

Una visión más amplia del Universo



La luz visible fue, durante milenios, el medio por el cual el hombre pudo acercarse al Cosmos. Actualmente, avances tecnológicos de apenas algunas décadas han ampliado insospechadamente nuestro conocimiento del Universo.

Silvia Torres Peimbert

Buscando satisfacer su curiosidad, el hombre ha tratado de entender el cosmos a partir de la observación de las estrellas, de su permanencia y sus variaciones. Lo que hace muy especial a la astronomía es que, a diferencia de otras ciencias donde se pueden realizar experimentos, tocar los cuerpos en estudio y controlar sus condiciones, en astronomía sólo es posible observar a distancia a los distintos objetos. El Universo se estudia principalmente por medio de la luz, que es radiación electromagnética, lo que significa que para entender los fenómenos celestes ha sido necesario estudiar con gran detalle la relación entre materia y luz. También se obtiene información a partir de rayos cósmicos y neutrinos, pero no nos ocuparemos de ello en este texto.

En las últimas décadas ha sido cada vez más evidente la necesidad de contar con mejores y

más completas observaciones de los objetos celestes. Esta necesidad ha estimulado que se amplíen las observaciones para incluir información en diferentes longitudes de onda, además de las observaciones ópticas que han estado disponibles desde principios del siglo XVII. Poco a poco se han incorporado a nuestro acervo datos provenientes de radiotelescopios, y telescopios infrarrojos, así como de telescopios a bordo de satélites artificiales que permiten observar el cielo en longitudes de onda como la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

En 1860 el físico escocés James Clerk Maxwell describió todas las propiedades de la electricidad y el magnetismo, demostrando que los efectos eléctricos y magnéticos viajan en el espacio en forma de ondas. Sus cálculos predijeron que estas ondas viajan con velocidad de 3 mil millones de metros por segundo. La sugerencia de Maxwell de que estas ondas existen y se observan como luz, pronto fue confirmada por una variedad de experimentos. Debido a las propiedades magnéticas y eléctricas de la

luz, ésta es también radiación electromagnética, y los colores de que está compuesta la luz blanca se pueden describir como las diferentes longitudes de onda de la radiación correspondiente (donde longitud de onda es la distancia entre dos crestas sucesivas de la onda).

Los tipos de radiación electromagnética dependen de su longitud de onda, y ésta se puede dividir en diferentes regiones: radio, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. La longitud de onda de la radiación va desde dimensiones mucho más pequeñas que las de la luz visible (mil millones de veces más corta) hasta las de mayor longitud (un millón de millones de veces más larga). Por otro lado, a cada longitud de onda le corresponde una energía, la cual es inversamente proporcional a la longitud de onda; así las ondas de radio tienen mucho menos energía que las de los rayos X y gamma. La luz visible es apenas una pequeñísima porción de este amplísimo panorama, pues cubre longitudes de onda que van de 300 a 700 nanómetros solamente (un nanómetro es la milmillonésima

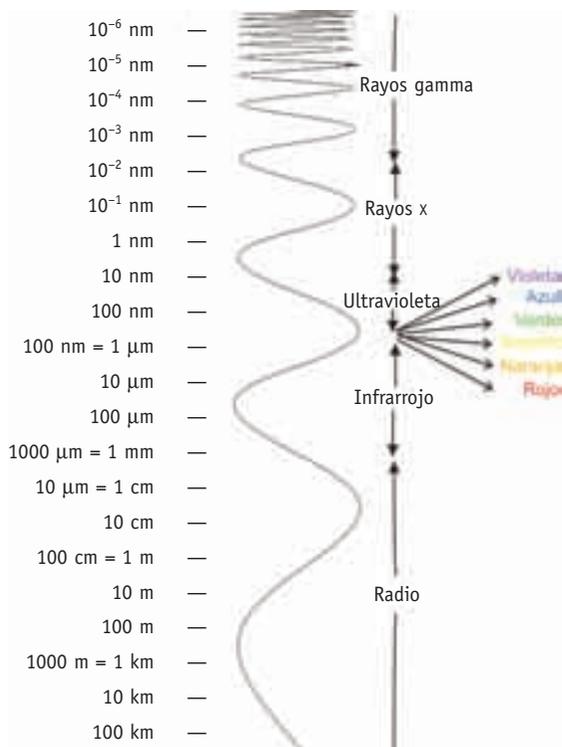


Figura 1. Al conjunto completo de los diferentes tipos de radiación electromagnética se le puede llamar espectro electromagnético. Se extiende desde las longitudes de onda más largas (ondas de radio), a las longitudes más cortas (rayos gamma). La luz visible constituye apenas una pequeña parte de todo el espectro electromagnético.

parte de un metro, o sea la millonésima parte de un milímetro).

¿POR QUÉ REQUIERE LA ASTRONOMÍA OBSERVAR EN OTRAS LONGITUDES DE ONDA?

La búsqueda de nuevas observaciones en otras longitudes de onda es un fenómeno de finales del siglo XX, y ha revolucionado completamente nuestro concepto del Universo. Simultáneamente a los enormes avances logrados en los estudios en luz visible de los objetos del Universo, se ha desarrollado la astronomía en multifrecuencias, que comprende estudios de la radiación en todas las longitudes de onda emitida por los objetos celestes. Se desea conocer la información que se puede obtener en las distintas regiones del espectro electromagnético: las ondas de radio (que incluyen a las microondas), la luz infrarroja, la luz óptica, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Para hacer una analogía con el sonido, la astronomía óptica representa un esfuerzo para entender la sinfonía del Universo con oídos

Desde la superficie terrestre
se pueden observar
la luz visible,
algunas regiones
de la radiación infrarroja
y las ondas milimétricas
y de radio

que pueden captar solamente el do central y las dos notas adyacentes.

El crecimiento rápido de la astronomía en multifrecuencias se debe al descubrimiento accidental, en los años treinta del siglo XX, de radioondas que provenían de más allá de la Tierra, lo que mostró que hay radiación no óptica que viene del espacio. Pero existen dificultades muy serias, que han sido apenas superadas en las décadas recientes. Primero, hay problemas tecnológicos, por lo que ha sido necesario construir nuevos tipos de telescopios que produzcan imágenes para los diversos tipos de radiación. También hubo que desarrollar nuevos detectores, para registrar las imágenes y mostrarlas de manera que se puedan entender. Un obstáculo adicional es la atmósfera terrestre, la cual absorbe la mayor parte de la radiación que proviene del espacio antes de que logre llegar a la superficie, por lo que varios de los detectores para las distintas longitudes de onda deben estar por encima de la atmósfera. Estas ramas de la astronomía se pu-

dieron iniciar hasta que los telescopios pudieron ser enviados a bordo de cohetes o de satélites en la “era espacial”.

Aunque estos diversos tipos de radiación electromagnética comparten muchas propiedades básicas (por ejemplo, todas ellas viajan a la misma velocidad —la velocidad de la luz—), cada una interactúa en forma distinta con la materia. Por ejemplo, nuestro cuerpo es transparente a los rayos X, pero no lo es a la luz visible; nuestros ojos responden a la luz visible, pero no a los rayos gamma, y nuestros radios detectan ondas de radio, pero no luz ultravioleta. Desde la superficie terrestre se pueden observar la luz visible, algunas regiones de la radiación infrarroja y las ondas milimétricas y de radio. Por lo tanto, los astrónomos requieren diferentes tipos de telescopios para detectar la radiación en estas longitudes de onda variadas. Por ejemplo, un radiotelescopio que detecta las ondas de radio del espacio es muy diferente a un telescopio de rayos X, o a un telescopio óptico ordinario. En cambio, algunas regiones del infrarrojo, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma requieren de telescopios fuera de la atmósfera terrestre, ya que ésta impide su paso. Esta propiedad de la atmósfera, tan benéfica para la vida humana, imposibilita las observaciones desde la superficie terrestre y hace que se requiera instrumentación fuera de la atmósfera para poder recibir información en esas longitudes de onda.

Cada una de las distintas regiones del espectro electromagnético da información sobre distintos procesos en la naturaleza. Así, aunque todos los cuerpos emiten en todas las longitudes de onda, en general no en todos los casos resulta de interés observar las distintas regiones, y en otros casos, no es posible hacerlo.

Se puede hacer una breve reseña de los fenómenos más importantes que se pueden observar en las distintas regiones del espectro electromagnético. Se hará en orden decreciente de longitud de onda, y no necesariamente en orden de importancia.

LAS DISTINTAS REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SU APLICACIÓN ASTRONÓMICA

a) Radio

Veintitrés años después de las investigaciones de James Clerk Maxwell, y de las predicciones de que se podría emitir y recibir energía en forma de ondas electromagnéticas empleando antenas, Heinrich Hertz logró producir estas ondas, que hoy cono-

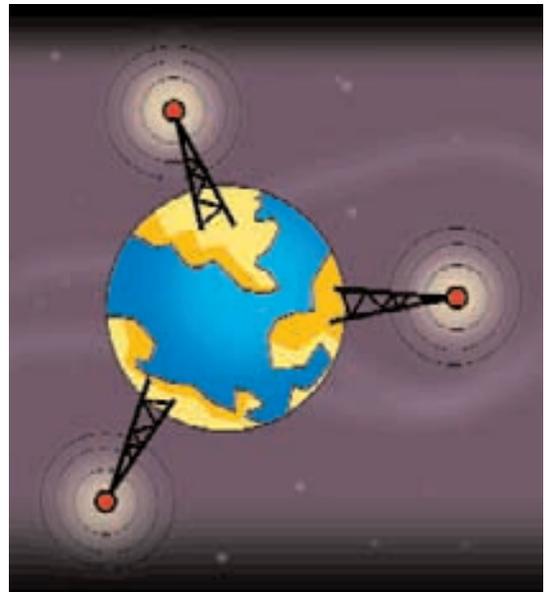
ceamos como ondas de radio. Los experimentos realizados a finales del siglo pasado demostraron que las ondas de radio son efectivamente una manifestación del mismo tipo de fenómeno que es la luz. Cien años después de su descubrimiento, las ondas de radio forman parte esencial de nuestra sociedad.

Al igual que en la luz podemos distinguir los colores, existen distintos tipos de ondas de radio que se caracterizan por su frecuencia, medida en hertz (oscilaciones o ciclos por segundo). La banda de amplitud modulada (AM) o de onda media, cubre frecuencias de entre 540 y 1600 kilohertz (un kilohertz son mil hertz); la banda de frecuencia modulada (FM) abarca entre los 88 y los 106 megahertz (millones de hertz). La televisión es transmitida de hecho por ondas de radio de muy alta frecuencia, por encima de los 300 megahertz. Los teléfonos celulares utilizan frecuencias todavía mayores. Nuestro entorno está lleno de ondas electromagnéticas de muy variadas frecuencias. A la región desde un milímetro hasta 30 metros se le llama región de radio. Las ondas de radio desde dos centímetros hasta 30 metros pueden penetrar la ionósfera y la atmósfera inferior.

La primera evidencia de radiación invisible del espacio exterior vino del trabajo de un joven ingeniero, Karl Jansky, de los laboratorios de la compañía telefónica Bell. Usando largas antenas, Jansky investigaba la fuente de la estática de radio que afecta la comunicación radiotelefónica de onda corta. En 1932 se dio cuenta de que un cierto tipo de ruido es mayor cuando la constelación de Sagitario está en el cielo. El centro de nuestra galaxia está localizado en la dirección de Sagitario, y así pudo Jansky concluir que estaba detectando ondas de radio provenientes de fuera del Sistema Solar. De 1936 a 1944, Grote Reber observó la emisión de radio de la Vía Láctea y logró hacer un mapa en radio de la misma.

Una propiedad de las ondas de radio es que no son absorbidas por el polvo interestelar, lo que permite observar en muchas direcciones a mayores distancias de las que es posible acceder mediante luz visible. En ondas de radio se puede observar el gas de hidrógeno neutro y también el gas de hidrógeno ionizado, y se pueden observar muchos compuestos moleculares en el medio interestelar. Es decir, se puede determinar la presencia de gas en estado ionizado, neutro y molecular (átomos con carga eléctrica, átomos sin carga y átomos unidos formando moléculas).

Así se ha determinado la estructura de las nubes de gas, y se han medido las velocidades de muchos de los objetos de nuestra galaxia y de otras galaxias. Vale la pena mencionar que gran



Nuestro entorno está lleno de ondas electromagnéticas de muy variadas frecuencias

parte de la energía del Universo está presente en la porción submilimétrica y milimétrica del espectro. Esta energía proviene del polvo frío mezclado con gas que hay en el espacio interestelar. También proviene de galaxias distantes que se formaron hace muchos miles de millones de años, en el umbral del universo conocido.

b) Radiación infrarroja

Se conoce desde 1800, cuando William Herschel, en su estudio del espectro de la luz solar, colocó termómetros en distintas posiciones y encontró que se recibía calor en la posición más allá del color rojo, por lo que se le llamó “infrarrojo”. Se le llama radiación infrarroja a aquella cuya longitud de onda va desde 700 nanómetros hasta 350 milímetros. La región del infrarrojo cercano se puede observar desde la superficie terrestre, aunque requiere de detectores distintos a los de luz visible; estos detectores infrarrojos se desarrollaron en la década de 1960.

Algunas longitudes de onda infrarrojas se pueden observar desde los telescopios en tierra, mientras que otras son bloqueadas por el vapor de agua de la atmósfera, por lo que solamente son observables desde arriba de la atmósfera. Para ello se requieren aviones cohete o satélites. Uno de los primeros telescopios in-

frarrojos en el espacio fue el satélite IRAS (por sus siglas en inglés: *Infrared Astronomical Satellite*), cuya misión principal fue hacer un mapa del universo observable en el infrarrojo, con el cual se dispuso de un caudal de nuevos datos sobre la presencia de nubes de polvo a diferentes temperaturas, estrellas en formación y galaxias extraordinariamente brillantes.

En la medida que la luz infrarroja (y la radiación de menor energía) no es absorbida por el polvo interestelar, las observaciones en esta región del espectro electromagnético permiten observar objetos más alejados que los que se pueden distinguir en luz visible, por estar ocultos detrás de nubes espesas. En la región del infrarrojo cercano, el cielo presenta aspecto similar al que presenta en la región óptica, aunque se hacen más notorias las estrellas más frías y se logra penetrar más allá de nubes densas.

Los cuerpos a distintas temperaturas emiten radiación de distintas energías. Por ello, con radiación infrarroja es posible observar las pequeñas partículas de “polvo” interestelar que tiene distintas temperaturas. Así, la emisión infrarroja frecuentemente indica la presencia de nubes de polvo a distintas temperaturas. En distintas circunstancias las regiones de gas ionizado también están acompañadas de nubes de polvo caliente que emiten luz infrarroja. Es muy variada la información que se ha obtenido mediante luz infrarroja. Entre otros objetos de interés están las estrellas jóvenes que se encuentran inmersas en nubes de polvo muy densas, las galaxias activas y el polvo intergaláctico frío que está hacia el centro de algunos cúmulos de galaxias. Con el telescopio espacial COBE (por sus siglas en inglés: *Cosmic Background Explorer*), se detectó por primera vez la “radiación fósil” que proviene de la gran explosión del Universo (*big bang*), y que ahora se observa en todas direcciones como una radiación de 2.73 kelvins (o grados kelvin, usados para indicar temperaturas absolutas; son aproximadamente iguales a la temperatura en grados centígrados menos 273).

Con el telescopio espacial
COBE, se detectó
por primera vez
la “radiación fósil”

c) Luz visible

El intervalo de luz visible ha estado disponible para la observación desde tiempos inmemoriales, y desde 1609 se han realizado observaciones con telescopios, lo que ha permitido tener más detalle y ver objetos más débiles que los que se alcanzan a simple vista. Además del ojo desnudo, los detectores que se han usado desde mediados del siglo XVIII son placas fotográficas, lo que permitió avances considerables en las medidas de posición y de brillo. Actualmente se dispone de detectores

electrónicos que permiten registrar objetos muy débiles con altísima precisión.

Están en operación cada vez más telescopios capaces de formar imágenes con mayor detalle de lo que antes se había logrado. En particular se han obtenido imágenes con telescopios fuera de la atmósfera (como el Telescopio Espacial Hubble). Aunque no es un telescopio de gran tamaño, en la región visible este telescopio ofrece una gran ventaja, ya que las imágenes obtenidas con los telescopios instalados en tierra firme se ven afectadas por la turbulencia atmosférica, que impide que se pueda alcanzar la nitidez que la calidad de las lentes y espejos permiten. La turbulencia de nuestra atmósfera hace aparecer los puntos de luz un poco borrosos, y por lo tanto no logramos ver con el detalle que se desea a los objetos astronómicos. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado técnicas muy sofisticadas para compensar las imperfecciones que introduce la turbulencia atmosférica. De esta manera, también desde tierra, en algunos telescopios se logran imágenes con gran detalle.

Esta región del espectro nos ha permitido conocer el cielo y los cuerpos que existen en él. Se pueden observar las estrellas y los grupos de éstas, los gases calientes y las galaxias.

d) Luz ultravioleta

Aunque el ojo humano no percibe radiación con longitud de onda menor que 390 nanómetros, el intervalo hasta 310 nanómetros se puede observar con telescopios convencionales y detectores sensibles a estas longitudes de onda (por lo que a esta región del espectro se le llama ultravioleta cercano). Se conoce como región ultravioleta lejana a las longitudes de onda más cortas que 310 nanómetros (que es el límite que el ozono de la atmósfera superior permite penetrar hasta la superficie terrestre), pero mayores de 100 nanómetros. Y a la región de longitud de onda menor que 100 nanómetros se le llama ultravioleta extremo. Las observaciones en el ultravioleta lejano y el ultravioleta extremo han requerido nuevas tecnologías, pues se requiere que los telescopios y detectores estén fuera de la atmósfera. Esto fue posible desde hace 40 años, con el advenimiento de los cohetes espaciales y satélites artificiales. Así, ahora conocemos el cielo en estas regiones del espectro electromagnético. Principalmente se pueden apreciar las estrellas más calientes, que tienen temperaturas de 20 mil a 100 mil kelvins en su superficie (la superficie del Sol se encuentra a 6 mil kelvins).

Las imágenes que se obtienen presentan características muy diferentes de las que se ven con telescopios ópticos. Al selec-

Se pueden apreciar
las estrellas más calientes,
que tienen temperaturas
de 20 mil a 100 mil kelvins
en su superficie

cionar las estrellas más calientes, se registran predominantemente los grupos de estrellas jóvenes en el cielo. Así, la imagen que se recibe de las galaxias espirales hace muy evidentes las regiones de formación estelar, y por lo tanto resultan más notorios los brazos espirales. Adicionalmente, con estudios espectroscópicos se pueden estudiar distintos estados iónicos de los elementos presentes en gases tenues, que emiten radiación en longitudes de onda precisas y que no son accesibles al estudio en otras regiones del espectro. En particular está en estudio la posibilidad de investigar el deuterio que proviene de la gran explosión y la evolución química de las galaxias (elementos como carbono, nitrógeno ionizado, oxígeno ionizado, etcétera). Actualmente, además del Telescopio Espacial Hubble, hay varios satélites en órbita que permiten estudiar en detalle diversos objetos celestes.

En el ultravioleta extremo, la astronomía enfrenta un problema prácticamente insuperable, por encima de dificultades tecnológicas. El hidrógeno, el elemento más abundante en el cosmos, absorbe con gran eficiencia la luz con longitud de onda menor de 91.2 nanómetros, convirtiendo al medio interestelar en una densa cortina. Sin embargo, algunas misiones espaciales han mostrado que en algunas direcciones es posible observar a mayores distancias; se logra así observar luz ultravioleta incluso

afuera de la Vía Láctea. A pesar de estos esfuerzos, sólo han sido detectados unos cuantos objetos extragalácticos, y sólo hemos podido dar unos pocos vistazos por la difícil ventana del ultravioleta extremo, que guarda celosamente muchos secretos.

e) Rayos x

En noviembre de 1895, William Roentgen, al estudiar la producción de electrones en haces conocidos como rayos catódicos, se dio cuenta de un misterioso tipo de radiación no observada anteriormente. La llamó “rayos X”, y este nombre ha perdurado. Max von Laue demostró en 1912 que estos rayos son, al igual que la luz y las ondas de radio, un tipo de radiación electromagnética.

A la región del espectro de 0.1 a 10 nanómetros de longitud de onda se le llama de rayos X. Las primeras observaciones astronómicas de rayos X las hicieron Riccardo Giacconi, Herbert Gursky, Frank Paolini, y Bruno Rossi en 1962. Enviaron un cohete hasta 225 kilómetros de altura, lo que permitiría que por unos minutos estuviera por encima de la atmósfera terrestre, con la intención de detectar rayos X provenientes de la Luna. Lo que detectaron fue una fuente muy intensa de rayos X en la constelación del Escorpión, en una posición distinta a la de la Luna. El que se encontrara esta fuente fuera del Sistema Solar

Los hoyos negros son objetos predichos por la teoría general de la relatividad

significa que es muy luminosa en rayos X, posiblemente cien millones de veces más intensa en los rayos X que nuestro Sol. Se le denominó Scorpius X-1. En 1970 se puso en órbita un satélite llamado UHURU, y con este instrumento se produjo un catálogo de más de 300 fuentes cósmicas de rayos X.

Los procesos que producen rayos X son, por naturaleza, de mucha más energía que los que producen la luz visible. Así, es de gran interés identificar las fuentes y los fenómenos que ocurren ahí. Dos tipos de fuentes se encuentran en objetos en nuestra galaxia (y en otras galaxias): son los sistemas de estrellas binarias y los restos de supernovas. También emiten rayos X las llamadas galaxias activas y los cúmulos de galaxias. Si bien estos cuatro tipos de objetos ya se conocían con anterioridad, la presencia de emisión de rayos X reveló nuevas facetas. En todos estos objetos la emisión de rayos X proviene de gas que ha sido calentado a temperaturas enormes, de decenas de millones de grados o más.

Los hoyos negros son objetos predichos por la teoría general de la relatividad, que tienen un campo gravitacional tan intenso que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de ellos. De hecho, hace 200 años Laplace ya concebía la posible existencia de este tipo de objetos. La dificultad intrínseca de observar un hoyo negro radica justamente en que es negro, es decir, la radiación no puede escapar de él. La única forma que tenemos para detectarlos es observar el gas que está cayendo dentro de un hoyo negro. De hecho, el mejor lugar para observar este fenómeno es en un sistema binario, en el que la estrella compañera le cede gas al hoyo negro, el cual literalmente lo devora. Sabemos que, al caer, este gas se calienta a temperaturas de millones de grados, emitiendo rayos X. Los astrónomos han observado rayos X provenientes de muchos sistemas de estrellas dobles, y tienen identificados a cerca de una docena como probables hoyos negros. El más famoso de estos objetos es Cygnus X-1, en la constelación del Cisne.

Vale la pena mencionar que la astronomía de rayos X va mucho más allá de la búsqueda de hoyos negros. Hoy en día sofisticados instrumentos observan rayos X provenientes de ráfagas solares, estrellas, pulsares, cuasares y cúmulos de galaxias. Actualmente se conocen más de 100 mil fuentes de rayos X. La astronomía contemporánea, al igual que otras áreas de la sociedad, difícilmente puede imaginarse sin el estudio de los rayos X.

f) Rayos gamma

A toda la región del espectro de longitud de onda menor que 0.01 nanómetros se le llama región de rayos gamma. Los rayos

gamma corresponden a energías mayores que 0.1 megaelectrón-volt (donde un megaelectrón-volt es la energía que adquiere un electrón cuando se acelera por una diferencia de potencial eléctrico de un millón de volts). Para estas altísimas energías, las técnicas de detección son muy diferentes a las anteriores y son más semejantes a las que usan los físicos de partículas.

El primer evento de rayos gamma en el espacio fue observado en 1967 por satélites militares estadounidenses que estaban observando posibles explosiones nucleares en tierra. No fue reportado sino hasta 1973. Lo que se observó fue un súbito aumento de la cantidad de rayos gamma captados en los detectores de varios satélites muy distantes entre sí. Los datos indicaban que la fuente de la emisión no estaba en la vecindad de la Tierra, sino en el espacio exterior. El artículo en el que se reporta el descubrimiento de los estallidos de rayos gamma no fue dado a conocer sino hasta 1973 por Ray Klebesabel y sus colegas del *Los Alamos National Laboratory*, quienes reportaron 16 eventos de julio de 1969 a julio de 1972. No había duda que los eventos que reportaron eran reales y no había explicación razonable para ellos. A la fecha, las explicaciones no son satisfactorias para estos eventos, que se denominan brotes de rayos gamma.

Estos estallidos ocurren aproximadamente uno por día, y su intensidad es mayor que la de todas las otras fuentes de rayos gamma juntas. La fuente desaparece y no se puede predecir el siguiente evento. Durante las décadas de los setenta y ochenta se empezaron a caracterizar estos estallidos: su duración es muy corta, típicamente entre uno y diez segundos; no es posible saber dónde va a ocurrir el próximo estallido y, hasta donde se sabe, no han ocurrido repeticiones en un mismo lugar. Por otro lado, la cantidad de energía que se detecta de estos estallidos es tal que desde el principio quedó claro que se trata de un fenómeno extremadamente violento.

Así, mientras que entre 1973 y 1991 se habían detectado menos de cien estallidos, posteriormente el satélite BATSE logró observar más de dos mil. A partir de sus posiciones en la bóveda celeste, y de sus intensidades, ha quedado prácticamente establecido que los estallidos se dan fuera de nuestra galaxia. De hecho es muy probable que sean fenómenos que suceden a grandes distancias, probablemente de hasta miles de millones de años luz. A esa distancia, los estallidos de rayos gamma resultan ser los fenómenos más energéticos que se conocen en el Universo. En tan sólo un segundo, emiten tanta energía como el Sol en diez mil millones de años. Son tanto o más poderosos

Los estallidos de rayos gamma resultan ser los fenómenos más energéticos que se conocen en el Universo

que una supernova, la violentísima explosión que da fin a una estrella de gran masa. Aún cuando no sabemos de dónde provienen, el simple hecho de emitir tal cantidad de energía en forma de rayos gamma, y en un intervalo de tiempo tan corto, impone muchas restricciones acerca de su origen. Una de las explicaciones propone que los estallidos ocurren cuando dos estrellas de neutrones que se hallan en órbita una alrededor de la otra se van acercando lentamente hasta chocar.

Una manera de conocer los objetos responsables de las emisiones en rayos gamma es encontrar la “contraparte” de dicha emisión. Esta contraparte es un objeto que se pueda identificar en otras longitudes de onda y que tenga una relación física con la emisión.

Apenas en 1997 se descubrieron las dos primeras contrapartes de estallidos de rayos gamma. El resultado de estas observaciones mostró que los brotes se originan a miles de millones de años luz de distancia de la Tierra. Estos descubrimientos fueron el resultado de nuevos instrumentos y de la cooperación entre la astronomía de rayos gamma, la de rayos X y la astronomía óptica. El satélite *Gamma-Ray Observatory* (observatorio de rayos gamma) detectó en promedio un brote por día. Desgraciadamente no tenía la capacidad de identificar la posición del objeto con precisión, lo que impidió que las búsquedas de contrapartes rindieran frutos. El lanzamiento del satélite de rayos X BeppoSAX, en 1996, cambió

la situación, pues tiene capacidad de dar posiciones más precisas en el cielo. Estas posiciones se comunican a otros astrónomos que tienen oportunidad de observar en telescopios ópticos, y son ellos los que han podido descubrir las contrapartes en luz visible. Esto ha permitido determinar sin ambigüedades que los estallidos en cuestión se originan fuera de nuestra galaxia. La primera ocasión que fue posible identificar estos brotes misteriosos fue el 28 de febrero de 1997. Así se pudo determinar que el objeto emisor está asociado con una imagen difusa, y que el brillo de la fuente de rayos gamma fue muy intenso durante un tiempo muy breve. Se interpreta que se trata de un evento catastrófico dentro de una galaxia. Posteriormente se ha medido la distancia a estas galaxias y se sabe que están a distancias enormes.

A la fecha se han identificado las contrapartes de 30 objetos, y se han medido las distancias a 25 de ellos. Entre las teorías que se han planteado para explicar los eventos de rayos gamma están el colapso de estrellas masivas, y las colisiones entre estrellas de neutrones. Una galaxia como la nuestra produciría un evento de este tipo cada millón de años, originando una explosión que por unos cuantos segundos sería más intensa que la luz de toda la galaxia.



Figura 2. Contraparte óptica de un estallido de rayos gamma. El punto azul marcado es la fuente de luz que corresponde al estallido de rayos gamma GRB011121, que fue detectado por satélites de rayos gamma y de rayos x el 21 de noviembre de 2001. La fotografía en luz visible fue captada un día y medio después del evento, para desaparecer en muy poco tiempo. (Observatorio Austral Europeo, ESO).

REGIONES DE HIDRÓGENO IONIZADO

A partir de imágenes en distintas longitudes de onda se ha podido estudiar la estructura completa de las nubes de gas en distintos estados de ionización, así como las estrellas que ahí se encuentran. Este desarrollo ha sido muy importante en el caso de los estudios de formación estelar, pues por primera vez se han podido ver estrellas que se encuentran en fases de formación estelar tan reciente que todavía están parcialmente ocultas por un disco que las rodea, a partir del cual se formarán sistemas planetarios, o que más tarde será disipado por la luz de las mismas estrellas.

La nebulosa de Orión, que se encuentra en la dirección de la constelación de su mismo nombre, está a mil 500 años luz de distancia. Sus estrellas se han formado hace apenas unos millones de años, a partir de la contracción de nubes de gas interestelar. Las nubes de más masa han formado las estrellas más brillantes hacia el centro, y éstas están tan calientes que iluminan el gas que quedó cerca de ellas después de que se formaron. En ese conjunto de estrellas hay muchas estrellas más pequeñas

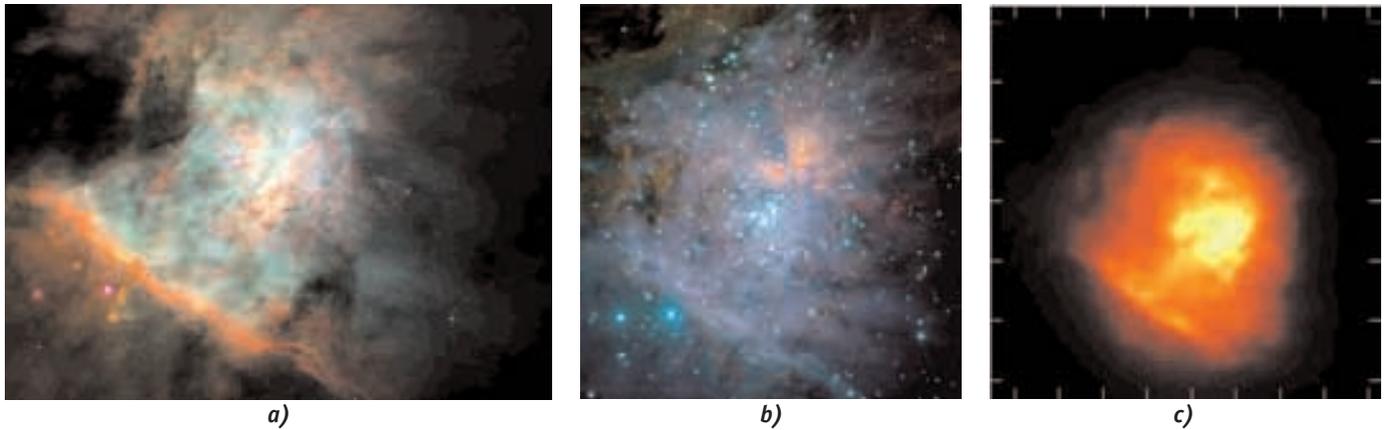


Figura 3. Fotografías en distintos intervalos de longitud de onda de la parte central de la Nebulosa de Orión. **a)** Fotografía en luz visible compuesta por la luz del gas de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno (Telescopio Espacial Hubble/NASA). **b)** Fotografía en infrarrojo cercano en luz de 1.2 micras (azul) 1.6 micras (verde) y 2.2 micras (rojo) (ESO). **c)** Imagen de radio en longitud de onda de 2.6 cm. Los colores son falsos, el amarillo representa más intensidad; se puede apreciar el hidrógeno ionizado sin absorciones (Observatorio Radioastronómico Nacional de los EUA, NRAO).

que todavía se encuentran en proceso de formación, bajo la acción de su propia gravedad. Se ha logrado tener un conjunto de imágenes muy completas en distintas longitudes de onda, que ponen de manifiesto su gran complejidad. Ahora se sabe que es una gran nube de gas frío con muchas irregularidades, y que la nube de gas ionizada está en la parte de enfrente de esta nube de gas. También, dentro de esta región ionizada, se ha visto que existen condensaciones o nubecillas. Se han obtenido imágenes detalladas en luz visible de distintos elementos de algunas zonas de interés en la nebulosa de Orión, lo que permite conocer mejor la distribución del gas y del estado en que se encuentra (molecular, neutro o ionizado), del polvo y de su temperatura, y de las estrellas en proceso de formación. Los resultados han sido muy significativos, ya que en la nebulosa de Orión se han descubierto las estrellas envueltas en su capullo, lo que confirma las ideas que se han tenido acerca de la formación de las estrellas y los sistemas planetarios.

REMANENTES DE SUPERNOVA

Las remanentes de supernova son los residuos que subsisten a explosiones de estrellas de más de ocho masas solares, que arrojan casi la totalidad de su material al espacio interestelar. La explosión en sí misma es muy breve, pues se puede percibir solamente durante unos cuantos meses, mientras que los gases que arroja tienen un efecto sobre el medio que los rodea y persisten brillando durante decenas de miles de años.

En el año 1054 de nuestra era los astrónomos chinos reportaron una “estrella visitante”, que apareció súbitamente y permaneció visible casi dos años, durante los cuales su brillo, que originalmente fue claramente superior al de Venus, fue disminuyendo gradualmente hasta dejar de ser perceptible. Esta estrella nueva fue también observada en Japón y en tierras

En la nebulosa de Orión
se han descubierto
las estrellas envueltas
en su capullo

La nebulosa
del Cangrejo se encuentra
a 6 mil años luz
de distancia
en la constelación
de Tauro

musulmanas. Los registros chinos permiten ubicar la aparición en la constelación de Tauro. Se ha identificado este suceso con la llamada nebulosa del Cangrejo. En 1939 John Duncan, comparando placas fotográficas tomadas en 1909, 1921 y 1938, encontró que los gases de esta nebulosa están en expansión rápida, y determinó que podrían haberse originado en un solo punto, hacía apenas unos ochocientos años. Al mismo tiempo, Nicholas Mayall, empleando técnicas de espectroscopía, encontró que la velocidad de expansión de los gases es superior a los mil kilómetros por segundo, por lo que desde 1942 se identificó sin ambigüedades que la nebulosa del Cangrejo corresponde a la “estrella huésped” observada en 1054. La nebulosa del Cangrejo se encuentra a 6 mil años luz de distancia en la constelación de Tauro.

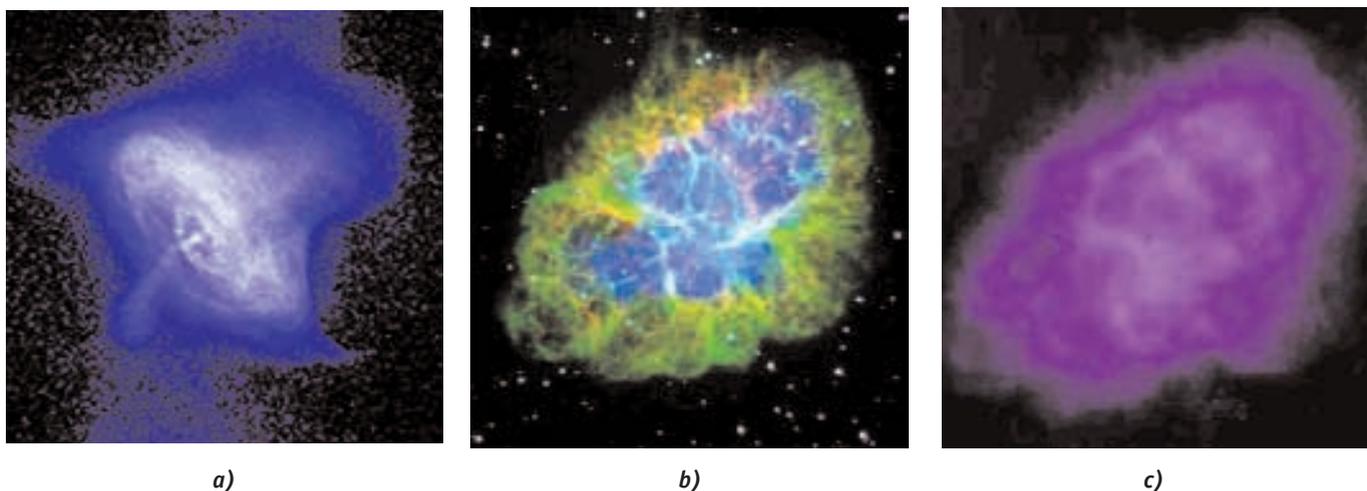


Figura 4. Fotografías en distintos intervalos de longitud de onda de la nebulosa del Cangrejo. **a)** Fotografía en rayos x (Centro de rayos x Chandra/NASA) **b)** Fotografía en luz visible (ESO). **c)** Imagen en radio (NRAO).

En este objeto se pone de manifiesto la riqueza y complejidad de los procesos que ocurren. Este objeto ha sido observado en todas las longitudes de onda, desde las ondas de radio a los rayos gamma, virtualmente desde todos los instrumentos astronómicos disponibles. Ya que además de ser visible en la región óptica, es una intensa fuente de ondas de radio. Además, en 1968 se encontró que la nebulosa contiene un pulsar, una estrella de tan sólo veinte kilómetros de diámetro que gira sobre su eje treinta veces por segundo. Poco después se estableció que tanto la nebulosa como el pulsar son intensas fuentes de rayos X y rayos gamma.

En la explosión, la supernova produjo elementos químicos pesados como níquel, cobalto, aluminio, cobre, oro y plata. Todo ello salió arrojado, junto con la materia que alguna vez formó las capas externas de la estrella, a velocidades tal vez de hasta unos diez mil kilómetros por segundo. Es este gas lo que

formó finalmente la nebulosa que observamos hoy en día. En las semanas siguientes a la explosión, la supernova emitió un brillo millones de veces más intenso que el que había emitido durante su vida como estrella normal. Al expandirse, el gas se enfría y brilla cada vez menos. Sin embargo, la combinación de rotación rápida y campo magnético intenso es una característica de los pulsares, que los convierte en eficientes aceleradores de partículas. Al poco tiempo, el pulsar recién formado empezó a proveer a la nebulosa de partículas con muy alta energía, las cuales son las responsables del brillo actual de la nebulosa. En pocas palabras, el pulsar es la fuente de energía que mantiene brillando a la nebulosa del Cangrejo. Dentro de unos diez o veinte mil años, el pulsar girará mucho más lentamente y ya no podrá proveer suficientes electrones energéticos a la nebulosa para mantener su brillo. Por otro lado, la nebulosa se habrá expandido al punto de ser muy tenue y disolverse en el medio interestelar.

Mediante luz visible se puede apreciar que la nebulosa del Cangrejo emite luz por procesos sincrotrónicos; esta emisión es generada por partículas (electrones) moviéndose a velocidades muy cercanas a la de la luz dentro de la nebulosa, en presencia de un campo magnético muy intenso. También se observa la presencia de gas muy caliente que se desplaza a grandes velocidades, y se puede determinar la composición del gas a partir de las líneas espectrales de los distintos elementos. También brilla en radio por radiación sincrotrónica. La imagen de rayos X muestra los restos espectaculares de la explosión estelar, y aparece un conjunto de anillos brillantes alrededor del centro de la nebulosa. Se trata de ondas de partículas de altas energías que parecen haber sido lanzadas hacia fuera a la distancia de un año luz de la estrella central, y se puede apreciar la presencia de chorros de partículas que salen de la estrella de neutrones en la dirección perpendicular al anillo. Estas imágenes nos ayudan a entender cómo la estrella de neutrones alimenta de energía a la nebulosa, la cual sigue brillando intensamente casi mil años después de la explosión.

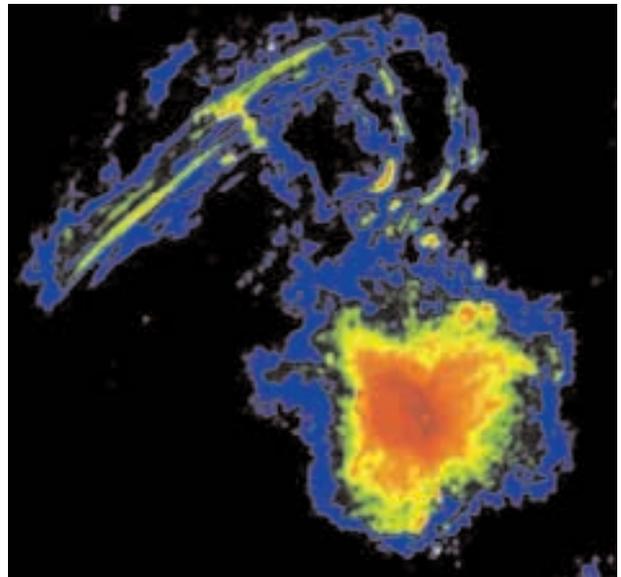


Figura 5. Imagen en radio del centro galáctico (en longitudes de onda de 20 cm) se puede observar que el gas ionizado presenta estructuras filamentosas. Estos filamentos son perpendiculares al plano galáctico y son paralelos entre sí (NRAO).

ESTUDIOS DEL CENTRO GALÁCTICO

Llevó mucho esfuerzo determinar la forma de la galaxia a la que pertenece el Sol. Ahora se sabe que es un conjunto de estrellas principalmente localizadas en un disco. Estas estrellas giran alrededor del centro de masa del sistema: el centro de la galaxia. Además hay estrellas que se encuentran fuera del plano con

¡Un hoyo negro
en el centro de la galaxia,
con una masa
tres millones de veces
mayor que la del Sol!

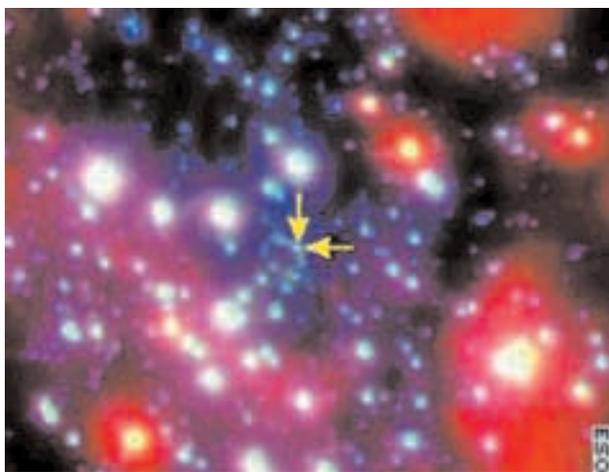


Figura 6. Centro galáctico. Fotografía en luz infrarroja del centro galáctico. Esta imagen es de un campo más pequeño que la presentada en la Figura 5 y muestra un conjunto de estrellas gigantes. La flecha indica la ubicación del objeto central (eso).

distintos tipos de movimientos, pero todas ellas bajo la acción de la gravedad de todas las demás. En el plano del disco galáctico se encuentra concentrada gran cantidad de gas (acompañado de partículas sólidas o polvo, el cual también está en rotación alrededor del centro). Es de especial interés observar el centro de la galaxia. Sin embargo, resulta imposible hacerlo en luz visible, ya que en esa dirección hay nubes que lo ocultan. Por eso fue necesario contar con observaciones de radio para entender mejor su estructura.

En la región infrarroja se han observado las estrellas gigantes rojas que se encuentran en las partes más centrales de la galaxia. Además de observaciones infrarrojas, se requieren técnicas especiales llamadas de óptica adaptativa para obtener imágenes más nítidas. Así se han seguido las posiciones de las estrellas durante una década, para determinar los movimientos de las estrellas, y en 2002 se pudo determinar que una de ellas recorre una órbita que sólo se puede entender si se considera que está dando vueltas alrededor de un objeto de gran masa, que no se alcanza a ver. ¡Un hoyo negro en el centro de la galaxia, con una masa tres millones de veces mayor que la del Sol!

ESTUDIOS DE GALAXIAS

En cualquiera de las direcciones que no estén oscurecidas por nubes se encuentran innumerables galaxias. Todas ellas son estructuras complejas, algunas de gran belleza. Se les ha clasificado por su forma: elípticas, espirales e irregulares. Resultan particularmente interesantes las galaxias espirales, que desde nuestra perspectiva aparecen con distintas inclinaciones, lo que permite conocer más detalles de su estructura. Debido a las enormes distancias que nos separan, solamente en las más próximas (la más cercana, la nebulosa de Andrómeda se encuentra a 2.2 millones de años luz de distancia) se pueden distinguir y estudiar estrellas individuales.

El ejemplo que aquí se presenta es la galaxia espiral M101, que se encuentra en la constelación de la Osa Mayor. Ahí se puede apreciar cómo en luz ultravioleta son más evidentes las regiones de formación estelar en los brazos espirales, mientras que las estrellas viejas (y rojas) están distribuidas más uniformemente sobre todo el disco. También se presenta una representación en color falso de observaciones de radio, que permiten determinar la velocidad en la dirección del observador en los brazos espirales.

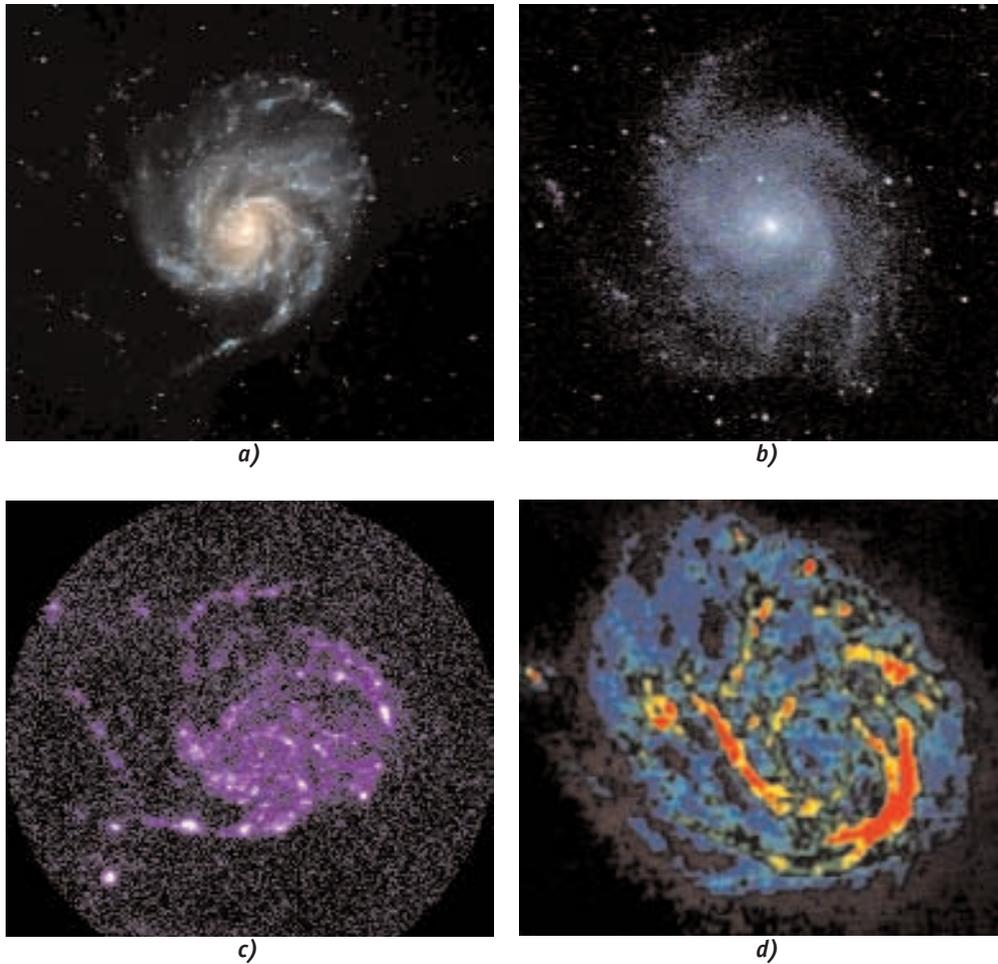


Figura 7. Fotografías en distintos intervalos de longitud de onda de la galaxia M101. *a)* En luz visible [Observatorio Óptico Astronómico Nacional de los EUA (NOAO)]. *b)* En luz infrarroja [Two Micron All Sky Survey (2Mass)]. *c)* En luz ultravioleta (Astro 2, UIT, NASA). *d)* En radio en 21 cm de longitud de onda (NRAO).

CONCLUSIONES

Nuestro conocimiento sobre el cosmos ha avanzado vertiginosamente en fechas recientes. Esto se debe a varias causas, entre ellas que el número de científicos activos en el mundo ha crecido mucho, y que las técnicas de observación y de reducción e interpretación de los datos se han modificado en forma importante. Entre los desarrollos más importantes que han obtenido está la conjunción de observaciones del cielo en distintas longitudes de onda, que ha permitido obtener información de distintos fenómenos que ocurren en el Universo y que brindan datos complementarios, que deben ser interpretados como un todo para entender los fenómenos que ocurren en la naturaleza. La búsqueda de nuevos horizontes ha sido una aventura muy

interesante, llena de sorpresas, pues aunque cada experimento y cada nuevo instrumento ha sido motivado por preguntas científicas específicas, en repetidas ocasiones los resultados han sido muy diferentes a lo esperado.

Silvia Torres de Peimbert es investigadora emérita del Instituto de Astronomía, profesora de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Nació en México, D.F., obtuvo la licenciatura en Física por la Facultad de Ciencias de la UNAM, y el doctorado en Astronomía en la Universidad de California, Berkeley. Se dedica al estudio teórico y observacional de la materia interestelar (la materia tenue que existe entre las estrellas). silvia@astroscu.unam.mx