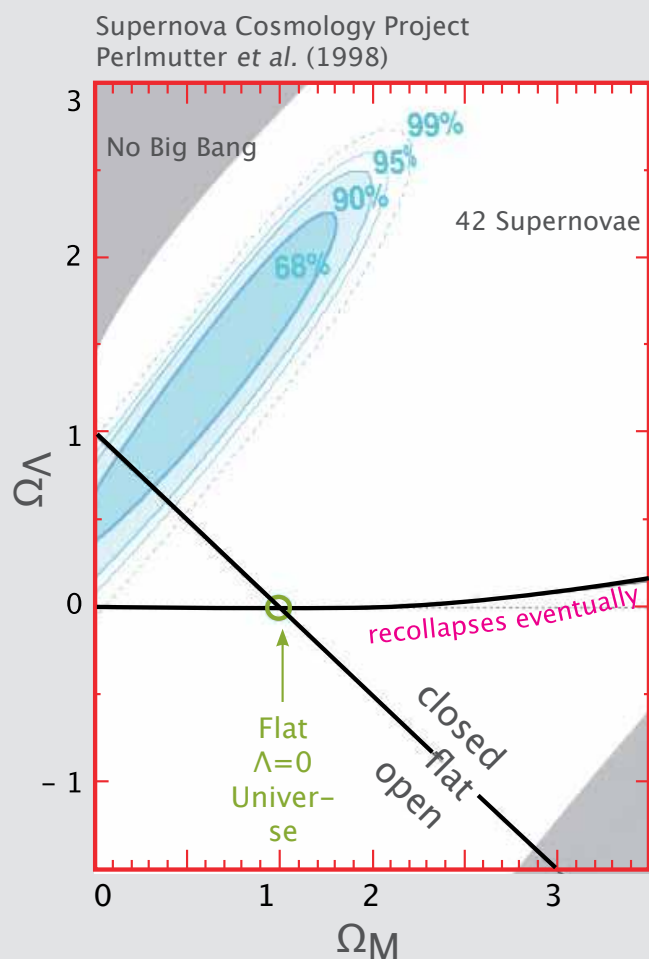


Figura 4. Contornos de confianza para los parámetros Ω_M y Ω_Λ determinados por el SCP.

y del HZST. ¿Otra genialidad de Einstein? Al incorporar la constante cosmológica a los modelos de Friedmann y Lemaître, el modelo cuenta con dos parámetros de ajuste, la densidad de la materia (Ω_m) y la densidad de energía de la constante cosmológica (Ω_Λ). Las soluciones de los dos grupos de investigadores fueron sorprendentemente consistentes y en ambos casos se pudieron descartar modelos con $\Omega_\Lambda=0$ (Figura 4).

Al combinar los datos de las SNs con otros dos experimentos —las observaciones de las anisotropías de temperatura en el Fondo de Radiación Cósmico y los estudios de agrupamiento de galaxias— se obtiene una determinación precisa de Ω_M y Ω_Λ , como se puede ver en la Figura 5.

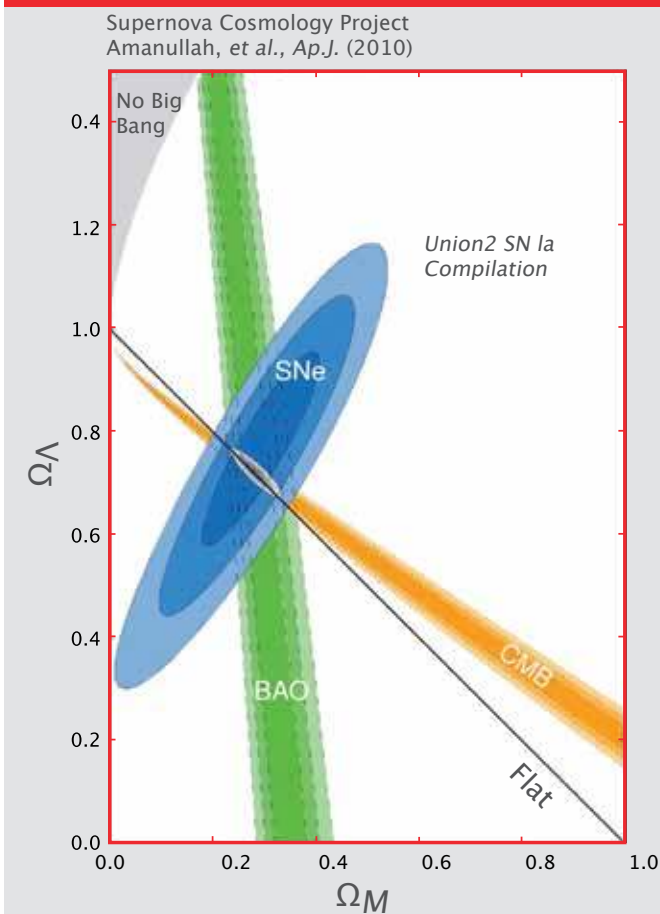
De acá se desprende que un 73% de energía total del Universo se debe a la constante cosmológica, la cual se denomina «energía oscura». Del resto, un 23% se debe a una forma desconocida de «materia oscura». Solo un 4% de la densidad de energía corresponde a materia en forma de átomos. La notable concordancia que arrojan estos tres experimentos independientes es lo que da el nombre al modelo cosmológico estándar actualmente aceptado, el Modelo de Concordancia denominado Λ CDM, el que incluye tanto una constante cosmológica como materia oscura fría, esta última compuesta por partículas masivas no relativistas (que se desplazan a baja velocidad comparado con la luz).

La constante cosmológica

La fuerza dominante que provoca la aceleración del Universo permanece desconocida. Debido a que la constante cosmológica tiene una densidad constante —la propiedad de no decaer a medida que el Universo se expande— se cree que la causa de la aceleración podría ser energía del vacío.

El modelo estándar de la física de partículas, el cual describe la naturaleza a las escalas más pequeñas, tiene dos posibles fuentes para la energía del vacío: las fluctuaciones cuánticas y el rompimiento espontáneo de simetrías. En la física cuántica relativista, el vacío no está vacío sino lleno de fluctuaciones cuánticas permitidas por el principio de incerteza de Heisenberg. Una estimación de la magni-

Figura 5. Contornos de confianza para los parámetros Ω_m y Ω_Λ determinados a partir de supernovas (azul), el Fondo de Radiación Cósmico (anaranjado) y el estudio del agrupamiento de las galaxias (verde), del artículo de Amanullah, et al. 2010.



tud de la densidad de la energía del vacío resulta ser 122 órdenes de magnitud superior al valor medido a partir de las SNs.

Para poder explicar por qué el Universo es tan homogéneo a grandes escalas, a pesar de que distintas regiones de este no parecen haber estado en contacto causal, ha sido necesario invocar la idea de una fase inflacionaria en el Universo temprano. En la teoría de la inflación se establece que, en una etapa muy temprana (10^{-34} s), el Universo pasó por una transición de fase en la que se rompieron ciertas simetrías, generando una enorme densidad de energía del vacío dependiente del tiempo, la cual, durante un breve lapso de tiempo, hizo que este se expandiera exponencialmente. Un efecto similar podría aún estar operando, produciendo la energía del vacío que vemos hoy día. Esto, denominado quintaesencia, podría ser detectable, ya que dicha energía debiera mostrar una dependencia temporal. Serán necesarias observaciones de miles de SNs en un amplio rango de distancias para poder de-

terminar si existe la variación de la energía del vacío.

La aceleración del Universo presenta el desafío de conocer cuál es la fuente de energía que la ocasiona. Alternativamente, podríamos estar frente a una modificación de la gravedad a distancias cosmológicas o, simplemente, a una propiedad intrínseca del espacio-tiempo (una constante física universal sin explicación).

El descubrimiento de la aceleración del Universo a partir del estudio de las SNs tipo "Ia", develó que un 70% del Universo había permanecido oculto como energía oscura. No solo amplió los límites astronómicos, sino que impuso enormes desafíos para la física. Estamos frente a una nueva revolución que ha cambiado fundamentalmente el paradigma cosmológico. **f**

* Doctores José Maza y Mario Hamuy, académicos del Departamento de Astronomía de la FCFM-U. de Chile.