

Una exploración sin límites

Rafael Rebolo López

Excelentísimo Sr. Rector, Excelentísimas autoridades, profesores y amigos

El afán que tiene el hombre por entender el Universo es algo innato. Nos acompaña desde el comienzo de los tiempos y seguramente ha sido clave en la propia evolución humana. El deseo de comprender lo que nos rodea conduce a la exploración, al descubrimiento y en definitiva al conocimiento, todo esto es esencial para nuestra supervivencia. La astronomía, una de las primeras ciencias modernas, tiene como objetivo entender la naturaleza, el origen y la evolución del Universo y de sus constituyentes: las formas de materia y energía que hay en él. En las últimas décadas los avances astronómicos nos han dejado perplejos. El descubrimiento de planetas alrededor de otras estrellas, de agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias, incluida la nuestra, de estallidos energéticos de enorme violencia en lejanas galaxias y la medida de la radiación que nos llega del origen del Universo y de su actual expansión acelerada son sólo algunas muestras de la enorme variedad de fenómenos astronómicos, a cual más interesante, que centran el interés de los astrofísicos de hoy. Estos objetos de estudio están muy lejos de lo que seguramente habrían imaginado gigantes del pasado como Copérnico, Galileo, Kepler o Newton, pero a ellos debemos en gran medida que podamos abordar hoy estos problemas.

Las observaciones del cosmos con frecuencia desafían los modelos físicos más avanzados y obligan al desarrollo de nuevas ideas. El progreso en nuestra comprensión de los principios básicos de la Naturaleza depende en gran medida de que exista una eficiente interacción entre los modelos teóricos y la observación. A su vez, la observación se halla muy ligada a los avances tecnológicos. Las nuevas tecnologías han posibilitado construir telescopios e instrumentos cada vez más potentes y su operación desde tierra y desde el espacio. En prácticamente todos los rangos del espectro electromagnético desde las ondas de radio a los rayos gamma los nuevos detectores han abierto nuevas ventanas para el estudio del universo facilitando lo que podríamos llamar una visión global desde su origen hasta nuestros días y la posibilidad de predecir su evolución futura.

En este breve repaso de algunos de los problemas de la moderna astronomía procuraré enfatizar el destacado papel que las nuevas tecnologías desempeñan y el beneficio que aportan a la investigación básica. La necesidad de efectuar medidas astronómicas con mayor precisión también impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías que con frecuencia tienen aplicaciones en otros ámbitos de la ciencia y de la ingeniería. Las implicaciones de la astronomía en nuestra vida son también de carácter cultural porque esta rama de la ciencia aborda profundas preguntas sobre el origen del Universo, del espacio-tiempo, de nuestra Galaxia, nuestro planeta y sobre los orígenes de la vida. Los astrofísicos buscamos respuestas a esas preguntas con la colaboración de colegas en otros ámbitos de la ciencia y de la tecnología, y también deseamos que el público en general nos acompañe en este singular viaje que pretende conocer cómo se originó el Universo y la vida.

El Sol y el impacto de la actividad solar sobre la vida en la Tierra

La investigación en física solar ha contribuido muy notablemente a entender una gran variedad de problemas físicos, que incluyen procesos atómicos, la fusión nuclear y las propiedades de las partículas más elementales. En el año 2002 se otorgó el Premio Nobel de Física a los profesores Ray Davis and Masatoshi Koshiba por su descubrimiento de los neutrinos procedentes del Sol, y porque su trabajo pionero fue esencial para poder establecer propiedades fundamentales de estas partículas elementales que todavía son de las más enigmáticas de la física. Gracias a esos y otros estudios, en esta década hemos podido saber que los neutrinos tienen masa, aunque todavía no hemos podido establecer cuánta. El llamado modelo estándar de física de partículas no puede considerarse completo hasta que tengamos un perfecto conocimiento de las propiedades del neutrino.

Las cuestiones que hoy centran la investigación en física solar van desde establecer la ecuación de estado de los gases en las condiciones de muy elevada temperatura que hay en el interior del Sol, a cómo se generan los campos magnéticos y el papel que tienen en el equilibrio energético de sus capas más externas. Por su proximidad, el Sol nos ofrece un laboratorio excepcional para entender el magnetismo estelar y los procesos magnetohidrodinámicos.

El Sol es una estrella muy estable que produce su energía gracias a reacciones de fusión de hidrógeno en helio en su interior. Su luminosidad cambia en menos de una milésima en escalas de semanas y cuando se promedia sobre décadas las variaciones en luminosidad son inferiores a una diezmilésima, afortunadamente para la vida en la Tierra. Sin embargo, visto desde cerca se aprecia una enorme riqueza de fenómenos atmosféricos en el Sol, regiones activas y manchas, que aparecen y desaparecen con ciclos de actividad de once años y que son modulados por el campo magnético solar. El origen de este ciclo de actividad reside en la interacción entre el campo magnético, la convección y la rotación del Sol alrededor de su eje, pero los detalles finales de cómo se genera el campo magnético en el interior y cómo aflora en la superficie todavía no son bien entendidos. Tampoco lo es la estructura del campo magnético en las regiones más externas de la atmósfera solar, la cromosfera y corona, ni su evolución temporal. Los campos magnéticos coronales son los responsables de la liberación de energía en forma de “flares” y de las eyecciones coronales de masa que tanto preocupan por su impacto sobre múltiples dispositivos a bordo de satélites y por la seguridad de los astronautas. El satélite SOHO de la Agencia Espacial Europea con su continua vigilancia del Sol ha supuesto un hito en el estudio de las eyecciones de material coronal. El desafío consiste ahora en disponer de un modelo con capacidad de predicción de estos acontecimientos para poder actuar en consecuencia y limitar su impacto. Es fundamental poder predecir el comportamiento del Sol en todas las escalas temporales relevantes y eso requerirá de una mejora muy sustancial de nuestro conocimiento de los procesos físicos claves y el desarrollo de sistemas de monitorización continua de nuestro astro. Misiones espaciales como el “Solar Dynamics Observatory”, STEREO y redes de telescopios terrestres como SOLIS serán claves en esta tarea.

El origen de las estrellas y de los planetas

A simple vista se pueden ver unos pocos miles de estrellas, pero sólo en la Vía Láctea hay miles de millones. La mayor parte tienen bastante menos masa que el Sol. Las estrellas más masivas son mucho menos numerosas. ¿Cuál es la distribución de masas de las estrellas? ¿Por qué son más frecuentes las estrellas cuanto menor masa tienen? ¿Dónde se forman? ¿Cuál es la frecuencia de los sistemas múltiples? ¿Cuántas estrellas tienen planetas? ¿Hay planetas como el nuestro alrededor de otras estrellas?

La mayor parte de las estrellas posiblemente se forman dentro de las grandes nubes de material gaseoso que hay en las galaxias. Esas nubes colapsan y se fragmentan en piezas de diferente tamaño que sometidas a la fuerza de la gravedad terminan dando lugar a estrellas. La observación de diversas regiones de formación estelar ha puesto de manifiesto que con gran frecuencia las estrellas como el Sol y las más pequeñas se originan con discos de material gaseoso y polvo (silicatos y partículas carbonáceas de carácter microscópico). Los tamaños de estos discos varían entre 10 y 1000 unidades astronómicas (la unidad astronómica es la distancia entre la Tierra y el Sol) y sus masas están entre el 1 y el 0.1 % de la masa del Sol. En estrellas con edades inferiores al millón de años la frecuencia de discos es superior al 80%, lo que indica que los discos son también un resultado natural del proceso de fragmentación y colapso de nubes moleculares. Sin embargo, sólo un 10% de las estrellas que tienen 5 millones de años muestran estos discos, lo que sugiere que la mayor parte de ellos son disipados en un tiempo inferior. Desde hace décadas se especula que en estos discos podría tener lugar la formación de planetas, bien mediante inestabilidades gravitatorias que originan pequeñas condensaciones, bien mediante acreción de pequeñas partículas que dan lugar a un núcleo sólido que después captura gas. Mientras que el primer mecanismo puede formar planetas en escalas de tiempo más cortas que la vida media de los discos, el segundo parece requerir tiempos comparables o mayores y podría ser menos efectivo. La formación de planetas gigantes en los discos puede ser detectada directamente pues se espera que la interacción del planeta con el gas del disco origine huecos en la distribución de éste que serían observables por ejemplo por el interferómetro en el rango milimétrico ALMA que se instalará en el desierto de Atacama en Chile. Un conjunto de decenas de antenas que Europa, Estados Unidos y Japón construyen para estudiar, entre otras cosas, los procesos que conducen a la formación de los sistemas planetarios.

Los planetas no tienen suficiente masa para alcanzar en sus interiores las temperaturas necesarias para generar energía por reacciones nucleares como hacen las estrellas. Júpiter, el planeta de mayor tamaño del Sistema Solar, tiene 1000 veces menos masa que el Sol ($M_{\text{sol}} = 2 \times 10^{30}$ kg) y es unas 300 veces más masivo que la Tierra. Los astros con masas entre la de Júpiter y la Tierra emiten entre un millón y diez mil millones de veces menos radiación que las estrellas más pequeñas, lo que hace difícil su detección directa. En la última década, tras siglos de especulación sobre la existencia de este tipo de objetos fuera del Sistema Solar, se presentaron pruebas concluyentes de su presencia alrededor de estrellas de neutrones y de estrellas de tipo solar y también se mostró su existencia aislados de estrellas.

Desde 1995 se han descubierto más de 200 planetas alrededor de estrellas de tipo solar. Utilizando observatorios en el espacio y en tierra se espera multiplicar el número de planetas conocidos al menos por cien, desvelando su distribución de masas, periodos y excentricidades orbitales. En la próxima década asistiremos posiblemente al descubrimiento de planetas de tipo terrestre alrededor de otras estrellas, y veremos grandes esfuerzos para detectar trazas de actividad biológica en ellos. Mi equipo de investigación está involucrado en algunos de proyectos que persiguen como objetivo alcanzar la detección de planetas de tipo terrestre. Nuestra aproximación al problema consiste en el desarrollo de instrumentos que midan con una

precisión sin precedentes las velocidades de las estrellas o que sean capaces de obtener imágenes de estrellas con un contraste sin precedentes.

La presencia de planetas en órbita alrededor de las estrellas provoca cambios en la velocidad de éstas que podemos detectar. El primero de estos instrumentos, denominado HARPS-NEF se está construyendo ya en el marco de una colaboración con la Universidad de Harvard y el Observatorio de Ginebra y comenzará en el año 2010 su operación con el telescopio de 4.2m William Herschel en la isla de la Palma. Este instrumento permitirá complementar las medidas de eclipses planetarios que efectuará el satélite Kepler de la NASA cuyo lanzamiento está previsto para este año y permitirá detectar planetas de tipo terrestre en el hemisferio norte. Con un consorcio entre Suiza, España, Italia y Portugal estamos desarrollando un instrumento aún mas potente para utilizar los 4 telescopios VLT que Europa tiene instalados en el Observatorio de Paranal en Chile, nuestro objetivo es alcanzar precisiones de 10 cm/s en el año 2013 y detectar así planetas de tipo terrestre en multitud de estrellas del hemisferio Sur. Finalmente, acabamos de consolidar un consorcio para el desarrollo de un instrumento denominado CODEX que alcance precisiones de 1 cm/s en la medida de velocidad utilizando el futuro telescopio gigante europeo de 42m cuya construcción comenzará en el año 2010 y que sería capaz de detectar la presencia de planetas en condiciones idénticas al nuestro.

El telescopio gigante europeo, en cuya construcción participará España activamente, también contará con un instrumento que haciendo uso de las técnicas más avanzadas de óptica adaptativa extrema tratará de captar imágenes de planetas como la Tierra alrededor de otras estrellas. Será esencial el uso de detectores de muy rápida lectura y bajo nivel de ruido capaces de seleccionar las imágenes menos distorsionadas por la turbulencia atmosférica. En colaboración con el grupo de astrofísica de la UPCT hemos desarrollado una cámara para obtener imágenes ultra-rápidas, denominada FastCam que ya se ha probado en los telescopios de 1.5m TCS, 2.5m NOT y 4.2m WHT y esperamos que pueda ser probada pronto en el telescopio más grande del mundo, el GTC 10.4 m que entrará este año en funcionamiento en la isla de la Palma.

¿Cómo sabremos si hay vida en algún otro planeta?

Vivimos en una época especial donde por primera vez se podrá abordar de acuerdo con el método científico la pregunta sobre la existencia de vida en planetas como el nuestro que orbiten alrededor de otras estrellas. Detectar indicios de actividad biológica constituirá una ambiciosa empresa. Un primer paso consistirá en llevar a cabo la detección de esos astros, después será necesario un análisis espectral de la luz de esos planetas para establecer la composición química de sus atmósferas. La medida de bandas de dióxido de carbono, vapor de agua, ozono y metano nos ayudarán a entender las condiciones de las llamadas exo-Tierras. Es posible que consigamos detectar marcas de moléculas orgánicas o incluso los signos de la clorofila si existe vegetación en ellos como la conocemos en la Tierra. La búsqueda de vida en otros planetas nos permitirá situar a la especie humana en un amplio contexto de la evolución de los sistemas planetarios y de los agente biológicos y por tanto nos ayudará también a entender mejor los factores que garantizan nuestra supervivencia.

Los fenómenos más energéticos del Cosmos: supernovas y estallidos de rayos gamma

Estrellas y gas concentran una buena parte de la materia que brilla en galaxias. Las estrellas con una masa diez veces superior a la del Sol pueden terminar sus vidas en explosiones termonucleares que liberan una cantidad enorme de energía: las supernovas. Hay al menos dos mecanismos que pueden desencadenar una supernova. En el caso de una estrella con masa al menos unas ocho veces mayor que el Sol, el colapso del núcleo inicia una serie de reacciones nucleares que conducen a una violenta liberación de energía, produciendo las llamadas supernovas de tipo II, que tras la explosión podrían dejar como remanente objetos colapsados del tipo estrellas de neutrones y agujeros negros. El otro mecanismo se basa en la detonación de una estrella enana blanca cuando recibe aportaciones importantes de materia de una estrella compañera. En este caso la supernova que se produce se conoce como tipo Ia. Estas supernovas tienen una particularidad que las hace relevantes en el estudio del ritmo de expansión del Universo. Alcanzan un brillo máximo bien definido y la evolución de este brillo con el tiempo tiene también un perfil característico de forma que es posible identificar este tipo de supernovas por su “curva de luz” y establecer a qué distancia se encuentran al medir el máximo del flujo que recibimos de una de ellas y compararlo con dicho brillo intrínseco. Estas supernovas tienen un papel muy relevante en la medida del ritmo de expansión del Universo como veremos más adelante y propiciaron las primeras indicaciones experimentales de que este ritmo podría ser acelerado. Las supernovas son claves para la producción de elementos esenciales para la vida.

Cuando una supernova de tipo II tiene lugar, se forma una estrella de neutrones o un agujero negro. Las estrellas de neutrones fueron descubiertas por A. Hewish y J. Bell en los años sesenta gracias a un nuevo radiotelescopio construido por la Universidad de Cambridge. Estos objetos que tienen radios estimados de unos 15 km y pueden concentrar una masa hasta un millón de veces mayor que la de la Tierra son capaces de producir una fuerte emisión direccional de ondas de radio. Con su rápida rotación son vistos con los radiotelescopios terrestres como potentísimos faros. Con períodos de milisegundos, estas estrellas de neutrones denominadas “púlsares” están frecuentemente asociadas con las nebulosas que dejan los restos de las estrellas al explotar como supernovas. La conexión entre ambos tipos de objetos es incuestionable hoy día. No resulta tan obvia la evidencia para la formación de agujeros negros en el curso de una explosión de supernova pero los modelos teóricos apoyan decididamente que en la fase final de estrellas muy masivas también se pueden originar este tipo de objetos enigmáticos.

El desarrollo de nuevas ventanas de observación en rangos poco explorados del espectro electromagnético ha conducido al descubrimiento de frecuentes estallidos de rayos gamma en el cielo, durante décadas estas emisiones han intrigado a los astrofísicos. Duran muy poco tiempo y rara vez repiten. A finales de los años 90 fue posible asociar algunas de estas fuentes con galaxias muy lejanas y hoy sabemos que los estallidos de rayos gamma de mayor duración están vinculados a la formación de supernovas de extraordinaria potencia, las hipernovas. Quizás los de menor duración responden a la fusión de estrellas de neutrones o de agujeros negros y estrellas de neutrones. Estas fuentes de rayos gamma también emiten en el visible, infrarrojo y radio. Durante pocos minutos pueden convertirse en fuentes tan luminosas en el visible como las estrellas cercanas, eso a pesar de que se encuentran a una distancia mil millones de veces mayor. Seguramente asistimos a los acontecimientos más energéticos que pueden tener lugar en el Universo y que liberan en pocos minutos energías comparables a la que el Sol puede liberar durante toda su vida.

Los agujeros negros: materia en condiciones extremas. ¿Podemos entender la gravedad?

Los fenómenos cósmicos permiten poner a prueba nuestros modelos físicos en situaciones mucho más extremas que las que podemos reproducir en la Tierra. Los agujeros negros representan el triunfo de la gravedad y son la clave para el estudio de la teoría de la Relatividad General en situaciones límite. Las estrellas de neutrones son sólo ligeramente menos extremas pero cerca de ellas la gravedad es muy intensa y el espacio-tiempo debe tener una importante curvatura. Una diferencia fundamental entre estrellas de neutrones y agujeros negros es que las primeras tienen una superficie donde pueden producirse fenómenos de alta energía que podemos detectar y por tanto nos informan de cómo están constituidas. Los agujeros negros tienen lo que llamamos un horizonte de cuyo interior no podemos extraer información. La materia que se aproxima a esas regiones alcanza velocidades cercanas a la de la luz y la descripción de su comportamiento requiere de la teoría de la Relatividad General.

Los campos gravitatorios muy intensos provocan numerosos efectos susceptibles de medida, grandes desplazamientos al rojo gravitacionales, curvatura de los rayos de luz en la proximidad de objetos compactos y desviaciones de órbitas keplerianas. El radio gravitacional de un objeto de masa M se define como GM/c^2 donde G es la constante de la gravitación y c la velocidad de la luz. Para restringir a la teoría de la Relatividad General es preciso medir las propiedades de la materia y de la radiación a pocos radios gravitacionales. El radio del horizonte de un agujero negro sin rotación es dos veces su radio gravitacional.

Conocemos la existencia de agujeros negros de masa estelar por algunos casos donde una estrella gira alrededor de ellos a muy alta velocidad. En uno de los casos más extremos que conocemos, XTE J1118+480, la estrella alcanza una velocidad de 700 km/s en su movimiento orbital. Estas estrellas transfieren material al agujero negro formando un disco de acreción en torno a él. Con cierta frecuencia se producen episodios en los que el material penetra el horizonte del agujero, liberando en los instantes previos grandes cantidades de energía, sobre todo en el dominio de rayos X. Esas intensas emisiones han permitido identificar a la mayor parte de estos sistemas con satélites. La dinámica de estas estrellas que están típicamente separadas por millones de kilómetros de sus oscuros compañeros ha permitido establecer la masa de los objetos compactos primarios. Varios de estos agujeros negros estelares se conocen con masas entre 5 y 10 veces la masa del Sol (V404 Cyg, XTE J1118+480 y Nova Sco 94 son algunos ejemplos).

En el núcleo de nuestra Galaxia, tenemos un potencial agujero negro de tres millones de veces la masa del Sol que coincide con la intensa fuente de emisión en radio Sag A. El movimiento de las estrellas detectadas alrededor de esta fuente pone de manifiesto fenómenos originados a pocos cientos de radios gravitacionales de un agujero negro supermasivo. Es posible que en el futuro se pueda descubrir algún pulsar en esta región que permitiría medir la masa, rotación y momento cuadrupolar del agujero negro y someter así a pruebas muy exigentes a la teoría de la Relatividad General. Obtener imágenes directas del horizonte de eventos de los agujeros negros seguramente requerirá interferometría infrarroja y submilimétrica y también el desarrollo de nuevos observatorios espaciales de rayos X y rayos gamma. Hoy se piensa que la mayor parte de las galaxias tienen agujeros negros supermasivos en sus núcleos, pero todavía no tenemos una explicación de cómo se originaron y no sabemos cómo van a evolucionar. Este es un tema de investigación intensa para los actuales observatorios espaciales de rayos X y gamma (XMM-Newton, Chandra e Integral), especialmente interesados en estudiar los mecanismos de acreción y de eyección que tienen lugar cerca de los horizontes, y establecer la relación entre agujeros negros y la evolución de las galaxias.

Las galaxias y la red cósmica de cúmulos y supercúmulos

Ahora sabemos que muchas de las enigmáticas nebulosidades que centraban el debate de los astrónomos de principios del siglo XX son, en realidad, conjuntos de miles de millones de estrellas ligadas por la gravedad.. En los años 1925 y 1926, Hubble identificó varias estrellas Cefeidas en la Nebulosa de Andrómeda (M31) y en su compañera M33. Utilizando las relaciones de Leavitt estableció una distancia a Andrómeda de aproximadamente un millón de años luz, la mitad del valor correcto, pero fue suficiente para concluir que estos sistemas se encontraban fuera de nuestra Galaxia y que se trataba realmente de galaxias como la nuestra, con tamaños y contenidos estelares similares, situadas a enormes distancias. Estimamos que puede haber decenas, incluso centenas de miles de millones de galaxias como nuestra Vía Láctea en el Cosmos, las más cercanas se encuentran a pocos millones de años luz, pero los modernos telescopios alcanzan a verlas miles de veces más lejos.

Gracias a que la velocidad de la luz es finita, podemos ver las galaxias más distantes tal y como eran hace miles de millones de años y como hacen los arqueólogos con los restos de civilizaciones pasadas, los astrónomos tratamos de buscar en las huellas del pasado la contestación de preguntas esenciales relativas a su origen y formación. ¿Hasta qué distancia podemos llegar a ver galaxias como la nuestra? ¿Cómo se formaron las galaxias? ¿Cuándo? ¿Qué tipo de poblaciones de estrellas contienen? ¿Existen en sus centros agujeros negros supermasivos? Si es así, ¿cómo han evolucionado hasta nuestros días?

Si bien es cierto que en el Universo existe una cierta estructuración, no responde ésta a una geometría regular como podemos ver en las formas de cristalización de muchos minerales. Más bien se trata de una organización difusa de la materia, en la que se repite con frecuencia algunos componentes básicos como las estrellas, las galaxias, los cúmulos de galaxias, los vacíos intergalácticos, y donde los tamaños y masas asociados a estos componentes tienen un papel más destacado. Por ejemplo, las galaxias son típicamente decenas de miles de millones de veces más masivas que nuestro Sol, y las estrellas tienen masas entre 100 y 0.1 veces la del Sol, pero no hay estrellas que tengan miles de veces la masa solar, y no parece que existan muchas galaxias con una masa de cientos de miles o pocos millones de veces la masa solar. ¿Por qué esto es así?. ¿Cómo se ha originado esta rica fenomenología?, ¿Cómo ha evolucionado hasta el presente?, ¿Cómo será su evolución futura?

La formación de la estructura a gran escala de la materia se puede entender como una competición entre la fuerza de la gravedad y la expansión global del Universo. Las grandes simulaciones numéricas realizadas con los más potentes ordenadores permiten tener una visión de cómo ha evolucionado esa competición con el tiempo. La materia luminosa ha sido capaz de concentrarse en cúmulos de galaxias y en galaxias que observamos en cualquier región del Universo, pero para tener un cuadro completo, todavía tenemos que poder ver cómo fueron las primeras etapas de este proceso, cómo tuvo lugar la formación de las primeras galaxias, de los primeros cúmulos y supercúmulos. Con el grupo de astrofísica de la UPCT desarrollamos una línea de investigación encaminada a detectar en el óptico e infrarrojo los cúmulos y supercúmulos más distantes que el satélite Planck de la Agencia Espacial Europea identificará en el rango de las microondas a partir del año que viene. El estudio de estos cúmulos será de gran importancia para entender las primeras etapas de estructuración del Universo.

La evolución del Universo: del instante inicial al presente

En la segunda década del siglo XX, Edwin Hubble descubrió que vivimos en un Universo en expansión, las galaxias se alejan unas de otras con velocidades relativas aparentes tanto mayores cuanto mayor es la distancia que las separa. Estableció una relación lineal entre las velocidades y las distancias de las galaxias $v = H_0 D$ que hoy se conoce como ley de Hubble para la expansión del Universo y la constante H_0 , que lleva su nombre, es una medida del ritmo actual de expansión del Universo. Estudios posteriores confirmaron esta ley como una de las más fundamentales del Cosmos, y aunque la pendiente de la recta no es la que inicialmente sugirió Hubble, la relación lineal que propuso se ha confirmado ampliamente. Con el telescopio espacial Hubble se ha obtenido una de las medidas más precisas de la constante, $H_0 = 68 \pm 7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

La ley de proporcionalidad lineal entre velocidades y distancias no permite inferir que ocupemos una posición privilegiada en el Cosmos. Todo lo contrario, lo que indica es que no necesitamos considerar que nuestra posición sea algo especial ya que un observador en cualquier otra galaxia determinaría el mismo comportamiento para las restantes. Es interesante notar que sólo una la ley de carácter lineal que vincule la velocidad de alejamiento de las galaxias y la distancia que las separa puede preservar la homogeneidad a gran escala. Conviene remarcar que la expansión global no responde a un movimiento real de las galaxias sino a las propiedades intrínsecas del espacio-tiempo que Einstein describe en sus ecuaciones de campo de la Teoría de la Relatividad General en 1915. Son las propiedades geométricas del espacio, cambiantes en el tiempo, las responsables de las aparentes velocidades de alejamiento que se observan. La explicación del fenómeno de expansión llevó a la conclusión de que el Universo debió tener en su comienzo un tamaño muy pequeño y una densidad y temperatura elevadísima, muy superior a las que se alcanzan en los interiores estelares y por supuesto en cualquier laboratorio. Entender cómo se comporta la materia y la energía en esas circunstancias supone uno de los grandes desafíos de la física. La descripción última de aquellos instantes requerirá el desarrollo de una teoría cuántica de la gravedad que todavía no tiene una formulación definitiva. De momento, los cosmólogos hacen uso del llamado modelo de “Big Bang” basado en la formulación relativista de la gravedad, para describir la evolución del Universo desde las primeras fracciones de segundo hasta nuestros días. Este modelo explica satisfactoriamente la abundancia de los elementos más ligeros (hidrógeno y helio) que son los más abundantes y explica la existencia del fondo cósmico de microondas, cuyo descubrimiento a mitad de los años sesenta haría merecedor del premio Nobel de Física unos años más tarde a Penzias y a Wilson. La medida de la anisotropía y del espectro del fondo cósmico de microondas realizadas en 1992 por el satélite COBE de la NASA también habría de deparar el Nobel de Física a Smoot y Mather en el año 2006.

Si bien el modelo estándar de *Big Bang* ha conseguido clamorosos éxitos todavía deja sin contestar preguntas relativas a las condiciones iniciales del Universo: el origen de la homogeneidad y la planitud de la geometría a gran escala, el origen de la materia y la radiación, de la asimetría entre materia y antimateria, el origen de las semillas que habrían de dar lugar por inestabilidad gravitatoria a la estructura que observamos en la distribución de las galaxias y finalmente la naturaleza de las llamadas materia y energía oscuras. La contestación a estas preguntas se enmarca hoy en el conjunto de modelos conocidos como inflacionarios, según los cuales el Universo sufrió un proceso de expansión ultra-acelerada muy cerca del instante inicial. La Inflación predice un Universo prácticamente uniforme, con una geometría sin curvatura y ofrece una explicación para el origen de la estructura del Universo y la anisotropía del fondo cósmico de microondas en base a fluctuaciones de densidad adiabáticas. Además predice un fondo de ondas gravitacionales cuya amplitud es una función directa de la escala de energía del

proceso inflacionario. El agente causante de la Inflación es la energía del vacío de un hipotético campo escalar. Estamos en un nuevo dominio de la física que va más allá del llamado Modelo Estándar de las partículas elementales, por lo que estas ideas suponen controversia y están abiertas a gran debate. La densidad de energía responsable de la expansión acelerada, habría de dar lugar a la materia y radiación y a las condiciones iniciales del modelo estándar del Big Bang. Estos procesos predicen varios fenómenos cuya huella podría persistir en el Universo. Uno de ellos, es la formación de ondas gravitacionales que habrían dejado su marca en la polarización del fondo cósmico de microondas, concretamente los llamados modos rotacionales o modos B, su detección supondría un paso enorme hacia nuestra comprensión de los primeros instantes del Universo y centra la investigación de muchos grupos en el mundo, concretamente un nuevo experimento en Tenerife denominado QUIJOTE-CMB comenzará este año para investigar la polarización del fondo cósmico de microondas. También podremos ver cómo el satélite Planck, que espera ser lanzado a finales del 2008, obtiene los datos más precisos del fondo de microondas con una resolución de tan sólo 5 minutos de arco. Este satélite dejará como legado mapas de todo el cielo a nueve frecuencias elegidas en el rango 30-900 GHz que permitirán desentrañar el origen de la estructura del Universo a gran escala y acotar con gran precisión los parámetros del modelo cosmológico estándar.

Todavía nos enfrentamos a una difícil cuestión, ¿cómo pudo formarse a 10^{-43} s una región del espacio-tiempo, más pequeña que un protón, extremadamente densa y caliente conteniendo toda la materia y energía que hoy observamos en el Universo? Las teorías inflacionarias caóticas sugieren que nuestro Universo podría haberse originado a partir de un número muy elevado de configuraciones diferentes. En un supuesto meta-Universo, algunas regiones podrían estar en expansión, otras en contracción, algunas muy calientes, otras muy frías. Si en alguna de ellas se dieron las condiciones para que tuviera lugar la Inflación podría haber surgido un Universo como el nuestro. En esas etapas tan tempranas se necesita una formulación cuántica de la gravedad y del espacio-tiempo que todavía no existe de forma completa y por tanto, cualquier propuesta de descripción de esos instantes debe considerarse con precaución. Esta es la parte más especulativa de la visión del Universo que nos ofrece la Cosmología actual. En su evolución posterior, el Universo esencialmente se expande, y el plasma inicial con sus irregularidades evoluciona para dar lugar a galaxias y otras estructuras. Hoy sabemos que la expansión puede incluso estar siendo acelerada por la llamada energía del vacío, un fenómeno que abre nuevas puertas para la comprensión última de las leyes fundamentales de la Naturaleza.

La materia y la energía oscura

Múltiples observaciones apuntan a que la cantidad de materia ordinaria (la constituida esencialmente por protones y neutrones) en el Universo no es suficiente como para frenar su expansión. Pueden existir, no obstante, otras formas de materia que contribuyan y que incidan sobre el futuro de la expansión universal. Una ya la hemos mencionado, los neutrinos, otras más exóticas, como los axiones, fotinos, gravitinos, neutralinos pertenecen al reino de la especulación teórica porque su existencia no ha sido verificada aún experimentalmente. Todas estas partículas se caracterizan por su débil interacción con la materia, lo que hace intrínsecamente difícil su detección. La astrofísica tampoco ha podido establecer su existencia, pero observaciones de la dinámica de las galaxias en cúmulos y la propia dinámica interna de las galaxias apuntan la existencia de abundante materia oscura (que no emite luz) en el Universo, cuya naturaleza última desconocemos.

Los principales ingredientes del Universo en términos de su contribución a la densidad total de materia y energía, precisan tener propiedades extraordinarias que no acabamos de entender. La materia y la energía oscura dominan abrumadoramente sobre la materia ordinaria y la radiación

que apenas suman el 5% de toda la energía que hay en el Universo. Cada día conocemos más acerca de las propiedades que deben satisfacer las formas dominantes de materia y energía pero su naturaleza permanece inasequible. Si estos componentes del Universo, esenciales en el actual modelo del *Big Bang*, no pudiesen llegar a ser identificados y caracterizados, posiblemente habría que abandonar o modificar algunos de los principios y leyes sobre los que se sustenta nuestra actual teoría del origen y evolución del Universo.

La componente asociada a la energía del vacío ocasiona una aceleración en la expansión del Universo que fue inicialmente puesta de manifiesto por observaciones de supernovas tipo Ia en galaxias muy distantes. La primera base empírica a favor de la energía oscura fue obtenida por los equipos de Reiss y de Perlmutter de manera independiente en 1998. Las observaciones de supernovas del tipo Ia en galaxias muy lejanas parecen indicar que estos objetos son un 25% menos luminosos intrínsecamente que las supernovas con curvas de luz de igual característica en galaxias cercanas. Después de analizar las posibles razones para esa diferencia estos grupos de investigadores consideraron improbable que se debiese a algún efecto intrínseco a las explosiones o al medio donde tienen lugar. La menor luminosidad aparente ha sido interpretada como resultado de una expansión acelerada del Universo que habría ocasionado que estas galaxias se encuentren en realidad más lejos de lo que la ley de Hubble les asignaría.

La composición y naturaleza de la materia y energía oscura es uno de los desafíos más importantes con que se enfrenta la moderna Cosmología. Si efectivamente, la energía oscura se trata de una densidad de energía del vacío, la teoría cuántica le asignaría un valor 120 órdenes de magnitud mayor que el correspondiente a la constante cosmológica. Hay pues un grave problema por resolver que posiblemente nos está indicando el camino para reconciliar la mecánica cuántica y la relatividad general, aunque esto implique un cambio de paradigma. Se están proyectando para la próxima década dos satélites de NASA y ESA que permitirán estudiar la ecuación de estado de la energía oscura y su evolución en el tiempo. Muchos otros experimentos de astropartículas que ahora están en construcción explorarán también la naturaleza de la materia oscura y quizás incluso puedan lograr una detección directa. Tal vez, el misterio de la materia y energía oscura, uno de los más enigmáticos con que nos enfrentamos pueda ser desvelado en las próximas décadas sin necesidad de una revisión drástica de las ideas actuales, o quizás se desarrolle una nueva teoría de la gravitación. En cualquier caso, la exploración del Universo habrá conducido a una mejor comprensión de las leyes fundamentales.

Conclusiones

Asistimos a una época de extraordinarios descubrimientos astronómicos resultado de una exploración sin límites que va desde las escalas más pequeñas asociadas con las partículas elementales a las que abarcan todo el Universo. Esta exploración se lleva a cabo en todo el rango electromagnético desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. El extraordinario progreso realizado en las últimas décadas es en gran medida deudor del avance tecnológico. La tecnología aunada con el afán por descubrir y conocer ha propiciado que los astrónomos obtengan algunas de las imágenes más bellas y cautivadoras de la ciencia. Muchas de ellas ya forman parte del acervo cultural de nuestra civilización. Estas imágenes son fuente constante de inspiración científica y por ello tienen un extraordinario valor, pero además también captan la imaginación de la gente y despiertan el interés en la ciencia de las nuevas generaciones, de los futuros científicos e ingenieros que toda sociedad avanzada necesita para su desarrollo. Todavía son muchas las preguntas importantes que quedan por resolver, es nuestro deber tratar de encontrar respuestas. Seguramente nos sorprenderán.