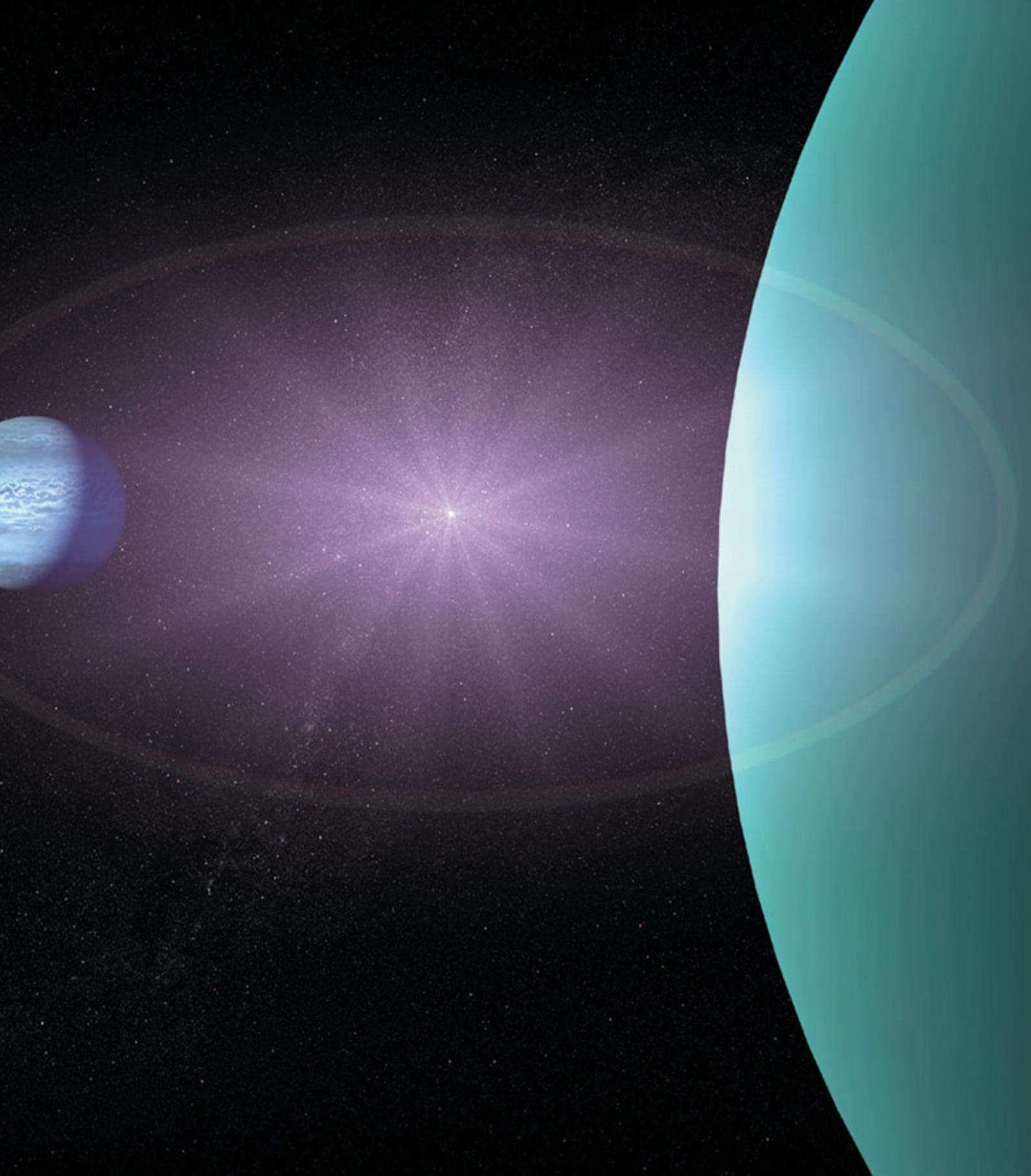
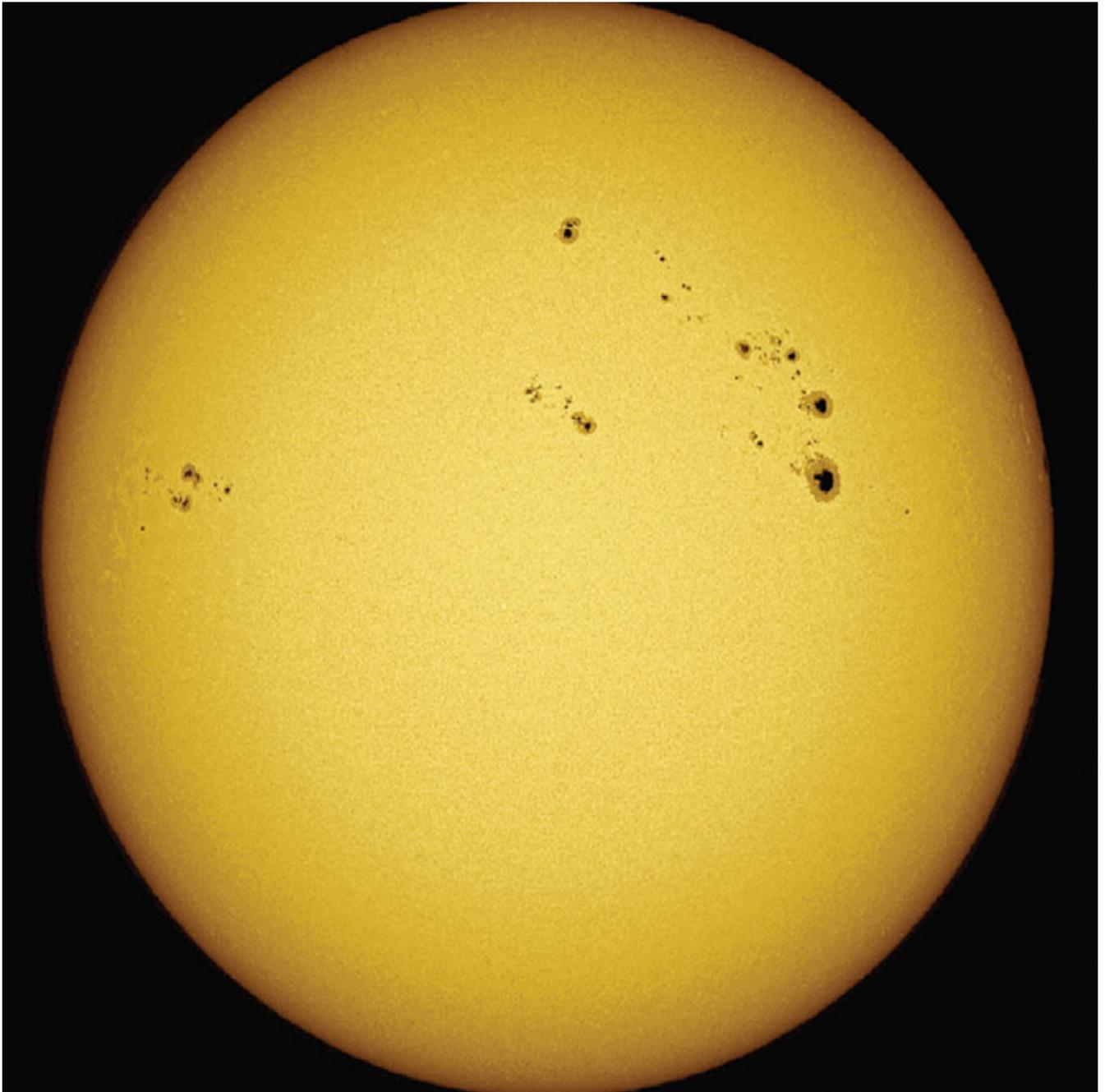


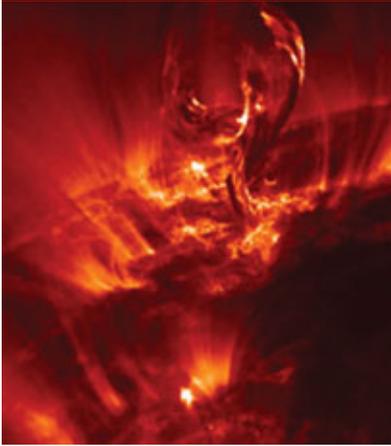
Una mirada al cosmos



Indice	Página	
	4	I. El sistema solar
	10	II. Evolución estelar
	15	III. Galaxias:
	15	1 · Formación de la Vía Láctea
	18	2 · Evolución interna
	20	3 · Evolución externa
	22	IV. El orden del universo
	24	V. Astrofísica de altas energías
	26	VI. Cosmología
	30	VII. Instrumentación
	32	VIII. El IAA
	34	IX. Glosario



El sol posee una atmósfera de la que proviene la mayoría de la luz que recibimos. En las figuras podemos distinguir las capas atmosféricas: arriba, la más baja (el disco entero) y la más alta (un detalle en la siguiente página). Esta última, denominada corona, presenta espectáculos inigualables de eyecciones de materia que son detectadas en la Tierra. © Disco: Th. Petlaner (IfA) y J.A. Bonet (IAC).



© Detalle: Sockheed, Martin. Solar and Astroph. Lab.

I. El sistema solar

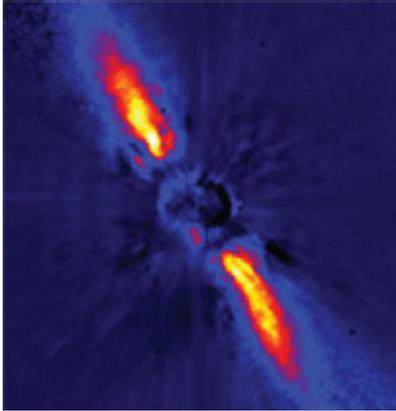
Nuestros vecinos más cercanos

A simple vista podemos reconocer cinco planetas, pero el sistema solar consta de nueve y una miríada de objetos pequeños cuyo recuento aumenta constantemente: satélites, anillos, asteroides, cometas y polvo interplanetario.

Cuando los humanos miraron al cielo por primera vez, reconocieron grupos fijos de estrellas que giraban alrededor de sus cabezas y que, dada su estabilidad, recibieron nombres de objetos y animales conocidos. Se trata de las constelaciones. Junto a ellas, además del Sol y la Luna, se distinguían unos puntos brillantes que se movían cada noche y que más tarde se identificarían como los planetas de nuestro sistema solar. En términos numéricos, el sistema solar consta del Sol, en el centro, nueve planetas mayores, 97 satélites (conocidos, aunque pueden existir más), cuatro sistemas de anillos, millones de asteroides (con radio superior a 1 km), trillones de cometas, el viento solar (flujo de partículas cargadas procedentes del Sol que invaden el espacio interplanetario), y una gran nube de polvo. Estudiando estos cuerpos, tanto colectiva como individualmente, intentamos comprender el origen, formación y evolución del sistema solar; un proceso que comenzó, a partir de una nube de gas y polvo, hace 4.600 millones de años.

El Sol, nuestra estrella

Se trata de una estrella bastante «común», que emite la mayor parte de su radiación en luz visible y cuya atmósfera se compone de un 95% de hidrógeno, un 3% de helio y el 2% restante de elementos pesados (como el hierro magnesio). Produce energía mediante la fusión de átomos de hidrógeno para dar lugar a helio, de tal forma que esa energía se «abre» camino hasta la superficie de la estrella y se emite en forma de radiación visible. La temperatura central del Sol, donde la fusión tiene lugar, asciende a 15 millones de grados, mientras que en la superficie es «tan solo» de 5.600 grados. Una estrella con las características del Sol tiene una vida media de unos 9.000 a 10.000 millones de años, de modo que nuestra estrella ha vivido ya la mitad de su existencia.



Disco protoplanetario, embrión de un posible sistema solar. © ESO.

Los planetas

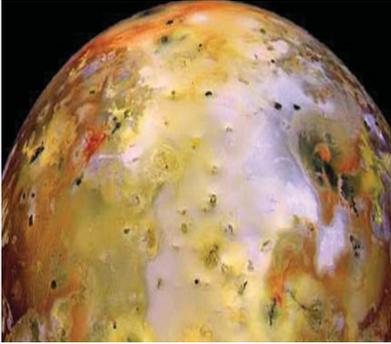
Según su composición, podemos clasificar los planetas en dos grandes grupos: los terrestres (similares a la Tierra) y los gigantes gaseosos o jovianos (similares a Júpiter). El primero abarca Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, todos ellos con superficie sólida y un núcleo de hierro y rocas ricas en silicio.

Esta característica común parece consecuencia de que, a distancias cortas al Sol, la temperatura era muy elevada para que los gases condensaran y formaran hielos. Pero vayamos uno por uno: Mercurio cuenta con el mayor número de cráteres porque su cercanía al Sol atrae a los meteoritos y su tenue atmósfera no protege la superficie ni los desintegra. En cambio, Venus posee una densa envoltura gaseosa de dióxido de carbono (CO₂), una presión en la superficie 94 veces superior a la terrestre (equivalente a una profundidad en el mar de 1.000 m) y una temperatura de 462° C (el plomo se fundiría fácilmente). Las nubes de esta atmósfera, compuestas por ácido sulfúrico y agua, forman un escudo gaseoso que ha protegido la superficie de los impactos de meteoritos. Además, la actividad tectónica, reflejada en un vulcanismo muy activo, con cráteres de 100 km de diámetro o ríos de lava de 80 km de largo, ha rejuvenecido la cara del planeta, que cuenta sólo con unos 600 millones de años.

Algo mucho más agradable ocurre en la Tierra. Ciertamente, existe una actividad tectónica que origina cordilleras y volcanes, pero no de las dimensiones vistas en Venus. Sin embargo, la «coincidencia» más agradable reside en que sólo en nuestro planeta se da la combinación justa de presión atmosférica y temperatura para la existencia de agua en estado líquido sobre la superficie. Esto ha favorecido que las cicatrices de los impactos de meteoritos hayan desaparecido gracias a la erosión climática, y que se haya desarrollado vida en la forma que actualmente conocemos.

LA NEBULOSA SOLAR, la nube de polvo y gas a partir de la que se formó el sistema de planetas, presentaba, casi con total certeza, una elevada variación de temperatura y era más fría a mayor distancia del centro. La huella de este cambio de temperatura se puede ver en la composición de los planetas y de sus satélites. Incluso, parte de esta variación se ha conservado en el cinturón de asteroides, entre Marte y Júpiter. A la derecha, Marte, planeta de carácter sólido, y Neptuno, un gigante gaseoso. © NASA.





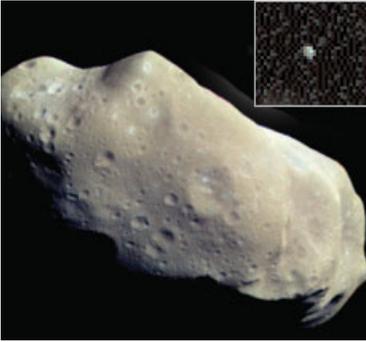
OTRAS LUNAS

Aunque la Tierra cuenta con la Luna, Marte con sus dos satélites, los planetas jovianos ostentan el récord en variedad de satélites. Júpiter tiene, «por ahora», 52 satélites. Quizá el más atractivo, pero también el más terrorífico, es Io, donde las explosiones volcánicas de azufre han conformado una superficie muy rica en sales con colores que van desde el verdoso hasta el rojo; o Europa que, bajo su rejuvenecida superficie, puede ocultar un océano de agua líquida con sales disueltas. Se han encontrado 37 satélites alrededor de Saturno, entre los que destaca Titán, el único satélite del sistema solar con una atmósfera densa de nitrógeno, metano e hidrógeno, digna de ser llamada así. Urano cuenta con cinco cuerpos catalogables como satélites, cuya variedad sugiere que, en algún momento de su historia, se rompieron y posteriormente acumularon masa para formar Miranda u otros especialmente amorfos. Neptuno también posee un elemento singular: Tritón, con géiseres de nitrógeno y metano, una superficie en continuo procesamiento, y con una órbita retrógrada que indica que fue capturado por el planeta y que terminará por caer sobre él. Imagen superior: La casi macabra cara del satélite Io. © NASA

La composición atmosférica actual se debe precisamente a la existencia de vida, pues se cree que en sus orígenes era mucho más densa y más contaminada con dióxido de carbono.

Marte presenta una mezcla de las características mencionadas hasta ahora. Tiene una atmósfera tenue de dióxido de carbono con una presión en la superficie de seis milibares, equivalente a la terrestre a 50 kilómetros de altura, y una temperatura de -63°C . La casi totalidad de la superficie marciana se asemeja a nuestros más desoladores desiertos, con tormentas de polvo que pueden cubrir al planeta durante meses, con cañones de 7 km de profundidad (el Cañón del Colorado tiene 2.7 km), montañas de 24 km. de altura (tres veces el Monte Everest), y una «Antártida» y «Antártica» locales de hielo de CO_2 . En «días claros», las imágenes que proporcionan las misiones espaciales muestran un planeta cuya superficie se asemeja aún más a la terrestre, con torrenteras probablemente causadas por flujos masivos de agua de hace millones de años. Si esto fue así, quizá Marte reunió las condiciones idóneas para albergar alguna forma de vida en tiempos primitivos.

Los gigantes gaseosos se caracterizan por tener una densidad media baja y una atmósfera de hidrógeno-helio muy densa, probablemente capturada de la nebulosa solar durante su formación. De hecho, la composición de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno se parece a la del Sol, ligeramente enriquecida en elementos pesados (nitrógeno, carbono, fósforo, azufre...). Estos planetas carecen de una superficie sólida, aunque muy probablemente contienen un núcleo sólido de silicatos y hierro de unas diez veces la masa terrestre. Sus atmósferas presentan bandas de diferentes «colores», originadas por las capas de nubes a diferentes alturas y de diferente composición que reflejan la luz solar y se ven afectadas por ciclones y anticiclones: algunas son tan estables que han permanecido durante decenas y centenares de años (la gran mancha roja de Júpiter es una de ellas), otras se desplazan de sur a norte sin perder su forma (la mancha oscura de Neptuno), o se engullen unas a otras, desaparecen y renacen.



EL PLANETA QUE NO FUE

Entre Marte y Júpiter nos encontramos con un embrión de planeta conocido como el Cinturón de Asteroides. Los cuerpos, o planetas menores, que contiene, se pueden considerar similares a los bloques (o planetesimales) que se unieron para formar los planetas terrestres, pero a los que la cercanía de un planeta gigante, Júpiter, les impidió unirse para formar un planeta más. Son muy diversos en composición (olivino, silicatos anhídricos, arcillas, piroxenos de magnesio, feldespatos, etc.), forma (elongada, deformada y accidentada por impactos, generalmente) y tamaño (desde centenares de metros hasta los 960 km de diámetro de Ceres), y algunos incluso poseen satélites (como Ida y su satélite Dactilo). Imagen superior: Ida y Dactilo. © NASA

Cada planeta joviano posee un sistema de anillos: Júpiter posee sólo uno; Saturno muestra un maravilloso cinturón compuesto por miles de anillos individuales; a Urano le rodean cinco finísimos anillos, mientras que el sistema de Neptuno destaca por su irregularidad, incluso con vacíos a lo largo de él. Plutón y su satélite Caronte, de tamaños muy similares, constituyen un sistema binario, es decir, una pareja cuyos elementos no podrían sobrevivir por separado. Ligados dinámicamente, se muestran siempre la misma cara, lo que los mantiene estables en la frontera del sistema solar. Son cuerpos rocosos helados, con hielos de agua, nitrógeno, metano y monóxido de carbono en sus superficies, que comparten las características comunes a los planetas terrestres pero en los confines del sistema solar externo.

La pregunta inevitable

¿Constituye el sistema solar una singularidad en el universo observable? Parece que no. Los grandes avances telescópicos permiten el descubrimiento de planetas (todavía gigantes gaseosos) alrededor de otras estrellas a un ritmo vertiginoso. Los 87 sistemas descubiertos, entre los que once son múltiples - estrella y más de un planeta- albergan un total de 101 planetas. Pero la similitud se extiende más allá, ya que las observaciones del telescopio espacial Hubble han desvelado, alrededor de muchas estrellas (como Beta Pictoris), un disco de material opaco (¿polvo?, ¿planetesimales?, ¿asteroides?) muy similar a la visión que nos ofrecería nuestro sistema solar visto desde Beta Pictoris.

lo que no sabemos...

¿Existe o ha existido agua en otros cuerpos del sistema solar? Se busca tanto agua como trazas biológicas en Marte y Europa.

¿Cómo se forma un sistema planetario? Debemos establecer qué tipo de estrellas forman planetas y con qué características.

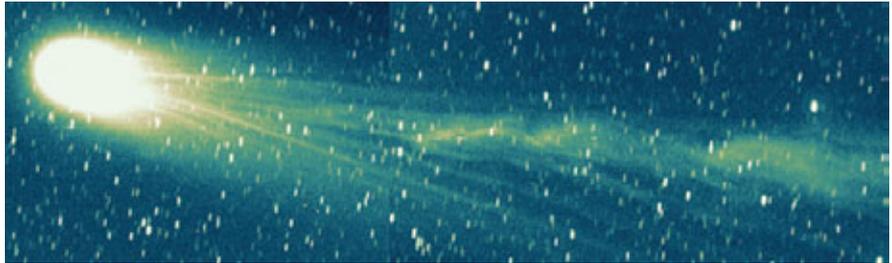
¿Qué ocurre en el Sol a escalas menores de 100 kilómetros?

¿Qué procesos dan lugar a las características de los gigantes gaseosos antes descritas?

¿Cuál es la estructura, composición y comportamiento que tienen los cuerpos menos evolucionados del sistema solar



Cometa Hale-Bopp. © Jochen Rink, Canadá.



Cometa Hyakutake. © Herman Mikuz, Eslovenia.

Este escenario de Sol y planetas recibe a veces la visita de un cometa, que despliega una enorme belleza en el cielo nocturno. La estructura interna de un cometa, es decir, su núcleo, no se conoce con absoluta certeza; puede tratarse de una mezcla de hielo y material rocoso (silicatos y olivinos) que se mantiene estable a grandes distancias del Sol, pero que, a medida que se acerca a éste, se calienta, el hielo se evapora y arrastra parte de ese material sólido y, en algunos casos, produce la ruptura del núcleo. Así nace la maravillosa «estrella con cabellera» (significado griego de cometa), aunque en realidad se trata de una nube de gas con dos o tres colas: la de polvo que se hace visible al reflejar la luz del Sol, la de gas ionizado y arrastrado por la radiación y el viento solar, y otra de sodio que procede de la evaporación parcial de los granos de polvo.

Todas estas colas tienen una dirección antisolar. A diferencia del Sol, los planetas y asteroides, que comparten aproximadamente un mismo plano (el de la eclíptica), los cometas vienen «de todas direcciones». Sus órbitas indican que existen dos reservas de éstos: un disco plano -aproximadamente también en la eclíptica- llamado cinturón de Edgeworth-Kuiper, que se localiza más allá de la órbita de Neptuno -a una distancia de entre 30 y 100 unidades astronómicas (UA)- y una burbuja que abarca todo el sistema solar (con una anchura de 10000 a 20000 UA) conocida como Nube de Oort. Los cometas y objetos del cinturón de Edgeworth-Kuiper, al encontrarse muy lejos del Sol casi toda su vida, no han sufrido cambios, ni físicos ni químicos, y albergan pistas sobre nuestros orígenes.



ESTRELLAS JÓVENES

Las Pléyades, visibles a simple vista en la constelación de Tauro, constituyen un cúmulo joven con unos treinta millones de años de edad. Aún se pueden ver, en forma de neblina, los restos de la materia de la que se formó. © D. Malin & Anglo-Australian Observatory.



ESTRELLAS ANCIANAS

Los cúmulos globulares son las agrupaciones de estrellas más viejas de la galaxia. Éste, M80, contiene cientos de miles de estrellas unidas debido a la atracción gravitatoria. Todas las estrellas de M80 se formaron hace quince mil millones de años. © Hubble Heritage Team (AURA / STScI / NASA).

II. Evolución estelar

El ciclo de vida de las estrellas

La longevidad de las estrellas oscila entre millones y miles de millones de años. Aunque este tiempo excede con mucho al de nuestra vida, el ser humano ha aprendido que las estrellas nacen, evolucionan y mueren, y puede estudiar todas las etapas de su vida.

Supongamos que una mosca quiere estudiar la vida de los seres humanos. Una mosca vive sólo unos pocos días, así que no podría concluir nada observando a una sola persona. Sin embargo, si la mosca visitase una maternidad, un colegio, diferentes familias, un hospital, etc., le sería fácil deducir que en la vida de un ser humano existe un principio, un desarrollo y un final. El punto clave radica en la observación de muchos grupos de seres humanos de diferentes edades. De forma similar actuamos los astrónomos con respecto a las estrellas. La ingente cantidad de ellas existente nos permite observar todas sus edades y no sólo concluir que las estrellas nacen, evolucionan y mueren, sino, además, estudiar y describir su vida. Hertzsprung y Russell llegaron a esta conclusión a principios del siglo pasado cuando representaron la relación entre el brillo y la temperatura de gran cantidad de estrellas en un diagrama, que hoy conocemos por el nombre de ambos. La inmensa mayoría de estrellas se encontraba en una banda del diagrama que correspondía a la etapa de madurez de las mismas. En dicha banda, la Secuencia Principal, se encuentra actualmente nuestro Sol.

Formación estelar

Las estrellas se forman en nubes de gas y moléculas que se concentran por efecto de su propia gravedad. El proceso es violento y lleva consigo la formación de discos, que alimentan de materia a la estrella naciente (o protoestrella), y expulsiones de materia a cientos de kilómetros por segundo. La temperatura y densidad en el centro de la protoestrella aumentan conforme se acumula la materia hasta permitir que los átomos de hidrógeno, el elemento más abundante del Universo, se fusionen para formar átomos de helio en un proceso que libera grandes cantidades de energía. Cuando comienza este proceso, que constituye el motor de una estrella durante su vida, decimos que se ha formado una nueva estrella:



ESTRELLAS EN FORMACIÓN

La nebulosa de Orión. En la constelación de Orión se puede ver una de las regiones donde se están formando estrellas de todo tipo a partir de una inmensa nube de gas, moléculas y polvo interestelar. © C.R. O'Dell & S.K. Wong & NASA.

una enorme esfera gaseosa cuya parte más externa, la atmósfera, podemos ver de forma directa. Poco queda ya alrededor de la estrella de la materia que la formó. Sin embargo, la materia en el disco puede condensarse y formar planetas, cometas o asteroides, es decir, un sistema planetario.

Las estrellas tienden a formarse en cúmulos. Todas las estrellas de un cúmulo se forman al mismo tiempo y, aunque coinciden en edad, no todas evolucionan al mismo ritmo: los procesos internos son lentos en las estrellas con poca masa -que pueden vivir miles de millones de años- y más rápidos en las estrellas de mayor masa, que completan su ciclo vital en pocos millones de años.

La formación de una estrella solitaria, como el Sol, no es lo más común. Además de formarse en cúmulos, dos tercios de las estrellas forman parte de sistemas estelares dobles ligados gravitacionalmente. El estudio de las órbitas de las estrellas dobles permite deducir las masas de las componentes. Estos valores, combinados con otras propiedades y modelos teóricos, hacen posible obtener calibraciones para estimar la masa de otras muchas estrellas.

Estrellas adultas

La vida de una estrella ya formada, como el Sol, no resulta plácida. Sus procesos físicos internos dan como resultado fenómenos observables en su atmósfera: vientos estelares, llamaradas, manchas frías y campos magnéticos. En algunas estrellas, las inestabilidades internas se traducen en pulsaciones y convulsiones, similares a un terremoto, cuyo estudio proporciona valiosa información sobre sus procesos internos.

CEMENTERIOS ESTELARES

Las nebulosas planetarias, el final de la vida de una estrella similar al Sol, presentan una enorme variedad de formas cuyo origen es, en buena parte, desconocido.

© Hubble Heritage Team / NASA / ESA / A

© Fruchter & ERO Team (STScI) / R. Sahai, J.

© Trauger and the WFPC2 Science Team.

1 · NGC2392 (Nebulosa del Esquimal)

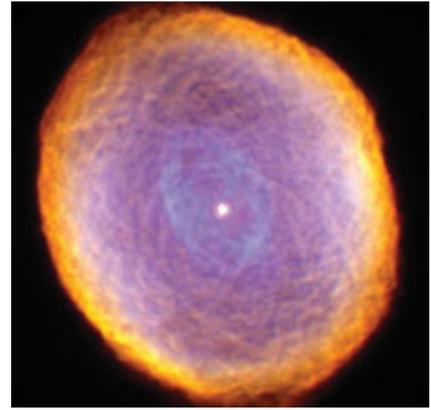
2 · IC418

3 · NGC6543 (Nebulosa del Ojo de Gato)

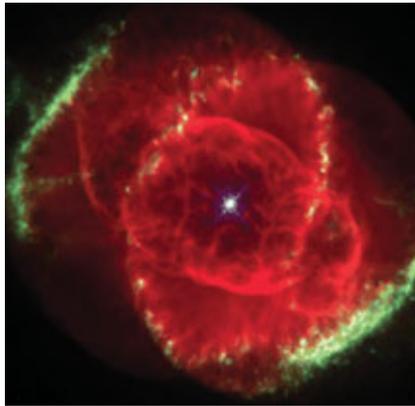
4 · Mz3 (Nebulosa de la Hormiga)



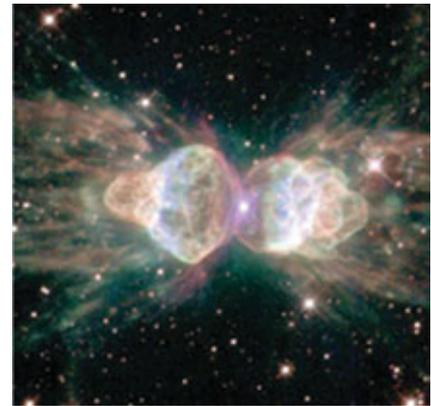
1



2



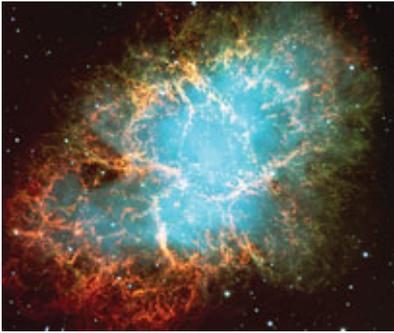
3



4

Muerte de la estrella

El agotamiento del hidrógeno en el centro marca el principio del fin en la vida de una estrella. Para mantener su equilibrio, la estrella crece desmesuradamente y se convierte en una gigante roja, con un tamaño similar a la distancia desde la Tierra -o incluso desde Júpiter- al Sol. En esta etapa, la estrella expulsa lentamente la atmósfera, que forma una envoltura gaseosa alrededor del núcleo. La masa inicial de la estrella desempeña un papel crucial en su final. Los modelos teóricos y las observaciones indican que, si la masa estelar no alcanza unas siete veces la masa del Sol, la estrella expulsará toda su atmósfera y dejará al descubierto un núcleo caliente que ilumina la envoltura. Se forma entonces una nebulosa planetaria cuyo núcleo, una enana blanca con temperaturas de decenas de miles grados y tamaño similar al de la Tierra, es incapaz de producir energía y se enfría lentamente hasta perderse de vista.

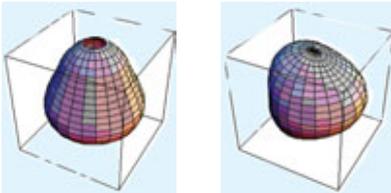


NEBULOSA DEL CANGREJO

La Nebulosa del Cangrejo es el resultado de la explosión de una supernova observada y documentada por los astrónomos chinos en el año 1054. El brillo en el momento de la detonación la hacía visible en pleno día. En el centro de la nebulosa se encuentra una estrella de neutrones, un pulsar, que gira a una velocidad de treinta vueltas por segundo. © FORS Team, VLT, ESO.

Las estrellas que superan en unas siete veces la masa del Sol explotan como supernovas, uno de los fenómenos más violentos del universo: lanza la materia estelar al espacio a velocidades de miles de kilómetros por segundo y sólo queda el núcleo central, de pocos kilómetros de diámetro, en el que se concentra una masa mayor que 1,4 veces la solar. Este núcleo puede desarrollarse como una estrella de neutrones que gira rápidamente -un pulsar- o, si su masa es mayor que 3,2 veces la del Sol, como un agujero negro una concentración de materia tal que ni la luz puede escapar de la acción de su gravedad.

La materia que expulsan las estrellas, principalmente al final de su vida, retorna al medio interestelar donde, tras largos procesos dinámicos, se agrupará y desencadenará la formación de una siguiente generación de estrellas. Dicha materia se encuentra enriquecida por nuevos elementos químicos que se fabricaron en los interiores de la primera generación de estrellas o, incluso, en su propia muerte explosiva en forma de supernova. Tales elementos químicos son los que encontramos en la Tierra y que conforman el material del que estamos hechos los seres vivos.



PULSACIONES DE UNA ESTRELLA

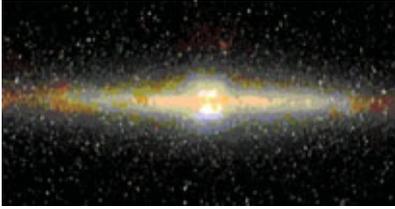
Las simulaciones por ordenador proporcionan información sobre los procesos en el interior de las estrellas como, por ejemplo, sus modos de pulsación. Aunque la amplitud de la pulsación está exagerada en la figura, la simulación nos muestra que algunas estrellas pueden pulsar de forma bastante exótica. © B. Guenther (U. of St. Mary's).

lo que no sabemos...

¿Cómo se forman las estrellas? Muchos aspectos de la formación estelar son aún desconocidos, como los procesos de formación de estrellas masivas, cuántas estrellas se forman a partir de una nube y en qué rango de masas.

¿Cuál es el origen de la vida? Buena parte de la investigación futura estará centrada en la detección y estudio de planetas de tipo terrestre y de posibles indicios de actividad biológica en los mismos.

¿Cómo se generan los intensos campos magnéticos al final de la evolución estelar? Técnicas de muy alta resolución nos permitirán estudiar los campos magnéticos y su geometría para entender su origen y la influencia que tienen en la formación de las nebulosas planetarias y restos de supernova.



Panorama de la Vía Láctea vista de perfil en infrarrojo y visible obtenida a partir de observaciones del satélite COBE. La estructura esferoidal central es la mejor imagen del bulbo que tenemos.
© NASA.

III. Galaxias

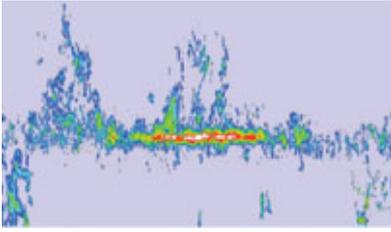
III.1 Formación de la Vía Láctea

Historia de un encuentro

Algunos objetos celestes gozan de una significación que sobrepasa la puramente astronómica. Entre ellos destaca nuestra galaxia, la Vía Láctea: una isla de materia en el cosmos, una vasta colección de estrellas, gas y polvo... una galaxia más, en definitiva. El hombre ha intentado explicarla, aprehenderla y humanizarla utilizando todos los saberes a su alcance: magia, religión, filosofía, arte y ciencia han elaborado modelos que intentaban dar respuestas a dos preguntas fundamentales: ¿Qué es la Vía Láctea? y, ¿cómo se formó?

La primera aproximación a la Vía Láctea tuvo que esperar hasta principios del siglo XVII. La introducción del telescopio en la observación astronómica aportó la primera prueba de que «...la naturaleza de la Vía Láctea no es más que un ingente conglomerado de estrellas». Galileo fue el encargado de darnos la respuesta e indicarnos el camino a seguir: instrumentación, observación y una mente abierta y osada capaz de generar nuevas teorías, y enfrentarse al paradigma vigente, forman la receta que todavía funciona. Desde entonces, la historia de la Astronomía ha ido paralela al desarrollo de nuestro conocimiento de la galaxia: toda revolución científica lleva aneja una nueva visión de la Vía Láctea.

A principio de los 60, se creía tener un conocimiento bastante aproximado de la estructura de nuestra galaxia: se trata de una galaxia espiral, formada por dos grandes subsistemas, el halo y el disco, que muestran propiedades de movimiento, químicas y morfológicas bien diferenciadas. El halo, con un bajo contenido en elementos químicos pesados, un movimiento desordenado y simetría esferoidal, constituye la componente más vieja de la galaxia. Por el contrario, el disco galáctico -donde se sitúa el Sol- presenta una estructura en la que las estrellas giran ordenadamente alrededor del centro como en un gran tiovivo, una química más evolucionada y estrellas muy jóvenes, incluso en formación, que dibujan los brazos espirales.



Distribución del monóxido de carbono en la Vía Láctea. Este compuesto nos indica la distribución de las nubes moleculares a partir de las cuales se forman las estrellas. © CfA-Harvard.

El «modelo tranquilo»

El halo, la componente más primitiva, contiene los objetos más viejos de nuestra galaxia cuyo estudio, a modo de fósiles, permite la reconstrucción del nacimiento y evolución de la Vía Láctea. Los astrónomos Eggen, Lynden-Bell y Sandage se encargaron, en 1962, de realizar esta tarea: descubrieron una aparente correlación entre el contenido de elementos pesados de las estrellas y la excentricidad de sus órbitas, que les llevó a proponer lo que podríamos llamar el "modelo tranquilo".

En este modelo, una nube de gas protogaláctica de gran radio y en rotación sufre un colapso mientras va formando estrellas. La primera generación de estrellas no contiene elementos pesados y sus órbitas (hacia el centro del colapso) son muy elípticas. La segunda generación se forma a partir del gas residual enriquecido con los elementos expulsados por las primeras supernovas y, las órbitas, al disminuir el radio de la nube, se tornan más circulares; y así sucesivamente hasta alcanzar un equilibrio dinámico. El gas que no ha sido capaz de formar estrellas en este rápido colapso se asienta y forma un disco con una velocidad de rotación alta. Eureka, lo fundamental ya está explicado pero, ¿es realmente así?

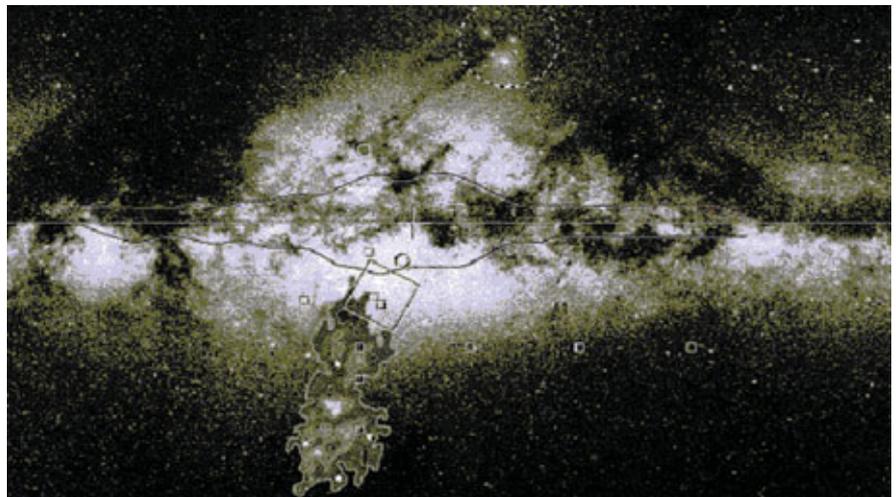
Ruptura de esquemas

Si tenemos que estudiar la evolución de la arquitectura granadina pero sólo podemos analizar un barrio y, dentro de ese barrio, las casas pintadas de blanco, seguro que presentaremos conclusiones poco fiables. Algo así sucedía con el conocimiento de la Vía Láctea a finales de los 60: la exploración abarcaba sólo una pequeña región de la vecindad solar y, además, en luz visible. El resto del espectro electromagnético no alcanzaba la superficie terrestre o no existían detectores para fijar y medir la radiación no visible. Al igual que en 1609, la tecnología ayudó a resolver el atasco: los telescopios de entre tres y cinco metros de diámetro se convirtieron en una herramienta más accesible, se desarrollaron nuevos detectores capaces de medir la energía en diferentes longitudes de onda y nació la astronomía espacial, que permitía obviar el filtro de nuestra atmósfera. La radiación más energética desveló mucho acerca de los diferentes procesos físicos que tienen lugar en nuestro universo. Un cosmos más turbulento y violento hizo aparición. Los grandes colectores permitieron fotografiar los primeros instantes del universo material y el "modelo tranquilo" de formación de la galaxia empezó a resquebrajarse. A la par, los nuevos modelos cosmológicos propugnaban la construcción de un universo de pequeño a grande. Los primeros grumos de materia, las galaxias enanas, chocarían para formar galaxias de mayor tamaño, como nuestra Vía Láctea. Las observaciones de galaxias externas mostraron

imágenes espectaculares de estos choques, pero aún no existía evidencia de que nuestra galaxia se hubiera formado por la fusión de varias galaxias enanas. La fortuna sonrió y, en 1994, las medidas rutinarias de velocidad radial en un campo del halo galáctico pusieron de manifiesto la existencia de una galaxia enana en interacción con la Vía Láctea.

Se rompieron los esquemas. La parte más externa del halo galáctico parece haber tenido una gestación más violenta que la prevista en el "modelo tranquilo", y puede estar formada por los escombros de galaxias enanas que fueron capturadas y destruidas por el campo gravitatorio de la Vía Láctea. Así pues, no sólo la galaxia, sino también la manera de estudiar la galaxia requieren una revisión: no se trata ya de un objeto que se formó al principio de los tiempos y ha evolucionado de forma tranquila, sino de un rompecabezas que todavía está armándose y cuyas piezas ni siquiera conocemos.

La galaxia enana de Sagitario en interacción con el centro de la galaxia. Sagitario se observa en la parte inferior central de la imagen; la distribución del polvo genera la estructura oscura que divide verticalmente en dos a la figura. © R. Ibata, R. Wyse, R. Sword.



lo que no sabemos...

¿Cuándo se formó y cuáles son las propiedades dinámicas del bulbo de la galaxia? Se trata de uno de los componentes menos conocidos de la galaxia, situado en la vecindad del centro galáctico con forma, al menos en infrarrojo, de cacahuete.

¿Cuántas galaxias enanas han sido capturadas por el campo gravitatorio de la Vía Láctea? Además de conocer mejor el halo, esta información impondría severas restricciones a los modelos cosmológicos en discusión.



Galaxia espiral barrada junto a pequeña galaxia elíptica. © Anglo Australian Observatory.

III.2 Evolución interna

El zoo de las galaxias

Además de galaxias espirales, como la nuestra, existen otros tipos de galaxias que se clasifican por su apariencia o morfología, y cuya estructura responde a procesos físicos diferentes.

Ya a mediados del siglo XIX, algunas de las nebulosas observadas en el firmamento por los astrónomos (y entonces aún no consideradas como sistemas externos a nuestra propia galaxia) fueron clasificadas como espirales y elípticas. A principios del siglo XX, dichas nebulosas se identificaron como galaxias, y Hubble y Lundmark las clasificaron en tres tipos fundamentales: elípticas, espirales e irregulares lo que resultó en el esquema básico que aún se utiliza hoy día. Las galaxias espirales, como nuestra Vía Láctea, están formadas por un núcleo, envuelto en una esfera central llamada bulbo, y un disco con brazos espirales. Se ven en el cielo en una variedad de inclinaciones, con bulbos mayores o menores, y con diferentes tipos de brazos espirales (mejor o peor trazados, más o menos enrollados); en ellas se aprecian otras componentes, como anillos o barras (estructuras aproximadamente rectas que se extienden a ambos lados del núcleo de la galaxia). Las galaxias irregulares, por el contrario, no tienen núcleos dominantes y tienen formas asimétricas; un claro ejemplo son las Nubes de Magallanes, las dos galaxias más próximas a la nuestra, visibles a simple vista desde el hemisferio sur. Las galaxias elípticas, en tres dimensiones, son sistemas semejantes, *grosso modo*, a un balón de rugby. No presentan detalles estructurales, aparte de un núcleo concentrado alrededor del cual se observa una nebulosidad cuyo brillo decrece suavemente hacia el exterior. Las galaxias elípticas constituyen la población dominante de las partes centrales de los cúmulos de galaxias y, al menos algunas de ellas, podrían formarse por la fusión de dos o más galaxias espirales tras una colisión violenta.

Efectos de las barras

El esquema de clasificación de Hubble presenta dos secuencias paralelas, una para galaxias sin barra y otra para galaxias barradas. De hecho, los astrónomos han demostrado que la proporción de galaxias barradas es superior a la de galaxias no barradas. Esto hace de las barras una propiedad muy importante en las galaxias espirales. Las simulaciones numéricas por ordenador han reconstruido su evolución bajo la fuerza de la gravedad comprimiendo miles de millones de años en unos pocos segundos.

Estas simulaciones muestran que la aparición y evolución de la barra produce efectos fundamentales en la vida de una galaxia espiral, ya que actúa como un transportador de material desde las partes exteriores del disco hacia el centro y engrosa el bulbo. Curiosamente, esto puede llevar a la autodestrucción de la barra y a un cambio en la clasificación morfológica de la galaxia. Se cree que las barras podrían, además, producir la formación de estrellas de manera violenta en las partes próximas al núcleo galáctico, a partir del material acumulado por la barra en el centro de la galaxia; o incluso dar lugar a la llamada actividad nuclear, en la que las partes centrales de las galaxias emiten una cantidad de energía mucho mayor de la que se podría atribuir a procesos normales de las estrellas o el material interestelar.

Otras galaxias

Existen galaxias que no se ajustan al esquema de Hubble, como las galaxias perturbadas por la interacción con otras. Pero también quedan fuera de la clasificación aquellas cuya apariencia no está conectada con la interacción de forma evidente, como son las conocidas como galaxias enanas por su tamaño físico (menos de la mitad de una galaxia normal), junto con otras que, con tamaños similares a los de galaxias espirales, muestran luminosidades muy inferiores (conocidas por ello como galaxias de bajo brillo superficial). En la actualidad, los astrónomos no consideran las galaxias como sistemas inmutables en el tiempo, sino en permanente cambio; en consecuencia, su lugar en la secuencia de Hubble cambiará a lo largo de sus vidas.



La Nube de Magallanes, galaxia irregular.
© ESO.

lo que no sabemos...

¿Cuándo se formaron las galaxias que vemos? Las imágenes de galaxias muy lejanas muestran gran proporción de galaxias con formas peculiares, lo que indica que las espirales y elípticas se formaron más recientemente. Los procesos de formación para unas y otras están aún por dilucidar.

¿Existe en las galaxias espirales una conexión entre la actividad nuclear y la presencia de una barra? Galaxias activas y no activas parecen tener proporciones similares de barras. Si bien la barra facilitaría el transporte de material cerca del centro, para alcanzar el núcleo la clave parece estar en las barras nucleares o espirales centrales, con tamaños menores que las barras normales.

¿Cuál es el origen y la evolución de las galaxias de bajo brillo? ¿Cómo tiene lugar la formación estelar? ¿Son comparables las propiedades de las galaxias irregulares actuales y las de las más antiguas?



CÚMULOS DE GALAXIAS

Los cúmulos están formados por cientos y hasta miles de galaxias: son los sistemas más grandes unidos por la gravedad que se conocen en el universo. Curiosamente, la mayor parte de su materia luminosa no está en las galaxias, sino entre ellas, en forma de un gas a temperaturas de millones de grados atrapado por la fuerza gravitatoria del conjunto. En su mayor parte es material residual de su formación, enriquecido por explosiones de supernova y por el material más exterior de las galaxias, barrido en su desplazamiento por el cúmulo. Imagen superior: El cúmulo de galaxias de Coma. © O. López-Cruz (INAOEP).

III.3 Galaxias: Evolución externa

La vida en sociedad de las galaxias

La mayor parte de las galaxias vive en comunidades, lo que provoca colisiones entre ellas que dan lugar a formas espectaculares. Los tres tipos principales de agrupaciones en que habitan son los pares, grupos y cúmulos de galaxias.

A pesar de que las galaxias son sistemas cambiantes, la contemplación del cielo nocturno nos produce la sensación de que los objetos celestes son inalterables. Esto sólo es debido a la cortedad de nuestras vidas con respecto a los cientos de millones de años que separan los fotogramas de las películas galácticas. Además, estos fenómenos tienen lugar a distancias increíbles de nosotros: viajando a la velocidad de la luz emplearíamos 200.000 años en llegar a las galaxias más cercanas a nosotros, las Nubes de Magallanes, visibles como una mancha lechosa en el cielo del hemisferio sur; en 60 millones de años llegaríamos al «cercano» cúmulo de Virgo, solo observable con un instrumento astronómico. Para los humanos, que rara vez llegamos a centenarios, la distante danza de las galaxias pasa desapercibida.

Cristales rotos en choques galácticos

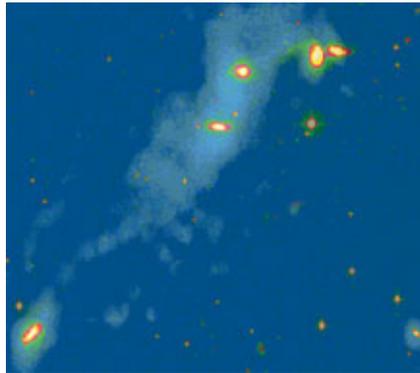
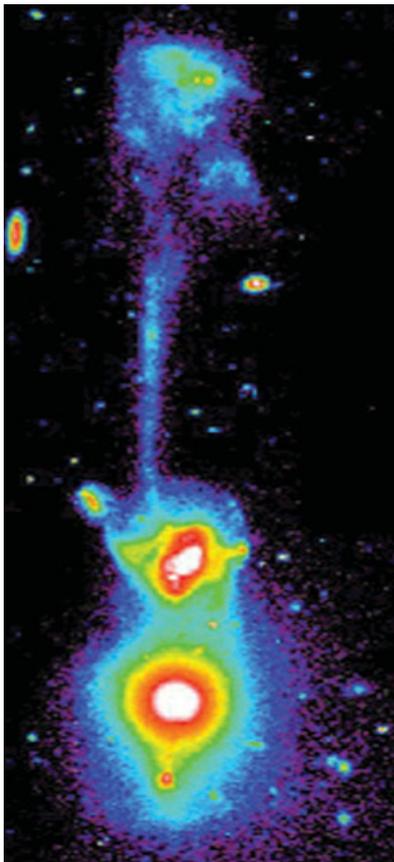
Los choques entre estrellas son prácticamente inexistentes, debido a las grandes separaciones estelares. Por el contrario, la mayor parte de las galaxias vive en comunidades y a distancias cortas, en forma de pares, grupos o cúmulos, y sufre al menos una colisión en sus vidas. En estos choques se encuentran 10^{39} toneladas (¡un uno seguido de 39 ceros!) de estrellas y gas, a velocidades de ¡700.000 kilómetros por hora! y con tamaños de 80.000 años luz. Las colisiones que suceden en las carreteras galácticas, como las de nuestras autopistas, dejan huellas inconfundibles. Las partes más débiles y expuestas de un automóvil, cristales y parachoques, dan pistas reveladoras del accidente. En las galaxias espirales, la componente más frágil es el gas de hidrógeno atómico, ligero y especialmente concentrado en las partes externas, aunque también las estrellas se ven afectadas. Por ello, en la interacción de dos galaxias espirales el gas atómico es expulsado hacia el exterior y se producen estructuras generalmente alargadas, que semejan largas colas o plumas, o constituyen un puente de materia entre las galaxias.

PARES DE GALAXIAS

Cuando dos galaxias se cruzan pueden tener un solo encuentro o comenzar una serie de giros una en torno a la otra, arrancándose material que da lugar a colas y puentes de marea. El material eyectado puede volver de nuevo a las galaxias, dispersarse en el medio intergaláctico o, según se ha encontrado recientemente, colapsar para formar pequeñas galaxias, llamadas enanas de marea, en las que coexisten estrellas procedentes de las galaxias que han colisionado y nuevas estrellas nacidas por la contracción del gas acumulado.

En la imagen el par de galaxias en interacción Arp 105. De las dos galaxias, que ocupan la mitad inferior, emerge una estrecha y larga cola que apunta hacia una posible galaxia enana en formación.

© P.A.Duc (CFHT)



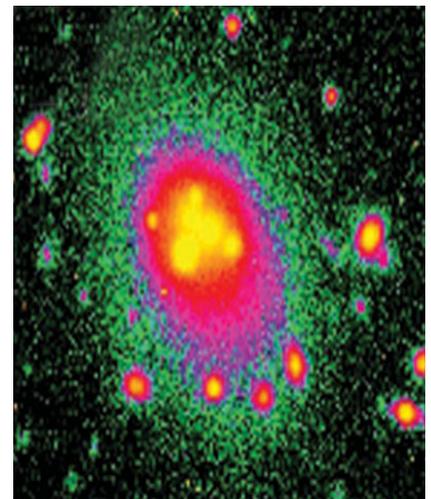
GALAXIAS CANÍBALES: las más grandes del universo.

En el centro de los cúmulos de galaxias se encuentran las galaxias más grandes del universo. Han conseguido este récord gracias a su apetito gravitatorio, que les hace atraer hacia sí las galaxias que pasan cerca de ellas. En esta imagen, el tamaño monstruoso de la galaxia caníbal del cúmulo Abell 3827 hace parecer enanas a una decena de galaxias cercanas, que en realidad tienen el mismo tamaño que nuestra Vía Láctea. En su interior se pueden apreciar algunas recientemente ingeridas. © M. J. West (St. Mary's U.).

GRUPOS DE GALAXIAS

La Vía Láctea se encuentra en el Grupo Local, formado por unas treinta galaxias con una extensión de unos 10 millones de años luz. Existen sin embargo grupos de densidades enormes, los grupos compactos de galaxias, que constituyen los sistemas aislados de galaxias más densos del universo. En ellos se ha observado la formación de un complejo entramado de colas y puentes de gas atómico, como el que muestra la imagen.

Las nubes de gas, representaciones en azul claro, envuelven y unen la luz estelar de las seis galaxias del grupo denominado Hickson 16. © L. Verdes-Montenegro y colaboradores (IAA)



lo que no sabemos...

¿Se forman las galaxias elípticas a partir de la fusión de galaxias espirales en colisión? Eso muestran las simulaciones, pero no existen pruebas. Desconocemos también si las galaxias elípticas son diferentes en los cúmulos de galaxias y fuera de ellos.

¿Cómo se destruye el gas atómico en los grupos compactos? Los datos muestran una coincidencia marginal entre grupos pobres en gas y la emisión de gas muy caliente. Es necesario disponer de mejores medidas para confirmarlo.

¿Proceden los cúmulos ricos de la unión de cúmulos pobres o incluso grupos de galaxias? Para responder a esta pregunta es necesario observar un gran número de cúmulos antiguos y por tanto más distantes.

¿Percibe el fenómeno de formación de estrellas el entorno "social" en que tiene lugar? Estudiando grupos y cúmulos ya formados se puede comprender si estos procesos sienten la estructura en que están transcurriendo.

IV. El orden del universo

Si pudiéramos observar el universo desde una imposible ventana exterior, nos encontraríamos ante un entramado infinito de cúmulos de galaxias y vastas zonas aparentemente vacías. En cada galaxia, millones de nebulosas y estrellas. Alrededor de cada estrella, un posible sistema planetario.



CÚMULO DE GALAXIAS

Tamaño: Entre 1 (grupos) y 300 millones de años luz (supercúmulos). Nuestra galaxia, la Vía Láctea, forma parte del cúmulo de Virgo, que contiene 2.000 galaxias en una región de 50 millones de años luz. En el seno de estos cúmulos se producen colisiones entre galaxias y fenómenos de canibalismo galáctico.

(Arriba) Cúmulo de Abel 2218. © NASA, Andrew Fruchter (STScI), and the ERO team.



GALAXIAS

Tamaño: Desde 30.000 hasta 120.000 años luz. Una galaxia es un inmenso conjunto de estrellas, nebulosas de gas, polvo, planetas, cometas... Se clasifican según su forma en espirales, elípticas o irregulares. La Vía Láctea es una galaxia espiral de unos 100.000 años luz de diámetro.

(Izquierda) Galaxia espiral NGC1232. © European Southern Observatory.



NEBULOSA DE GAS

Tamaño: Desde 0,30 y 100 años luz. En el interior de las galaxias se hallan las nebulosas: formaciones de gas y polvo compuestas principalmente por hidrógeno y helio. Éstas se relacionan tanto con el nacimiento de nuevas estrellas (nebulosas de formación), como con la muerte de aquellas (nebulosas planetarias y restos de supernovas).

(Izquierda) Nebulosa de Orión. O'Dell & S.K. Wong (Rice University). © NASA

PLANETAS

Tamaño: Entre 2.000 Km. (Plutón) y más de 150.000 Km. (Júpiter)

Aunque la mayoría de ellos se formó a partir de la misma nube de gas y polvo, los planetas presentan características muy diferentes: gigantes bolas de gas (Júpiter o Saturno) o pequeñas esferas sólidas (La Tierra o Marte). Las técnicas actuales han permitido detectar y confirmar más de un centenar de planetas extrasolares.

(Derecha) Saturno. © Hubble Heritage Team.

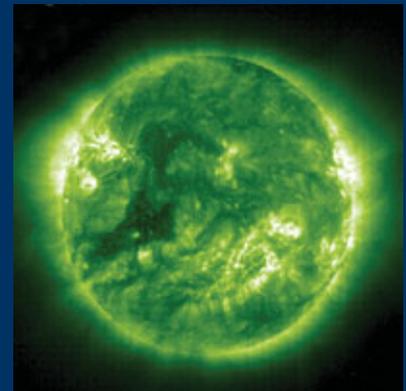


ESTRELLAS

Tamaño: Desde 300.000 Km. (enanas blancas) hasta 1.000 millones de km. (súper gigantes)

Una estrella es una esfera de gas que emite energía en forma de radiación, gracias a reacciones termonucleares que convierten elementos ligeros en otros más pesados; su color, tamaño, masa o edad puede ser muy variado. El Sol tiene un diámetro de 700.000 km. (100 veces la Tierra) y una edad de 5.000 millones de años.

(Derecha) Imagen del Sol en emisión Fe XII. © SOHO



CÚMULOS ESTELARES

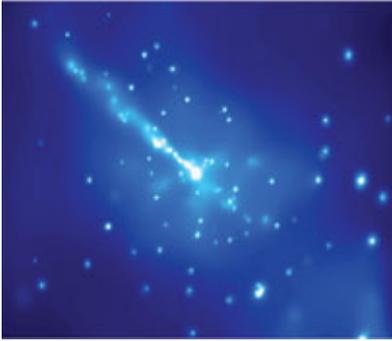
Tamaño: Desde 10 a 100 años luz.

Muchas estrellas forman parte de grupos denominados cúmulos estelares. Se han observado dos tipos: los "cúmulos abiertos" con pocas estrellas (decenas a miles) y muy jóvenes; y los "cúmulos globulares", más grandes, con muchas estrellas (miles a millones) y muy viejas.

(Derecha) Cúmulo de Las Pleiades.

© Anglo Australian Observatory/Royal Observatory Edinburgh.





La galaxia Centauro-A vista con el satélite de rayos X Chandra. Se observa un chorro de partículas que emerge desde el núcleo de la galaxia. Las fuentes puntuales de rayos X son, en su mayoría, estrellas binarias en las que una estrella de neutrones está "engullendo" el gas de la estrella compañera. © NASA / SAO / R. Kraft et al.



Chorros de partículas relativistas surgiendo del núcleo de la galaxia NGC 383. Esta imagen en radio está tomada con el VLA, un conjunto de 27 radiotelescopios situados en el estado de Nuevo México (EE.UU.) que actúan de manera conjunta para producir imágenes de muy alta resolución angular. © (NRAO / AUI / NSF).

V. Astrofísica de altas energías

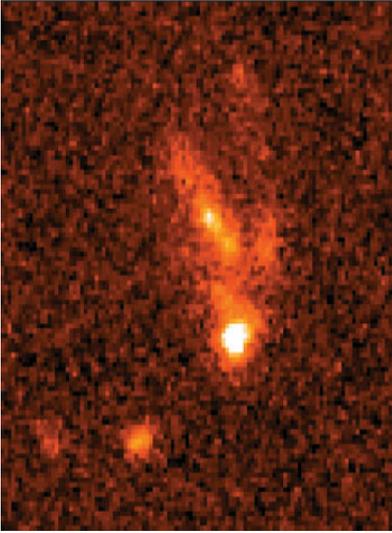
Cuando las esferas tocan Heavy Metal

Los antiguos griegos concebían el universo formado por una serie de esferas concéntricas que giraban armoniosamente con la Tierra como centro, y en ese girar perpetuo producían una música suave, sólo audible en condiciones espirituales muy especiales. Esta idea dio lugar a la expresión «la música de las esferas». Hoy día conocemos algo más del universo, de la dinámica de los astros, de su «música». Y parece que hay lugares en los que se toca realmente fuerte, algo parecido al Heavy Metal.

Ciertamente el universo no escatima en vatios: una estrella como el Sol emite en un solo segundo energía suficiente como para cubrir la demanda actual de energía eléctrica de España durante 240 millones de años. Pero, a pesar de lo espectacular de esta cifra, la energía producida por el Sol resulta despreciable si la comparamos con la que producen otros procesos de altas energías que ocurren en el universo. Cuando en Astrofísica se habla de altas energías, no nos referimos a procesos relacionados con las reacciones termonucleares que ocurren en el interior de las estrellas que, aunque magníficas desde un punto de vista humano, no pasan de procesos corrientes si los consideramos desde una perspectiva cósmica. En el universo existe otra suerte de fenómenos muchísimo más energéticos, y que están asociados a dos de los objetos celestes más llamativos descubiertos en las últimas décadas: los cuásares y las explosiones de rayos gamma. Un cuásar tiene una potencia equivalente a 25 billones de soles y es capaz de mantener este ritmo de producción de energía durante millones de años. Un estallido de rayos gamma tiene una potencia aún mayor, aunque por lo general no sobrepasa los varios minutos de duración.

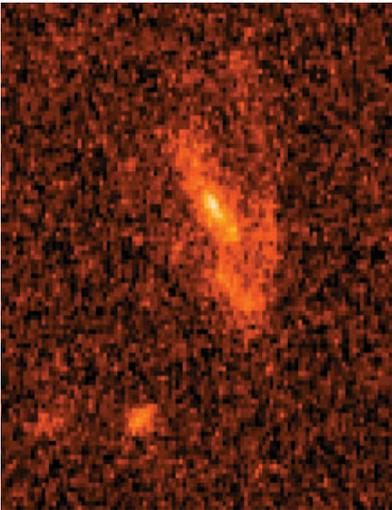
Cuásares

Un cuásar es el núcleo de una galaxia lejana que se caracteriza porque el brillo de su zona central supera con diferencia al del resto de la galaxia; tanto que las estrellas que la forman son difícilmente detectables, incluso con telescopios de gran tamaño, y sólo se consigue ver la intensa radiación del núcleo, que al ser muy compacto presenta el aspecto de una estrella. Los cuásares se descubrieron en 1963 y, durante varios años, constituyeron un verdadero enigma: si se hallaban tan lejos, la fuente de energía que los revelaba debía de ser algo descomunal. Tan sólo la existencia de grandes



GRB, ANTES

El remanente óptico de la explosión de rayos gamma del 23 de enero de 1999 observado por el telescopio espacial Hubble a los 16 días de la explosión (arriba). Se trata del objeto puntual en el centro de la imagen.



GRB DESPUÉS

Un año después, el remanente de GRB 990123 ha desaparecido, y deja entrever el complejo subyacente de dos o tres galaxias interaccionando entre sí a 9.000 millones de años luz de nosotros.
© (HST GRB Collaboration / NASA).

cantidades de materia cayendo hacia un objeto muy masivo y compacto parecía explicar la energía observada. Esa caída liberaría energía, de manera similar a la que se libera cuando un vaso cae al suelo y salta en pedazos. Pero, ¿qué tipo de objeto se encuentra en el núcleo de las galaxias? Los físicos habían considerado en los años treinta la posible existencia de concentraciones de materia tales que su campo gravitatorio fuese, hasta una cierta distancia, lo suficientemente intenso como para no dejar escapar ni siquiera la luz. Se les llamó agujeros negros, puesto que nunca podrían observarse directamente, aunque sí los efectos en su entorno. Precisamente, la observación de esos efectos ofreció certeza experimental sobre la existencia en el núcleo de algunas galaxias de agujeros negros con masas equivalentes a la de varios millones de soles. Los agujeros negros atraen hacia sí el gas de la zona central de la galaxia que, en su caída, forma un gigantesco remolino con velocidades de hasta diez mil kilómetros por segundo y temperaturas de varios millones de grados y produce grandes cantidades de energía. En algunos de estos cuásares se forman unos chorros que sirven de escapatoria para una fracción del gas que cae hacia el agujero negro. Los chorros pueden alcanzar tamaños de varios millones de años luz y están formados por partículas, fundamentalmente electrones, que viajan a velocidades próximas a la de la luz.

Los más energéticos

Pero si de alta potencia hablamos, el récord actual lo ostentan las explosiones de rayos gamma (GRB, del inglés *Gamma Ray - Burst*). Estas explosiones, a modo de destellos muy intensos y con duración de varios segundos, se vienen registrando por término medio un par de veces al día. Desde su descubrimiento de manera fortuita en 1969, su origen es uno de los misterios aún no resueltos de la Astrofísica. El mayor inconveniente en su estudio radica en que hasta hace muy poco no ha sido posible localizar el origen de la explosión con la suficiente precisión en el cielo como para identificarla con algún objeto conocido. Pero hoy día ya sabemos que ocurren en galaxias muy lejanas, prácticamente en los confines del universo. Se piensa que estas explosiones están asociadas al colapso de estrellas muy masivas en las últimas etapas de sus vidas, pero todavía quedan muchas incógnitas que resolver. Lo cierto es que con una potencia equivalente a la de unos 400 cuásares, constituyen hoy por hoy los eventos conocidos más energéticos del universo.

lo que no sabemos...

- ¿Qué es lo que provoca que en el núcleo de una galaxia aparezca un cuásar?
- ¿Cómo se generan los chorros que surgen del núcleo de algunas galaxias?
- ¿Existe un agujero negro en el núcleo de todas las galaxias?
- ¿Cuál es la verdadera naturaleza de los GRB?

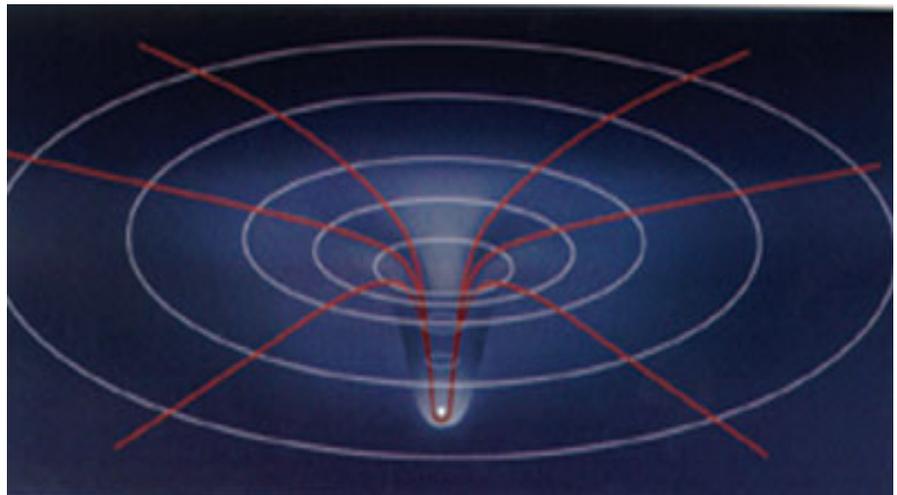
VI. Cosmología

El universo a gran escala

Los resultados de los últimos experimentos sobre la radiación de fondo de microondas parecen indicar que el universo a gran escala tiene estructura plana, es decir, para triángulos suficientemente grandes el teorema de Pitágoras es válido. En este caso, el universo se encuentra en expansión lineal. Esto no contradice la existencia de fuertes distorsiones locales alrededor de los cuerpos celestes masivos. Y todo ello en perfecto acuerdo con la teoría de A. Einstein.

El proceso de interpretación física de cualquier fenómeno natural está siempre amenazado por el riesgo de caer en un círculo vicioso: para plasmar un conjunto de datos experimentales en leyes físicas, capaces de predecir los resultados de nuevos procesos, se precisa de un modelo (matemático) concreto, lo que condiciona el alcance o significado de tales datos. Y si esto es así para experimentos realizados en un laboratorio convencional (terrestre, digamos), qué cuidado no habría que tener cuando los datos experimentales conciernen al propio universo, el laboratorio es el Espacio-Tiempo y los instrumentos se rigen por leyes físicas que han sido establecidas en su seno y comprobadas a escalas relativamente insignificantes.

© M. Begelman y M. Rees.



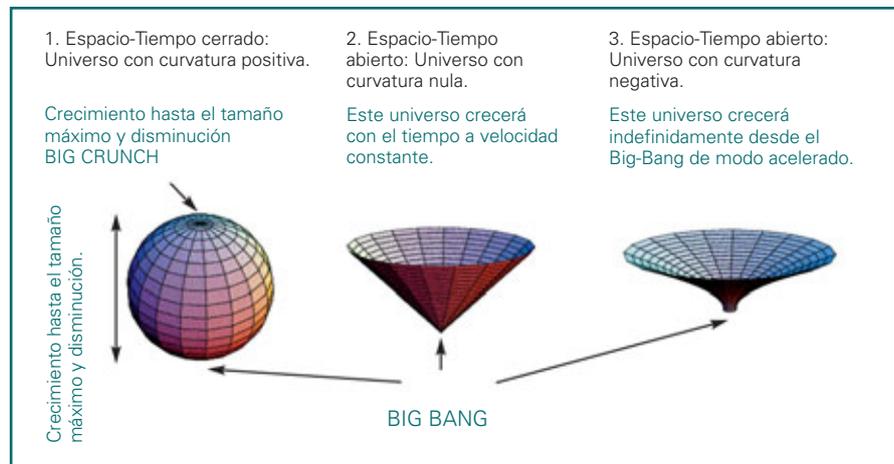
Por Espacio-Tiempo entendemos la trayectoria del universo a lo largo del tiempo, y es la evolución del universo a partir de un instante dado lo que constituye el objeto de estudio de la Cosmología. En concreto, cabe preguntarse por ciertos parámetros característicos como son la forma del universo en un instante determinado (como el instante actual, un supuesto instante inicial o un posible final), su tamaño, el tipo de materia de que se compone, densidad, etc. y, lo que es muy importante, la regla de medida de distancias que ha de usarse. Quizá la geometría que todos conocemos no sea la apropiada para medir todos los casos, y he aquí un ejemplo: tenemos una sábana elástica en donde se ha depositado una bola: la superficie sigue siendo plana a grandes rasgos, pero con una pequeña curvatura local que exige otra regla de medida. Algo similar ocurre en el universo, cuya medida exige dos tipos de reglas según la escala que, aunque diferentes, no son por ello incompatibles.

El modelo actual

El modelo que se usa en la actualidad para interpretar los datos cosmológicos consiste esencialmente en un conjunto de simplificaciones impuestas a las ecuaciones de Einstein que describen la dinámica de los campos gravitatorios. Estas suposiciones se justifican por las observaciones sobre homogeneidad a grandes rasgos en todas las direcciones y desde todos los puntos del espacio, y constituyen lo que se conoce como Principio Cosmológico. A esto hay que añadir una modelización, a su vez, de la estructura de las leyes físicas a pequeñas escalas de distancia, o Física de Partículas Elementales, que establece el tipo de materia que puede servir de fuente para la creación del campo gravitatorio en las ecuaciones de Einstein. Existen tres tipos de materia: la materia normal, constituyente de estrellas y polvo estelar, esto es, la luz y los componentes de los núcleos atómicos; la materia oscura, que no vemos pero cuya existencia se encuentra asociada a las ondas gravitatorias y a los neutrinos, partículas sin carga y con una masa pequeñísima, pero que son relevantes por la gran cantidad que existe; y la denominada materia exótica, asociada a campos y fenómenos físicos a los que sólo se les puede atribuir sentido real dentro de un esquema más preciso y general que incorpora la Teoría Cuántica en los modelos de Cosmología. Los efectos indirectos de estos objetos exóticos se conocen modernamente bajo el nombre, también exótico, de quintaesencia.

Interrogantes futuros

El reto de la Cosmología actual es determinar la curvatura del universo a la luz de los datos experimentales sobre la distancia de los objetos astronómicos más lejanos, medida experimentalmente a través de las supernovas, sobre la distribución de densidades de masa y sobre la composición o tipo de materia. La curvatura espacial determina la evolución en el tiempo y, por tanto, si el universo se vuelve a cerrar (*Big-Crunch*) o no. Para responder a estos interrogantes no se deben menospreciar los riesgos de interpretación de los datos experimentales, antes comentados, como consecuencia del empleo de un modelo específico de evolución del universo y de las interacciones locales o no gravitatorias entre las partículas que componen la materia.



TRES POSIBLES HISTORIAS DEL UNIVERSO

La evolución del universo puede esquematizarse en tres tipos de Espacio-Tiempo, dependiendo de la cantidad y tipo de materia que contiene. Según las leyes de la física, si el universo contuviera mucha materia, su fuerza gravitatoria frenaría la expansión y provocaría un colapso final (fig.1); si contuviera muy poca se expandiría para siempre de modo acelerado (fig.3). Existe, no obstante, una densidad crítica, que se sitúa en la línea divisoria entre las dos y predice la expansión indefinida a velocidad constante; en este caso, el universo es plano, es decir, tiene curvatura nula (fig. 2).

lo que no sabemos...

¿Cuál es la influencia del modelo cosmológico utilizado en la interpretación de medidas cosmológicas a gran escala, como las de Boomerang?

¿Es la energía oscura el ingrediente dominante en el universo?

¿Qué es realmente la gravedad cuántica y qué sería la cosmología cuántica?

EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS Y LA GEOMETRÍA DEL UNIVERSO

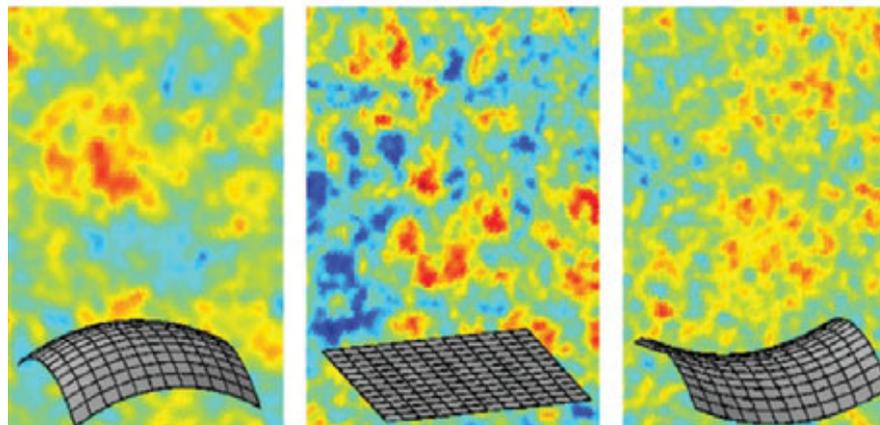
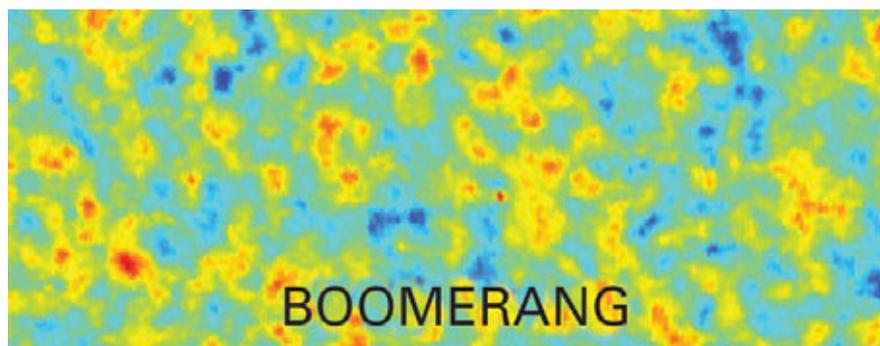
Los últimos resultados obtenidos en el marco del proyecto Boomerang (siglas en inglés de Observaciones en Globo de la Radiación Milimétrica Extragaláctica y Geofísica), que estudia la distribución de pequeñas variaciones de intensidad en el fondo cósmico de microondas (ver friso inferior), concluyen que el universo es plano, es decir, que respeta la geometría euclidiana a gran escala. Se trata de la misma geometría que aprendemos en la escuela, en la que la línea más corta entre dos puntos es la recta, los ángulos de un triángulo siempre suman 180 grados y las líneas paralelas nunca se separan ni se cortan. No ocurriría lo mismo en una superficie curva, que contempla dos posibilidades: la curvatura positiva, representada por una esfera, en la que los ángulos de un triángulo suman siempre más de 180 grados, y la curvatura negativa, similar a la forma de una silla de montar, en la que la suma siempre es inferior a 180; en ambos casos, la suma dependerá del tamaño del triángulo.

Hemos de recalcar que las curvaturas de las que hablamos en estos experimentos cosmológicos hacen mención a la estructura a gran escala del Espacio-Tiempo o del universo, como si la materia estuviese uniformemente distribuida, y que nada tiene que ver con las curvaturas locales generadas como consecuencia de la presencia de cuerpos celestes masivos, y que pueden llegar a ser extremadamente grandes. Dichas curvaturas locales dan lugar a verdaderas distorsiones del Espacio-Tiempo que se ponen de manifiesto incluso ópticamente por la aberración de las imágenes de estrellas que llegan hasta nosotros después de atravesar campos gravitatorios intensos.

LAS IMÁGENES DEL BOOMERANG DETERMINAN LA GEOMETRÍA DEL UNIVERSO

Las simulaciones cosmológicas predecían que, si la geometría era plana, las imágenes del Boomerang debían estar constituidas por puntos fríos y calientes distribuidos como en la imagen superior, ya que una geometría curva hubiera desviado los rayos de luz y distorsionado las imágenes.

La comparación con la imagen del Boomerang indica que el universo es casi totalmente plano.



VII. Instrumentación

Tecnología fuera de este mundo

En Astrofísica, el instrumento ideal está limitado por los tres componentes que atraviesa la luz antes de convertirse en información astronómica: la atmósfera, el telescopio y el detector. De ellos, el único que no podemos modificar a nuestro antojo es la atmósfera terrestre aunque, quizá, podamos obviar o atemperar sus efectos.

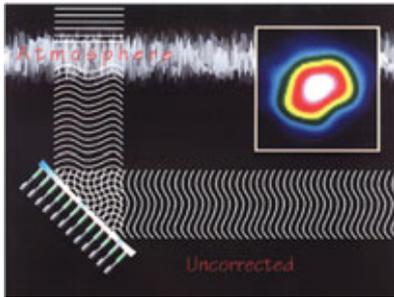
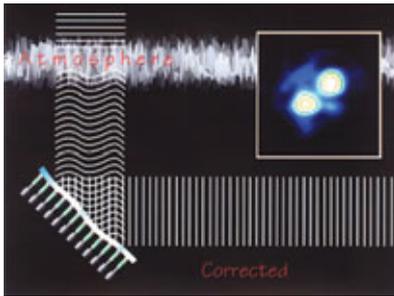
La instrumentación en Astronomía centra su desarrollo en cuatro aspectos fundamentales: sensibilidad, resolución espacial, rango espectral y resolución espectral. De este modo, el mejor instrumento es aquel capaz de captar una mayor porción de la luz proveniente de los objetos celestes en menos tiempo, de separar mejor la localización de esta luz, de observar los astros en cualquier longitud de onda y de distinguir la luz emitida en dos longitudes de onda muy próximas. La atmósfera terrestre limita el rango de longitudes de onda observable desde tierra a la luz visible, absorbe una parte importante de la intensidad luminosa y difumina la luz de los astros, lo que conlleva una disminución de la sensibilidad. Pero sobre todo, la atmósfera degrada la nitidez de la imagen. La turbulencia atmosférica genera pequeñas lentes que se forman y deshacen en un corto período de tiempo y disminuyen la resolución espacial de nuestras observaciones. Los astrónomos han abordado la solución de estos problemas desde tres ángulos diferentes: la astrofísica espacial, la óptica adaptativa y la interferometría.

Astrofísica espacial

La solución directa: ponemos los instrumentos por encima de la atmósfera y evitamos sus problemas. Esta solución ha permitido poner en órbita

Imagen de las cuatro cúpulas que albergan el primer interferómetro de gran diámetro en luz visible e infrarrojo. El VLT (en español, Telescopio Muy Grande) está situado en Cerro Paranal (Chile) y es un proyecto del Observatorio Europeo del Sur. © (ESO).





Estas dos imágenes muestran el principio de la óptica adaptativa, en la imagen superior el frente de onda es deformado a su paso por la atmósfera. En la imagen inferior vemos cómo perturbaciones inducidas en el espejo del telescopio pueden corregir estas deformaciones.
© (ESO).

detectores en cualquier longitud de onda y aumentar la sensibilidad y calidad de imagen, pero está constreñida por su alto coste y por el tamaño del colector. Satélites como IUE (en ultravioleta), el telescopio espacial Hubble (en visible e infrarrojo), Chandra o XMM (en rayos X) nos han proporcionado una visión del universo inexplorada hasta hace 20 años. La misiones espaciales Mariner, Voyager, Viking y, recientemente, Cassini-Huygens, están cambiando continuamente nuestra visión del sistema solar y esperamos proporcionen las claves de su formación.

Óptica adaptativa

Se trata de la solución óptima para aumentar la calidad de imagen desde tierra. Utilizando una estrella vecina (a veces artificial) como patrón, se miden las deformaciones producidas por la atmósfera, se modifica la estructura superficial del espejo del telescopio y se corrigen las deformaciones. El principal inconveniente de esta técnica estriba en que sólo puede aplicarse a un área del cielo pequeña, muy lejos del campo de visión que alcanzan los telescopios actuales. Los grandes colectores (diámetros de 8-10 metros) como Keck, Gemini, VLT y el futuro GTC (telescopio español de 10 m) disponen de esta tecnología, que ya ha producido imágenes impactantes.

Interferometría

La interferometría permite mejorar la resolución espacial de forma considerable. La enorme distancia que nos separa de los objetos celestes provoca que veamos confundidos en el cielo objetos que en realidad se hallan separados. El diámetro del aparato que recoge la radiación determinará su capacidad a la hora de separar los objetos, aunque aumentar el tamaño de los telescopios parece no ser la opción adecuada. Los radioastrónomos nos dieron la respuesta hace ya cuarenta años: construyeron una red de telescopios cuyo diámetro equivalente fuera igual a la distancia entre los telescopios individuales. Cada telescopio debía recibir el mismo plano de luz en el mismo instante y, dado que los telescopios se sitúan en distinto lugar geográfico, era imposible. La solución consiste en jugar con los relojes hasta obtener el mismo frente de ondas emitido por el objeto en un instante dado. Esta técnica fue diseñada para las longitudes de onda en radio (sirvan de ejemplo los instrumentos VLA, EVN, VLBA y ALMA, este último en fase de construcción), aunque su aplicación al rango visible ya ha dado sus primeros frutos con los telescopios del VLT del Observatorio Europeo del Sur (Chile). También se encuentra en proceso de diseño un interferómetro infrarrojo espacial (DARWIN) liderado por la ESA, que se espera nos dé las primeras imágenes de un planeta extrasolar hacia el 2020.

VIII. EL IAA

Instituto de Astrofísica de Andalucía

El IAA, instituto perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), ha establecido como objetivo científico genérico contribuir al aumento del bagaje de conocimientos sobre nuestro universo: desde lo más inmediato, nuestro sistema solar, hasta una escala global del universo en su conjunto. Dada la naturaleza del objeto de estudio, esta meta debe abordarse desde un punto de vista multidisciplinar, con el concurso de teoría, observación y tecnología. Aunque el IAA es un centro de generación de ciencia básica, tiene en cuenta el papel que la Astrofísica juega como usuario y generador de nuevas tecnologías. Para conseguir nuestro objetivo global se llevan a cabo diferentes programas científicos, que abarcan cuatro grandes áreas de la Astrofísica: Sistema solar; Formación, estructura y evolución estelar; Estructura y evolución de las galaxias; y Cosmología.

El Observatorio de Sierra Nevada

La historia del IAA habla claramente de la vocación observacional del centro, manifiesta en la instalación de los telescopios del Observatorio de Sierra Nevada (OSN). La atmósfera cerca de las cumbres de Sierra Nevada goza de unas características extraordinarias para la Astronomía.

Vista panorámica del Observatorio de Sierra Nevada © (OSN)





Cúpula de uno de los telescopios del Observatorio de Sierra Nevada.

La pureza y estabilidad de los cielos permiten obtener medidas fotométricas de una calidad excepcional y de una altísima resolución. Por otro lado, el contenido de vapor de agua atmosférico en Sierra Nevada es tan bajo que permite el paso de gran parte de las radiaciones infrarrojas y milimétricas que normalmente quedan atrapadas en la atmósfera. Si a eso unimos la gran cantidad de noches despejadas, queda claro que el enclave de Sierra Nevada presenta condiciones excepcionales para la observación astronómica. El observatorio, perteneciente al Instituto de Astrofísica de Andalucía, cuenta con un telescopio de 1.5 metros de diámetro, otro de 0.9 y otros de diámetro inferior, que representan el mayor complejo de observación astronómica enteramente español y constituyen la instalación permanente más alta de Europa. En el OSN se llevan a cabo investigaciones lideradas por científicos del IAA y por científicos de otras instituciones nacionales e internacionales.



Sede del IAA.

Agradecimientos:

A todo el personal del IAA, en especial a Silbia López de Lacalle Ramos, Antxon Alberdi, Víctor Aldaya, Emilio Alfaro, José María Castro, Antonio Claret, Emilio José García, Lucas Lara, Luisa Lara, Isabel Márquez, Luis Miranda, José Luis Ortiz, Rafael Rodrigo, Jose Carlos del Toro y Lourdes Verdes-Montenegro. Agradecemos también la colaboración de *Ideal*, en especial a Carlos Valdemoros y Gabriel Pozo.

GLOSARIO

Agujero negro: Tras la explosión de supernova, el núcleo de una estrella muy masiva (más de 15 veces la masa solar) colapsa indefinidamente hasta alcanzar una densidad de materia infinita. Su poderosa atracción gravitatoria impide que incluso la luz pueda escapar de su radio de acción. Se ha convertido en un agujero negro.

Año luz: Distancia que recorre la luz en un año. Tiene un valor de 9,45 billones de Km (9.450.000.000.000 Km).

Big Bang: Término que define, según el modelo cosmológico aceptado, el instante inicial del universo a partir de un punto de infinita densidad de energía, y donde las leyes de la física carecen de validez. Fue acuñado por el físico Fred Hoyle en los años 40, con el fin de ridiculizar dicha teoría.

Cámara CCD: CCD son las siglas en inglés de Dispositivos de Carga Acoplada (*Charged-Coupled Device*). Estos detectores, que han revolucionado el mundo de la Astrofísica observacional, consisten en un dispositivo altamente sensible a la luz, capaz de registrar electrónicamente su intensidad y punto de llegada. Permiten obtener imágenes digitales que pueden posteriormente tratarse con programas informáticos.

Corrimiento al rojo cosmológico: Es el desplazamiento del espectro electromagnético de un objeto hacia longitudes de onda mayores (hacia el «rojo» del espectro), debido al movimiento relativo entre el observador y el objeto emisor.

Elementos químicos pesados: Se denominan elementos pesados o metales a todos los elementos químicos, salvo hidrógeno y helio. Constituyen una fracción mínima de la composición del universo, frente al 80% de hidrógeno y el 20% de helio. Se originan a partir de procesos de fusión en el interior de las estrellas. Su presencia y abundancia es un indicador de la edad de éstas y del medio interestelar.

Enana blanca: En las etapas finales de una estrella con masa siete veces menor que la del Sol, toda la envoltura se expulsa. Lo que queda es un objeto enormemente compacto formado principalmente por carbono y oxígeno que va enfriándose lentamente y se denomina enana blanca. Su densidad es tal, que una cucharada de enana blanca pesaría unas 100 toneladas.

Espectro electromagnético: Llamamos espectro electromagnético de un objeto a la representación de la intensidad de la radiación que emite, en función de su longitud de onda. Las condiciones físicas del objeto implican que emita ondas electromagnéticas de distinta intensidad en cada longitud de onda; por ello, la observación en un determinado rango del espectro (radio, visible, etc.) determina la naturaleza del fenómeno físico estudiado y el tipo de detector empleado.

Estrella de neutrones o pulsar: El resto estelar de una explosión de supernova es, para estrellas de entre 7 y 15 masas solares, un objeto que colapsa por su propio peso. La presión se hace tal que toda la materia se descompone en neutrones. Estos objetos rotan muy rápidamente y emiten una radiación muy focalizada en un eje, que sólo es detectable cuando éste corta con el eje de nuestra visual, por lo que parecen pulsar.

Excentricidad de una órbita: Es un número, entre 0 y 1, que indica la forma de la órbita, cuanto más "alargada" es la elipse que dibuja mayor es su excentricidad. El valor nulo corresponde a una órbita circular.

Gigantes rojas: Etapa en la vida de una estrella posterior a la Secuencia Principal. Durante esta fase, la estrella se caracteriza tener por un núcleo de helio que se fusiona en carbono, y una envoltura que se dilata tremendamente, hasta un diámetro entre 10 y 100 veces mayor que el del Sol.

Ley de Hubble: Edwin Hubble descubrió que las galaxias se alejan todas unas de otras, y que cuanto más lejanas están, a mayor velocidad lo hacen. Esta sencilla ley, que refleja la expansión del universo, es conocida como Ley de Hubble. En ella, la constante que relaciona velocidad con distancia es inversamente proporcional a la edad del universo, que actualmente se estima en 14.000 millones de años.

Longitud de onda: Distancia entre dos crestas sucesivas de una onda. Cuanto mas pequeña es, mayor energía comunica la onda. En la radiación electromagnética, las longitudes de onda de la radiación gamma son las más pequeñas y las de la radiación radio las más grandes.

Planeta extrasolar: Planeta situado fuera del sistema solar. Aunque aún no existen imágenes directas de un planeta extrasolar, las técnicas actuales han permitido detectar por métodos indirectos más de un centenar de planetas de distintos tamaños y masas orbitando en torno estrellas que no son nuestro Sol.

Radiación: La energía emitida por los objetos celestes llega a nosotros tras recorrer, a la velocidad de la luz, enormes distancias en el vacío. La manera en que se transmite es lo que denominamos radiación electromagnética, y tiene la misma naturaleza, por ejemplo, que la que inunda una habitación iluminada por una bombilla. Consiste en un infinito conjunto de ondas electromagnéticas, que agrupamos de menor a mayor longitud de onda en: rayos gamma, rayos X, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio.

Reacción termonuclear: Consiste en la fusión de varios núcleos de elementos ligeros para formar otros más pesados. Este tipo de reacciones, que necesitan de una temperatura de varios millones de grados, desprenden una ingente cantidad de energía y son la base de las bombas de hidrógeno, pero también la fuente de energía de las estrellas. En el interior del Sol, la fusión de hidrógeno en helio convierte, en un segundo, más de cuatro millones de toneladas de materia en energía, de la cual, una ínfima cantidad es captada por la Tierra.

Secuencia Principal: Tras un nacimiento violento, las estrellas entran en una fase estable, caracterizada por la fusión del hidrógeno en helio. Esta "tranquila" etapa se denomina Secuencia Principal, y en ella pasa la estrella el 90% de su existencia. El Sol lleva aproximadamente unos 5.000 millones de años en dicha etapa.

Unidad astronómica (UA): Es la distancia media entre la Tierra y el Sol. Una UA corresponde a unos 150 millones de Km y a 0.000015 años luz. Es la unidad de distancia utilizada en el estudio del sistema solar.

Velocidad de la luz: Según uno de los postulados de la teoría de la relatividad espacial de Einstein, nada puede superar la velocidad de la luz en el vacío. Ésta es de 299.792 Km/s.

VLA (interferómetro): Siglas de *Very Large Array*. Se trata de un conjunto de 27 radioantenas de 25 metros de diámetro situadas en Socorro, Nuevo Méjico (EE.UU). Los datos tomados por las distintas antenas son combinados electrónicamente para obtener la resolución que tendría una única antena de 36 Km. de diámetro.