

Imagen de los restos de la supernova que observó Tycho Brahe en 1572 y que también observaron el español Jerónimo Muñoz y el siciliano Francesco Maurolico. Recientemente se ha podido confirmar que esta supernova fue de tipo Ia al detectarse en 2008 los ecos de luz de su explosión. Como los ecos del sonido, la luz rebota en las nubes de polvo, reflejándose. (NASA/SAO/JPL-CAHA)

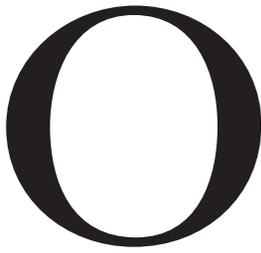
# SUPERNOVAS: ILUMINANDO EL UNIVERSO

**LAS OBSERVACIONES DE SUPERNOVAS TIPO IA LEJANAS NOS MUESTRAN EL RITMO DE EXPANSIÓN DEL UNIVERSO, SU RECIENTE ACELERACIÓN Y ANTERIOR DESACELERACIÓN. ESTOS RESULTADOS HAN DESVELADO LA EXISTENCIA DE LA ENERGÍA OSCURA QUE ACTUALMENTE DOMINA LA EXPANSIÓN. ¿QUÉ ES ESTA MISTERIOSA ENERGÍA? ¿PODRÁN LAS SUPERNOVAS ILUMINAR SU NATURALEZA?**

**INMACULADA DOMÍNGUEZ AGUILERA**



Artículo exclusivo colaboración de  
la Sociedad Española de Astronomía



Observar la bóveda celeste en una clara noche estrellada ha fascinado a los humanos desde siempre. Quizás por ello la astronomía sea una de las ciencias más antiguas, compartida por todas las culturas

del planeta. Desde pequeños sabemos que esa banda tenue lechosa que cruza el cielo nocturno como una larga nube es parte de la Vía Láctea y que en el firmamento pueden distinguirse con prismáticos algunos objetos difusos, como Andrómeda, que no pertenecen a nuestra Galaxia. ¿Cómo podemos saberlo? ¿Cómo conocemos los límites de la Vía Láctea o la distancia a otras galaxias?

Vamos a medir distancias astronómicas y antes conviene decidir qué unidades utilizaremos. Las distancias astronómicas son grandes comparadas con las que nos son familiares y que solemos expresar en kilómetros. Para las astronómicas emplearemos los años luz y los megapársec (Mpc).

Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año, viajando a su velocidad en el vacío que es aproximadamente 300 000 km/s. A esa velocidad podríamos dar siete veces la vuelta al mundo en un solo segundo. La estrella más cercana al Sol, Próxima Centauri, está a 4,22 años luz. Es decir, la luz ha tardado 4,22 años en llegar desde esa estrella a nosotros. ¿Cuál es la distancia a Próxima Centauri expresada en kilómetros? Tenemos que multiplicar la velocidad de la luz por el tiempo, cambiando previamente esos 4,22 años a segundos: 39 925 000 000 000 km (o bien  $3,9925 \times 10^{13}$  km). Sobre la otra unidad, los megapársec (Mpc), solo diremos su equivalencia con el año luz. Un pársec es lo mismo que 3,26 años luz y el prefijo griego «mega» indica un millón ( $10^6$ ), por lo que 1 Mpc es igual a 3,26 millones de años luz, o  $3086 \times 10^{19}$  km.

Que la luz tenga una velocidad finita tiene otra implicación fundamental: vemos Próxima Centauri tal y como era hace 4,22 años, no actualmente. En el universo hablar de distancias es hablar de tiempo, un concepto con el que nos iremos familiarizando. Cuanto más distante está un objeto, más atrás en el tiempo lo observamos.

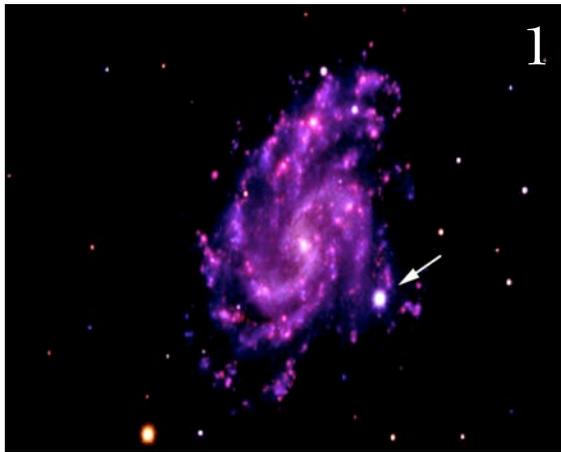
Andrómeda, situada a 2,54 millones de años luz, es la galaxia más cercana a la nuestra. Aparentemente Andrómeda es igual a otras muchas nebulosas que pertenecen a la Vía Láctea y, de hecho, fue

clave en la discusión científica sobre los límites de nuestra Galaxia y del universo. En 1920 se celebró el gran debate sobre la «Escala del Universo» en la Academia de las Ciencias en Washington DC. Dos astrónomos norteamericanos, Harlow Shapley y Heber Curtis, representaban dos hipótesis encontradas. Shapley defendía que todo lo que se observaba era parte de la Vía Láctea, mientras que Curtis argumentaba que había nebulosas, como Andrómeda, que eran otras galaxias, como la nuestra. En 1885 se había observado una «nova», una nueva estrella, en Andrómeda. Esta nova sirvió a Shapley para apoyar su tesis: si Andrómeda fuese otra galaxia, el brillo de la nova para ser vista desde tan lejos superaría todo lo razonable. En aquel momento solo se conocía el método trigonométrico de la paralaje, limitado a objetos próximos, para medir distancias. La paralaje se basa en el movimiento aparente de estrellas cercanas con respecto a las estrellas fijas al cambiar la posición de la Tierra con respecto al Sol.

#### FAROS CÓSMICOS Y DISTANCIAS

Atraída desde muy joven por la astronomía, la norteamericana Henrietta Swan Leavitt analizaba estrellas variables en el Observatorio de Harvard –sin cobrar o con un sueldo muy bajo–. Estudia un tipo de estrellas variables, conocido como Cefeidas (su nombre se debe a la primera que se identificó, sirviendo de patrón, delta Cephei en la constelación de Cefeo). El brillo de estas estrellas varía de forma regular con el tiempo, por lo que es posible caracterizarlas por su periodo, el tiempo transcurrido entre dos máximos de luz. Henrietta descubrió que las más brillantes tenían periodos más largos. Además se conocía la distancia, a través de la paralaje, a algunas Cefeidas cercanas. Las Cefeidas podían usarse como faros cósmicos: conocido su brillo a partir de su periodo y midiendo la luz que nos llega, podía estimarse la distancia a la que estaban. Como si se tratase de bombillas de las cuales conocemos la luz que emiten: cuanto más lejos están, menos brillantes las vemos. Henrietta acababa de dar un paso de gigante para la astronomía y para la humanidad.

El astrónomo norteamericano Edwin Hubble identificó Cefeidas en Andrómeda y en diversos cúmulos estelares y, basándose en la relación de Leavitt, estimó sus distancias. Andrómeda estaba mucho más lejos que cualquiera de los otros cúmulos: era otra galaxia. Los límites del universo se ampliaron.



**FIGURA 1.** La supernova la 2007af en la galaxia espiral NGC 5584, situada a 75 millones de años luz. Las supernovas se identifican por el año de su descubrimiento, seguido de una letra cuyo orden alfabético se corresponde con el cronológico del descubrimiento y al acabar el abecedario se añade una segunda letra, siguiendo el mismo criterio. (ESO)

**FIGURA 2.** Un faro cósmico funciona como la bombilla que se muestra en la figura: conocida la luz que emite y midiendo la luz que nos llega podemos calcular la distancia a la que se encuentra. Cuánto más lejos está, más débil la vemos. (Cortesía de la autora)

A esa distancia, la «nova» de Andrómeda resultaba muchísimo más brillante que cualquiera de las novavas conocidas, varias de ellas detectadas en la misma Andrómeda. El astrónomo alemán Walter Baade y el suizo Fritz Zwicky –ambos trabajaron en los EE.UU.– propusieron distinguir novavas de supernovas. La nova de Andrómeda de 1885 había sido una supernova.

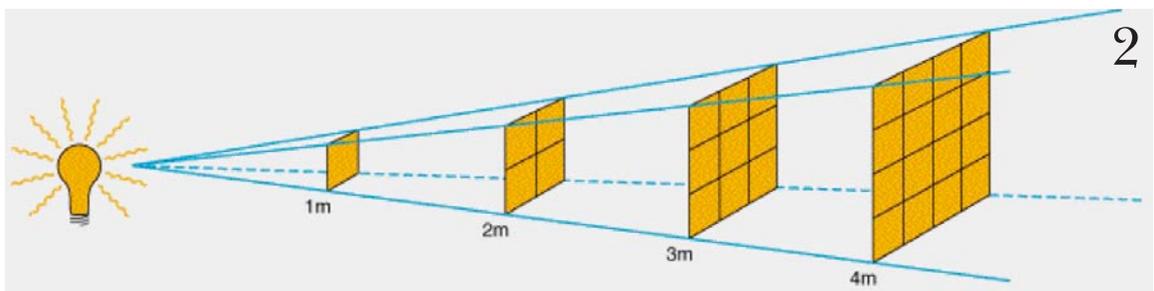
### EL RITMO DE EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Las observaciones realizadas, en esa misma época, por varios astrónomos –Edwin Hubble, Knut Lundmark, Vesto Slipher y Carl Wirtz– indicaban

que la mayoría de las galaxias observadas se alejan de la nuestra. Este hecho se deducía del desplazamiento «al rojo» de las longitudes de onda en el espectro electromagnético, debido al llamado efecto Doppler. Si la fuente que emite luz se aleja del observador, las longitudes de onda se alargan, mientras que si se acerca, las longitudes de onda se acortan. Estamos habituados a este efecto en el caso de las ondas sonoras. Percibimos más agudo –longitud de onda corta– el pitido del tren cuando se acerca a la estación, y más grave –longitud de onda larga– cuando se aleja. En la luz dispersada, como en el arco iris, la zona del rojo corresponde a longitudes de onda más largas que la zona azul. Por ello, se habla de desplazamiento al rojo de las galaxias que se alejan de nosotros.

Se detectaron Cefeidas en varias galaxias, fue posible estimar sus distancias, y se descubrió que las galaxias más distantes se alejaban más rápidamente. En 1929 Hubble recogió estas observaciones en la ley que lleva su nombre y que indica que el universo está en expansión:  $\text{Velocidad} = H_0 \times \text{Distancia}$ . El valor de la constante de Hubble,  $H_0$ , aún se discute y suele expresarse en km/s/Mpc. Es decir, si  $H_0$  fuese igual a 65 km/s/Mpc, las galaxias situadas a 10 Mpc de la Vía Láctea se alejarían de nosotros a 650 km/s.

La expansión del universo tiene otra implicación: si vamos hacia atrás en el tiempo las galaxias se irían aproximando unas a otras. En algún momento habrían estado juntas, si es que existían. Ese sería el origen del universo, lo que llamamos Big Bang y el tiempo transcurrido desde entonces, la edad del universo. Por su parte, el genial Albert Einstein mostró que el desplazamiento al rojo de las galaxias se debe a la expansión del universo. A propósito, el nombre de Big Bang se lo dio el físico británico Fred Hoyle, irónicamente, pues él no compartía esta teoría, y es posible que esta discrepancia le costase no recibir el premio Nobel junto a su colega William Fawler.



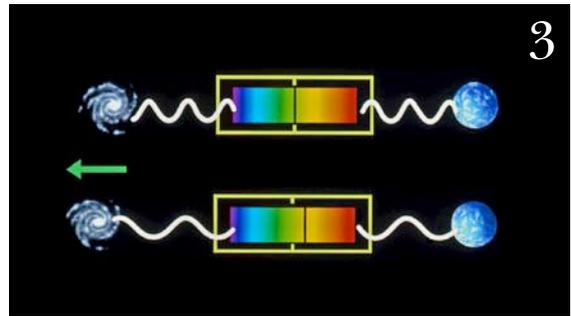
¿Ha sido el ritmo de expansión del universo constante desde el Big-Bang? Sabemos que la materia se atrae por la interacción gravitatoria y que en el universo hay planetas, estrellas, galaxias... en definitiva, materia, cuyo efecto debe ser frenar la expansión. Es más, en el universo hay más materia de la que observamos por su luz. El movimiento de las galaxias en los cúmulos de galaxias y el movimiento de las estrellas en las galaxias indican que la gravedad supera en mucho la debida a la materia que vemos. Se trata de la llamada «materia oscura», distinta de la materia «normal» formada por átomos. De hecho, la materia oscura es el tipo de materia más abundante en el universo, aunque aún no sabemos qué tipo de partícula la forma. Actualmente, varios experimentos están intentando detectarla.

¿Podemos observar cuánto se ha frenado, si es que así ha ocurrido, la expansión? Tendríamos que medir el ritmo de expansión del universo en épocas pasadas, a distancias, por ejemplo, de 5000 millones de años luz, y compararlo con el ritmo que medimos localmente –la constante de Hubble–. Pero para ello se necesitan faros cósmicos más luminosos que las Cefeidas, visibles a esas distancias de miles de millones de pársec.

#### LOS MEJORES FAROS CÓSMICOS DEL UNIVERSO: LAS SUPERNOVAS IA

Una supernova es tan brillante en su máximo de luz como toda una galaxia que puede contener cientos de miles de millones de estrellas. Para ser un buen faro cósmico, ser brillante no es el único requisito, se necesita cierta uniformidad y que pueda estimarse su luminosidad –o brillo intrínseco– en base a una propiedad fácilmente observable, como el periodo en el caso de las Cefeidas. Además de brillante y calibrable, debe ser un faro muy preciso. Las incertidumbres o errores en la calibración se traducen en errores en las distancias estimadas y en todos los parámetros cosmológicos que se deriven.

Entre las supernovas, las más luminosas y uniformes son las que se clasifican como de tipo Ia. Estas supernovas se caracterizan por mostrar líneas de silicio en sus espectros alrededor del máximo de luz. A principios de los 90 el muestreo de supernovas de Calán/Tololo (Chile) llevado a cabo por Mario Hamuy, Mark Phillips, Nick Suntzeff y José Maza demostró que las supernovas Ia eran buenos indicadores de distancia y que, observando rutinariamente cientos de galaxias, se descubrían decenas. Mark



**FIGURA 3.** Desplazamiento al rojo de las galaxias. Cuando la galaxia se aleja del observador las longitudes de onda se alargan, debido al efecto Doppler, desplazándose a la zona «roja» del espectro. [BBC]

**FIGURA 4.** Una supernova la brilla durante semanas tanto como toda una galaxia. La supernova 1994D (abajo a la izquierda) en la galaxia espiral NGC 4526 situada a 50 millones de años luz de la Tierra. [NASA/ESA, The Hubble Key Project Team y The High-Z Supernova Search Team]

Phillips encontró una forma de aumentar su precisión, calibrándolas: las supernovas Ia más brillantes presentan un declive de la curva de luz tras el máximo, más lento que las menos brillantes. Es decir, midiendo cuánto disminuye el brillo de una supernova Ia justo después de su máximo de luz, podemos saber su brillo intrínseco y, por tanto, estimar su distancia. Las supernovas Ia se convirtieron en los mejores faros cósmicos extragalácticos.

La calibración de las supernovas es «local», basada en supernovas cuyas distancias se conocen por otros métodos. ¿Puede considerarse la calibración fiable a grandes distancias? ¿Eran las supernovas Ia en el pasado iguales a las que observamos en

galaxias vecinas? William Fowler y Fred Hoyle propusieron en 1960 que las supernovas Ia, o termonucleares, eran explosiones de enanas blancas de carbono y oxígeno. Estas enanas incrementan su masa a costa de la masa de una compañera, aproximándose así a la masa crítica de Chandrasekhar. Cuando esto ocurre se alcanzan las condiciones físicas que conducen a su explosión termonuclear. El físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar calculó esa masa crítica a la que se desestabilizan las enanas blancas: 1,4 veces la masa del Sol.

Una enana blanca aislada no alcanza esta masa crítica. Las enanas blancas se forman al final de la evolución de la mayoría de las estrellas –aquellas con una masa inferior a unas diez veces la masa del Sol–. Las enanas blancas de carbono y oxígeno más numerosas tienen aproximadamente la mitad de la masa de Chandrasekhar, y las más masivas tienen la misma masa que el Sol. Por lo que, si están aisladas, no explotan.

Es decir, el modelo teórico respalda que las supernovas de tipo Ia sean buenos faros cósmicos. En cualquier época del universo se trataría siempre de explosiones de enanas blancas con la misma masa, la crítica de Chandrasekhar, y la misma composición química.

#### UN RESULTADO SORPRENDENTE: LA EXPANSIÓN SE ACELERA

En la década de los 90 dos grupos internacionales independientes se lanzaron a la búsqueda y análisis de supernovas Ia lejanas. Su objetivo era medir cuánto se frenaba la expansión. Para que el resultado fuese estadísticamente significativo, necesitaban un buen número de supernovas. Dado que las supernovas Ia solo ocurren una o dos veces por siglo en cada galaxia, había que idear una buena estrategia. Decidieron observar el cielo cada dos o tres semanas y restar las imágenes: la mayoría de los objetos del universo no cambian su brillo en ese tiempo y desaparecen, quedan solo las candidatas a supernovas. Inmediatamente se tomaba un espectro para confirmar que se trataba de una supernova Ia.

Uno de los grupos, el *Supernova Cosmology Project*, estaba liderado desde Berkeley (EE.UU.) por el astrofísico Saul Perlmutter y el otro, el *High-Redshift Team* desde Mount Stromlo (Australia) por Brian Schmidt. Ambos esperaban que, a un desplazamiento al rojo dado, las supernovas apareciesen más brillantes, es decir, más próximas de lo que les co-

**FIGURA 5.** Supernova Ia en la galaxia Centaurus A. Las curvas de luz, o variación de la luminosidad con el tiempo, son muy uniformes en este tipo de supernovas. También lo son los espectros y su evolución. En el espectro correspondiente a la zona del máximo de luz se observa la línea característica del silicio que sirve para identificar las supernovas Ia. Puede verse un video que muestra la evolución del brillo, la curva de luz y el espectro de esta supernova en la web del *Supernova Cosmology Project*. (SCP)

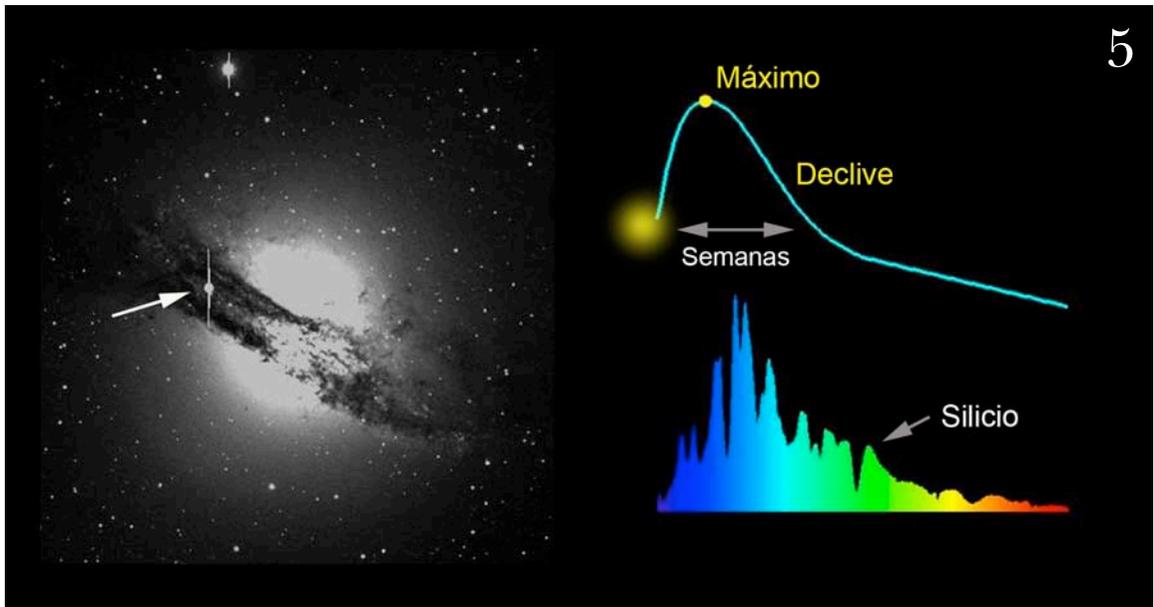
**FIGURA 6.** Progenitores de supernovas Ia. Las supernovas Ia o termonucleares son explosiones de enanas blancas con una masa próxima a la masa crítica de Chandrasekhar. Dos posibles vías pueden conducir a esta situación: (A) la enana blanca aumenta su masa a costa de la masa de una estrella normal, probablemente una gigante; (B) dos enanas blancas se fusionan y la más masiva ( $M_1$ ) acreta materia de la menos masiva ( $M_2$ ). Puede que ambas ocurran en la naturaleza aunque ninguna explica correctamente el número de supernovas Ia que se observa. (Real Academia de las Ciencias Sueca)

rrespondería si el ritmo de expansión del universo hubiese sido constante.

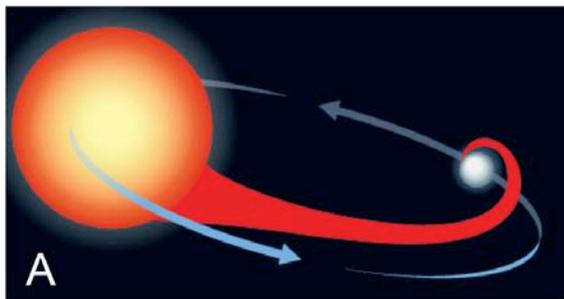
Los resultados sorprendieron a todos, las supernovas observadas eran un 15 % más débiles, es decir, estaban más lejos de lo que les correspondería en un universo con expansión constante: el ritmo de expansión del universo no se frenaba, ¡se había acelerado! Por este descubrimiento Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess –del mismo equipo que Brian– recibieron el premio Nobel de Física en 2011.

Tendríamos una sorpresa similar si lanzásemos una piedra vertical hacia arriba y en vez de ver cómo se frena y vuelve a caer hacia el suelo, la viésemos acelerar y alejarse cada vez más de nosotros. Pensaríamos que una fuerza la empuja. Aproximadamente esto es lo que se cree que ocurre. Para explicar las observaciones de las supernovas, necesitamos una nueva componente del universo que compense la gravedad y acelere el ritmo de expansión. A esta nueva componente se le llama «energía oscura».

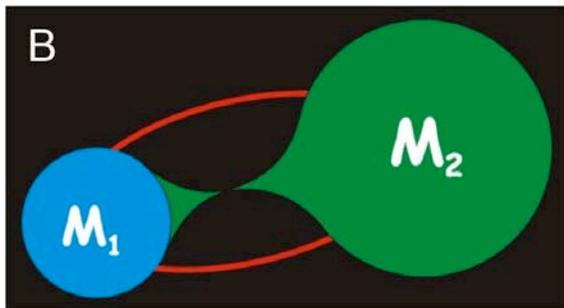
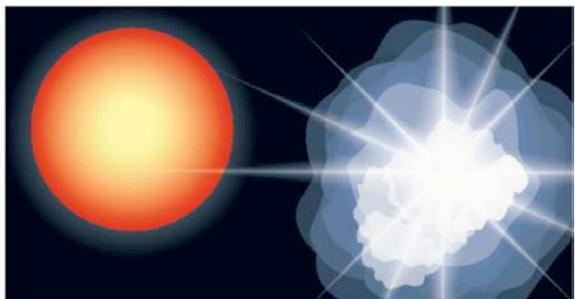
Las observaciones de supernovas Ia, por sí solas, excluyen completamente un universo sin energía oscura. Combinándolas con otros datos independientes, como los de la radiación de fondo cósmica de microondas, que indican la geometría del universo, o los de la dinámica de los cúmulos de galaxias, sensibles a la gravedad debida a la materia, podemos cuantificar las componentes posibles del universo. Todos los datos obtenidos hasta el mo-



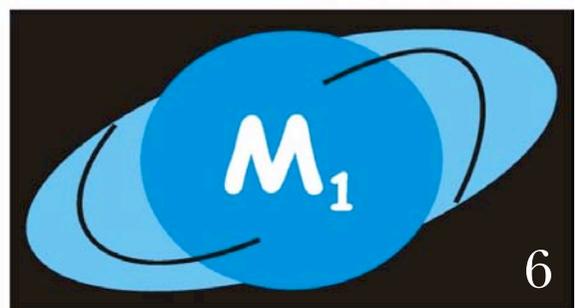
5



A



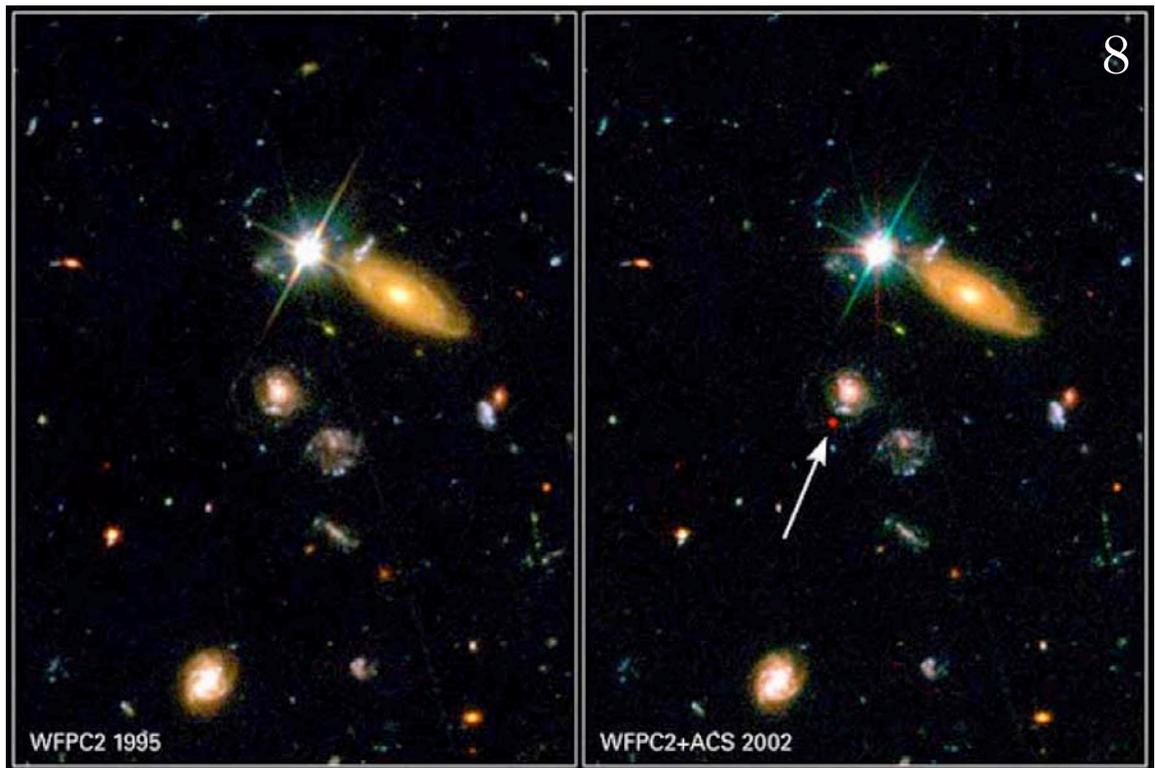
B



6

mento se explican con el Modelo Cosmológico Estándar, un modelo dominado por la energía oscura y por la materia oscura, en un 70 % y un 25 %, respectivamente, más un 5 % de materia «normal». Este universo tendría una edad de unos 14 000 millones de años, en buen acuerdo con las edades de las estrellas más antiguas, y su ritmo de expansión se estaría acelerando. Ninguno de los modelos alternativos propuestos hasta el momento explica mejor todo el conjunto de observaciones.

Los avances tecnológicos, como los telescopios espaciales, nos han permitido detectar supernovas aún más lejanas. Las más distantes, a unos 7000 millones de años luz, nos muestran una época en la que el ritmo de expansión se frenaba: las supernovas observadas a ese desplazamiento al rojo son más brillantes, están más cerca, de lo que les correspondería si el ritmo de expansión del universo hubiese sido constante. En esa época el universo era más denso y la densidad de materia, que se va diluyendo



**FIGURA 7.** Imagen de la galaxia espiral M 101 antes de la aparición de la supernova y con la supernova 2011fe. Esta supernova, situada a 21 millones de años luz de la Tierra, es una de las más cercanas observadas. Se ha buscado el progenitor en las imágenes tomadas antes de la explosión, sin éxito. (B. J. Fulton, Las Cumbres Observatory Global Telescope Network). **FIGURA 8.** Las supernovas la más distantes observadas muestran una época en la que el universo tenía la mitad de su edad actual y la expansión se frenaba. Con los telescopios espaciales, como el Telescopio Espacial Hubble, ha sido posible detectar supernovas la que explotaron cuando el universo tenía la mitad de su edad actual, unos 7000 millones de años. (NASA y J. Blakeslee -Johns Hopkins University-/STScI)

con la expansión, dominaba sobre la densidad de energía oscura.

¿Cabe otra interpretación a las observaciones de supernovas Ia? ¿Las vemos más débiles, no por estar más lejos, sino debido a la absorción de su luz por el polvo intergaláctico? Si fuese así, este efecto aumentaría siempre con la distancia pero, como hemos visto, no es el caso: las más distantes observadas son más brillantes, no menos.

¿Eran las curvas de luz de las supernovas en el pasado distintas a las actuales? Nada parece indicar, dentro de la precisión requerida, que así sea: las propiedades de las supernovas, próximas y lejanas, son prácticamente idénticas.

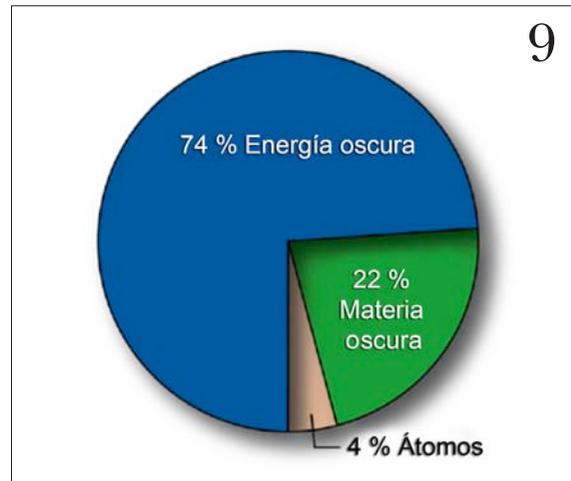
### LA ENERGÍA OSCURA Y EL FUTURO DEL UNIVERSO

No tenemos ninguna explicación para la energía oscura. Las observaciones de supernovas indican que el efecto «repulsivo» de la energía oscura ha comenzado a dominar, acelerando el ritmo de expansión, hace menos de 7000 millones de años —aproximadamente la mitad de la edad actual del universo—. Anteriormente, las supernovas muestran una época dominada por la gravedad, que frenaba la expansión.

Estas observaciones son compatibles con una forma de energía «anti-gravitatoria» cuya densidad no se diluye al aumentar el tamaño del universo. Podría ser una propiedad del espacio, inherente al mismo, como la energía del vacío. El problema es que el valor de la densidad de la energía del vacío que se estima teóricamente discrepa en  $10^{120}$  (¡un 1 seguido de 120 ceros!) del valor necesario para explicar la aceleración de la expansión. Necesitaríamos que ese valor tuviese una buena razón física para anularse, dejando solo la pequeña parte que requieren los datos de las supernovas.

Si la densidad de energía oscura fuese constante, la aceleración de la expansión sería cada vez mayor y finalmente perderíamos de vista al resto de galaxias. Los astrónomos entonces no tendríamos mucho trabajo, solo observaríamos nuestro grupo local de galaxias. A «pequeña» escala continuaría dominando la gravedad y, de hecho, todo parece indicar que Andrómeda acabará fusionándose con la Vía Láctea dentro de unos 4000 millones de años.

¿Podrán las supernovas Ia desvelarnos la naturaleza de la energía oscura? Este es el siguiente reto y para abordarlo se requiere aumentar aún más la precisión de las supernovas Ia como indicadores



**FIGURA 9.** Modelo Cosmológico Estándar. Las supernovas la indican un universo dominado en los últimos 5000-6000 millones de años por la densidad de energía oscura que causa la aceleración de la expansión. La materia a la que se debe la mayor parte de los efectos gravitatorios que observamos es materia oscura. Solo un 4-5 % del universo sería materia normal, compuesta por átomos. [Cortesía de la autora]

de distancias. Más y mejores datos —en los próximos años se detectarán miles de supernovas anualmente— contribuirán a ello, pero para extraer la información necesaria hay que controlar variaciones muy pequeñas.

De hecho, las observaciones indican una dependencia de las propiedades de las supernovas Ia con la edad de las poblaciones estelares donde se producen: las más brillantes aparecen asociadas a poblaciones más jóvenes. Es más, parece que la calibración sobrestima ligeramente la luminosidad de las supernovas que ocurren en galaxias masivas. Es inevitable, hay que entender completamente nuestro faro cósmico y su posible evolución, así como la absorción experimentada por la luz en su largo viaje desde la supernova hasta nosotros.

Las supernovas nos han desvelado el dominio de la energía oscura y nos han mostrado que desconocemos la naturaleza del 95 % del universo. Queda trabajo para las generaciones futuras. (A)

**Inmaculada Domínguez Aguilera** es catedrática de astronomía y astrofísica en la Universidad de Granada

