

ANTXÓN ALBERDI, OLGA MUÑOZ  
Y SILBIA LÓPEZ DE LACALLE

## 1. Introducción

# Un viaje por el Cosmos a la velocidad de la luz

Juan Sebastián Elcano completó la primera vuelta al mundo el 6 de septiembre de 1522, tras recorrer 78.000 kilómetros (aproximadamente dos veces el diámetro ecuatorial de la Tierra) en un devastador viaje de casi tres años: de los 240 hombres que partieron distribuidos en cinco naves, regresaron tan sólo dieciocho a bordo de la nave Victoria, la única superviviente. Entre los fallecidos se encontraba el capitán de la expedición, Fernando de Magallanes, a quien Elcano tomó el relevo. Durante el viaje se sucedieron intentos de sublevación, combates con indígenas, travesías sin agua ni provisiones frescas y con la tripulación afectada por el escorbuto. Cuando Elcano arribó al Puerto de Santa María, su último destino, pudo presumir de haber cumplido el objetivo inicial de su viaje al regresar con la nave

cargada de especias y, además, se convirtió en el estandarte del aventurero y el descubridor.

Siguiendo su legado, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y el diario *Granada Hoy* proponen un viaje apasionante por el Cosmos. Será una travesía más cómoda y, por supuesto, nada cruenta. Es un viaje más parecido al que emprendió Phileas Fogg en su *Vuelta al Mundo en 80 días* (Julio Verne), con la audacia y la inteligencia como armas para superar las fronteras. El riesgo se limitará a adentrarse en el conocimiento científico: seguiremos un recorrido por el Universo, desde lo más cercano (la Tierra y el Sistema Solar) hasta sus confines.

A lo largo de este viaje por el Cosmos lidiaremos con dos conceptos fundamentales: la distancia y la luz.



Figura 1.1. Nuestro pequeño Sistema Solar, que se encuentra en uno de los brazos espirales de la Vía Láctea, es uno de los 100.000 millones posibles de la galaxia. La Vía Láctea, por su parte, forma parte de un pequeño cúmulo de unas treinta galaxias, denominado Grupo Local, que se extiende a lo largo de unos diez millones de años luz y que, además, se incluye en el Supercúmulo de Virgo, cuya visión se pierde en la estructura a gran escala del Universo.

Nos olvidaremos del kilómetro, tan útil en tierra, y lo cambiaremos por el año luz y la Unidad Astronómica; del mismo modo, nos familiarizaremos con tipos de luz que el ojo humano es incapaz de captar pero que resultan de gran interés en astrofísica, como el infrarrojo o los rayos X.

## Midiendo el infinito

Existe un símil muy utilizado para facilitar la comprensión de las distancias astronómicas: “si el Sol fuera una naranja, la Tierra sería una cabeza de alfiler que gira a su alrededor a una distancia de unos 15 metros; Júpiter sería una cereza situada a 77 metros de la naranja; Plutón un granito de arena a 580 metros y la estrella más cercana, Próxima Centauri, sería otra naranja situada a unos 4.000 kilómetros”. Aunque este tipo de comparación resulta útil para este caso, si nos alejamos de la vecindad solar resulta imprescindible contar con otras unidades de medida. La primera, muy sencilla aunque algo limitada, es la Unidad Astronómica (UA): se trata de la distancia que separa la Tierra del Sol, calculada en 150 millones de kilómetros y fácilmente aplicable a otros planetas; así, Mercurio se encuentra a un tercio de UA y Plutón a 40 UAs. Sin embargo, más allá de los

confines del Sistema Solar tendremos que emplear el año luz, o distancia que recorre la luz (a 300.000 km/seg) en un año, ya que, si bien la luz que parte del Sol tarda sólo ocho minutos en alcanzar la Tierra, la distancia a la estrella más cercana es tan grande que la luz tarda 4,4 años en llegar hasta nosotros. Con estas pistas, los profanos ya podemos comprender mejor el cuadro general, que vemos una de las imágenes.

## La luz que no vemos

Por otra parte, dada la imposibilidad de estudiar *in situ* los cuerpos celestes, la luz (rigurosamente hablando radiación electromagnética) que recibimos de ellos constituye, en la inmensa mayoría de los casos, nuestra única herramienta para obtener información y conocer su estructura, composición o evolución temporal. Para extraer la máxima información de la luz realizamos observaciones en distintas regiones del espectro electromagnético, que agrupa los distintos tipos de radiación y permite obtener información diferente y totalmente complementaria del mismo objeto. Es decir, los objetos que pueblan el Universo pueden aparecer totalmente diferentes dependiendo de las “gafas” que estemos utilizando para mirarlos. En la figura 1.2 tenemos un ejemplo.



Figura 1.2. La galaxia activa Centaurus A o NGC 5128: la imagen del óptico muestra la nube de polvo que cubre la galaxia, mientras que en el infrarrojo podemos distinguir las estrellas que hay tras dicha nube. Las imágenes de radio y rayos X muestran un chorro de partículas de alta energía que se originan en el núcleo de la galaxia, posiblemente en un agujero negro supermasivo. Dependiendo del rango espectral que estemos utilizando en nuestras observaciones podremos estudiar fenómenos muy diferentes.

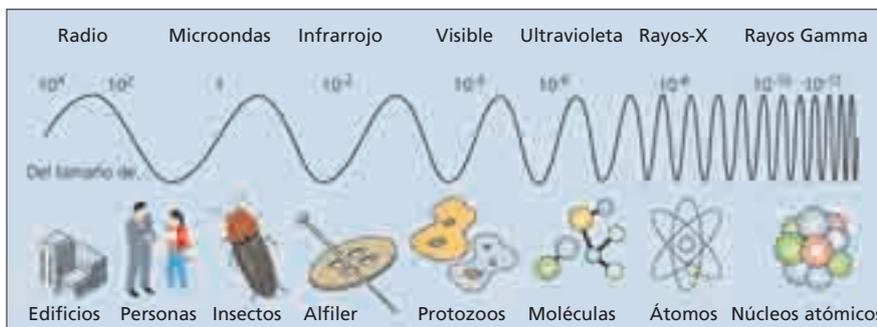


Figura 1.3. La radiación electromagnética se puede representar mediante una onda que transporta energía entre dos puntos del espacio moviéndose a 300.000 km/s. Cuanto mayor sea la longitud de onda, o la distancia entre dos de sus máximos consecutivos, menor será la energía que transporta, y viceversa.

## 2. El Sistema Solar: nuestro hogar en el Universo

**C**ómo y cuándo se formó el Sistema Solar, por qué los planetas son tan distintos unos de otros y qué características comparten como integrantes de un mismo sistema

El Sistema Solar constituye una peculiar mezcla de cuerpos: una estrella mediana, el Sol, nueve planetas (algunos terrestres y otros gaseosos), más de cien satélites conocidos, millones de asteroides, trillones de cometas y viento solar (un flujo de partículas eléctricamente cargadas procedentes del Sol que invade el espacio interplanetario). A lo largo de este viaje por el Universo veremos las características individuales de los cuerpos que forman el Sistema Solar, por lo que hoy quizá resulte más adecuado revisar sus características como sistema; para

ello resulta imprescindible acudir a un concepto básico, la gravedad, que constituye el ingrediente principal en todos los sistemas que hallamos en el Universo, desde un sistema planetario múltiple a un sistema estelar binario o incluso una galaxia. La gravedad es la fuerza de atracción de todos los cuerpos materiales, proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Se trata de la fuerza que nos mantiene pegados al suelo y la que provoca que las cosas se caigan y, en el Sistema Solar, provoca que el Sol (el cuerpo más prominente, que abarca el 98% de la masa total de éste), se presente como el elemento dominante alrededor del que giran todos los demás cuerpos. Éstos, cuyas órbitas se sitúan en un plano denominado eclíptica, siguen el

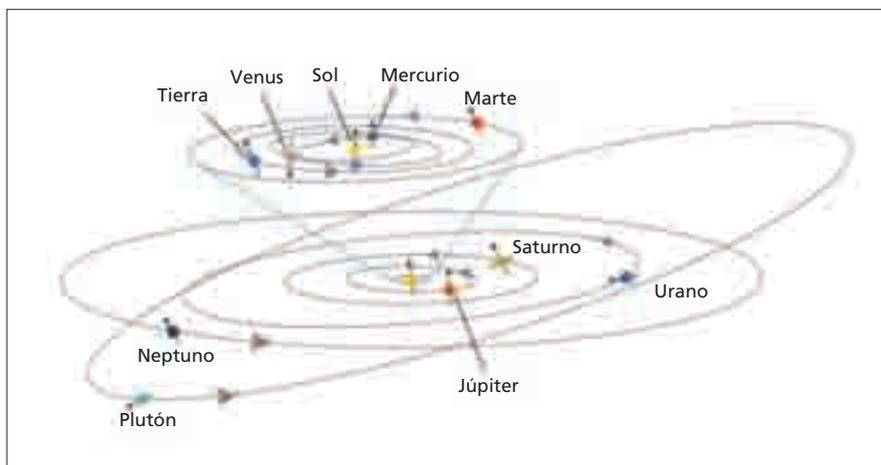


Figura 2.1. Órbitas planetarias. Fuente: Addyson Wesley.

sentido de rotación del Sol sobre su eje (contrario a las agujas del reloj), tanto en su movimiento de rotación (sobre su propio eje) como en el de traslación (alrededor del Sol); existen, sin embargo, curiosas excepciones, como Venus o Plutón, que giran sobre su eje en sentido contrario, o Urano, que se halla literalmente “tumbado” (su eje de rotación casi coincide con la eclíptica).

Si bien la explicación física del movimiento de los planetas, la ley de Gravitación Universal, no fue formulada por Newton hasta 1666, ya en 1609 el astrónomo Johannes Kepler describió el movimiento de los planetas por medio de tres leyes fundamentales, cuya validez se probó cierta al convertirse en un método eficaz para predecir la posición de éstos. Kepler,

tras estudiar las numerosas observaciones realizadas por Tycho Brahe, propuso como primera ley un movimiento planetario que dibujaba órbitas elípticas, y no circulares como se creía, con el Sol en uno de los focos de la elipse. Así, cuando el planeta se halla a la máxima distancia al Sol se encuentra en su afelio, en tanto que la posición de mayor proximidad con respecto a éste se denomina perihelio. Sin embargo, a excepción de Plutón, que traza una órbita marcadamente elíptica, el resto de planetas giran en órbitas casi circulares (la Tierra, por ejemplo, dista 152 millones de kilómetros del Sol en su afelio y 147 millones de kilómetros en su perihelio). La segunda ley de Kepler, por su parte, indica que la velocidad de un planeta varía a lo largo de su trayectoria (siendo



Figura 2.2. El Sistema Solar. De izquierda a derecha: el Sol, Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, el cinturón de asteroides, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón (más un cometa acercándose al Sol).

Fuente: [www.kidsastronomy.com](http://www.kidsastronomy.com).

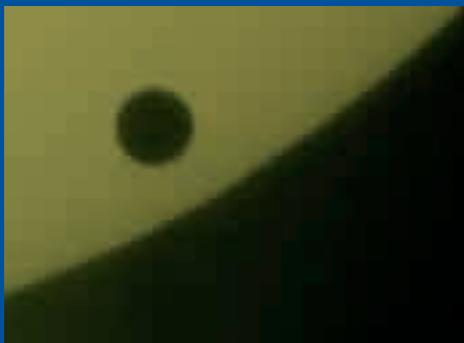


Figura 2.3. Imagen del tránsito de Venus, tomada por el telescopio PETI del IAA.

más lenta en el afelio que en el perihelio), en tanto que la tercera permite establecer una relación entre los periodos de traslación de dos planetas y sus distancias respectivas al Sol; esta ley nos permite, conocida la distancia de un cuerpo cualquiera al Sol, determinar la distancia al Sol de cualquier otro cuerpo del Sistema Solar.

### Fenómenos: tránsitos y eclipses

Como consecuencia del movimiento orbital de los planetas en el plano de la eclíptica, ocurren fenómenos que podemos observar desde la Tierra, como los eclipses y los tránsitos. Observamos un tránsito cuando Mercurio o Venus, los planetas más internos, se alinean entre la Tierra y el Sol y dibujan su trayectoria sobre el disco solar. Se trata de eventos que tuvieron gran importancia para la medición de la distancia de la Tierra al Sol, o Unidad Astronómica, aunque son muy poco frecuentes: los tránsitos de Mercurio se dan unas doce veces por siglo y, en el caso de Venus, sólo se producen dos en cada intervalo de 120 años (recientemente hemos tenido el privilegio de observar uno, que vemos en la figura 2.3). También ocasionalmente el Sol nos ofrece otro espectáculo fascinante: un

eclipse solar. Se trata de un fenómeno muy simple que sucede cuando el Sol, la Luna y la Tierra se hallan alineados: la sombra de la Luna se proyecta sobre la Tierra y, en determinadas zonas del globo terráqueo, se observa cómo la Luna “tapa” el Sol. Finalmente, observamos un eclipse de Luna cuando la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna y proyecta su sombra sobre ésta, fenómeno que resulta una excelente ocasión para la detección y el estudio de impactos de meteoritos sobre la superficie lunar.

### Formación del sistema solar

El estudio de los meteoritos indica que el Sol, los planetas y el resto de los componentes del Sistema Solar se formaron aproximadamente hace unos 4.600 millones de años. La teoría de formación del Sistema Solar más aceptada es la llamada teoría de la condensación, según la cual el Sol y los planetas se formaron a partir de una misma nube de gas y polvo (también llamada nebulosa) que, desestabilizada quizá debido a una explosión de supernova cercana, empezó a contraerse. Por efecto de la gravedad, esta nube comenzó a colapsar y a rotar hasta aplanarse en forma de disco, en cuyo centro, la zona más densa y caliente, nacería el

Sol; mientras, en las regiones más externas, se crearon pequeños grumos de gas y polvo, llamados planetesimales, que poco a poco acumularon materia suficiente para convertirse en planetas. La evidente diferencia que encontramos entre los cuerpos del Sistema Solar, que pueden clasificarse en terrestres (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) y helados (Plutón, objetos similares a éste como Quaoar y Sedna y algunas lunas de los planetas gaseosos, como Tritón), responde a las condiciones que, en su infancia, impuso el Sol: a su alrededor, la temperatura era tan elevada que sólo los elementos más pesados, como hierro, carbono y silicatos, podían permanecer en estado sólido y contribuir a la formación de los planetesimales, hecho que explica el carácter rocoso de los planetas internos. En cambio, en la región externa del Sistema Solar, la temperatura era lo suficientemente baja como para que el agua, el

amoníaco o el metano formaran hielos que, en combinación con algunos restos rocosos, formaron los núcleos de los planetas gaseosos. La fuerza de gravedad de estos núcleos helados atrapó gran cantidad de hidrógeno y helio, elementos predominantes en este tipo de planetas, sobre todo los de mayor tamaño: Júpiter y Saturno. Finalmente, en los confines del Sistema Solar se formaron los que hoy se conocen como Objetos Transneptunianos y cuyo más conocido representante es Plutón.

A este periodo de formación de planetesimales le siguió una etapa en la que el recién nacido Sol, mediante un fuerte viento estelar, terminó de limpiar de gas y polvo el espacio interplanetario. Este momento determinó el fin de la acumulación de materia por parte de los planetas que, cientos de millones de años después y tras muchas perturbaciones e impactos, se estabilizaron en las órbitas que conocemos hoy día.

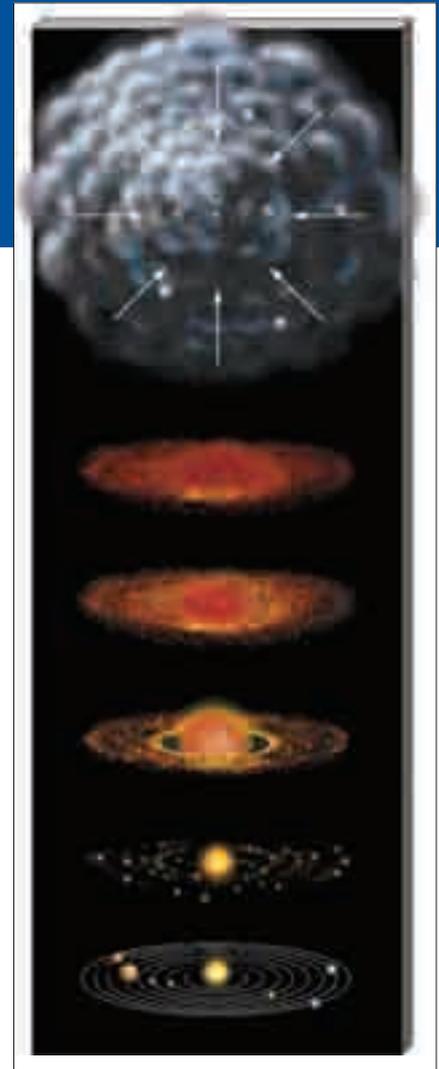


Figura 2.4. Concepción artística de la formación del Sistema Solar. Fuente: Niel Brandt (Universidad Pensilvania).

## 3. El Sol: la estrella más cercana

**A demás de su evidente importancia e influencia sobre nuestras vidas, el Sol es la única estrella que podemos estudiar directamente en detalle**

Aunque en estas fechas el Sol es el culpable de muchos de nuestros sofocos y no parece el momento ideal para aproximarnos a los 6.000 grados de temperatura de su superficie, vamos a hacer un esfuerzo que el astro rey bien merece: a fin de cuentas, estamos aquí gracias su luz y calor y, además, los cambios o fenómenos que el Sol experimenta pueden afectar a la climatología o las comunicaciones en Tierra, de modo que nos interesa conocerlo bien. Por otro lado, se trata de la única estrella que podemos estudiar directamente en detalle, por lo que resulta fundamental para la comprensión de la física de otras estrellas.

Al igual que el resto de las estrellas, el Sol es una gran esfera de gas incandescente, que debe su energía a las reacciones termonucleares que se producen en su núcleo: la fusión de átomos de hidrógeno da lugar al helio, proceso en el que se libera la energía que viaja hacia la superficie y que se manifiesta en forma de luz y calor. Pero en ese viaje hasta la superficie la energía se transporta de distintos modos y a través de las diversas capas del interior solar, en un recorrido que puede durar unos diez millones de años y en el que vamos a acompañarla.

### El interior del Sol

El núcleo solar, que comprende un 25% del radio del Sol y alberga unas condiciones de temperatura y densidad

que permiten la fusión del hidrógeno (hasta 15 millones de grados y 150 kg/l, diez veces la densidad del plomo), limita con la zona radiativa, que abarca el siguiente 45% del radio solar y se caracteriza por el modo en que se transporta la energía: los fotones, o partículas de luz, tras chocarse insistentemente con los apretadísimos átomos que constituyen el material estelar, consiguen acarrear su contenido energético hasta la zona convectiva, que se extiende casi hasta la superficie. Aquí el movimiento de los gases toma el relevo en el transporte de energía: el gas, al igual que en una cazuela con agua hirviendo, se mezcla y burbujea, efecto que se manifiesta en la superficie en forma de lo que se conoce como granulación. Entre las zonas radiativa y convectiva existe una fina capa intermedia con más importancia que la de una simple línea de transición: parece ser que en ella se genera el intenso campo magnético solar, responsable de la continua y, en ocasiones, intensa actividad, que trataremos la próxima semana.

## Las regiones externas

La imagen del Sol que estamos acostumbrados a ver, la de un disco amarillo con algunas manchas oscuras, corresponde a la fotosfera o “esfera de luz”, una capa muy fina que presenta

estructuras muy características, como gránulos y manchas. En tanto que los primeros se deben a la “ebullición” del gas ya mencionada, las manchas son zonas más frías, de unos 4.000°C, que vemos oscuras en comparación con sus alrededores.

Casi totalmente transparente, la cromosfera se encuentra justo por encima de la fotosfera. Las imágenes que se han obtenido de esta región han sido tomadas durante el principio y el final los eclipses del Sol totales, en los que aparece como un anillo rojizo, o con filtros muy específicos. Dichas imágenes revelan una serie de fenómenos, como los filamentos, protuberancias y espículas (figura 3.1).

Finalmente, la corona es la capa más externa de la atmósfera solar, formada por gas de muy baja densidad y con una extensión que supera los millones de kilómetros. Podemos observarla durante los eclipses totales de Sol como un halo blanquecino y, por su fuerte emisión en rayos X debido a su elevada temperatura —cercana al millón de grados—, también con telescopios diseñados para esta longitud de onda. Con ellos se han obtenido imágenes que muestran “agujeros” en los polos de la corona, de donde se cree que procede el viento solar, un chorro de partículas eléctricamente cargadas que, con velocidades de unos 400 km/s, invade el espacio interplanetario.



Figura 3.1. Filamentos y protuberancias en la cromosfera. Se trata de densas nubes de material más frío que quedan suspendidas sobre la superficie siguiendo los bucles del campo magnético. Como consecuencia de su menor temperatura, se muestran oscuras en el disco (filamentos) y brillantes en el limbo (protuberancias). En la cromosfera también se distinguen las espículas, pequeñas erupciones que ascienden y descienden a una velocidad del orden de 20 km/s, y cuyo aspecto puede compararse con el de una pradera en llamas.

## El Sol, datos básicos



**Diámetro:** 1.391.980 km (en el interior de la esfera solar cabrían un millón de Tierras).

**Masa:**  $2 \times 10^{30}$  kg (2.000 billones de billones de toneladas).

**Temperatura en la superficie:** 6.000°C.

**Temperatura en el centro:** 15.000.000°C.

**Composición:** hidrógeno (70%); helio (28% de su masa); elementos pesados (2% de trazas de carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, magnesio, silicio y hierro).

### Curiosidades

**Estado:** ni sólido ni gaseoso, la masa solar se denomina plasma. Este plasma es tenue y gaseoso en las zonas cercanas a la superficie y va haciéndose más denso hacia el núcleo.

**Rotación:** el Sol no rota de forma rígida como los planetas sólidos, sino que las regiones ecuatoriales rotan más rápido, con un periodo de unos 24 días, que los polos, que completan una vuelta en unos 30 días.

**Temperatura coronal:** si bien en el interior del Sol la temperatura desciende con la distancia al núcleo, encontramos una enorme diferencia entre los 6.000 grados de la superficie y casi el millón de la corona. Aunque se han articulado diversas posibles explicaciones, aún no se ha determinado el mecanismo responsable del calentamiento coronal.



Figura 3.2. Concepción artística de la misión Ulysses (NASA/ESA), dedicada al estudio del Sol en todas sus latitudes.

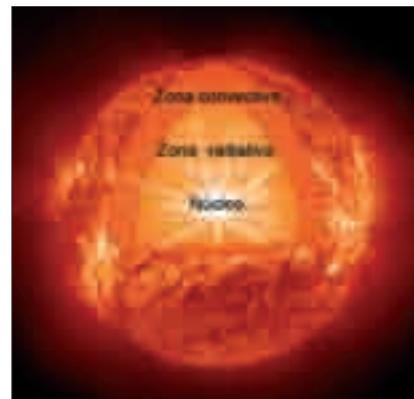


Figura 3.3. Este esquema muestra un corte del Sol, donde se distinguen las diferentes regiones que atraviesa la luz. Fuente: SOHO.

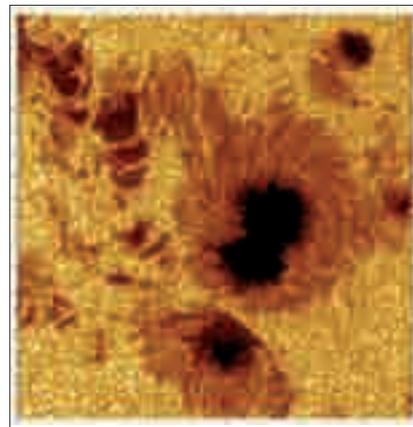


Figura 3.4. Manchas y gránulos en la fotosfera. Las marcas de los bordes señalan una distancia de 1.000 kilómetros, con lo que los gránulos pueden tener el tamaño de la Península Ibérica.