

# El Premio Nobel de Física 2011

## LA EXPANSIÓN ACELERADA DEL UNIVERSO

Rafael Bachiller García

### ■ Resumen

La Real Academia de Ciencias de Suecia concedió el Premio Nobel de Física de 2011 a los tres astrónomos estadounidenses Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam G. Riess por “sus descubrimientos sobre la aceleración de la expansión del Universo a través de sus observaciones de supernovas muy distantes”. El Comité del Nobel subrayó la importancia del estudio de “varias docenas de explosiones de estrellas, llamadas supernovas, que permitieron descubrir que el Universo se está expandiendo a un ritmo cada vez mayor”.

El hallazgo de ese aumento de velocidad, en 1998, fue una sorpresa incluso para los dos equipos, que llegaron a la misma conclusión de forma independiente. Uno de ellos, el dirigido por Saul Perlmutter, llevaba trabajando en el tema desde 1988. Mientras que el otro, coordinado por Brian Schmidt, con quien trabajaba Adam Riess, había comenzado sus medidas en 1994. Ambos grupos competían por localizar las supernovas más distantes, es decir, las explosiones de estrellas que se producen cuando llegan al final de su vida, para medir la expansión del Universo en los momentos próximos al Big Bang. Este artículo describe el descubrimiento que dio lugar al Nobel, situándolo en el contexto de la Cosmología contemporánea. También examina la importancia del concepto de la energía oscura y su trascendencia para nuestra concepción del Universo.

### ■ La teoría del Big Bang y la expansión del Universo

La teoría del Big Bang (‘Gran Explosión’) es considerada hoy día como la teoría estándar para explicar el origen del Universo. Aunque algunos cosmólogos han señalado ciertos problemas conceptuales y de consistencia, pocos son los miembros de la comunidad científica que la ponen en duda. Según esta teoría, el Universo se

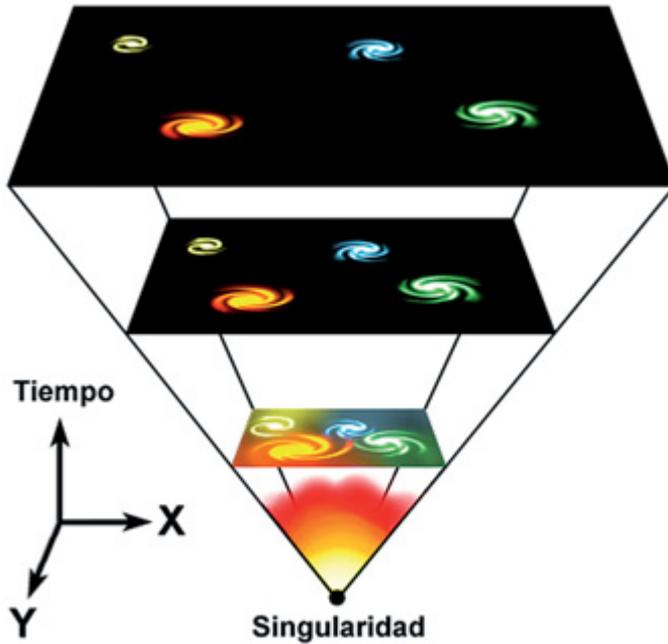


Figura 1. Representación de la expansión del universo.

originó en una singularidad espacio-temporal de densidad infinita a la que siguió una expansión del propio espacio. La denominación Big Bang, que fue acuñada inicialmente con un cierto ánimo peyorativo, no está exenta de críticas. Y es que en cierto modo aquella Gran Explosión no pudo haber sido ‘grande’ ya que se produjo exactamente antes del surgimiento del espacio-tiempo, tuvo que ser el mismo Big Bang lo que generó las dimensiones desde una singularidad. Tampoco es exactamente una explosión en el sentido propio del término, ya que no se propagó fuera de sí misma.

El Big Bang debió originarse en una fluctuación en el vacío. En efecto, hoy sabemos que el vacío no es lo mismo que la nada y que en el vacío pueden producirse fluctuaciones de energía. La energía es masa por velocidad de la luz al cuadrado y, por tanto, la energía puede dar lugar a pares de partícula-antipartícula, creándose así la materia del Universo. Aquella fluctuación dio lugar a una Gran Explosión, rompiéndose así la simetría de la “bola de energía” primigenia que debía ser altamente inestable. Fue un fenómeno muy energético. Una explosión que sucedió en todos los sitios simultánea-

mente, en todo lo que constituía el Universo en aquel momento. Y fue la energía del vacío lo que hizo que el Universo se inflase de manera exponencial en un principio, y es lo que hace que continúe expandiéndose hoy de manera acelerada. Se fueron formando las galaxias, las estrellas y los planetas, todo lo que observamos en el Cosmos, y todo se formó a partir del vacío. En efecto, parece haber “algo” en el vacío, en el entramado del espacio-tiempo, un sutil sustrato que no sabemos qué es, pero que es capaz de originar un Universo.

La concepción actual sobre el origen y evolución del Universo, que puede considerarse uno de los mayores logros tanto de la Astrofísica como de la Física teórica contemporáneas, es el resultado de una larga serie de observaciones y experimentos encaminados a explorar y comprender lo infinitamente grande y lo infinitamente pequeño. Y es que el ser humano parece situado en un punto medio privilegiado desde el que puede emprender la conquista de esos extremos. Esta situación intermedia entre lo infinitamente pequeño y lo infinitamente grande es aprovechada por el hombre. Con la ayuda de grandes telescopios explora los confines del Universo y con microscopios cada vez más potentes, y últimamente mediante grandes aceleradores de partículas, investiga la constitución de la materia al nivel más detallado posible. Esta situación intermedia del hombre en el Universo la describió bellamente Blas Pascal en sus Pensamientos: *“Car qu’est-ce que l’homme dans la nature ? Un néant à l’égard de l’infini, un tout à l’égard du néant, un milieu entre rien et tout...”* (¿Pues qué es el hombre en la naturaleza? Una insignificancia respecto del infinito, un todo respecto de lo insignificante, un punto medio entre la nada y el todo...”).

## ■ Los fundamentos de la Teoría del Big Bang

Para comprender bien el gran alcance de los descubrimientos que merecieron el Premio Nobel de Física 2011, debemos remontarnos a los sólidos fundamentos, tanto teóricos como observacionales, sobre los que reposa la teoría cosmológica estándar o del Big Bang.

La Relatividad General de Einstein y la Mecánica Cuántica son las herramientas que sirven para explicar el origen, evolución y estructura (geometría del espacio-tiempo) del Universo. Pero la teoría estándar no es una mera construcción teórica, sino que está fundamentada en una serie de constataciones observacionales que, actualmente, no pueden explicarse correctamente en el marco de teorías alternativas.

A continuación examinamos los argumentos que sustentan la teoría estándar, argumentos que pueden clasificarse en teóricos y observaciones.

### ***Fundamentos teóricos***

Los fundamentos teóricos residen en la Teoría de la Relatividad General de Einstein y en la Teoría de la Mecánica Cuántica. En concreto, como mencionamos más arriba, las fluctuaciones del vacío, como la que debió ocasionar el Big Bang, están previstas por la Mecánica Cuántica (y están permitidas por el Principio de Incertidumbre de Heisenberg). De hecho, este tipo de fluctuaciones pueden ser observadas en grandes aceleradores de partículas. El Gran Colisionador de Hadrones del CERN en Ginebra permite hoy, mediante la colisión de haces de protones viajando en sentido contrario a velocidades próximas a la de la luz, la simulación de eventos similares al Big Bang. Observando la creación de partículas en estas colisiones se espera poder refinar las ideas sobre el origen del Universo.

La Teoría de la Relatividad de Einstein sirve para explicar la topología del espacio-tiempo y su evolución. En contraste con las ideas de la Cosmología de Newton que interpretaban el espacio como un gran receptáculo vacío en el que se mueven y evolucionan los cuerpos materiales sometidos a la fuerza de la gravedad, la teoría de Einstein postula que la luz se mueve a velocidad constante siguiendo la trayectoria más corta posible en el espacio. Debido a la equivalencia entre masa y energía, la luz también se ve sometida al efecto de los graves, y ese postulado implica que el espacio ya no es un sistema de referencia absoluto, sino un medio “flexible” que se ve alterado por la presencia de los objetos masivos. El espacio-tiempo se constituye así en un medio continuo que se configura y evoluciona de acuerdo con la distribución de la materia.

Según la ecuación fundamental de la relatividad general o ecuación de Einstein, la distribución de materia y energía en el Universo determina la estructura del espacio-tiempo. Esta ecuación, que relaciona el tensor espacio-tiempo con el de energía-momento, de apariencia sencilla, tiene implicaciones muy complejas en la descripción del Universo. Naturalmente, cuando las masas involucradas son pequeñas (campo gravitatorio débil), esta ecuación se convierte en las de Newton (más concretamente en la ecuación de Poisson). De esta forma, la Cosmología de Einstein se reduce a la de Newton en el límite de los campos gravitatorios débiles, o dicho de otro modo, la gravitación de Einstein constituye una generalización de la mecánica clásica descrita por Newton.

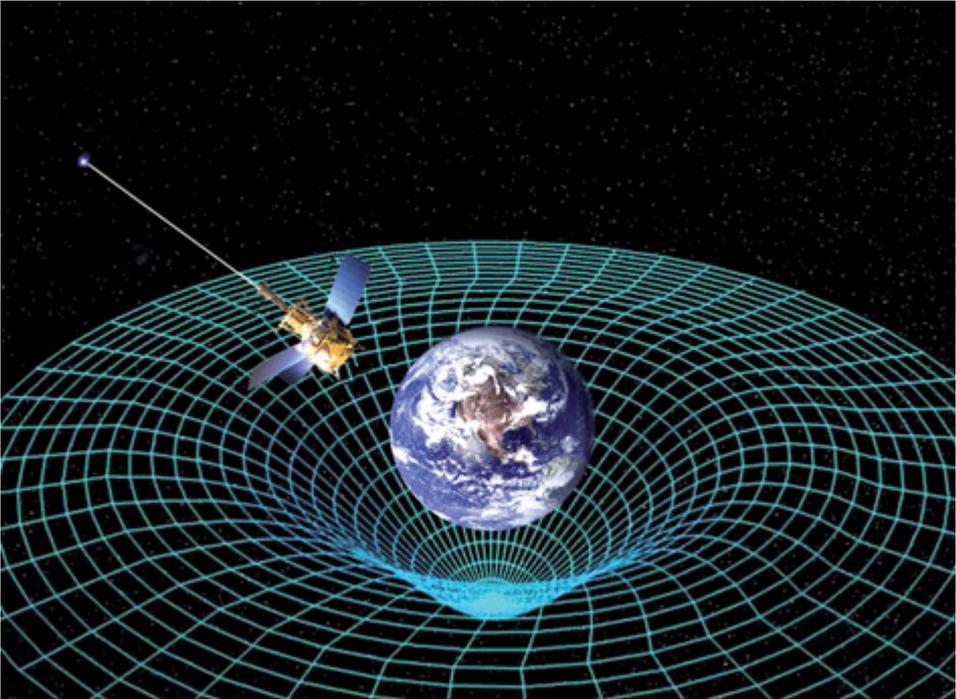


Figura 2. Ilustración de la deformación del espacio-tiempo por un grave. NASA.

El Universo descrito por Einstein es estático, e inestable debido a la única presencia de una fuerza atractiva (la gravedad). Para hacerlo estable, el propio Einstein inventó un artificio, hizo la hipótesis de una fuerza que pudiese oponerse a la gravedad ayudando así al equilibrio y estabilidad del Cosmos. Esta nueva fuerza la expresó Einstein mediante la introducción de la constante cosmológica, denotada por el símbolo  $\Lambda$ .

El significado físico del nuevo término resultaba incierto incluso para Einstein. Imaginemos dos galaxias que, naturalmente, se atraen por la fuerza gravitatoria, el nuevo término podría interpretarse como una fuerza repulsiva que hace que el espacio ocupado por estas dos galaxias se repela para compensar la atracción gravitatoria. Einstein se arrepintió posteriormente de haber introducido esta idea y renegó de la constante cosmológica llegando a afirmar de ella que fue “el mayor error de mi vida”.

Fueron Friedman y Lemaître quienes en los años 1920 lograron resolver las ecuaciones de Einstein para un Universo no estático. Las soluciones de Friedman-Lemaître describen pues un Universo (con  $\Lambda = 0$ ) que se encuentra inicialmente en expansión.

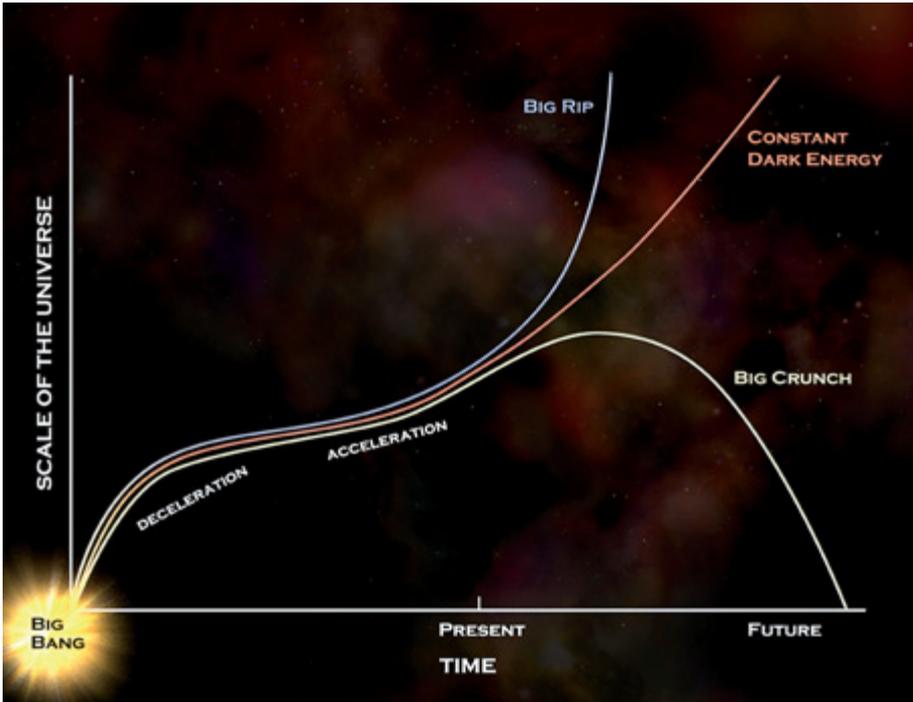


Figura 3. Alternativas en la expansión del Universo.

Dependiendo de la densidad del Universo (es decir de la cantidad de materia que contiene) el espacio-tiempo se expande indefinidamente (caso de un Universo de densidad “baja”) o se expande hasta un determinado punto en el que la fuerza de la gravedad frena la expansión para dar paso a un movimiento de implosión (caso de un Universo de “alta” densidad), que en último término debería producir un evento inverso del Big Bang: una gran implosión (colapso) en un punto, o Big Crunch.

### ***Fundamentos observacionales***

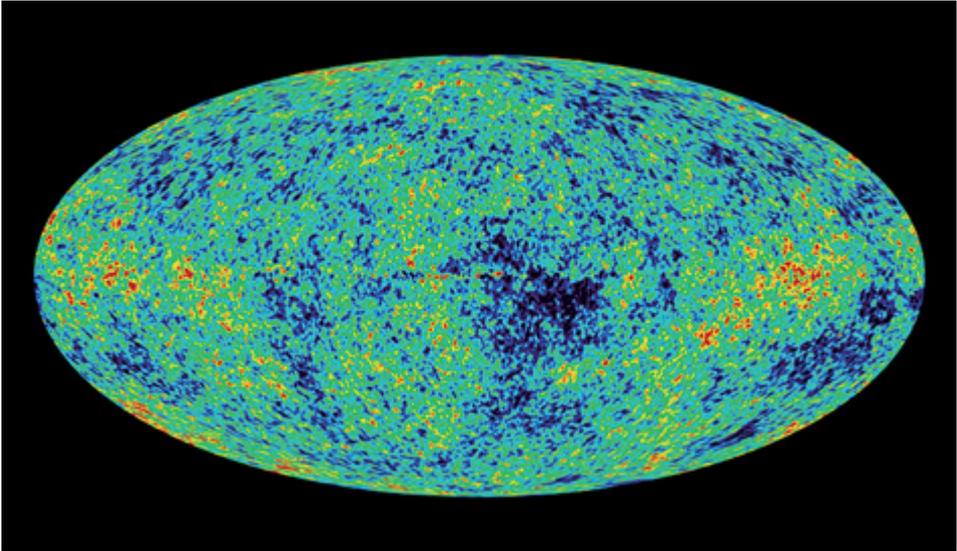
El objetivo de la Cosmología, la elaboración de una descripción del Universo como un todo, requiere de una hipótesis sobre la distribución global de materia en todo el Universo, una distribución que naturalmente no es observable en su totalidad desde nuestra posición limitada. Sin embargo, las observaciones muestran que en primera aproximación, y a muy gran escala, el Universo es homogéneo (esto es, que cualquier parcela del Universo es equivalente a cualquier otra del mismo tamaño, independien-

temente de la región de estudio elegida) e isótropo (es decir, todas las direcciones en las que observemos o viajemos son equivalentes). Este postulado de homogeneidad e isotropía recibe el nombre de Principio Cosmológico y está basado en la voluntad (de acuerdo con el principio de Ockham) de obtener una descripción del Universo lo más sencilla posible.

El astrónomo estadounidense Edwin Hubble estableció en 1930 una relación de gran trascendencia en Cosmología. Observando con el telescopio más potente de su época (ubicado en el observatorio de Mount Wilson) fue midiendo para una serie de galaxias tanto la velocidad como la distancia. Aunque las velocidades eran fácilmente medibles (gracias al efecto Doppler), la distancia a las galaxias había resultado relativamente difícil de medir hasta entonces debido a la necesidad de disponer de algún tipo de “balizas” naturales indicadoras. Cuando estas medidas se hicieron posibles mediante la calibración de la relación periodo-luminosidad para unas estrellas variables conocidas con el nombre de “Cefeidas”, Hubble pudo establecer su célebre ley que establece que las galaxias más lejanas se mueven más aprisa siguiendo una ley lineal. Este tipo de movimiento (expansión lineal) corresponde al que se ocasiona en una explosión. En efecto, pensemos que un objeto que estalla fragmentándose en muchos pedazos y que esos pedazos son despedidos hacia el exterior con velocidades constantes. Al cabo de cierto tiempo, los objetos más rápidos habrán alcanzado una distancia mucho mayor que los más lentos. Un fragmento que se mueva al doble de velocidad que otro alcanzará el doble de distancia en el mismo tiempo.

Así pues, la expansión encontrada por Hubble sugiere inmediatamente la pre-existencia de una explosión. La constante  $H_0$  se conoce con el nombre de constante de Hubble y su inversa,  $1/H_0$ , mide el tiempo transcurrido desde la explosión, esto es la edad del Universo suponiendo que el movimiento de expansión ha sido siempre uniforme. Las estimaciones más precisas obtenidas en la actualidad indican que el valor de  $H_0$  se encuentra en el rango 60-70 km/s/Mpc. Si  $H_0 = 65$  km/s/Mpc, el valor correspondiente para la edad del Universo es  $1/H_0 \sim 15.000$  millones de años, un número que es totalmente consistente con la estimación de las edades de las estrellas más viejas que se conocen.

Por otra parte, en 1965, Penzias y Wilson descubrieron una misteriosa radiación de microondas en el fondo del cielo. Tal radiación, cuya existencia había sido predicha por varios investigadores durante las dos décadas previas (entre ellos el ruso George Gamow en 1948), pudo ser inmediatamente reconocida como una reliquia del Big Bang.



**Figura 4.** Las irregularidades en el fondo cósmico de microondas, semillas de las galaxias. NASA, WMAP.

Estas observaciones vinieron por tanto a confirmar la interpretación de la ley de Hubble en términos de una expansión generalizada del Universo que tenía su origen una Gran Explosión.

Gracias a la misión espacial COBE de la NASA, en 1992 se detectaron las irregularidades primigenias que debieron dar lugar a la formación de galaxias y de cúmulos de galaxias. Posteriormente, la misión WMAP contribuyó a medir parámetros importantes del Universo, tales como su edad y su composición. Finalmente, el telescopio Planck lanzado por la ESA en mayo de 2009 está refinando ahora todas estas medidas, culminando así medio siglo de sorprendentes descubrimientos cosmológicos.

Basándose en medidas de la expansión del Universo utilizando observaciones de las supernovas tipo **Ia** (ver más abajo), en función de la variación de la temperatura en diferentes escalas en la radiación de fondo de microondas y en función de la correlación de las galaxias, se encuentra que la edad del Universo es de aproximadamente  $13,7 \pm 0,2$  miles de millones de años. Es notable el hecho de que tres mediciones independientes sean consistentes, lo que se considera un fuerte argumento en favor del modelo estándar que describe la naturaleza detallada del Universo.

## ■ Las observaciones que merecieron el Premio Nobel

Hasta bien entrados los años 1990, todos los astrónomos consideraban que la expansión del Universo, tras la Gran Explosión y el periodo inflacionario, debía ir frenándose con el tiempo. En efecto, la atracción gravitatoria mutua entre las galaxias debía ocasionar una tendencia de oposición a la expansión. A la medida de tal deceleración se aplicaron varios equipos de investigadores utilizando los telescopios más potentes del mundo, lo que les debería permitir medir la velocidad de expansión en las galaxias más lejanas, y por lo tanto más débiles, que son de especial interés para muestrear la evolución temprana del Universo.

Uno de estos equipos era el dirigido por Saul Perlmutter (de la División de Física del Lawrence Berkeley National Laboratory, EE.UU.) que comenzó a trabajar sobre el asunto en 1988 y que bautizó a su proyecto como el Supernova Cosmology Project (SCP).

El segundo equipo se sumó a este tipo de trabajos en 1994: el 'High-z Supernova Search Team' dirigido por Brian Schmidt (entonces un postdoc en la Universidad de Harvard, hoy en el Observatorio Mount Stromlo de Australia), y Nicholas Suntzeff, con quienes trabajaba Adam Riess y otra decena de astrónomos. Este equipo obtuvo cuatro noches de tiempo de observación en el Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo (Chile) para un primer proyecto piloto en el que descubrieron la supernova SN1995Y. Poco después el grupo se aumentó con otros investigadores estadounidenses, australianos y chilenos, hasta alcanzar una veintena de miembros. El grupo utilizó los telescopios Keck de Hawaii (EE.UU.) y los de ESO en Chile.

Ambos equipos tenían una fuerte componente internacional, y utilizaron los telescopios más potentes y sensibles del mundo (incluyendo el telescopio espacial Hubble), esto es sin duda un reflejo de la globalización de la Astronomía contemporánea. Y ambos equipos llegaron a la sorprendente conclusión de que, lejos de desacelerarse en su movimiento de expansión, las galaxias se encontraban en una expansión que se aceleraba con el tiempo, lo que parecía indicar que la expansión del Universo continuará *ad eternum*.

Este sorprendente descubrimiento se hizo indiscutible en el año 1998, momento en el que la revista Science lo calificó como el mayor logro científico del año.

## ■ Supernovas de tipo Ia: la clave del Nobel

La clave del descubrimiento fue la observación de supernovas de tipo **Ia**. Estas explosiones de tipo **Ia** son tan luminosas que es posible localizarlas (aunque con bajo brillo aparente) en galaxias muy lejanas. Pero lo que las hace extremadamente útiles en Astronomía es que, en primera aproximación, estas supernovas explotan todas con la misma luminosidad intrínseca. La diferencia de brillo aparente observada entre una supernova **Ia** y otra sólo se debe a la diferencia en las distancias que las separa de nosotros. Así pues, las supernovas **Ia** juegan en el Universo un papel similar al de las balizas que nos indican la posición en una carretera: a partir del brillo aparente de uno de estos objetos podemos estimar la distancia a la que se encuentra.

¿A qué se debe la uniformidad en luminosidad de las supernovas **Ia**? Las estrellas que no superan en ocho veces en masa al Sol acaban su vida eyectando una buena parte de sus capas al medio interestelar y dejando un pequeño residuo inerte y muy denso que apenas tiene una masa solar, residuo que se denomina ‘estrella enana blanca’.



Figura 5. Recreación de la formación de una supernova la NASA.

Cuando una enana blanca forma parte de un sistema binario, su intenso campo gravitatorio arranca parte de la materia a su estrella compañera (mucho más voluminosa que la primera). Según esta materia se va transfiriendo sobre la superficie de la enana blanca, su masa aumenta y cuando alcanza un valor umbral suficiente (el límite de Chandrasekhar: 1,44 veces la masa del Sol), se produce una explosión termonuclear extremadamente energética. Es esta explosión lo que se conoce como ‘supernova de tipo Ia’.

Así pues, la uniformidad en la luminosidad de estas supernovas se debe a que todas estas explosiones se originan en estrellas enanas blancas cuando alcanzan el mismo valor de esta masa umbral necesario para la explosión. Es decir, todas tienen la misma luminosidad porque todas explotan con la misma masa. Pero, naturalmente, tal uniformidad no es más que una primera aproximación. Por ejemplo, diferencias en la composición química de las enanas blancas pueden ocasionar pequeñas diferencias en la luminosidad de las explosiones.

Las supernovas de tipo Ia no son frecuentes. En una galaxia media, ocurren dos o tres cada mil años, y los equipos de astrónomos tuvieron que vigilar un enorme número de galaxias para descubrir unas decenas. Por ejemplo, el equipo SCP descubrió entre los años 1988 y 1998 unas 80 supernovas de tipo Ia en un amplio rango de distancias. En las etapas iniciales del proyecto, el equipo tuvo grandes dificultades para descubrir este tipo de objetos.

Como ha reconocido el propio Perlmutter, al principio del proyecto se encontraban dentro de un problema del tipo “el huevo y la gallina”: para obtener tiempo de observación en los grandes telescopios que les eran imprescindibles, necesitaban demostrar que iban a descubrir alguna supernova, pero sin una cantidad apreciable de tiempo de observación no podían demostrar que el proyecto era viable. A principios de los 1990, el grupo desarrolló una nueva estrategia que garantizaba el descubrimiento de numerosas supernovas “por encargo”. Poco después de una luna nueva, el equipo tomaba unas 50 - 100 imágenes de gran campo de regiones selectas del cielo. Típicamente, en cada una de estas imágenes se podía localizar un millar de galaxias distantes. Tres semanas después, se realizaba una observación idéntica de las mismas regiones del cielo y, en estas nuevas imágenes, las supernovas aparecían como puntos luminosos que no eran detectables en las primeras observaciones. Dado que se observaban varios millares de galaxias, el número típico de supernovas detectadas era de unas cuantas decenas. Además, en el lapso de tiempo transcurrido entre imágenes (tres semanas) las

supernovas no habían alcanzado su máximo brillo y podían ser estudiadas ahora con mayor detalle en la luna nueva que comenzaba.

Las supernovas de tipo **Ia** son tan similares entre sí que, ya estén en galaxias cercanas o lejanas, un rápido estudio de su espectro nos indica en qué momento explotaron y a qué distancia están.

### ■ Implicaciones del Nobel: energía oscura y constante cosmológica

Las implicaciones del descubrimiento de Perlmutter, Schmidt y Riess indican que el Universo actual parece estar dominado por una forma misteriosa de energía, conocida como energía oscura, que debe ser la causante de la expansión acelerada. Para explicar la aceleración observada, aproximadamente el 70 por ciento de la densidad de energía del Universo actual debería estar en esa forma de energía oscura. Una de las propiedades características de este componente del Universo es el hecho de que provoca que la expansión del Universo varíe con una relación lineal entre velocidad y distancia, haciendo que el espacio-tiempo se expanda más rápidamente que lo esperado según evoluciona el Universo.

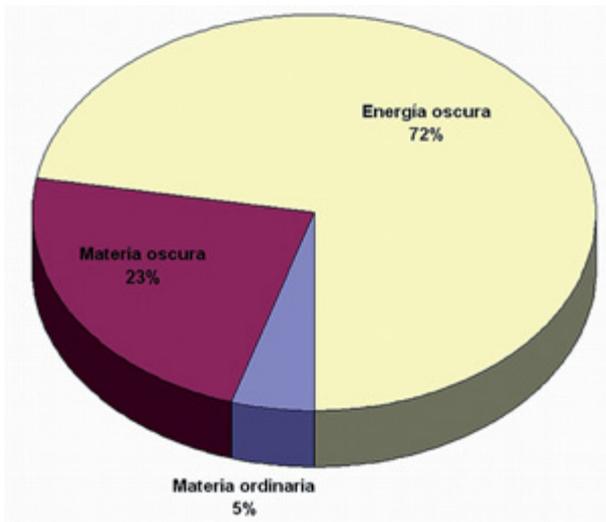


Figura 6. La composición del Universo.

La energía oscura puede ser vista, por tanto, como una especie de repulsión entre el espacio ocupado por las galaxias, repulsión que se opone —y acaba superando— a la atracción gravitacional entre galaxias. Naturalmente esta idea está íntimamente relacionada con la de la constante cosmológica  $\Lambda$  de las ecuaciones de campo de Einstein de la relatividad general, que hemos descrito más arriba. De hecho, energía oscura y constante cosmológica parecen ser dos descripciones del mismo fenómeno físico subyacente. Los descubrimientos de los premiados con el Nobel vienen a reconocer así la validez de aquella formulación de Einstein. Aunque el propio Einstein lo consideró el mayor error de su carrera, estos nuevos descubrimientos parecen sugerir que Einstein no solo no se equivocó cuando introdujo su constante cosmológica, sino que como en tantas otras ocasiones demostró una intuición sobresaliente.

Sin embargo los detalles de la naturaleza física de la constante cosmológica y su relación con el modelo estándar de la física de partículas continúan siendo un enigma que es investigado hoy de manera intensa por científicos tanto en el ámbito de la física teórica como en el de las observaciones astronómicas.

La Mecánica Cuántica predice la existencia de una “energía del vacío” que surge de manera natural en las ecuaciones de campo fundamentales, un concepto que parece muy próximo al de la energía oscura. Uno de los mayores desafíos de la física teórica contemporánea es comprender la predicción genérica de las teorías cuánticas de campos y su posible relación con la constante cosmológica. Sin embargo, el valor de la energía del vacío predicho por la Mecánica Cuántica resulta ser muchísimo mayor que el valor de la energía oscura. Concretamente ¡hay una diferencia de 120 órdenes de magnitud en las estimaciones de ambas! Esta descomunal discrepancia ha sido calificada como “la peor predicción en la Historia de la Física”.

Como vemos, aun quedan muchos fenómenos que comprender. Nos encontramos sólo al principio de las investigaciones que deberían arrojar luz sobre la energía del vacío, la energía oscura y su posible relación entre ellas. Finalmente, aunque los físicos nos refiramos a la energía oscura como si fuese un ente real, no puede descartarse que tal término encubra un fenómeno físico del que no podemos sospechar aún su naturaleza, quizás una corrección a alguna de las leyes de la Física que parecen hoy perfectamente establecidas, pero cuya validez habría que verificar sobre escalas cosmológicas. No es descabellado pensar que el estudio del fenómeno denominado “energía oscura” acabe desembocando en el desarrollo de una Nueva Física.

## ■ La evolución del Universo

La teoría del Big Bang nos dice que el Universo en sus primeros momentos estaba lleno homogénea e isotrópamente de una energía muy densa y que tenía una temperatura y presión concomitantes. Se expandió y se enfrió, experimentando cambios de fase que pueden considerarse análogos a la condensación del vapor o a la congelación del agua, pero relacionados con las partículas elementales. Estudiando la historia térmica del Universo y los cambios de fase que van asociados con la disminución de su temperatura, puede reconstruirse la evolución desde el Big Bang hasta nuestros días y extrapolarla hacia el futuro.

Aproximadamente  $10^{-35}$  segundos después del tiempo de Planck un cambio de fase causó que el Universo se expandiese de forma exponencial durante el período llamado inflación cósmica. Al terminar la inflación, los componentes materiales del Universo quedaron en la forma de un plasma de quarks-gluones, en donde todas las partes que lo formaban estaban en movimiento en forma relativista.

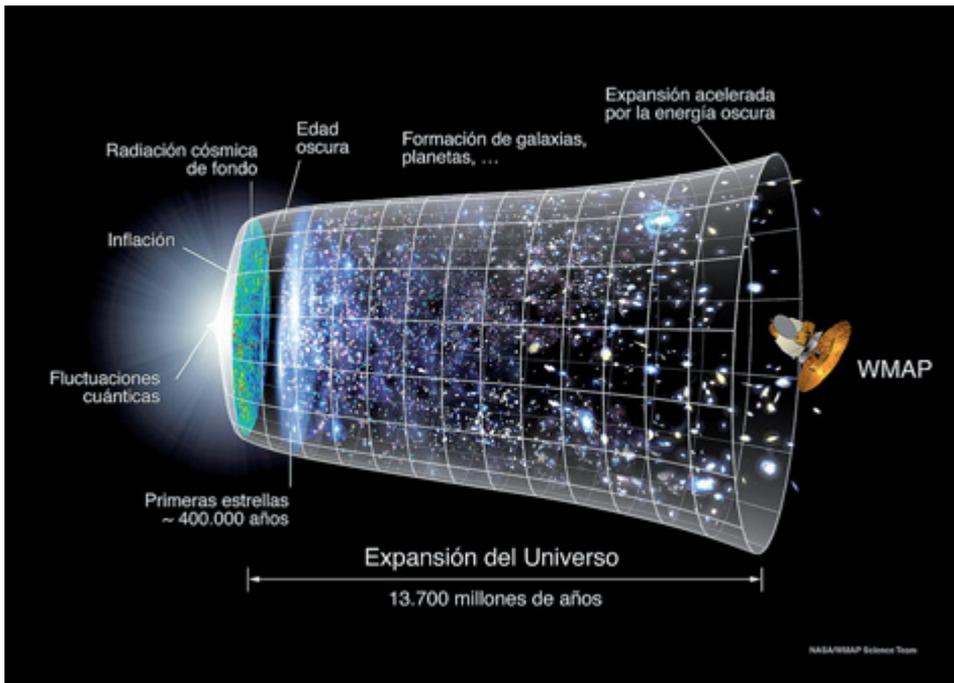


Figura 7. La evolución del Universo. NASA, WMAP.

Con el crecimiento en tamaño del Universo, la temperatura descendió, y debido a un cambio aún desconocido denominado bariogénesis, los quarks y los gluones se combinaron en bariones tales como el protón y el neutrón, produciendo de alguna manera la asimetría observada actualmente entre la materia y la antimateria. Las temperaturas aún más bajas condujeron a nuevos cambios de fase, que rompieron la simetría.

Más tarde, protones y neutrones se combinaron para formar los núcleos de deuterio y de helio, iniciando así el proceso denominado nucleosíntesis primordial. Al enfriarse el Universo, la materia gradualmente dejó de moverse de forma relativista y su densidad de energía comenzó a dominar gravitacionalmente sobre la radiación. Pasados 300.000 años, los electrones y los núcleos se combinaron para formar los átomos (mayoritariamente de hidrógeno). Por eso, la radiación se desacopló de los átomos y continuó por el espacio prácticamente sin obstáculos. Ésta es la radiación de fondo de microondas.

Al pasar el tiempo, algunas regiones ligeramente más densas de la materia casi uniformemente distribuida crecieron gravitacionalmente, haciéndose más densas, formando nubes, estrellas, galaxias y el resto de las estructuras astronómicas que actualmente se observan. Los detalles de este proceso dependen de la cantidad y tipo de materia que hay en el Universo. Los tres tipos posibles se denominan materia oscura fría, materia oscura caliente y materia bariónica. Las mejores medidas disponibles muestran que la forma más común de materia en el Universo es la materia oscura fría. Los otros dos tipos de materia sólo representarían el 20 por ciento de la materia del Universo.

Más misterios aparecen cuando se investiga más cerca del principio, cuando las energías de las partículas eran más altas de lo que ahora se puede estudiar mediante experimentos. No hay ningún modelo físico convincente para el primer  $10^{-33}$  segundo del Universo, antes del cambio de fase que forma parte de la teoría de la gran unificación. En el «primer instante», la teoría gravitacional de Einstein predice una singularidad gravitacional en donde las densidades son infinitas. Para resolver esta paradoja física, hace falta una teoría de la gravedad cuántica. La comprensión de este período de la historia del Universo figura entre los mayores problemas no resueltos de la Física.

Vemos como de acuerdo con la teoría, un Universo homogéneo e isótropo lleno de materia ordinaria, podría expandirse indefinidamente o, alternativamente, frenar su expansión lentamente, hasta producirse una contracción universal. El fin de esa

contracción se conoce con un término contrario al Big Bang: el Big Crunch o ‘Gran Colapso’ o un Big Rip o ‘Gran Desgarro’. El parámetro fundamental que determina si el Universo continuará expandiéndose indefinidamente o si se contraerá es la densidad media del Universo. Si el Universo se encuentra en un punto crítico, puede mantenerse estable, en expansión, de manera indefinida.

Prácticamente todos los trabajos teóricos actuales en Cosmología tratan de ampliar o concretar aspectos de la teoría del Big Bang. Gran parte del trabajo actual en Cosmología trata de entender cómo se formaron las galaxias en el contexto del Big Bang, comprender lo que allí ocurrió y cotejar nuevas observaciones con la teoría fundamental.

### ■ Perspectivas futuras

El estudio de la energía oscura es uno de los mayores retos de la Astronomía y de la Física de nuestros días y varios experimentos están siendo diseñados con este objetivo específico.

La misión espacial EUCLID de la Agencia Espacial Europea ha sido aprobada recientemente (dentro del programa Cosmic Vision 2015-2025) para su lanzamiento hacia el

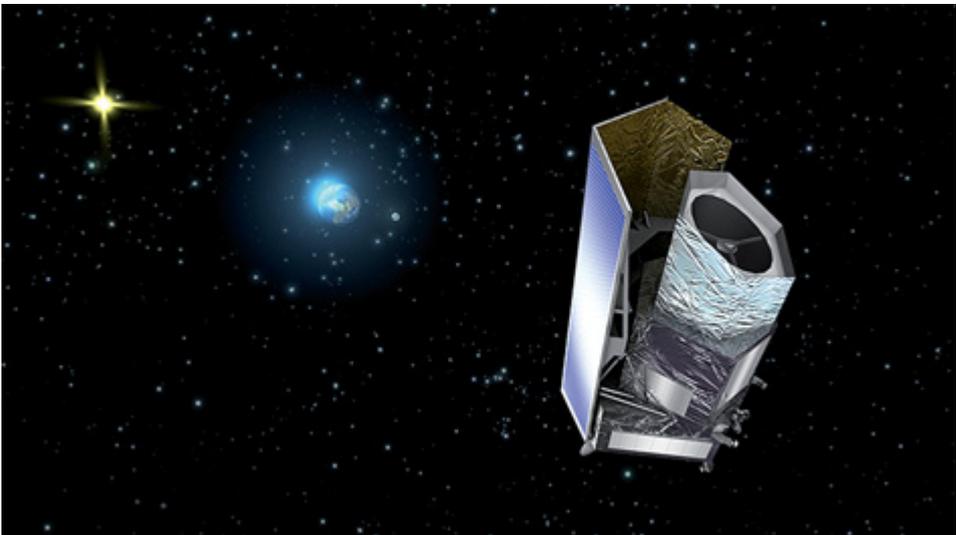


Figura 8. Recreación del telescopio EUCLID - ESA.

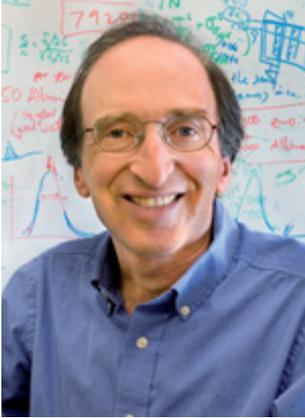
año 2019. Se trata de un telescopio de 1,2 m de diámetro que irá equipado con tres instrumentos para realizar imágenes y tomar espectros, tanto en el visible como en el infrarrojo. Su objetivo es explorar la historia de la expansión del Universo y la evolución de las estructuras cósmicas (galaxias y cúmulos de galaxias). Observando a distancias progresivamente más lejanas será posible medir la forma y las velocidades de las galaxias, así como la distribución de los cúmulos de galaxias en función de la distancia. El telescopio se situará en el punto L2 de Lagrange (a unos 150 millones de kilómetros de la Tierra) donde permanecerá durante 6 años.

Los efectos de la energía oscura esperan encontrarse en la forma en la que han evolucionado los cúmulos de galaxias durante los últimos 10.000 millones de años. Concretamente, se espera estudiar las oscilaciones acústicas bariónicas y las distorsiones del espacio-tiempo que deben ser creadas por la energía oscura. Trece países europeos contribuyen a la instrumentación de EUCLID con una participación importante de instituciones y empresas españolas.

El Telescopio Infrarrojo de Gran Campo (WFIRST por sus siglas en inglés) de la NASA es un proyecto con objetivos similares a los de EUCLID. Aunque también contempla la observación de exoplanetas (mediante el método de las microlentes gravitatorias), una de sus misiones principales es la medida de las oscilaciones acústicas bariónicas mediante una exploración de un elevado número de galaxias y cúmulos. Otro de sus objetivos es el descubrimiento y medida precisa de nuevas supernovas de tipo **Ia** para refinar la medida de la aceleración de la expansión del Universo. Este telescopio también tendrá un modo de operación como observatorio de propósito general, al que podrán acceder todo tipo de proyectos de investigación.

## ■ Biografías de los premiados

### *Saul Perlmutter*



Nacido en 1959 en Champaign-Urbana (EE.UU.) se graduó en Harvard en 1981 y recibió su doctorado en la Universidad de Berkeley en 1986. Su tesis doctoral fue dirigida por el astrónomo Richard A. Muller y trató sobre la hipótesis de la estrella Némesis. Ésta es una hipótesis astronómica que mantiene la posibilidad de que nuestro Sol forme parte de un sistema binario, cuya compañera, una estrella oscura y pequeña, probablemente una enana marrón, recibiría el nombre de “Némesis” (la diosa griega de la venganza), debido a los efectos catastróficos que produciría al perturbar periódicamente la Nube de Oort.

Actualmente trabaja en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley y es profesor en el Departamento de Física de la Universidad de Berkeley. En este Laboratorio lideró el Proyecto Supernova Cosmology y junto al equipo de investigación High-Z Supernova, realizaron observaciones de supernovas de clase **Ia** del Universo profundo que les permitieron obtener evidencias de la aceleración de la expansión del Universo.

En la actualidad intenta consolidar su teoría de la aceleración en la expansión del Universo con las investigaciones que se llevan a cabo en el marco de un nuevo proyecto internacional de gran alcance. También está colaborando en el desarrollo de misiones espaciales dedicadas a localizar y estudiar más supernovas a gran distancia.

La labor científica de Perlmutter no se limita al campo de la Astrofísica, pues participa en el programa de Berkeley para la medida de la temperatura de la superficie de la Tierra a través del análisis de datos climáticos.

Es miembro de la Academia Estadounidense de las Artes y las Ciencias y de la Academia Nacional de Ciencias de los EE.UU. A lo largo de su trayectoria científica ha recibido numerosos premios entre los que destacan el Premio de Física E.O. Lawrence del Departamento de Energía de los EE.UU. (año 2002), el Premio Padua (año 2005), el Premio Shaw en Astronomía, compartido con Adam Riess y Brian P. Schmidt (año 2006), además del prestigioso Premio Gruber en Cosmología, dotado con medio millón de

dólares estadounidenses, que le fue otorgado junto a su equipo, a Schmidt y al equipo High-Z Supernova.

### **Brian P. Schmidt**

Nacido en 1967 en Missoula (Montana, EE.UU.), cursó estudios en la Bartlett High School en Anchorage, Alaska y se graduó en Física y Astronomía por la Universidad de Arizona en 1989. Recibió el doctorado en Ciencias Físicas por la Universidad de Harvard en 1993. El tema de su tesis doctoral fue el estudio de supernovas de tipo **Ia** para medir la constante cosmológica de Hubble.



En el periodo 1993-94 fue becario postdoctoral en el Centro Astrofísico Smithsonian de Harvard, hasta que contrajo matrimonio con Jenny M. Gordon, estudiante de Económicas en la Universidad de Harvard y marcharon al Observatorio Astronómico de Monte Stromlo, cerca de Camberra, Australia.

Ya instalado en Australia, Schmidt pasó a coordinar el equipo de investigación “High-z Supernova”. Realizó una medición de la expansión del Universo que le permitió llegar hasta los ocho mil millones de años-luz en el pasado.

Actualmente Brian P. Schmidt es profesor del Consejo de Investigaciones Científicas de Australia, forma parte de la Universidad Nacional de Australia y del Observatorio Astronómico de Monte Stromlo y miembro del Centro Nacional de Astronomía y Astrofísica de Australia. Se encuentra liderando un gran proyecto de cartografía celeste con el telescopio espacial Hubble y forma parte de la Red de Estudio del Cielo Austral (Southern Sky Survey).

Su brillante trayectoria científica se ha visto recompensada con numerosos premios. Entre ellos el Premio Malcolm McIntosh del Gobierno de Australia y el Premio Bok de la Universidad de Harvard (ambos en el año 2000), la Medalla Joseph Lade Pawsey de la Academia Australiana de Ciencias (2001) y la Medalla Vainu Bappu de la Sociedad Astronómica de la India (año 2002). Junto a Riess y Perlmutter recibió en el año 2006 el Premio Shaw en Astronomía.

## **Adam G. Riess**



Nació en 1969 en Washington, DC (EE.UU) y se graduó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1992. Recibió el doctorado en la Universidad de Harvard en 1996 con una tesis dirigida por Robert Kirshner. En ella presentó resultados de las medidas de una veintena de supernovas tipo Ia situadas en el Universo profundo y realizó un método para calcular distancias y calibrarlas ayudando así a corregir el efecto del polvo interestelar en las medidas de las inhomogeneidades en el tejido cosmológico.

Antes de ingresar en el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial (Space Telescope Science Institute) en el año 1999, fue becario Miller en la Universidad de California, Berkeley (EE.UU). Dentro del equipo de investigación ‘High-z Supernova Search’ lideró el equipo que trabajó con el telescopio espacial Hubble para obtener datos de supernovas distantes.

En la actualidad es astrofísico en la Universidad Johns Hopkins y en el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial. Es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de los EE.UU. Ha recibido numerosos premios a lo largo de su trayectoria científica entre los que cabe destacar el Galardón Trumpler de la Sociedad Astronómica del Pacífico (año 1999), el Premio Bok de la Universidad de Harvard (año 2001), el Premio Helen B. Warnet de la Sociedad Astronómica Americana (año 2003) y el Premio Shaw de Astronomía compartido con Saul Perlmutter y Brian P. Schmidt por su contribución al descubrimiento de la aceleración cósmica, el mismo equipo que ha obtenido el premio Nobel de Física 2011.

### ■ **Apéndice. Los premios Nobel de la Astronomía**

Con la concesión del Premio Nobel de Física 2011 a los astrónomos Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess “por el descubrimiento de la expansión acelerada del Universo por la observación de supernovas distantes” se culmina una brillante trayectoria de logros astronómicos que han merecido el preciado galardón de la Academia Sueca.



Figura 9. Los galardonados en Estocolmo. Nobel Fund.

Recordemos que el de Física es uno de los cinco premios Nobel establecidos originalmente en el testamento de Alfred Nobel en 1895 para ser entregado anualmente por la Academia Sueca a “científicos que sobresalen por sus contribuciones en el campo de la Física”.

Desde que Wilhen Conrad Röntgen recibiera el primero de estos galardones en el año 1901 “por el descubrimiento de los notables rayos que llevan su nombre”, hasta este último de 2011, han sido 191 científicos (John Bardeen fue premiado en dos ocasiones) que han visto recompensado su trabajo con este reconocimiento. Tan sólo en seis años —1916, 1931, 1934 1940, 1941 y 1942— el premio fue declarado desierto o no pudo entregarse por motivos bélicos.

Estudiando la relación de los premiados, se puede observar que en las primeras décadas del siglo XX, los temas de trabajo que merecieron esta distinción se centraban en el estudio de la radiactividad y en los fundamentos de la Mecánica Cuántica. Después, los descubrimientos sobre partículas elementales y el estudio de la materia se fueron abriendo camino entre los temas más sobresalientes.

Poco a poco, la Astrofísica, parte de la Física que adquirió un gran auge a partir de la segunda mitad del siglo pasado, se vio recompensada en el trabajo de algunos de los astrónomos y físicos que se dedicaron a ella. Los Premios Nobel otorgados a temas de investigación de Astronomía han sido los siguientes:

- 1974: Martin Ryle y Antony Hewish “por sus investigaciones pioneras en la astrofísica de radio: Ryle por sus observaciones e invenciones, en particular por la técnica de síntesis de apertura, y Hewish por su papel decisivo en el descubrimiento de los púlsares”.
- 1978: Arno A. Penzias y Robert W. Wilson (compartido con Piotr Leonidovich Kapitsa) “por su descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas”.
- 1983: Subrahmanyan Chandrasekhar “por sus estudios sobre los procesos químicos importantes para la estructura y evolución de las estrellas” y William Alfred Fowler “por sus estudios teóricos y experimentales sobre las reacciones nucleares de importancia en la formación de elementos químicos en el Universo”.
- 1993: Russell Alan Hulse y Joseph Hooton Taylor Jr. “por el descubrimiento de un nuevo tipo de púlsar, que ha abierto nuevas posibilidades para el estudio de la gravitación”.
- 2002: Raymond Davis Jr. y Masatoshi Koshihira “por sus contribuciones pioneras a la Astrofísica, en particular, por la detección de los neutrinos cósmicos” y Riccardo Giacconi “por sus contribuciones pioneras a la astrofísica, que han conducido al descubrimiento de las fuentes de rayos X cósmicos”.
- 2006: John C. Mather y George F. Smoot “por el descubrimiento de la forma del cuerpo negro y la anisotropía de la radiación de fondo de microondas”.

También hay que destacar la concesión del Premio Nobel de Química del año 1996 a Robert F. Curl Jr., Sir Harold W. Kroto y Richard E. Smalley, “por el descubrimiento de los fullerenos” que también fueron identificados en el medio interestelar.

Dado que muchos de los desafíos de la Física actual requerirán de medidas astronómicas y desde el espacio, no nos cabe ninguna duda de que esta tendencia de la Astronomía a obtener Premios Nobel se acentuará. La Astronomía, como el propio Universo, es una disciplina que se encuentra en expansión acelerada.

## ■ Bibliografía

- Bachiller, R., 2012. *La Astronomía en la encrucijada de la Filosofía, la Ciencia y la Tecnología*. Real Academia de Doctores de España.
- Harrison, E., 2000. *Cosmology: the science of the universe*. Cambridge University Press.
- Hawking, S., 2002. *El Universo en una cáscara de nuez*. Ed. Crítica.
- Hawking, S., Mlodinow, L., 2010. *The Grand Design*. Bantam.
- Hoskin, M., 1997. *Illustrated History of Astronomy*. Cambridge University Press.
- Lachièze-Rey, M., 2005. *Initiation à la Cosmologie*. Dunod.
- Pascal, B., 1976. *Pensées*. GF Flammarion.
- Peebles, P. J. E., 1993. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press.
- Perlmutter, S., 2003. *Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe*. Physics Today.
- Riess, A. G., 2000. *The Case for an Accelerating Universe*. Pub. of the Astron. Soc. Pacific 112, 1284.
- Riess, A. G., et al. 1998. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*. Astron. Journal 116, 1009.
- Schneider, P., 2010. *Cuestiones fundamentales de Cosmología*. Investigación y Ciencia.
- Schmidt, B. P., 2012. *The Accelerating Universe*. American Astron. Society meeting 220, 327.01.
- Sparke, L. S., Gallagher, J.S., 2000. *Galaxies in the Universe*. Cambridge University Press.
- Turner, M. S., 2009. *El origen del Universo*. Investigación y Ciencia.

■ **En Internet:**

Página del *Supernova Cosmology Project*: <http://supernova.lbl.gov/>

Página del *High-z Supernova Team*: <http://www.cfa.harvard.edu/supernova/home.html>

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2011/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/)

<http://www.elmundo.es/elmundo/2011/10/04/ciencia/1317718798.html>

Wikipedia.