

Desde el inicio de los tiempos, el Cosmos ha despertado una ávida curiosidad en el ser humano. Una curiosidad que ha llevado al hombre a preguntarse la razón de nuestro Universo y su papel en el mismo, y a una búsqueda continua de respuestas. Desde la Antigüedad hasta nuestros días, la búsqueda de explicaciones, cada vez más elaboradas, ha dado lugar a una Ciencia que, en su desarrollo ha ido, a veces, distanciándose de la sociedad.

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) se ha planteado el reto de acortar esas distancias: la Ciencia forma parte del patrimonio cultural de los pueblos y el IAA, sin olvidar sus objetivos científicos, intenta mantener un contacto directo con la ciudadanía, satisfacer su curiosidad sobre el Universo, recoger las demandas sociales sobre la Ciencia y hacer partícipe a la sociedad de la investigación realizada bajo su patrocinio. Éste es el principal motor que

ha llevado al personal del IAA a trabajar en la producción del suplemento que ahora se presenta con motivo de la celebración de la Semana Europea de la Ciencia y la Tecnología. Este suplemento proporciona una visión de nuestro Universo mediante un lenguaje sencillo y ameno, a la vez que riguroso, y con el indispensable apoyo de imágenes.

Esperamos que el lector disfrute con su contenido.

*Rafael Rodrigo, Director del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA- CSIC)*

# Una mirada al Cosmos

## INDICE

El sistema solar	2 - 3
Las estrellas	4 - 5
Galaxias	
• La Vía Láctea	6
• Evolución interna	7
• Evolución externa	10
Póster	8 - 9
Astrofísica de altas energías	11
Cosmología	12
Instrumentación	13
El IAA	14
La astronomía en Granada	15
«Del telescopio al papel»	16



## EL SISTEMA SOLAR :

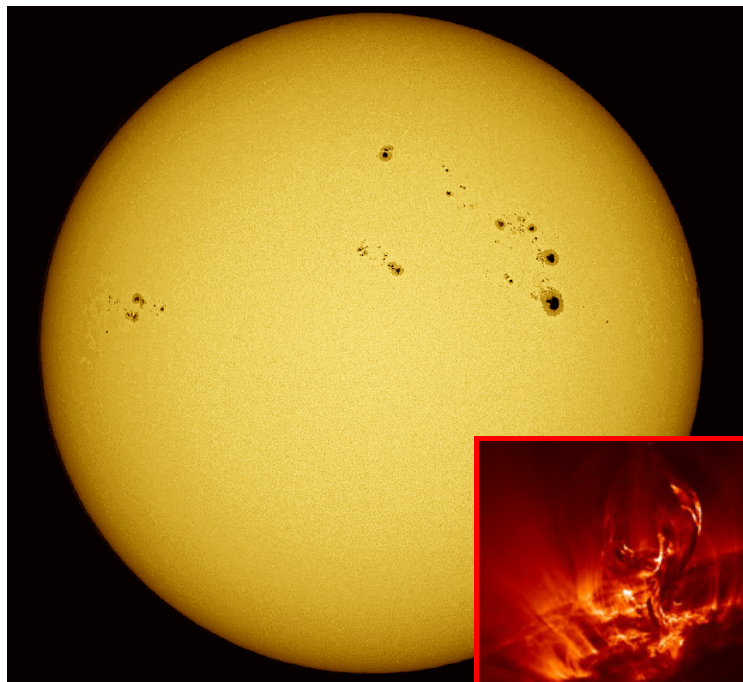
# NUESTROS VECINOS MÁS CERCANOS

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 4600 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 o 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,



El Sol posee una atmósfera de la que proviene la mayoría de la luz que recibimos. En las figuras podemos distinguir las capas atmosféricas: la más baja (el disco entero) y la más alta (un detalle). Ésta última, denominada corona, presenta espectáculos inigualables de eyecciones de materia que son detectadas en la Tierra.

Créditos disco: Th. Pellauer (IFA) y J. A. Bonnet (IAC).  
Créditos detalle: So.ohseed, Martin. Solar and Astroph. Lab.

mientras que en la superficie es «tan solo» de 5600 grados. Una estrella con las características del Sol tiene una vida media de unos 9000 a 10000 millones de años, de modo que nuestra estrella ha vivido ya la mitad de su existencia.

### 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).

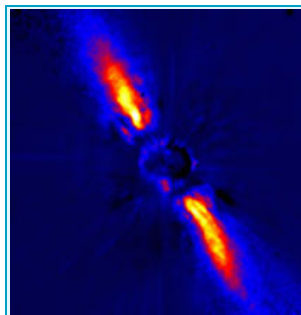
El primero abarca Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, todos ellos con superficie sólida y un núcleo de hierro y rocas ricas en silicio. Esta característica común parece consecuencia de que, a distancias cortas al Sol, la temperatura era muy elevada para que los gases condensaran y formaran hielos. Pero 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 (CO<sub>2</sub>), una presión en la superficie 94 veces superior a la terrestre (equivalente a una profundidad en el mar de 1000 metros) 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. Ésto 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 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.

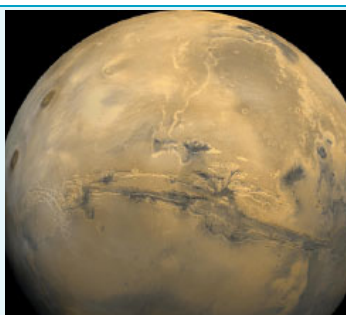
Marte presenta una mezcla de las características mencionadas hasta ahora. Tiene una atmósfera tenue de dióxido de carbono con una presión en la superficie de seis milibares, equivalente a la terrestre a 50 kilómetros de altura, y una temperatura de -63° C. La casi totalidad de la superficie marciana 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<sub>2</sub>. En «días claros», las



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.

Izquierda: disco protoplanetario, embrión de un posible sistema solar. Créditos: ESO.

Derecha: Marte, planeta de carácter sólido, y Neptuno, un gigante gaseoso. Créditos: NASA.



## HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: LA ANTIGÜEDAD

### BABILONIA

El interés astronómico de este pueblo obedecía a las necesidades que plantea el desarrollo de la agricultura. Como el cultivo de cereales exigía un conocimiento de la alternancia de las estaciones, establecieron el día de 24

4000 A.C.



Tabla babilónica con registro de información astronómica. Data del 550 aC aprox.

\*Todas las palabras en verde se completan con su definición en el glosario de las páginas 14 y 15.

### GRECIA

Los griegos fundaron la astronomía occidental al intentar explicar los fenómenos naturales sin atribuirlos a causas sobrenaturales.

**Aristóteles** (384-322 aC) probó el carácter esférico de la Tierra y elaboró una teoría geocéntrica que dominó el pensamiento científico durante 1800 años: la Tierra se encontraba en el centro del Universo y el Sol, la Luna, los planetas y la

S. IV- I A.C.



esfera de estrellas fijas se movían alrededor de ella.

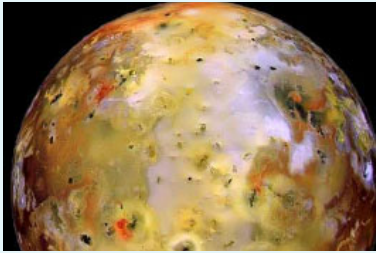
**Ptolomeo** (85-165 aC) compiló el saber astronómico de su época en el *Almagesto*. Estudió el movimiento de los planetas y elaboró un sistema donde la Tierra, situada cerca de un centro común, estaba rodeada por círculos que dibujaban la trayectoria de los seis astros conocidos.

Universo Ptolomeo

Créditos: Peter Apian, Cosmographia.

## Otras «lunas»

Aunque la Tierra cuenta con la Luna y Marte con sus dos satélites, los planetas jovianos ostentan el récord en variedad de satélites. Júpiter tiene, «por ahora», 32 satélites. Quizás el más atractivo, pero también el más terrorífico, es lo, donde las explosiones volcánicas de



La casi macabra cara de lo. Créditos: NASA

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.

## 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,



Ida y Dactilo. Créditos: NASA

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).

imágenes que proporcionan las misiones espaciales muestran un planeta cuya superficie se asemeja aún más a la terrestre, con tormentas probablemente causadas por flujos masivos de agua de hace millones de años. Si esto fue así, quizá Marte reunió las condicio-

nes 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 nebu-

losa 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.

Cada planeta joviano posee un sistema de anillos: Júpiter posee solo uno; Saturno muestra un maravilloso cinturón compuesto por miles de anillos individuales; a Urano le rodean cinco finísimos anillos, mientras que el sistema de Neptu-

no 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 observa-

ciones 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?

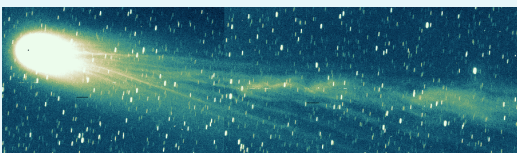
¿Cuál es la estructura, composición y comportamiento que tienen los cuerpos menos evolucionados del Sistema Solar?



Cometa Hale-Bopp. Créditos: Jochen Rink, Canadá

## Estrellas con cabellera

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.



Cometa Hyakutake. Créditos: Herman Mikuz, Eslovenia.

## y en el IAA...

- ▶ Investigamos los campos magnéticos solares.
- ▶ Investigamos de forma teórica y observacional las atmósferas de los planetas -incluida la Tierra- y satélites del Sistema Solar para desarrollar modelos que nos proporcionen datos sobre su composición, temperatura, presencia de nubes, etc., y que sirvan de apoyo científico a misiones espaciales como Cassini-Huygens, en ruta hacia Saturno; TIMED (de la NASA) y ENVISAT (Agencia Espacial Europea, ESA) alrededor de la Tierra; y Mars Express, que emprenderá viaje a Marte en Junio del 2003.
- ▶ Efectuamos observaciones telescópicas de los

Cuerpos Menores (asteroides, cometas,) cuyo estudio detallado nos está desvelando características primitivas del Sistema Solar. Esta investigación es de crucial importancia para interpretar los datos sobre un cometa y dos asteroides que la Misión Rosetta nos proporcionará entre el 2006 y el 2013.

▶ Se analizan las oscilaciones estelares, así como la detección del paso de planetas extrasolares frente al disco estelar. Todo ello como preparación para la Misión COROT, un satélite diseñado para medir las pulsaciones de las estrellas (astrosismología) y el primero que puede encontrar planetas de tamaño parecido al de la Tierra girando alrededor otras estrellas.

## ...LA ANTIGÜEDAD

### ASTRONOMÍA ÁRABE

Mientras Occidente sufría la fase de oscurantismo (S.X-XI), los árabes retomaron la investigación astronómica. Tradujeron y recopilaron textos clásicos -entre ellos el *Almagesto*- y catalogaron muchas estrellas, algunas de las que aún conservan su nombre original. También desarrollaron la instrumentación, con inventos como el astrolabio.

S. XI



Astrolabio. 1000 dC.

## HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: EL RENACIMIENTO

### NICOLÁS COPÉRNICO

Convencido de la inexactitud del sistema geocéntrico, Copérnico comenzó a desarrollar una teoría donde el Sol ocuparía el centro del Universo y que quedaría plasmada en su obra «*De revolutionibus orbium coelestium*».

1473-1543



Universo Copérnico

### TYCHO BRAHE

En 1572, Tycho Brahe observó una nueva estrella en la constelación de Casiopea. Este descubrimiento, que hoy sabemos se trataba de una supernova, o explosión de una estrella moribunda, minó las teorías de Aristóteles de un Universo sin cambios. Uraniborg, observatorio construido por Brahe en la isla danesa de Hven.

1546-1601



## EVOLUCIÓN ESTELAR:

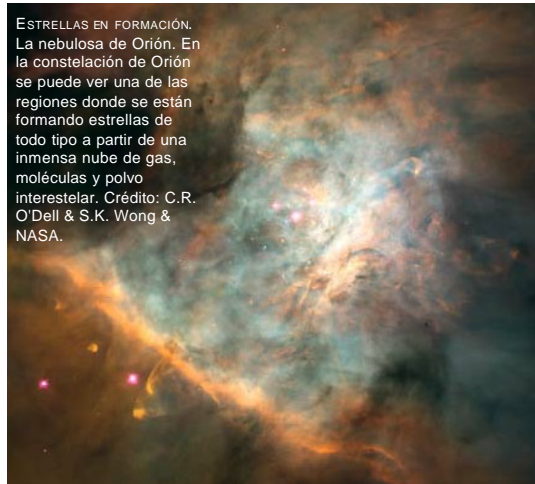
# EL CICLO DE VIDA DE LAS ESTRELLAS

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. Hertzprung 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 (ver friso página 7). 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



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. Crédito: C.R. O'Dell & S.K. Wong & NASA.



▶ 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. Créditos: D. Malin & Anglo-Australian Observatory.

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 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: 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 mode-



▼ 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. Créditos: Hubble Heritage Team

los 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 placida. 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.

## 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.

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

## ...EL RENACIMIENTO

**JOHANNES KEPLER 1571-1630**  
Empleando las observaciones de Brahe, Kepler publicó «*Astronomía Nova*» (1609), donde proponía la rotación de los planetas siguiendo órbitas elípticas. Sus leyes permitieron predecir la posición de los planetas.



Órbitas elípticas, con el Sol en un foco.

**GALILEO GALILEI 1564-1642**  
En 1609 comenzó a utilizar el telescopio para observaciones astronómicas, gracias al que descubrió las manchas solares y los cráteres lunares. Observó las lunas de Júpiter y las fases de Venus, ambas incom-

1564-1642



patibles con el modelo geocéntrico que la Iglesia defendía. Considerado el padre de las ciencias modernas por basar sus ideas en experimentos, fue juzgado y condenado de por vida bajo arresto domiciliario por disentir de la opinión eclesiástica.

## LA ASTRONOMÍA MODERNA

**ISAAC NEWTON 1643-1727**

Antes de los 25 años ya había desarrollado avances revolucionarios en matemáticas, óptica, física y astronomía, pero la Ley de Gravitación Universal constituyó su gran logro. Newton introdujo una aproximación matemática a los movimientos

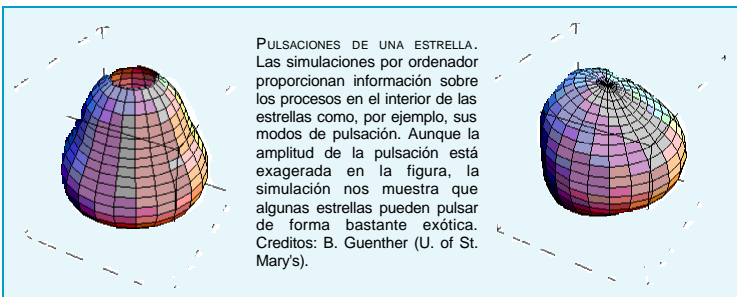


de los astros y postuló que la gravedad es la fuerza que mantiene a los planetas en órbita y que disminuye con la distancia. Expuso sus leyes en su obra «*Philosophiæ naturalis principia mathematica*». También creó los telescopios reflectores.



**CEMENTERIOS ESTELARES:**  
 Arriba y derecha: nebulosas planetarias. 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. En el sentido de las agujas del reloj: NGC2392 (Nebulosa del Esquimal), IC418, NGC6543 (Nebulosa del Ojo de Gato), Mz3 (Nebulosa de la Hormiga).  
 Créditos: Hubble Heritage Team/NASA/ESA/A, Fruchter & ERO Team (STScI)/R. Sahai, J. Trauger and the WFPC2 Science Team.

Izquierda: la 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 púlsar, que gira a una velocidad de treinta vueltas por segundo.  
 Créditos: FORS Team, VLT, ESO.



**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.  
 Créditos: 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.

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 púlsar-, 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 de que estamos hechos los seres vivos.

**y en el IAA...**

- ▶ Se estudian las etapas iniciales de la formación de estrellas masivas y no masivas con observaciones del gas y moléculas por medio de técnicas de interferometría en radio.
- ▶ Investigamos los procesos de formación de estrellas por medio del estudio de cúmulos muy jóvenes usando espectroscopia y fotometría óptica e infrarroja.
- ▶ Estudio de los procesos de acrecimiento y eyección de materia en las protoestrellas a través de observaciones fotométricas y espectroscópicas en el óptico, infrarrojo y rayos X.
- ▶ Se estudian sistemas binarios que contienen

- estrellas de neutrones o agujeros negros para deducir el rango de masas de estos objetos.
- ▶ Se crean modelos teóricos de la evolución estelar para estrellas de diferente masa.
- ▶ Se investiga la estructura interna de las estrellas por medio de su variabilidad y sus oscilaciones con técnicas fotométricas de alta precisión desde tierra y con satélites.
- ▶ Se investiga la formación y evolución de las nebulosas planetarias a través de observaciones de las envolturas y su dinámica.
- ▶ Estudio de la expansión angular de supernovas por medio de técnicas interferométricas.

**HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: LA ASTRONOMÍA MODERNA**

1656-1743

EDMOND HALLEY



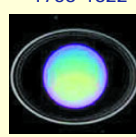
Estudió las órbitas de los cometas y predijo, utilizando las leyes de Newton, que el cometa visto en 1531, 1607 y 1682 reaparecería en 1758. Al confirmarse la predicción, el cometa fue nombrado en su honor.

También comparó la posición de las estrellas con el catálogo de Ptolomeo y concluyó que debían tener movimiento propio, lo que detectó en tres de ellas.

WILLIAM HERSCHEL

Constructor de grandes telescopios reflectores, descubrió el planeta Urano en 1782. Incrementó el catálogo de nebulosas de 100 a 2500 y descubrió las estrellas binarias que, enlazadas por su fuerza de gravedad, rotan alrededor de un centro común.

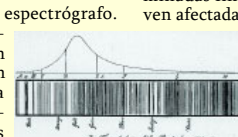
1738-1822



Planeta Urano.

1787-1826 FRAUNHOFER

Introdujo el uso del espectrógrafo. Este instrumento descompone la luz en colores de forma tan fina que se observa entrelazado con centenares de líneas negras, correspondientes a los elementos químicos que forman el objeto. Estas líneas -deno-



Espectro del Sol.

minadas líneas de Fraunhofer-, se ven afectadas por la temperatura, el magnetismo y otras propiedades de la materia, y permitieron el estudio a larga distancia de la composición y características de los objetos celestes, lo que a su vez dio lugar al nacimiento de la Astrofísica.



## FORMACIÓN DE LA VÍA LÁCTEA:

# HISTORIA DE UN ENCUENTRO

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 sub-sistemas, 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.

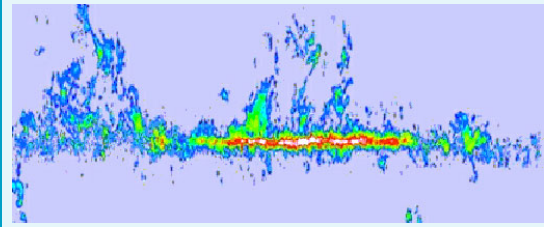
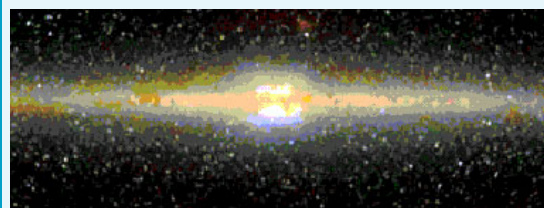
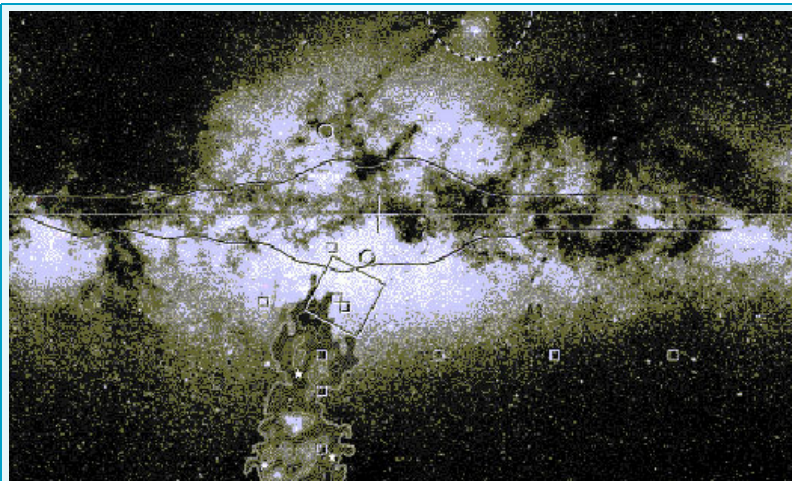
### El «modelo tranquilo»

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

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 hom-

bre 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 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. Créditos: R. Ibata, R. Wyse, R. Sword.

► 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. Créditos: NASA.

► 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. Créditos: CfA-Harvard.

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 (ver página 10),

## y en el IAA...

- El plano galáctico ha sido siempre considerado como tal: un plano. Sin embargo, éste tiene una estructura tridimensional cuyo conocimiento puede ofrecer mucha información acerca de los procesos de formación de estrellas en el disco galáctico, así como de la interacción entre el disco y el halo.
- Mediante la búsqueda de escombros en el halo se intenta dilucidar qué cúmulos y estrellas se generaron en el colapso de la nube de gas primigenia y cuáles son los residuos de una galaxia capturada.
- Estudiamos la estructura de la fuente compacta situada en el Centro Galáctico, fuente probablemente asociada a un agujero negro supermasivo.

## 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.

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 formado 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 armandose y cuyas piezas ni siquiera conocemos.

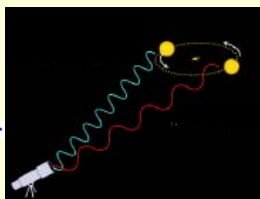
## HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: LA ASTRONOMÍA MODERNA

### 1842 EL EFECTO DOPPLER

Christian Doppler establece que la frecuencia del sonido depende de la velocidad relativa entre el emisor y el receptor. Al igual que una sirena de policía nos llega con un tono más agudo al acercarse y un tono más grave al alejarse, la luz se torna de color azul cuando la fuente se acerca y de color rojo cuando

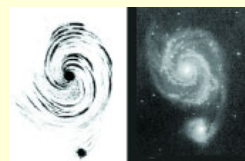
se aleja. Esto permite a los astrónomos determinar la velocidad y la dirección del movimiento de un objeto con respecto a la Tierra.

La imagen muestra cómo las ondas de luz aumentan su frecuencia cuando la fuente se acerca a nosotros y la reducen si se aleja. Créditos: Universidad de California.

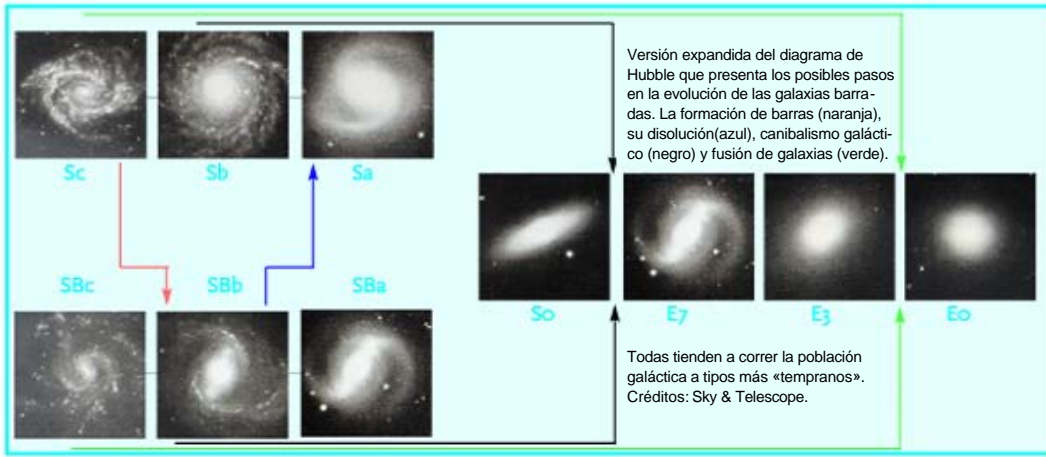


### LORD ROSSE 1800-1867

Lord Rosse (Charles Parsons) dedicó gran parte de sus observaciones al estudio de enigmáticas nebulosas que parecían contener estrellas. Gracias a Leviatán, el telescopio más grande de la época con 1,8 m, descubrió que algunas de ellas tenían forma espiral.



Dibujo de Messier 51 por Lord Rosse, comparado con una imagen moderna. Créditos: SEDS



y en el IAA...

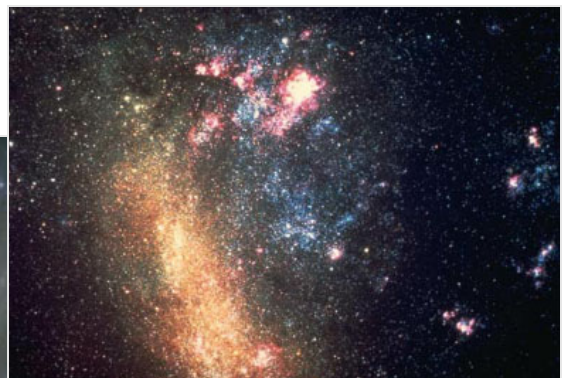
- Se estudia la física de las galaxias enanas, utilizando datos de grandes telescopios, como el VLT, para determinar la cinemática del gas y las estrellas.
- Se trabaja en las conexiones de la actividad nuclear con la presencia de barras y la formación estelar violenta en el caso de galaxias cercanas.
- Se estudian las propiedades de galaxias espirales aisladas, como punto de referencia para entender los mecanismos físicos que ocurren en situaciones de interacción, más complejas.

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 (imagen superior). 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 nebulosas de Magallanes, las dos galaxias más próximas a la nuestra, visibles a simple vista desde el Hemisferio Sur (imagen derecha). 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.

**GALAXIAS: 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.



Izquierda: galaxia espiral barrada junto a pequeña galaxia elíptica. Créditos: Anglo Australian Observatory.

Arriba: la Nube de Magallanes, galaxia irregular. Créditos: ESO.

**Otras galaxias**

Existen galaxias que no se ajustan al esquema de Hubble, como las galaxias perturbadas por la interacción con otras (ver página 10). 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.

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.

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.

**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?

**Efectos de las barras**

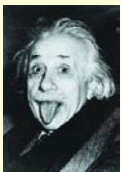
El esquema de clasificación de Hubble presenta dos secuencias paralelas, una para galaxias sin

**HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: EL SIGLO XX**

1900-1916

**NEUEVA FÍSICA**

Max Planck y Albert Einstein establecen el cuerpo teórico de la "Nueva Física". La teoría cuántica de Planck y la relatividad general de Einstein permiten abordar el estudio del microcosmos y macrocosmos.



Albert Einstein

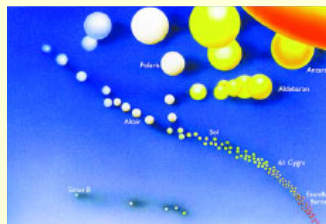


Max Planck

1911

**EVOLUCIÓN ESTELAR**

Ejnar Hertzsprung y Henry Russell establecen, de forma independiente, la relación empírica entre el color (temperatura) y luminosidad (masa) de las estrellas, expresada en el diagrama H-R. Más adelante (1920-40), Arthur Eddington y Subrahmayan Chandrasekhar fijan los principios teóricos de la evolución estelar que permite explicar la distribución de estrellas a lo largo del diagrama H-R.



**Diagrama H-R:** la mayoría de estrellas se ubican en la secuencia principal, extendiéndose desde el extremo superior izquierdo hasta el inferior derecho con números crecientes hacia el extremo rojo pálido. Por encima de la secuencia principal hay muchas gigantes como Aldebarán y escasas supergigantes. Minúsculas enanas blancas se extienden a lo largo de la base.

# El orden del Universo

## 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.



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

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.



Saturno. Hubble Heritage Team

## Planetas

Tamaño: Entre 2.000Km (Plutón) y más de 100.000Km (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.



Galaxia espiral NGC 1232. European Southern Observatory

## 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.

## Estrellas

Tamaño: Desde 300.000 Km. (enanas blancas) hasta 1000 millones de Km. (super 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.

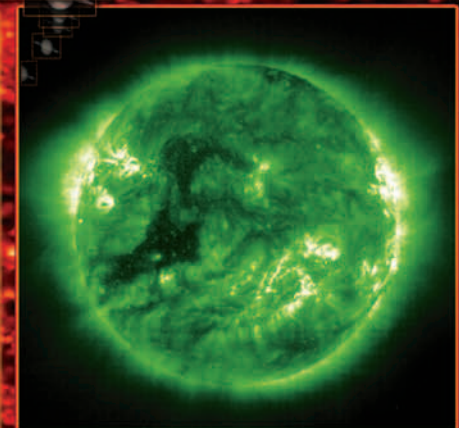


Imagen del Sol en emisión Fe XII. SOHO

## Nebulosas de gas

Tamaño: Entre 0,3 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. Estas se relacionan tanto con el nacimiento de nuevas estrellas (nebulosas de formación), como con la muerte de aquellas (nebulosas planetarias y restos de supernovas).



Nebulosas de Orión. O'Dell & S.K. Wong (Rice University), NASA



Cúmulo de Las Píades. Anglo Australian Observatory/Royal Observatory Edinburgh.

## Cúmulos estelares

Tamaño: De 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.



**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. Ésto 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.

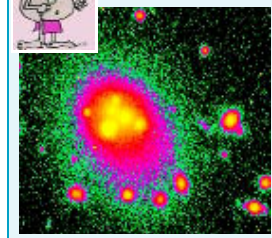
**Cristales rotos en choques galácticos**

Los choques entre estrellas son prácticamente inexistentes, debido a las grandes separaciones este-

res. 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<sup>19</sup> 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 largos colas o plumas, o constituyen un puente de materia entre las galaxias.

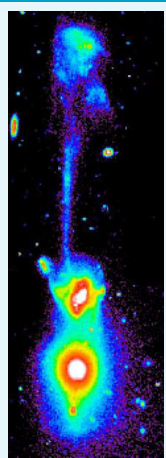
Viajando a la velocidad de la luz emplearíamos 200.000 años en llegar a las galaxias más cercanas a nosotros, las Nubes de Magallanes

**Galaxias canibales: 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 canibal 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.



Créditos: M. J. West (St. Mary's U.).

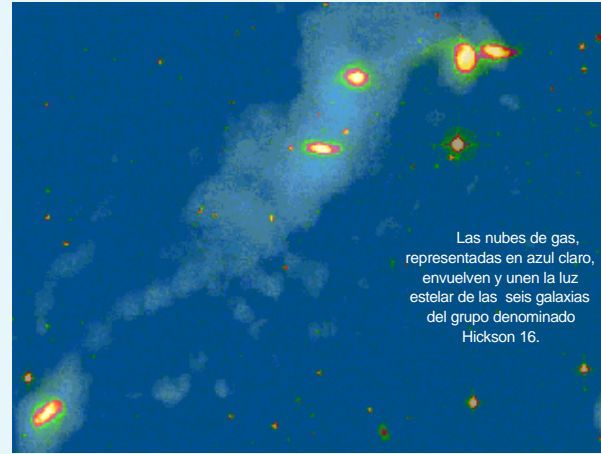
- y en el IAA...**
- ▶ Se estudia la formación de galaxias enanas como residuo de colisiones violentas, mediante el estudio del gas molecular.
  - ▶ Se estudia el gas atómico de grupos compactos de galaxias con el interferómetro VLA, gracias al que se ha descubierto una población de grupos pobres en gas atómico.
  - ▶ Se utiliza la distribución de la luz de las galaxias de los cúmulos para calcular la distancia que nos separa de ellos.
  - ▶ Se compara la formación de estrellas en los cúmulos de galaxias para comprender la influencia de la vida en comunidad sobre 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.

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.  
 Créditos: P.A.Duc (CFHT)



Las nubes de gas, representadas en azul claro, envuelven y unen la luz estelar de las seis galaxias del grupo denominado Hickson 16.

Créditos: L. Verdes-Montenegro y colaboradores (IAA)

**▲ 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.



**◀ 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.

El cúmulo de galaxias de Coma.

Créditos: O. López-Cruz (INAOEP).

**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.
- ¿ 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.
- ¿ 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.
- ¿ 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.

**HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: EL SIGLO XX**

**1918**  
**HARLOW SHAPLEY**  
 Shapley determina la distancia a los cúmulos globulares (agrupaciones estelares esféricas), mide el tamaño de la Vía Láctea y la distancia del Sol al centro galáctico.



Diagrama de la Vía Láctea, con el Sol en uno de sus brazos.

**LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO**  
 Edwin Hubble descubre que nuestra galaxia no es la única en el Universo: hay infinidad de ellas y, lo más importante, se alejan las unas de las otras, lo que sólo se explica si el propio Universo se está expandiendo en todas direcciones. Esto implica que el Universo es dinámico, y que en un pasado tenía unas dimensiones más pequeñas que el radio de un protón.

**1929**  
 Hubble en el telescopio de Monte Palomar, desde donde realizaba observaciones. (California Institute of Technology)

**RADIOASTRONOMÍA**  
 Karl Jansky, empleado de los laboratorios de la "Bell Telephone", descubre una persistente emisión en ondas de radio proveniente del centro de la Galaxia. Da lugar al nacimiento de la astronomía en radio, una nueva puerta al conocimiento del Universo.

**1931**



Detectores de ondas de radio.

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 desconocido. Tan sólo la existencia de grandes 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 gra-

## 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.



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. Créditos: NASA/SAO/R. Kraft et al.

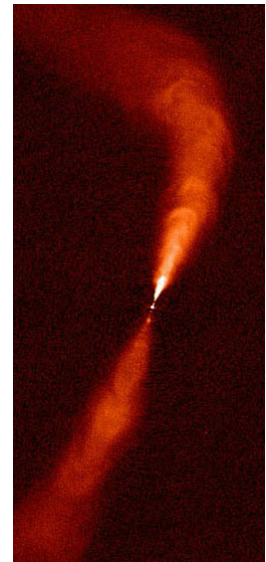
vitatorio fuese, hasta una cierta distancia, lo suficientemente intenso como para no dejar escapar ni siquiera la luz. Se les llamó agujeros negros, puesto que nunca podrían observarse directamente, aunque sí los efectos en su entorno. Precisamente, la observación de esos efectos ofreció certeza experimental 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 escapatória 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 record 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.



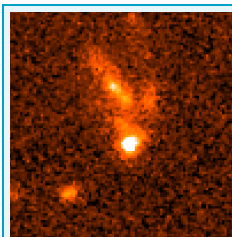
Chorros de partículas relativistas surgiendo del núcleo de la galaxia NGC 383. Esta imagen en radio está tomada con el VLA, un conjunto de 27 radiotelescopios situados en el estado de Nuevo México (EE.UU.) que actúan de manera conjunta para producir imágenes de muy alta resolución angular (NRAO/AUI/NSF).

### y en el IAA...

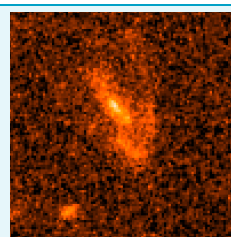
- ▶ Se investiga la naturaleza y evolución de los chorros en cuásares mediante observaciones de radiointerferometría y simulaciones numéricas.
- ▶ Se estudia la conexión de los cuásares con la morfología de las galaxias que los albergan y con la presencia de otras galaxias cercanas, con imágenes profundas de gran detalle proporcionadas por telescopios de gran tamaño (VLT).
- ▶ Con el fin de detectar en tiempo real los GRBs en coordinación con satélites científicos de altas energías, investigadores del IAA disponen de tiempo en distintos observatorios y satélites científicos. Con el mismo fin han desarrollado el primer observatorio robotizado del país.

### 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?



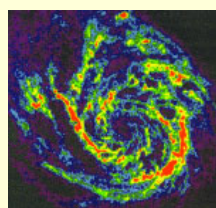
GRB, ANTES Y DESPUÉS. El remanente óptico de la explosión de rayos gamma del 23 de enero de 1999 observado por el telescopio espacial Hubble a los 16 días de la explosión (izquierda). Se trata del objeto puntual en el centro de la imagen. Un año después, el remanente de GRB 990123 ha desaparecido (derecha), 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).



## HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: EL SIGLO XX

### EL MAPA DE HIDRÓGENO

1944 Van der Hulst demuestra que el hidrógeno existente en el espacio debería emitir en un tipo de frecuencia muy característica y concreta, situada en la parte de radio del espectro. Esta predicción, comprobada años después, dotó a los astrónomos de una herramienta única para detectar hidrógeno, el elemento más abundante y la materia prima del Universo. Permitted realizar un mapa de las nubes

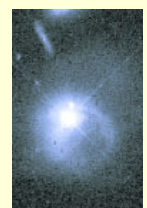


de hidrógeno de nuestra galaxia, y descubrir su estructura espiral, su centro y sus movimientos. También se utiliza para identificar tales nubes en otras galaxias y determinar su movimiento y velocidad, y cómo interactúan con otras galaxias.

Mapa de hidrógeno de la galaxia M-101, con una escala del rojo al azul para reflejar la intensidad de la emisión. Créditos: Telescopio Espacial Hubble.

### EL PRIMER CUÁSAR

1960 Se descubre una importante emisión en radio asociada a una fuente de luz puntual: un cuásar (cuasi-estrella). En 1963, Maarten Schmidt descubrió, analizando los espectros, que estos objetos se encontraban a mas de 14000 millones de años-luz de distancia, y emitían ¡100 veces más energía que toda la Vía Láctea!





**COSMOLOGÍA:**

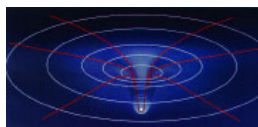
Los resultados de los últimos experimentos sobre la radiación de fondo de microondas parecen indicar que el Universo a gran escala tiene estructura plana, es decir, para triángulos suficientemente grandes el teorema de Pitágoras es válido. En este caso, el

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 UNIVERSO A GRAN ESCALA

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.

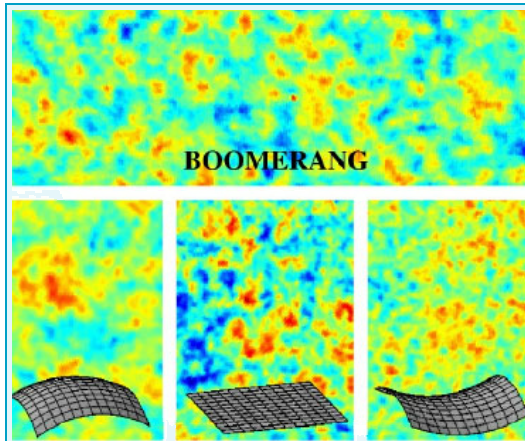
Por Espacio-Tiempo entendemos la trayectoria del universo a lo largo del tiempo, y es la evolución del universo a partir de un instante dado lo que constituye el objeto de estudio de la Cosmología. En concreto, cabe preguntarse por ciertos parámetros característicos como son la forma del universo en 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.



Créditos: M. Begelman y M. Rees.

**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



**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.

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 moderadamente 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.

**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, simi-

lar 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.

**1. Espacio-Tiempo cerrado: Universo con curvatura positiva.**

Este universo creará un Big Crunch.

**2. Espacio-Tiempo abierto: Universo con curvatura nula.**

Este universo crecerá con el tiempo a velocidad constante.

**3. Espacio-Tiempo abierto: Universo con curvatura negativa.**

Este universo crecerá indefinidamente desde el Big-Bang de modo acelerado.

**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).

**y en el IAA...**

- ▶ Se estudia la influencia de los fenómenos cuánticos macroscópicos sobre las ecuaciones clásicas de la Cosmología: Quintaesencia.
- ▶ Se profundiza en la teoría cuántica de la gravitación y unificación con el resto de las interacciones. Implicaciones en el Modelo Estándar.
- ▶ Se analiza la distribución de materia a gran escala. Evolución cósmica.

**lo que no sabemos...**

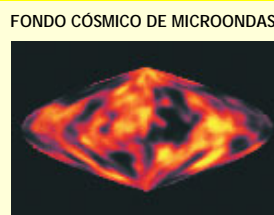
- ❓ ¿Cuál es la influencia del modelo cosmológico utilizado en la interpretación de medidas Cosmológicas a gran escala, como las de Boomerang?
- ❓ ¿Es la energía oscura el ingrediente dominante en el Universo?
- ❓ ¿Qué es realmente la gravedad cuántica y qué sería la cosmología cuántica?

**HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: EL SIGLO XX**



**1962**  
**ASTROFÍSICA ESPACIAL**  
Se inicia la Astrofísica espacial con el lanzamiento de la sonda Mariner 2 y las primeras imágenes de Venus fuera de la atmósfera terrestre. La posterior puesta en órbita de telescopios con detectores en longitudes de onda muy cortas da lugar al nacimiento de la Astrofísica de Altas Energías.

**1964**  
Arno Penzias y Robert Wilson, ingenieros de la Bell Telephone, descubren por casualidad una radiación de microondas, de muy baja temperatura, que inunda el Universo por igual y en todas direcciones. Se trata de la radiación cósmica de fondo, un vestigio de los primeros instantes de vida del Universo, que aporta



información sobre cómo era nuestro Universo cuando nació y sobre cómo se formaron las galaxias que hoy lo pueblan. Fue el espaldarazo definitivo al modelo del Big-Bang, y recibieron por su descubrimiento el premio Nobel en 1978.

Fondo cósmico de microondas. Créditos: IAC

## 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, quizás, podamos obviar o atemperar sus efectos.

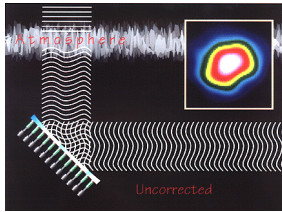
La instrumentación en Astronomía centra su desarrollo en cuatro aspectos fundamentales: sensibilidad, resolución espacial, rango espectral y resolución espectral. De este modo, el mejor instrumento es aquel capaz de captar una mayor porción de la luz proveniente de los objetos celestes en menos tiempo, 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 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



Arriba: 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).

Izquierda: 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. Créditos: (ESO).

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.

## Y EN EL IAA... ACTIVIDADES DE LA UNIDAD DE DESARROLLO INSTRUMENTAL Y TECNOLÓGICO (UDIT)

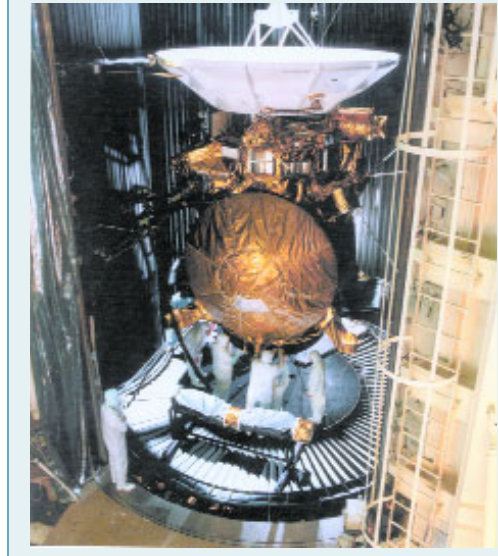
La Astrofísica precisa de instrumentos, tanto para observatorios terrestres como espaciales, para progresar con nuevos descubrimientos. La Unidad de Desarrollo Instrumental y Tecnológico, UDIT, se encarga de procurar esta instrumentación: tomando como base los avances tecnológicos más novedosos, diseña y construye instrumentos que satisfagan las difíciles especificaciones impuestas por la óptica, la mecánica y la electrónica. Dicha Unidad estuvo centrada, en sus comienzos, en la puesta en marcha del recién creado Observatorio de Sierra Nevada (OSN), tanto en la dotación de la instrumentación científica adecuada como en la construcción de fotómetros multispectrales para el estudio de la atmósfera terrestre desde cohetes de sondeo. En una etapa más reciente se renovó toda la instrumentación del OSN, lo que incluyó el diseño electrónico y electro-mecánico de los nuevos telescopios, la construcción de dos consolas para su control automático y de un espectrógrafo multi-objetos (ALBIREO). También comenzaron nuevas colaboraciones internacionales para diseñar instrumentación espacial, como las realizadas en las misiones Mars-94 y Cassini-Huygens. Gracias a estas cooperaciones, esta Unidad fue reconocida entre los Institutos de Investigación y empezó a colaborar en nuevas misiones de la Agencia Europea del Espacio, ESA, como Mars-Express o Rosetta, que serán lanzadas al espacio en enero de 2003. En la primera se diseñó la Unidad Central de Proceso de Datos de un Espectrómetro de Fourier y en la segunda se ha construido parte de dos instrumentos: OSIRIS, compuesto por dos cámaras de alta resolución

que tomarán imágenes del núcleo del cometa Wirtanen, y donde el IAA participa con la tarjeta controladora de mecanismos; y GIADA, analizador y acumulador de impactos de grano y de polvo que estudiará la evolución de flujo del polvo de los cometas y las propiedades dinámicas del grano. Se ha planteado como un instrumento multi-sensor y el Instituto contribuye con la electrónica de control del instrumento.

Para mejorar las observaciones terrestres desde el OSN se está finalizando un radiómetro infrarrojo que permitirá analizar la idoneidad del cielo de Sierra Nevada para trabajar en este rango del espectro y cuyo objetivo final será la instalación de una cámara infrarroja en el OSN.

También se ha proyectado un laboratorio de scattering donde, midiendo la matriz de dispersión de la luz para distintas muestras minerales, se realizarán importantes estudios que aporten nueva información sobre atmósferas de planetas, cometas, materia interplanetaria y polvo interestelar. El estudio del origen, evolución y destino final del campo magnético solar ha implicado al IAA en un proyecto muy ambicioso, el diseño del magnetógrafo ImaX (Imaging Magnetograph eXperiment) que albergará la plataforma SUNRISE, un globo estratosférico con lanzamiento en la Antártida en el verano austral del 2007. La UDIT interviene con el diseño de la electrónica de control.

Por último, el IAA forma parte del equipo que estudia la viabilidad de la misión espacial Eddington, destinada a la búsqueda de exoplanetas y al estudio de las pulsaciones en estrellas para determinar su estructura interna.

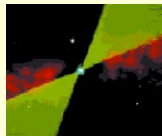


Satélite de la misión Cassini-Huygens. Créditos: NASA

## HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA: EL SIGLO XX

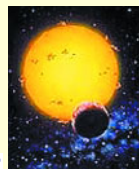
### 1967 EL PRIMER PÚLSAR

Jocelyn Bell-Burnell y Anthony Hewish descubren el primer radiopulsar. Se trata de una estrella de neutrones en rotación, cuya existencia había predicho la teoría de evolución estelar. Antes de alcanzar su total comprensión, este fenómeno fue denominado "hombrecito verde", sugiriendo que pudiera tratarse de una señal radio de otra civilización. Sólo Hewish fue honrado con el premio Nobel en 1978 por este descubrimiento.



### 1995 PRIMER PLANETA EXTRASOLAR

Michel Mayor y Didier Queloz (Observatorio de Ginebra) anuncian el descubrimiento de un planeta extrasolar que gira alrededor de la estrella 51 Pegasi. Aunque ya se ha encontrado un centenar de planetas extrasolares, aún no se dispone de ninguna imagen de este tipo de objetos.

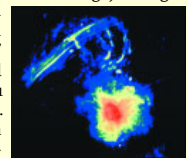


Interpretación artística del planeta de 51 Pegasi. Créditos: Lynette Cook.

## EL SIGLO XXI

### 2002 SgrA\*, EL CENTRO GALÁCTICO

Observación de una estrella orbitando el agujero negro supermasivo (SgrA\*) en el centro de nuestra galaxia a una distancia de tan solo 17 horas-luz con una velocidad superior a los 5000 km/s. Su período orbital es de 15 años. Modelos teóricos estiman la masa de SgrA\* en 2.6 millones de masas solares.



El centro galáctico. (VLA)



Vista Panorámica del Observatorio de Sierra Nevada (OSN).

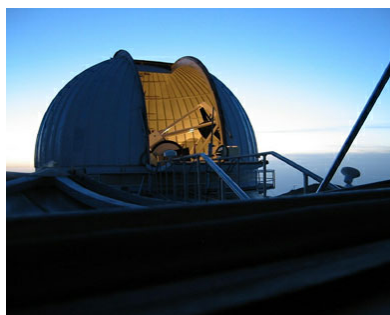
# EL IAA

## 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.



Izquierda: sede del IAA.



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

talación 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. 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.

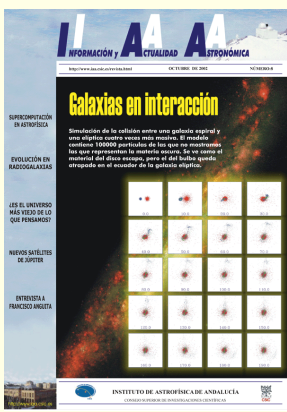
### El Observatorio de Sierra Nevada

La historia del IAA habla claramente de la vocación observacional del centro, manifiesta en la ins-

### LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA EN EL IAA

Durante los últimos años, el IAA ha incorporado como una de sus actividades prioritarias la divulgación de las investigaciones científicas que se realizan en nuestro centro, tanto a nuestros colegas científicos como a la sociedad. Con esta intención se ha desarrollado una serie de actividades encaminadas a satisfacer la curiosidad de nuestros conciudadanos sobre el Universo, entre las que podemos destacar la organización de conferencias institucionales tanto en la sede del instituto como fuera de ella, la visita de colegios y grupos a la sede del instituto y al Observatorio de Sierra Nevada, las colaboraciones con IDEAL, con la revista de divulgación en Astronomía «Tribuna de Astronomía y Universo» y con

el «Parque de las Ciencias» de Granada. Estas acciones se relanzaron durante el año 2000, año en el que el IAA celebró su vigésimo quinto aniversario. En ese año se lanzó la revista «IAA, Información y Actualidad Astronómica», que acaba de publicar su octavo número y que, con una periodicidad cuatrimestral, nació con la vocación de interesar e informar al público sobre todas las disciplinas de la Astrofísica. Invitamos a los lectores a que lean nuestra revista (<http://www.iaa.csic.es/revista.html>) y asistan a las charlas divulgativas mensuales que se imparten en el IAA y que se anuncian regularmente en las páginas de IDEAL y en la página web del Instituto (<http://www.iaa.csic.es>).



Último número de la revista, disponible en Internet en <http://www.iaa.csic.es/revista.html>

### HISTORIA DEL INSTITUTO

- ▶ **1975:** se crea, por acuerdo de la Junta de Gobierno del CSIC, el IAA, con dos líneas básicas de investigación: Aeronomía y Física Estelar. Su fundador, José María Quintana, es nombrado director. El Convenio suscrito entre la Universidad de Granada y el CSIC permite el uso de las instalaciones de observación del Observatorio de Mojón del Trigo.
- ▶ **1978:** traslado del Instituto desde los locales del Palacio de La Madraza a las nuevas instalaciones dentro de la Estación Experimental del Zaidín.
- ▶ **1980:** finaliza la construcción del nuevo Observatorio de la Loma de Dilar en Sierra Nevada (OSN) y se instalan dos telescopios (Cassegrain de 60 cm y Nashmyth de 75 cm) propiedad del Observatoire de Nice y del Royal Greenwich Observatory respectivamente.
- ▶ **1981:** lanzamiento, desde la base del Arenosillo, del primer cohete de sondeo atmosférico.
- ▶ **1983:** creación del Grupo de Extragaláctico (hoy Departamento de Astronomía Extragaláctica).
- ▶ **1985:** comienza en el IAA la actividad en Radioastronomía.
- ▶ **1986:** inauguración de la sede actual del IAA. Se inicia un proceso para dotar al Instituto de telescopios más potentes.
- ▶ **1988:** José María Quintana es relevado en la Dirección por Mariano Moles.
- ▶ **1989:** mediante un Convenio con el Instituto Geográfico Nacional, el IAA se responsabiliza de la operación del telescopio español de 1,5 metros del Centro Astronómico Hispano Alemán de Calar Alto.
- ▶ **1990:** Rafael Rodrigo asume la Dirección del IAA.
- ▶ **1991:** Creación de la Unidad Estructural de Investigación de Radioastronomía (hoy Departamento de Radioastronomía y Estructura Galáctica). El Ayuntamiento de Granada otorga el permiso para la construcción de una nave-taller en unos terrenos colindantes al IAA.
- ▶ **1993:** inauguración de dos telescopios - de 90 y 150 cm- del OSN, fruto del convenio con la Nanjing Astronomical Instrument Factory (NAIF) de la República Popular China.
- ▶ **1994:** construcción del edificio que albergará la Unidad de Desarrollo Instrumental y Tecnológico y los correspondientes laboratorios de Electrónica, Óptica y Mecánica.
- ▶ **1995:** el IAA dona al Parque de las Ciencias el antiguo telescopio de 75 cm, que se mantiene operativo para la divulgación de la Astronomía a través de visitas y observaciones.
- ▶ **1996:** lanzamiento del instrumento PFS (Espectrómetro Planetario Fourier) a bordo de la nave espacial Mars 96. España, a través del IAA, participa por primera vez en una misión interplanetaria.
- ▶ **1997:** convenio de cooperación con el NOT (Nordic Optical Telescope, situado en el Observatorio de La Palma) y la Universidad de Copenhaga para la instalación en el NOT del espectrógrafo ALFOSC, propiedad del IAA. Lanzamiento de la misión espacial Cassini-Huygens (NASA-ESA) desde Cabo Cañaveral hacia Saturno y su mayor satélite, Titán. El IAA participa en un instrumento que llegará a Titán en el 2004.
- ▶ **1998:** comienza la instalación en el OSN del espectrógrafo Albireo, fruto de la colaboración entre el IAA y el Observatorio de París-Meudon.
- ▶ **1999:** se inicia la participación del IAA en la misión COROT, del Centre National d'Etudes Spatiales (Francia), para astrosismología y búsqueda de planetas extrasolares.
- ▶ **2000:** nace la revista del IAA "IAA: Información y Actualidad Astronómica".
- ▶ **2001:** la NASA lanza la misión TIMED, la primera dentro de su programa espacial "Conexión Tierra-Sol". Dentro de la misión va el radiómetro de banda ancha SABER, en el que participa el Departamento de Sistema Solar del IAA. Se finaliza la entrega a la ESA de los modelos de vuelo de los instrumentos OSIRIS y GIADA, de la misión ROSETTA, para la exploración de cuerpos menores del Sistema Solar.
- ▶ **2002:** la Agencia Europea del Espacio (ESA) lanza la misión ENVI-SAT, el primer gran satélite europeo de observación de los recursos terrestres. Dentro de esta misión opera el interferómetro de gran resolución espectral MIPAS, en el que participa el IAA, que también forma parte del Comité Científico Asesor.

**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.).

**Elementos químicos pesados:** se denomina 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.

**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 dibu-

ja mayor es su excentricidad. El valor nulo corresponde a una órbita circular.

**Velocidad de la luz:** según uno de los postulados de la teoría de la relatividad especial de Einstein, nada puede superar la velocidad de la luz en el vacío. Esta es de 299.792 Km/s.

**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 deter-

minado rango del espectro (radio, visible, etc.) determina la naturaleza del fenómeno físico estudiado y el tipo de detector empleado.

**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.

# MIL Y UN AÑOS DE ASTRONOMÍA EN GRANADA

Busquemos algo que destaque en relación al binomio Granada-Astronomía a lo largo de la historia. La astronomía granadina, aunque relevante, no fue tan fulgurante como la toledana o la cordobesa; tiene, sin embargo, la particularidad de la continuidad. Una continuidad

peculiar y con licencias de siglos, pero que vemos hoy reflejada en la existencia de tres centros de Astrofísica en Granada (el Instituto de Astrofísica de Andalucía, el Instituto de Radioastronomía Milimétrica y la actividad docente dentro de la Facultad de Ciencias de la Universi-

dad de Granada) que convierten a la ciudad en la única del antiguo Al-Andalus que mantiene la tradición en estudios de Astronomía. Pero vayamos atrás, muy atrás en el tiempo para intentar juntar las piezas, y no sólo a Granada, sino también a Baza, Guadix y Loja.

**D**urante la dominación árabe vivieron muchos astrónomos granadinos o ligados a Granada dignos de mención: entre ellos Uach-Nafih, nacido en 1096, célebre matemático, o Benalbana el Granati, de origen granadino y nacido en Mameucos, que publicó obras matemáticas hasta hace poco estudiadas en Fez. En Baza nació Alcalsadi, viajero inveterado que destacó en aritmética y acabó sus días en Túnez. De notable capacidad creativa y crítica, Benasamh el Muhandis (siglo X) se dedicó a la investigación y enseñanza. Escribió dos obras sobre el astrolabio, un comentario sobre Euclides, obras de geometría y, sorprendentemente para la época, se dedicó también a la historia de la Física.

Un caso curioso es el del astrónomo granadino Benlhachach, que llegó a ser cadí en Almería. Otros, como el lojeño Beneljatib, también se involucraron en política, aunque éste tuvo un fin más trágico: se le encontró estrangulado en una prisión.

Algunos astrónomos se dedicaron a trabajos más pragmáticos: Benelcatib (siglo XII-XIII) fue el arquitecto de la Sala del Tribunal y de un puente sobre el río Genil. Finalmente, el astrónomo granadino Sukur, que trabajó en Siria, posiblemente participó en lo que se considera como las primeras observaciones coordinadas, fruto de una colaboración entre el Observatorio de Toledo y el de Maraga, en Mongolia.

Entre los constructores de instrumentos astronómicos destacan los Ibn Baso, padre e hijo, cuyos trabajos destacaron por su calidad impecable (foto 1). El padre, astrónomo responsable del horario de



Arriba e izquierda: cara y dorso del astrolabio construido en 1265 por Ibn Baso. Créditos: Real Academia de la Historia, Madrid.

Arriba y derecha: cara y dorso del astrolabio construido por al-Raqqam (Guadix). Créditos: Real Academia de la Historia, Madrid.

las plegarias en la mezquita granadina, introdujo una innovación en el astrolabio que posibilitaba "su utilización en todos los horizontes". También merece mención Ibn al-Raqqam, autor de unas tablas astronómicas y de un tratado de Gnomónica (foto 2).

Ibn Tufayl, nacido en Guadix en el siglo XII, es probablemente el científico granadino que más ha influido en el pensamiento de Occidente. Pionero de la revoluc-

ión anti-ptolomeica enraizada en las enseñanzas de Aristóteles, negaba los epiciclos y excéntricas por su imposibilidad física, detalle de suma importancia dado que los modelos vigentes en aquella época se basaban en la geometría. Su importancia se puede medir también a través de su influencia sobre su protegido, Averroes, o su otro discípulo, Alpetragio, quien escribe: "Ibn Tufayl había encontrado una teoría nueva sobre el

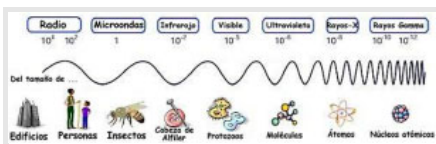
movimiento de los planetas. Deducía sus movimientos mediante principios distintos a los de Ptolomeo y rechazaba las excéntricas y epiciclos. Con este sistema, todos los movimientos celestes podían ser verificados. Había prometido escribir sobre el asunto". Esta obra, si ha existido, todavía no ha sido recuperada. La influencia de este astrónomo incluso ha llegado a la literatura europea: tanto el «Robinson Crusoe» de D. Dafoe como

el «Emilio» de J. J. Rousseau parecen tener claros tintes de la obra de Ibn Tufayl, «El Filósofo Autodidacta», que narra la evolución científica, filosófica y mística de un niño que crece solitario en una isla.

## Pérdida y recuperación

Aunque bajo el influjo de las navegaciones el interés por la investigación astronómica perduró entre los siglos XVI y XVII, la expulsión de los árabes y judíos rompió la tradición de estudios en Astronomía y creó un vacío ocasionado por las dificultades socioeconómicas, las guerras internas y el desprecio de las autoridades por las ciencias en general.

Tras una ardua recuperación y los siglos de licencia mencionados al principio, la Astronomía renace en Granada: en 1902 se funda el Observatorio de la Cartuja, que permanece activo hasta el año 1971. En 1975, un grupo de investigadores funda el Instituto de Astrofísica de Andalucía, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas que opera el Observatorio de Sierra Nevada y tiene su sede provisional en la Madrasa. Algunos años después, la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada comienza sus actividades en Astrofísica y el centro hispano-franco-alemán IRAM (Instituto de Radioastronomía Milimétrica) empieza la operación del Radiotelescopio de Pico Veleta en el año 1979. Todos estos centros realizan investigaciones de alto nivel en los diversos ámbitos de la Astrofísica y, aún hoy día, representan un vínculo de unión con aquella Astronomía árabe y con la misma historia de la ciudad.



**Longitud de onda:** distancia entre dos crestas sucesivas de una onda. Cuanto más 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.

**Cámara CCD:** CCD son las siglas en inglés de Dispositivos de Carga Acoplada (Charge-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.

**Planetas Extrasolares:** planetas situados 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 a estrellas que no son nuestro Sol.

**Unidad Astronómica (UA):** es la distancia media entre la Tierra y el Sol. Una UA equivale a unos 150 millones de Km, y a 0.000015 años luz. Es la unidad de distancia utilizada en el estudio del Sistema Solar.

**Reacciones Termonucleares:** una 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 5000 millones de años en dicha etapa.

**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.

**Enanas Blancas:** 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.

**Estrella de neutrones o púlsar:** 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 emi-

ten 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.

**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.

**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 físicas pierden su validez. Fue acuñado por el físico Fred Hoyle en los años 40, con el fin de ridiculizar dicha teoría.

**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 (EEUU). Los datos tomados por las distintas antenas son combinados electrónicamente para obtener la resolución que tendría una única antena de 36Km de diámetro.

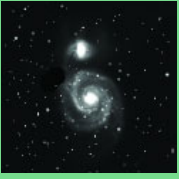
**Ley de Hubble:** Edwin Hubble descubrió que las galaxias se alejan todas unas de otras, y que cuanto más lejanas están, a mayor velocidad lo hacen. Esta sencilla ley, que refleja la expansión del Universo, es conocida como Ley de Hubble. En ella la constante que relaciona velocidad con distancia es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

**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.

# DEL TELESCOPIO AL PAPEL



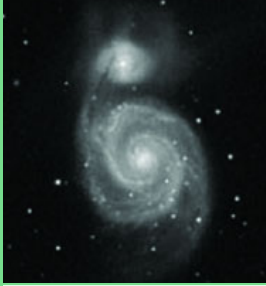
**Figura 1 y 2:** telescopio e imagen CCD, sin tratamiento, de dos galaxias en interacción. Vemos cómo los rayos cósmicos, partículas subatómicas interestelares que se desplazan a una velocidad próxima a la de la luz, degradan la imagen en forma de puntos luminosos.



**Figura 3:** Imagen corregida. Para eliminar los rayos cósmicos se combinan imágenes del objeto tomadas durante distintos momentos de la noche. Al ser eventos muy rápidos, aquellos puntos que no permanezcan idénticos en todas ellas son rayos cósmicos y pueden eliminarse.

Las variaciones de sensibilidad del detector son compensadas dividiendo la imagen del objeto en las llamadas «imágenes planas». Estas, que se obtienen apuntando el telescopio a una superficie iluminada uniformemente, reflejan el patrón de sensibilidad del detector.

Para la corrección de fondo de cielo (problemas derivados de la contaminación lumínica y del reflejo de la luz solar en la Luna y el polvo interplanetario) se toman imágenes



exclusivas del cielo próximo al objeto, que posteriormente se restan de la imagen de éste. El efecto de la extinción atmosférica se elimina realizando observaciones de las «estrellas estándar»: estrellas de brillo conocido que permiten estimar la extinción de la noche y contrarrestarla de las imágenes del objeto.



**Figuras 3 y 4:** Imágenes en falso color.

Los detectores ópticos registran las imágenes de los objetos astronómicos en una amplia gama de grises. En el tratamiento posterior se puede asignar a cada nivel de gris un determinado color. El resultado es una imagen en «falso color», que no tiene por qué coincidir con el color real del objeto, pero es tremendamente útil para realzar estructuras, indicar zonas de distinta temperatura, o «visualizar» lo invisible, como la imagen de un objeto en infrarrojo.

Créditos imágenes:

- 1: CAHA.
- 2 y 3: Takahashi FS102 ST7 (F/8).
- 4: National Optical Astronomy Observatories (NOAO).
- 5: Hubble Space Telescope.

A lo largo de este suplemento hemos visto algunas de las imágenes más espectaculares que poseemos de nuestro Universo, donde los objetos celestes se nos muestran llenos de colores y belleza. Pero, ya sea por puro placer estético o para la realización de un estudio científico, la creación de estas imágenes conlleva un laborioso proceso y un complejo instrumental, que han ido

variando a lo largo de la historia: desde los dibujos a mano de los satélites de Júpiter, que Galileo veía a través de su rudimentario telescopio (1609), hasta las modernas cámaras CCD y las imágenes digitales, sin olvidar el tedioso análisis de las placas fotográficas del Observatorio Monte Palomar, en las que Hubble, en 1919, descubrió que el Universo se expande.

**A**ctualmente son innumerables las técnicas empleadas en la obtención y tratamiento de datos astrofísicos. La elección de la adecuada dependerá del objeto (estrellas, galaxias,...), el tipo de radiación (óptico, radio, rayos X,...) y el fenómeno concreto que estemos estudiando (formación estelar, supernovas,...). En cualquier caso, el proceso siempre consta de tres etapas: observación, procesamiento de datos y análisis.

## Observación

A diferencia de otras disciplinas científicas, la Astrofísica no puede introducir su objeto de estudio en un laboratorio para experimentar con él. La radiación (luz) que emiten o reflejan los objetos del Universo constituye nuestra principal fuente de información;

para recogerla se utilizan los elementos colectores (telescopios, radioantenas...) que dirigen la luz hacia los detectores, que son los encargados de registrarla.

## Procesamiento de datos

En su camino hacia nosotros, la radiación registrada por los detectores se ve afectada por distintos elementos que desvirtúan las imágenes. Para poder trabajar con ellas se hace preciso un proceso de limpieza cuyo objetivo consiste en lograr que la imagen final se parezca lo más posible al objeto real. En este procesamiento, los astrofísicos se benefician de la digitalización de los datos: una imagen digital es un conjunto de números que se puede manipular con programas informáticos; así, tareas que se antojaban casi imposibles con las antiguas placas

fotográficas (como cambiar el contraste, el color, o incluso combinar varias imágenes) se emplean a menudo y de forma sencilla. Como los detectores no registran la radiación en unidades astrofísicas, se impone un proceso de calibración de los datos. Del mismo modo que en nuestra vida utilizamos a diario las llamadas magnitudes físicas (en la frutería pedimos tres kilos de manzanas y en la autopista ponemos nuestro coche a 120 kilómetros por hora), hemos de dotar a los números de nuestras imágenes de un sentido físico. El proceso de calibración consiste en comparar las medidas que obtenemos en nuestro detector con otras medidas de valor conocido (estrellas estándar, medidas en laboratorio, etc.), lo que nos permite transformar nuestros datos en unidades reconocibles e independientes del detector con el que se tomaron.

## Análisis

Tras la calibración y reducción comienza la etapa más exigente, pero, sin duda, también la más creativa e interesante de la labor de un astrofísico: el análisis de los resultados. El análisis concreto dependerá del fenómeno en cuestión (estrellas variables, formación estelar en galaxias, cometas, canibalismo galáctico) pero, en general, consistirá inicialmente en extraer toda la información que sea posible, y por supuesto, útil para nuestro estudio (formas, tamaños, temperaturas, velocidades, composición química, etc.). Los resultados deben pasar un primer examen de sentido físico, esto es, no deben violar los principios básicos de la Física. En muchas ocasiones son estos principios fundamentales los que nos indican que nuestro conocimiento es aún insuficiente y nos estimulan para ulteriores investigaciones. Después contrastaremos nuestros resultados con los ya publicados por otros investigadores y, por último, comprobaremos si las hipótesis iniciales y los modelos teóricos se ven corroborados por nuestras observaciones o, por el contrario, deben ser modificados. Finalmente, los resultados han de ser publicados en revistas científicas en forma de artículos que son verificados y censurados por otros científicos bajo encargo de los editores para, de esta forma, aumentar su fiabilidad.

Este suplemento ha sido sufragado con la ayuda de la Acción Especial DIF 2001-4284-E del Programa Nacional de Difusión de la Ciencia y la Tecnología, del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

**Dirección, coordinación y maquetación:** Silbia López de Lacalle.

**Agradecimientos:** a todo el personal del IAA, en especial a 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, José Carlos del Toro y Lourdes Verdes-Montenegro.

Agradecemos también la colaboración de Ideal, en especial a Carlos Valdemoros y Gabriel Pozo.

**Copyright:** Instituto de Astrofísica de Andalucía.

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)



C/Camino Bajo de Huétor 24  
18008 Granada  
Tlf: 958121311  
Fax: 958814530

www.iaa.csic.es

