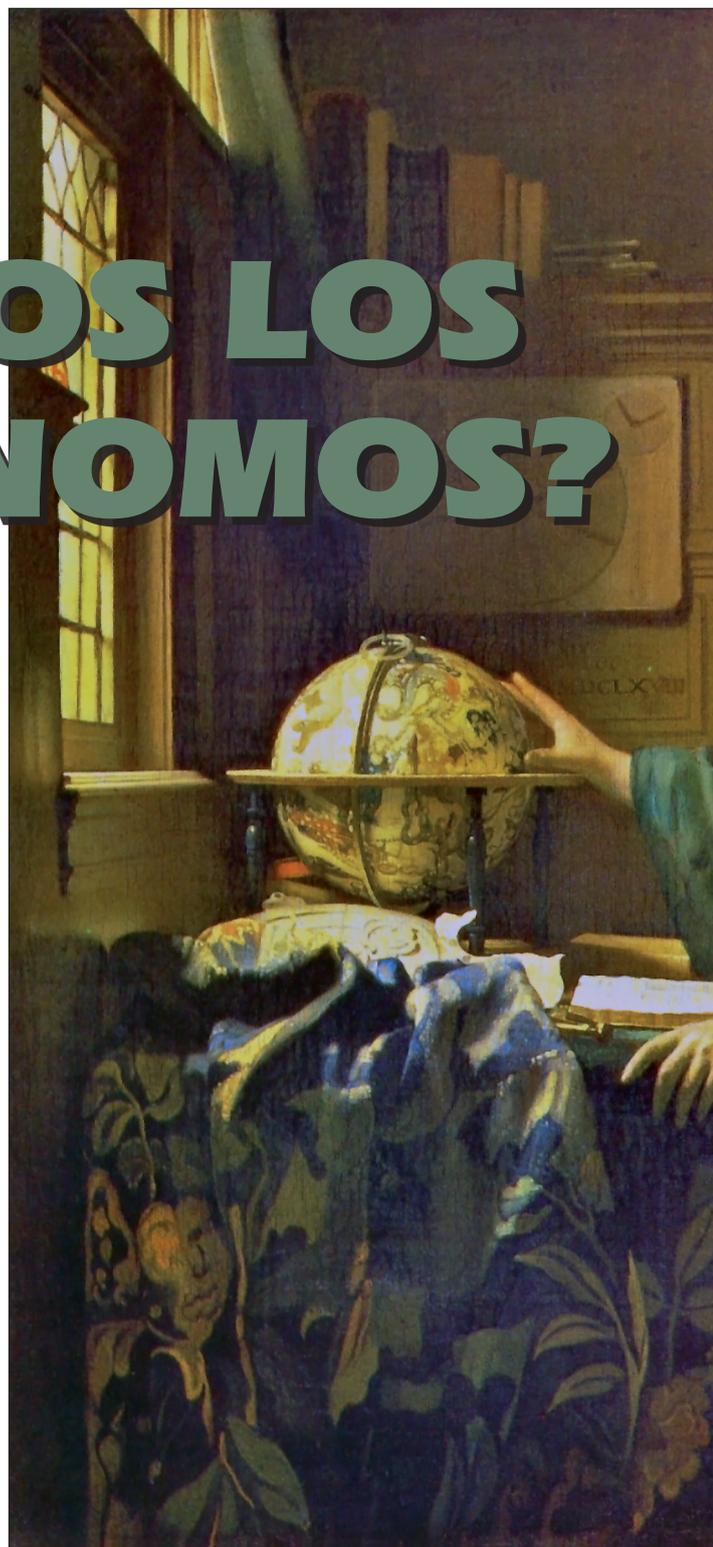


EMILIO J. ALFARO NAVARRO

¿QUÉ HACEMOS LOS ASTRÓNOMOS?

El origen de este artículo proviene de mi vivencia personal en el barrio sevillano donde me crié. Después de algún tiempo fuera de la ciudad, el encuentro con mis convecinos era siempre amable y dialogante, y en esos casos no tardaba en aparecer la pregunta de «¿A qué te dedicas?» Mi respuesta, breve, pero quizás no tan explicativa como cabría esperar –astrónomo–, podía dar lugar a dos variedades de réplica, siempre precedidas por la exclamación interrogativa «¿¡Ah!?» : a) «¿De los que vais a la Luna?»; y b) «¿Los que hacéis los horóscopos?» A esta última solía responder que ellos ganan más dinero que nosotros y acababa ahí la conversación, no era cuestión de hacerles más publicidad, pero siempre me quedó el regomeyo de establecer de una forma simple y concisa la diferencia entre astrónomo y astronauta.



Emilio J. Alfaro Navarro
es investigador del
Instituto de Astrofísica
de Andalucía, CSIC, y
Presidente de la Sociedad
Española de Astronomía.

La respuesta vino de forma natural cuando en 2004 la Diputación de Cádiz organizó un ciclo de conferencias científicas con un formato de dueto (dos conferenciantes) más un moderador, de tal forma que cada ponente presentaba su tema durante veinte o treinta minutos y posteriormente se abría un dilatado debate con la audiencia bajo el amigable control del

moderador. Tuve el placer de compartir cartel con Pedro Duque, quien dejó muy claro el rol del astronauta, *un técnico de altos vuelos*, en sus palabras más o menos recordadas: alguien con una preparación técnica superior y las actitudes y aptitudes que le permiten resolver problemas variados y difíciles en un ambiente incómodo y a veces peligroso. Los astro-



nautas ayudan a volar y dirigir la nave y a cumplir los objetivos específicos de cada misión, ya sea poner un satélite en órbita o realizar una serie de experimentos científicos. Conocen y entienden los objetivos, están familiarizados con las técnicas programadas y son capaces de subirse a una carísima chatarra, montada sobre toneladas de combustible, con el fin de ponerle

gafas al Telescopio Espacial Hubble, o crecer cristales a muy baja gravedad. Realizan experimentos únicos que no diseñan ellos.

Pero, ¿qué hace, entonces, un astrónomo? Un astrónomo se comporta como un decodificador de televisión por satélite. Veámoslo en más detalle.

El astrónomo, óleo sobre lienzo de Johannes Vermeer, 1668. (Museo del Louvre)

EL DECODIFICADOR

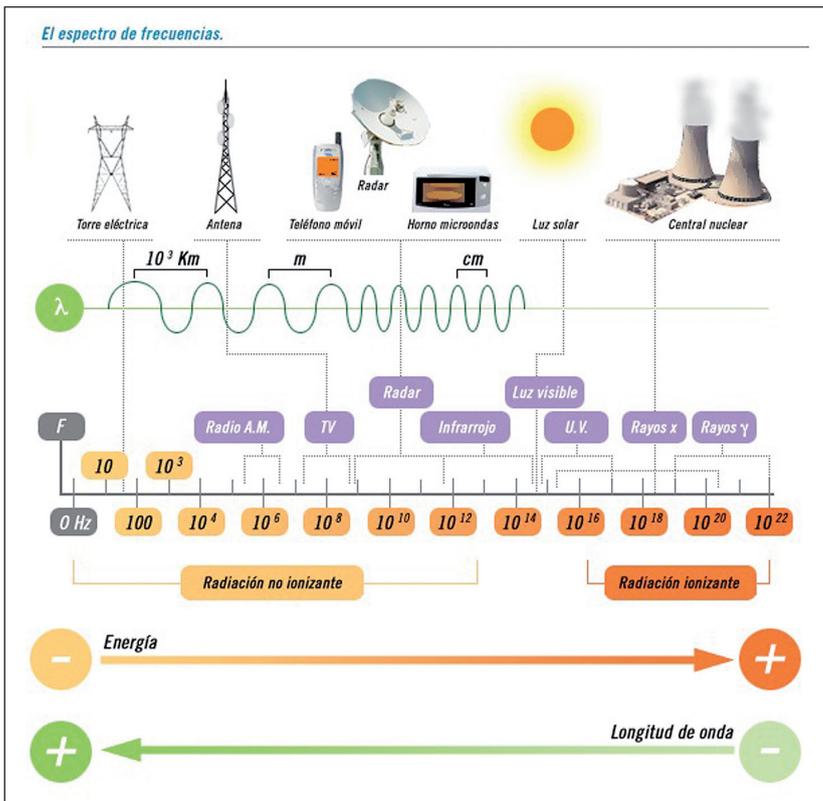
Si os habéis abonado a una televisión por satélite, os habrán entregado un paquete formado por una antena, un decodificador, y una tarjeta con los códigos de decodificación, supuesto ya contáis con un televisor. La antena recoge la información, en forma de onda electromagnética, que viene codificada desde el emisor; esta señal es amplificada y llevada al decodificador que, con los códigos adecuados contenidos en la tarjeta, descifra la señal y nos muestra en el televisor, un concurso, un partido de fútbol o un telediario, es decir, un trozo de nuestro universo.

El astrónomo realiza una tarea similar a la del decodificador. Las antenas recogen la luz proveniente de los astros diseminados en la bóveda celeste. La luz lleva información acerca del cuerpo emisor así como de los diferentes elementos que ha tenido que atravesar hasta llegar al receptor. Esta señal es entonces amplificada y analizada según los códigos de descifrado más adecuados (y disponibles), surgiendo así una visión de nuestro Universo, siempre parcial y a veces errónea, que es publicada en revistas especializadas para los colegas y divulgada en otros medios para el público interesado. Cómo veis las similitudes son contundentes.

Así, la historia de la Astronomía puede estructurarse de acuerdo al desarrollo de los diferentes códigos de interpretación y del diseño de las distintas antenas que nos han permitido captar la luz del Universo de una forma más precisa, amplia y útil para su interpretación por el astrónomo. Pero antes de realizar un breve viaje por la historia de la Astronomía, quizás debamos apuntar algunas ideas acerca de la luz, la fuente principal de conocimiento del Cosmos, y su relación con la atmósfera terrestre, una componente con la que mantenemos una estrecha relación de amor-odio; por un lado, permite la vida del astrónomo, pero entorpece notablemente su trabajo.

LA LUZ: EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Uno de los conceptos científicos más difíciles de definir es el de luz. Todos tenemos una noción empírica del término y la utilizamos cotidianamente en numerosas ocasiones; ¡qué luz más bonita hay!; ¡ponte a la luz!; ¡paga la luz!, pero si os pidieran que la definierais en términos sencillos os veríais en el mismo problema que tengo yo ahora. Empecemos por hacerlo complicado: la luz es otro nombre para el espectro electromagnético. Es decir, de las cuatro interacciones (o fuerzas) que conocemos en la naturaleza –interacción nuclear fuerte, interacción nuclear débil, gravitación y electromagnetismo–,



sorprendente que haya experimentos que sólo puedan ser explicados si consideramos una única naturaleza de la luz, onda o corpúsculo.

Dado que la luz es una onda podemos definir una de sus variables fundamentales, la longitud de onda, λ , que no es más que la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos. Considerando que la luz se transmite en el vacío a una velocidad constante c , de 300.000 km/s, definimos otra variable, la frecuencia ν , de tal forma que $\lambda\nu = c$. Así, la frecuencia tiene dimensiones de inversa de tiempo, y su unidad sería la inversa del segundo, también denominado hercio, y representado por Hz. Todo fotón, mínimo cuanto de luz, lleva asociada una cantidad de energía igual a $E = h\nu$, donde h es un factor de proporcionalidad denominado constante de Planck. Así, la luz se puede definir tanto por su longitud de onda como por su frecuencia, o lo que es lo mismo, por la cantidad de energía que es capaz de transportar cada corpúsculo luminoso. Cabe entonces señalar que si la longitud de onda es más larga, la frecuencia es más pequeña, y la energía transmitida por cada fotón es, por consiguiente, más pequeña.

En la Figura 1 se representa al espectro electromagnético completo, tanto en función de la longitud de onda como de la frecuencia. Diferentes intervalos de frecuencias han recibido diferentes nombres a lo largo de la historia de la ciencia, así, el rango de longitudes de onda observables por el ojo humano se ha denominado luz visible y como veremos posteriormente no fue hasta mediados del siglo XIX que el hombre pudo *ver* otros rangos de longitudes de onda. En la Figura 1 se observa como la banda de frecuencia de la luz visible es muy estrecha y que durante milenios el ser humano sólo ha podido ver una pequeña fracción de lo que estaba ocurriendo a nuestro alrededor; nos estábamos perdiendo casi toda la película. Todas estas longitudes de onda son generadas de forma natural en el mundo físico, los astros que observamos con nuestros ojos en el rango visible también emiten en otras longitudes de onda, dándonos información acerca de los distintos mecanismos físicos que los han generado y del medio que han atravesado hasta llegar a nuestros detectores. ¿Qué llega a nuestros detectores?, bueno, si lo permite la atmósfera.

LA ATMÓSFERA

La atmósfera es un filtro excepcional para las radiaciones ionizantes, aquellas capaces de modificar el ADN de los seres vivos. Tanto los rayos gamma, como los X y gran parte del ultravioleta, son totalmente absorbidos por las diferentes capas atmosféricas evitando que alcancen la superficie terrestre. La zona de las longitudes de onda más largas ($\lambda > 30 \text{ m}$), son también apantalladas por la ionosfera, y sólo una pequeña porción del espectro electromagnético en los rangos del ultravioleta cercano, visible, infrarrojo cercano y radio, pueden llegar a nuestros telescopios en tierra. Esto quizás se vea mejor en la

Figura 1. Diagrama esquemático del espectro electromagnético. (Cortesía Rafael Barzanallana, Univ. Murcia)

la luz representa al conjunto posible de partículas de intercambio de esta última interacción. De esta estrafalaria definición podemos sacar ya la conclusión de que la luz está formada por partículas, los fotones, que se emiten cada vez que las partículas con carga eléctrica interactúan entre si. Sin embargo, todos hemos oído alguna vez que la luz se comporta como una onda, de hecho la referimos en ciertas ocasiones como onda electromagnética, y esto es debido a que algunas de sus propiedades, como la generación de franjas de interferencias, son mejor explicadas si las formulamos en términos ondulatorios. La luz se nos ofrece como onda y como partícula y todavía resulta

Figura 2. En este diagrama se muestra la opacidad de la atmósfera a la radiación electromagnética. (Archivo)

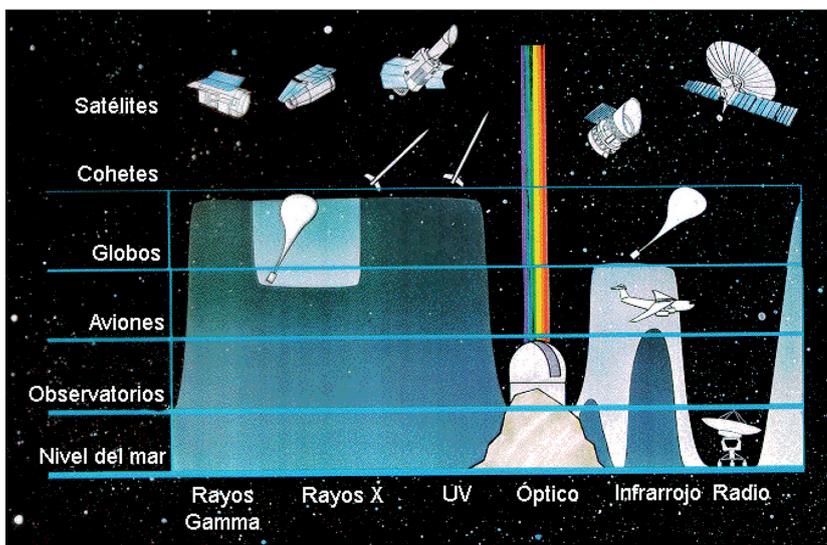


Figura 2, donde se muestra la absorción atmosférica a diferentes longitudes de onda, y donde se puede ver que incluso en aquellos rangos donde la atmósfera es parcialmente transparente, ésta absorbe, al menos, el veinte por ciento de la radiación incidente.

Sin embargo, el principal problema derivado de la atmósfera es la degradación de la calidad de imagen. Imaginaos la atmósfera como una lente de vidrio de densidad variable plagada de burbujitas que se crean y destruyen aleatoriamente. Estas células de convección se forman, normalmente, por la existencia de un pronunciado gradiente vertical de temperatura entre las capas más cercanas al suelo y las más elevadas creando un régimen turbulento en las regiones próximas al equilibrio.

El efecto de esta turbulencia es la de producir una refracción variable que genera focos que varían con el tiempo, de tal forma que por un lado se obtiene una imagen más ancha que la original y con una relación señal a ruido, por elemento de imagen, mucho más baja. Una medida de la calidad de la imagen se denomina *seeing* (a pesar de numerosos intentos por parte de muchos astrónomos no hemos encontrado todavía una buena traducción al castellano de este concepto) que no es más que una medida del diámetro angular (en segundos de arco) de la imagen final que engloba una determinada proporción de la energía recibida. A mayor *seeing* peor calidad de imagen.

Un parámetro de calidad de un telescopio es su poder separador que nos da la mínima distancia entre dos objetos capaces de ser distinguidos individualmente. Al igual que el *seeing* se mide en segundos de arco y la óptica ondulatoria nos dice que el poder separador de un telescopio (considerado libre de aberraciones y limitado únicamente por difracción) para una longitud de onda monocromática, es proporcional a λ/D donde λ es la longitud de onda y D el diámetro del telescopio.

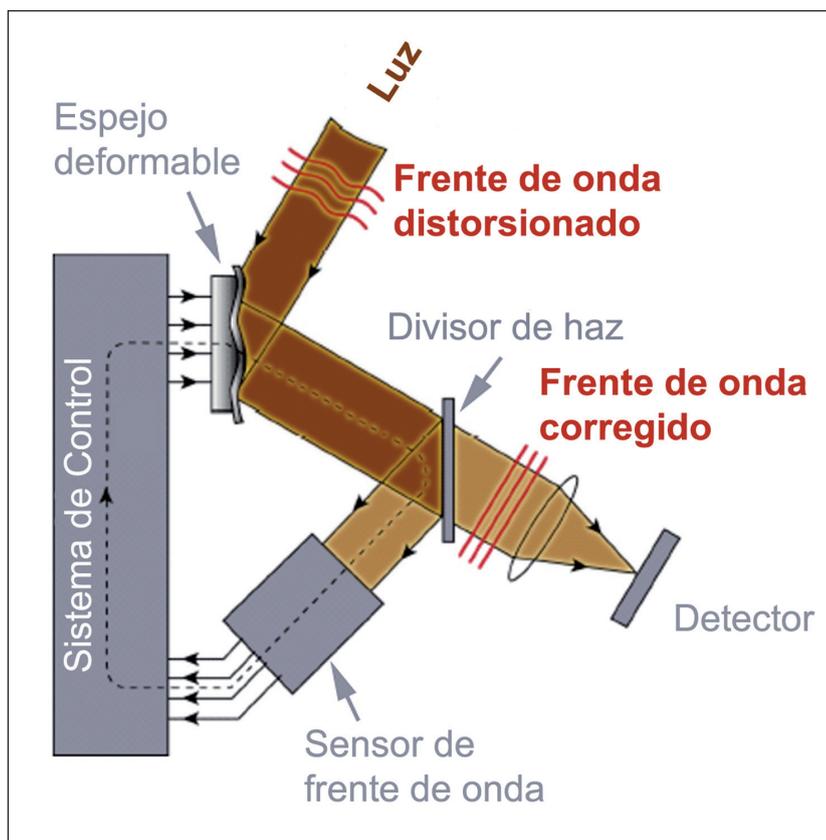
Así pues, la atmósfera incide negativamente en tres aspectos fundamentales de la observación de los cielos:

- Limita el rango de longitudes de onda observables.
- Absorbe un mínimo de un 20 % de la energía emitida por los astros y, por lo tanto, limita la visibilidad de los mismos.
- Degrada la calidad de imagen.

ALGUNAS SOLUCIONES

El hombre ha buscado constantemente soluciones a estos problemas, intentando ir más lejos en el límite de su capacidad de observación. Si recordamos algunas ideas expresadas anteriormente, la sensibilidad de una antena es proporcional a su diámetro al cuadrado y su poder separador, medido por la distancia mínima de separación que distingue dos objetos, también mejora linealmente con el diámetro del telescopio.

En la Tabla 1 se han esquematizado las mejoras necesarias para paliar en lo posible los problemas



derivados de la existencia del filtro atmosférico y algunas soluciones parciales adoptadas por el hombre. Como puede verse el aumento del diámetro del telescopio incide positivamente tanto en un aumento de la sensibilidad como en una mejora de la calidad de imagen.

El acceso a todo el rango luminoso sólo es posible si ponemos nuestros telescopios fuera de la atmósfera y si desarrollamos ópticas y detectores capaces de interactuar con fotones en todo el espectro electromagnético. Pero es que los telescopios espaciales resuelven todos los problemas derivados del filtro atmosférico por el contundente método de saltarse la atmósfera. Su único inconveniente es el precio, poner un kilogramo de carga útil en órbita vale mucho dinero y el coste crece exponencialmente con el peso de la misma. Sin embargo es una inversión rentable en muchos aspectos, no sólo por la obtención de

Figura 3. Esquema de un sistema de óptica adaptativa. El frente de onda del emisor atraviesa la atmósfera y sufre algunas deformaciones, variables con el tiempo a alta frecuencia. Una parte de esa luz es enviada a un sensor de frente de onda, que lo evalúa en tiempo real, y envía las correcciones pertinentes a un espejo deformable de tal forma que su acción corrige el frente de onda que llega al detector. (Adaptado de Caltech)

La Astrofísica es, hoy en día, una de las grandes aventuras de la humanidad.

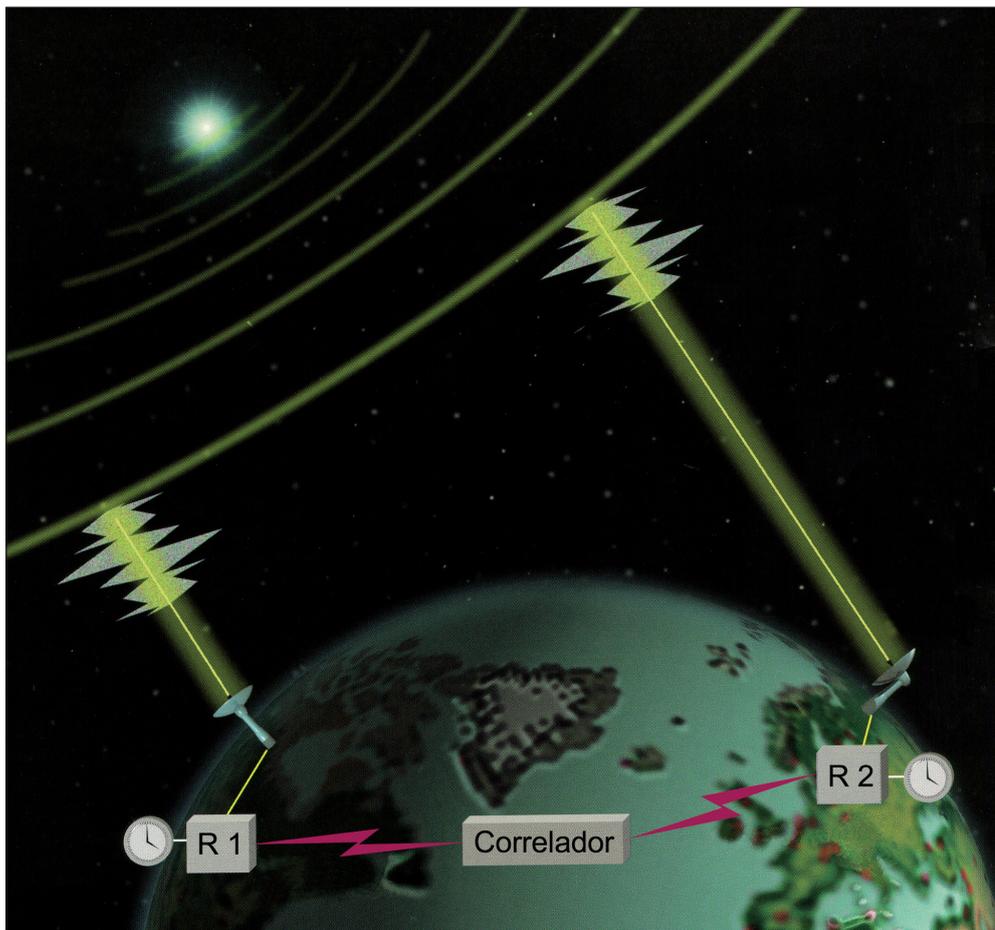


Figura 4. Esquema de un interferómetro en radio, con una línea de base intercontinental (VLBI en sus siglas inglesas, que se traduce por interferometría de muy larga base). Con esta técnica se puede obtener un poder separador de hasta una milésima de segundo de arco para longitudes de onda radio. (Adaptado de MIT/Haystack)

resultados científicos únicos, sino también por el retorno económico, tecnológico y político de gran incidencia en el desarrollo de una economía basada en el conocimiento.

Por último, el significativo avance en velocidad de cálculo y almacenaje de información de nuestros ordenadores, ocurrido en los últimos treinta años, ha contribuido considerablemente al desarrollo de dos técnicas observacionales denominadas óptica adaptativa e

TABLA 1 Problemas derivados de la observación a través de la atmósfera terrestre y algunas soluciones propuestas	
Sensibilidad	Telescopios de mayor diámetro. Telescopios fuera de la atmósfera.
Calidad de imagen	Telescopios de mayor diámetro. Telescopios fuera de la atmósfera. Óptica adaptativa. Interferometría.
Rango espectral	Telescopios fuera de la atmósfera.

interferometría. La primera se basa en el análisis en tiempo real de las deformaciones inducidas por la atmósfera en la imagen del emisor. La luz de una estrella brillante recibida por el telescopio es separada en dos haces, uno de los cuales es analizado en tiempo real, buscando la estructura de las deformaciones en el frente de onda y mandando una señal a un espejo deformable que compensa las perturbaciones atmosféricas del segundo haz, produciendo una imagen nítida sólo limitada por la difracción del telescopio (ver Figura 3 para un esquema de esta metodología). Esta operación se realiza una media de setecientas veces por segundo. Obviamente nuestro interés no se centra solamente en el análisis de estrellas brillantes, sino en objetos extensos más débiles como suelen ser los elementos de la fauna extragaláctica. El problema reside en que esta metodología es sólo aplicable a un campo de visión muy pequeño, de unos pocos segundos de arco en diámetro, donde es difícil encontrar una estrella brillante en la vecindad de una galaxia muy débil. En ese caso se suele acudir a la fabricación de una estrella artificial excitando una capa atmosférica de sodio con un potente y bien colimado láser. La mayoría de los telescopios de la clase 8-10 metros están dotados con esta tecnología, y una buena parte de la clase 3-5 metros han desarrollado también

un sistema de óptica adaptativa.

Por último quisiera comentar, aunque sólo sea de pasada, los principios de la técnica interferométrica que permite obtener imágenes de alta calidad con un alto poder separador. La idea es muy simple, aunque su realización sea bastante complicada y esté actualmente limitada a los rangos de longitudes de onda, radio, e infrarrojo. Dado que la distancia mínima de separación entre dos objetos distinguibles individualmente es proporcional a la expresión λ/D , resulta claro que dado una banda de longitudes de onda la única forma de aumentar el poder separador es aumentando el tamaño del telescopio, pero también es evidente que no podemos llevar el tamaño de nuestros telescopios al infinito, ni tan siquiera a una magnitud mensurable demasiado grande (el mayor telescopio óptico-IR en operación es el GTC y tiene sólo 10,4 m de diámetro). Pero imaginaos que estáis trabajando con la emisión atómica del hidrógeno interestelar cuya longitud de onda característica es de 21 cm. En ese caso, para obtener el mismo poder separador que el GTC a 5.000 angstroms¹ (la longitud de onda de máxima emisión del Sol) tendríamos que construir un radiotelescopio con un diámetro de 4.000 km, tarea demencial incluso para los astrónomos.

1. Un angstrom (Å) es una unidad de longitud equivalente a una cienmillonésima de centímetro (10^{-8} cm).

Ahora bien, suponed que tenéis dos radiotelescopios de 10 m de diámetro cada uno separados por 4.000 km. Si somos capaces de *acoplar* (*correlacionar* en el argot) la señal que llega a ambos telescopios procedentes del mismo frente de onda, estaríamos viendo el equivalente a un poder separador de un telescopio de 4.000 km de diámetro, pero eso sí, con una sensibilidad notablemente inferior a la de un telescopio de 10 m. La correlación de las señales es algo realmente complicado, que se convierte en una pesadilla cuando las distancias entre los telescopios son intercontinentales (en el caso de radio, ver Figura 4) o cuando queremos irnos hacia longitudes de onda más cortas (visible).

LAS ANTENAS: ÓPTICA Y DETECTORES

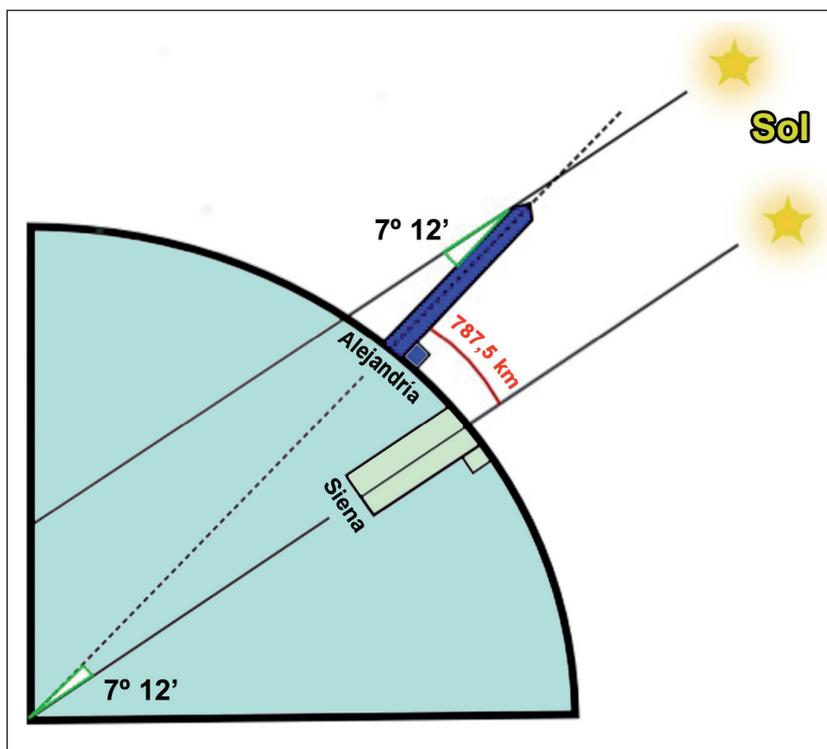
Resulta claro que queremos vencer las limitaciones de la atmósfera y observar objetos débiles, con gran lujo de detalle y en todo el rango de longitudes de onda. Entonces tenemos que construir antenas con mayor sensibilidad, mayor poder separador y con detectores capaces de captar todo el rango de longitudes de onda y ponerlas en los lugares más adecuados para su mejor aprovechamiento.

Una antena siempre está formada por dos unidades esenciales: el sistema óptico y el detector. El sistema óptico aumenta la sensibilidad de la antena y su calidad de imagen, o puede incluir elementos dispersores que nos permitan visualizar el espectro del emisor. El detector nos permite *ver* los fotones de la luz incidente.

Todo el mundo tiene o ha tenido una cámara fotográfica (la antena), ya sea digital o con película fotográfica, y en ella podemos distinguir claramente entre ambas componentes. Si quitamos la película a la cámara fotográfica, todo lo que queda es el sistema óptico, un conjunto de lentes y espejos que captan la luz del emisor y la llevan al plano focal, dentro de un campo de visión determinado, con una magnificación dada, y en foco. Allí se encuentra situado el detector, la película o el CCD, en el caso de que sea una cámara digital, que interacciona con los fotones incidentes y nos proporciona un negativo fotográfico o una imagen digital.

Las antenas utilizadas por el hombre para escrutar los cielos han variado con el tiempo, pero debemos distinguir entre los avances realizados en el desarrollo de la óptica y el de los detectores. En la Tabla 2 hemos esquematizado el desarrollo histórico de ambos componentes.

Es un corto guión donde faltan numerosos e importantes detalles tecnológicos, pero incluye la mayoría de los grandes hitos en el desarrollo de las antenas astronómicas. Durante milenios el ojo ha sido la única antena utilizada por el hombre para escrutar los cielos. El iris, la córnea, el cristalino y el globo ocular forman un sistema óptico de gran adaptabilidad, y la retina, aunque limitada al rango de colores que forman el arco iris, es un estupendo detector con un amplio rango dinámico que nos permite ver objetos a contraluz y disfrutar de la Vía Láctea en las noches



sin Luna, pero desde un punto de vista astronómico presenta algunos inconvenientes: no puedes exponer un tiempo superior a la décima de segundo y nadie excepto el observador puede *ver* la imagen formada en su retina. Así, el hombre sólo alcanza a ver las estrellas de la sexta magnitud a simple vista, y sólo

Figura 5. Esquema del experimento de Eratóstenes. El ángulo formado por el rayo solar incidente y el gnomon en Alejandría es el mismo ángulo subtendido por el arco, sobre la superficie terrestre, formado por la línea que une Siena y Alejandría. Midiendo ese ángulo y estimando la distancia entre Alejandría y Siena se puede estimar el radio de la Tierra. (Archivo)

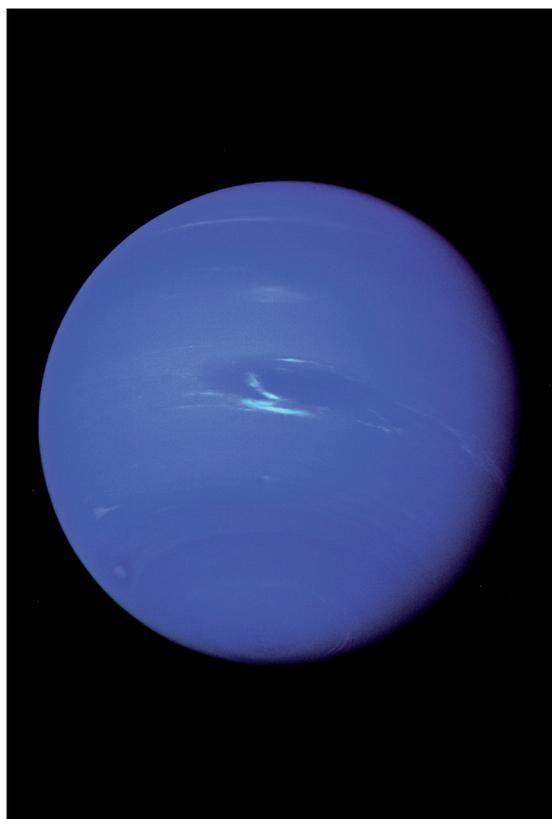
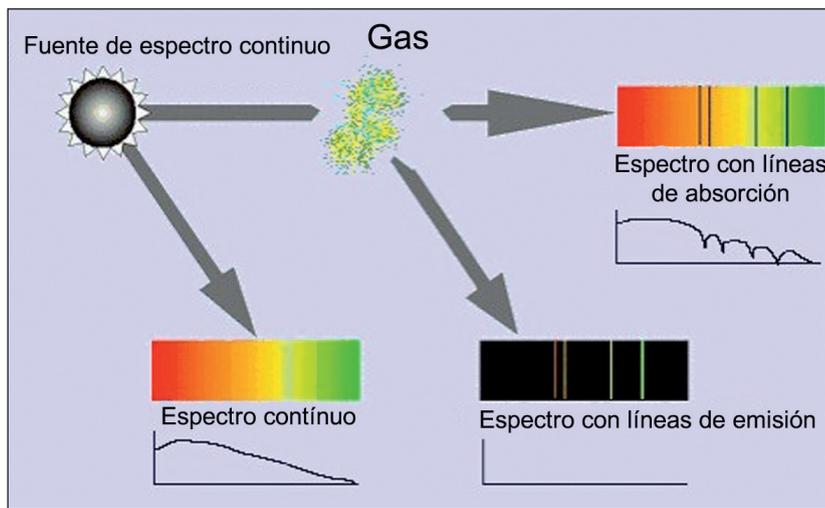


Figura 6. El planeta Neptuno, descubierto por 1846, significó el triunfo de la aplicación de la mecánica celeste. Imagen realizada por la sonda Voyager 2 en 1989. (NASA/JPL)

Figura 7. Esquema de las leyes de Kirchhoff para la espectroscopia de gases.

El paso de un continuo luminoso a través de un gas frío genera líneas de absorción en el espectro saliente a frecuencias características de los fotones absorbidos por la nube de gas. Cuando se llega a un equilibrio termodinámico, la nube de gas reemite estos fotones produciendo un espectro de emisión. La forma del continuo espectral viene dada por la temperatura del cuerpo negro emisor.

(Cortesía proyecto Partner)



puede compartir sus observaciones una vez éstas han sido transformadas y elaboradas por su cerebro.

La introducción del telescopio mejoró el sistema óptico pero no cambió nuestro detector. Cualquier descripción de un objeto celeste obtenida antes de 1840 es una interpretación pictórica o verbal de una única imagen retinal. La placa fotográfica cambió drásticamente el panorama; la imagen del cielo se fijaba con una emulsión sobre un sustrato de cristal, y cualquier otro astrónomo podía ver, horas o años después, la misma porción de cielo observada. La placa, por otro lado, representaba un nuevo método de almacenamiento de información más compacto y duradero, contenía cientos de objetos celestes cuyas posiciones relativas y brillos aparentes podían medirse en cualquier momento y no necesariamente a pie de telescopio; nos podíamos llevar el trabajo a casa.

LOS CÓDIGOS

Zdeněk Kopal (astrónomo británico de origen checo) escribió, en los años ochenta del siglo pasado, un libro titulado *El lenguaje de las estrellas* donde proponía que el movimiento relativo de las componentes de un sistema binario modulaba la luz que emitían ambas estrellas, de tal forma que la onda recibida en nuestros telescopios contenía información relativa al sistema binario y debía ser decodificada en

tierra para obtener la información concerniente al sistema. Imaginaba al astrónomo de sistemas binarios como una especie de ingeniero de telecomunicación cósmico que tenía que descifrar el lenguaje de las estrellas. Durante varios años y en diversos capítulos de la misma saga, Kopal y sus colaboradores escribieron el código para descifrar la información contenida en este tipo de sistemas.

En realidad, los físicos y astrónomos llevan escribiendo diferentes códigos de interpretación de la luz desde

el nacimiento de la ciencia, y proporcionando las herramientas intelectuales necesarias para el avance de la Astronomía. Veamos tres ejemplos de códigos de interpretación representativos de diferentes épocas: Geometría, Gravitación y Espectroscopia.

GEOMETRÍA

A los griegos debemos el germen de la ciencia occidental. En los cinco siglos anteriores al nacimiento de Cristo, Grecia proporcionó muchos filósofos, varias escuelas de pensamiento y un pequeño grupo de astrónomos que basándose en una simple hipótesis bien fundamentada, la luz se transmite en línea recta, y un código de interpretación bien conocido, los Elementos de Euclides, alcanzaron un sorprendente conocimiento acerca de los tamaños y distancias relativas de tres de los componentes más familiares del Sistema Solar: Tierra, Luna y Sol.

Quizás, el más conocido exponente de este grupo de astrónomos fuera Eratóstenes, quien en el siglo III a.C. diseñó y realizó un famoso experimento para medir el radio de la Tierra. Él se dio cuenta de que para una misma época del año, el solsticio de verano, el Sol no producía sombra, estaba en el zenit al mediodía de Siena (la actual Asuán de Egipto), mientras que en Alejandría, a esa misma hora de ese mismo día un palo vertical generaba una sombra de longitud finita.

TABLA 2. Principales hitos en el desarrollo de telescopios y detectores

Telescopios (Sistema Óptico)	Detectores
El ojo humano.	La retina del ojo.
El telescopio óptico (siglo XVII).	Placa fotográfica (desde los años 40 del siglo XIX).
El radiotelescopio (desde los años 30 del siglo XX).	Detectores radio (desde los años 30 del siglo XX).
Telescopios espaciales (desde los años 60 del siglo XX).	Otras longitudes de onda (desde los años 60 del siglo XX).
Interferómetros y telescopios segmentados (desde los años 70 del siglo XX).	Detectores lineales (desde los años 70 del siglo XX).

Interpretó este hecho como una consecuencia de la esfericidad de la Tierra y se percató de que midiendo la longitud de la sombra, conociendo la longitud del gnomon (es decir, sabiendo la tangente del ángulo con el que inciden los rayos solares en un determinado lugar, a una hora dada), podía determinar el radio terrestre y, por tanto, la circunferencia máxima de la Tierra, si conocía la distancia entre ambas ciudades (ver Figura 5). Las medidas de Eratóstenes lo llevaron a un valor de 40.000 km para la circunferencia máxima de la Tierra, pero lo sorprendente no es la cercanía de su resultado al valor real, sino la aplicación de un simple código de decodificación, la Geometría, para diseñar e interpretar una campaña de observación capaz de medir el tamaño de nuestro planeta.

GRAVITACIÓN DE NEWTON

Cuesta trabajo enumerar las aportaciones de Newton a la ciencia, pero creo que muchos estamos de acuerdo en que *Los principios matemáticos de la Filosofía Natural* es el libro fundacional de la Física, y el hito a partir del cual se construyó el edificio del método científico actual. En él se exponen de forma axiomática los principios de la Dinámica y, sobre todo, se establece una nueva forma de abordar el estudio de la Filosofía Natural basada en la formulación de los problemas en un lenguaje matemático, cuya resolución dentro de la propia lógica matemática lleva a predicciones susceptibles de ser contrastadas con las observaciones. Esa capacidad de predicción y falsación convirtió a la Física en la reina de las disciplinas científicas de los tres últimos siglos.

Pero Newton, aparte de establecer las relaciones funcionales entre el movimiento y sus causas, estableció la formulación de una de las cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza, la interacción gravitatoria. Así, dos cuerpos, por el mero hecho de poseer masa, se atraen con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Ahora podíamos analizar el movimiento de los planetas, estimar sus órbitas y predecir la posición de los mismos para un momento dado. Los siglos XVIII y XIX dieron lugar al desarrollo de una rama de la Astronomía denominada Mecánica Celeste, cuyo resultado más espectacular fue el descubrimiento de Neptuno, un planeta cuya presencia fue primero inferida y posteriormente observada. Durante el siglo XIX se habían notado variaciones de la órbita de Urano con respecto a la efeméride calculada. Urbain Leverrier y John Couch Adams trabajaron independientemente en el análisis de estas variaciones, postulando que se debían a la presencia de un octavo planeta que perturbaba la órbita de Urano. Ambos llegaron a resultados similares acerca de la posición más probable del desconocido planeta, pero el francés tuvo más suerte. Envío sus predicciones a Galle, un conocido astrónomo alemán, quien apuntó su telescopio a la región estimada por Leverrier. El 23 de septiembre de 1846 encontró al nuevo

planeta a sólo un grado de la posición predicha por Leverrier.

El descubrimiento de Neptuno (Figura 6), la frontera planetaria de nuestro Sistema Solar, es un maravilloso ejemplo de la aplicación del código de la mecánica celeste a la observación del movimiento planetario.

ESPECTROSCOPIA Y ASTROFÍSICA

La Astronomía, o mejor dicho, el estudio de la posición y movimiento de los astros es, sin lugar a duda, la ciencia más antigua de la que tenemos noticia. Sin embargo la Astrofísica es una ciencia moderna, comenzó a mediados del siglo XIX, creó sus bases fundamentales a principios del siglo XX y está alcanzando una época de esplendor en los albores del XXI gracias, como hemos visto, al desarrollo acelerado de nuevas tecnologías.

¿Qué diferencia existe entre Astronomía y Astrofísica? La Astronomía no tenía herramientas para responder a preguntas acerca de la naturaleza de los

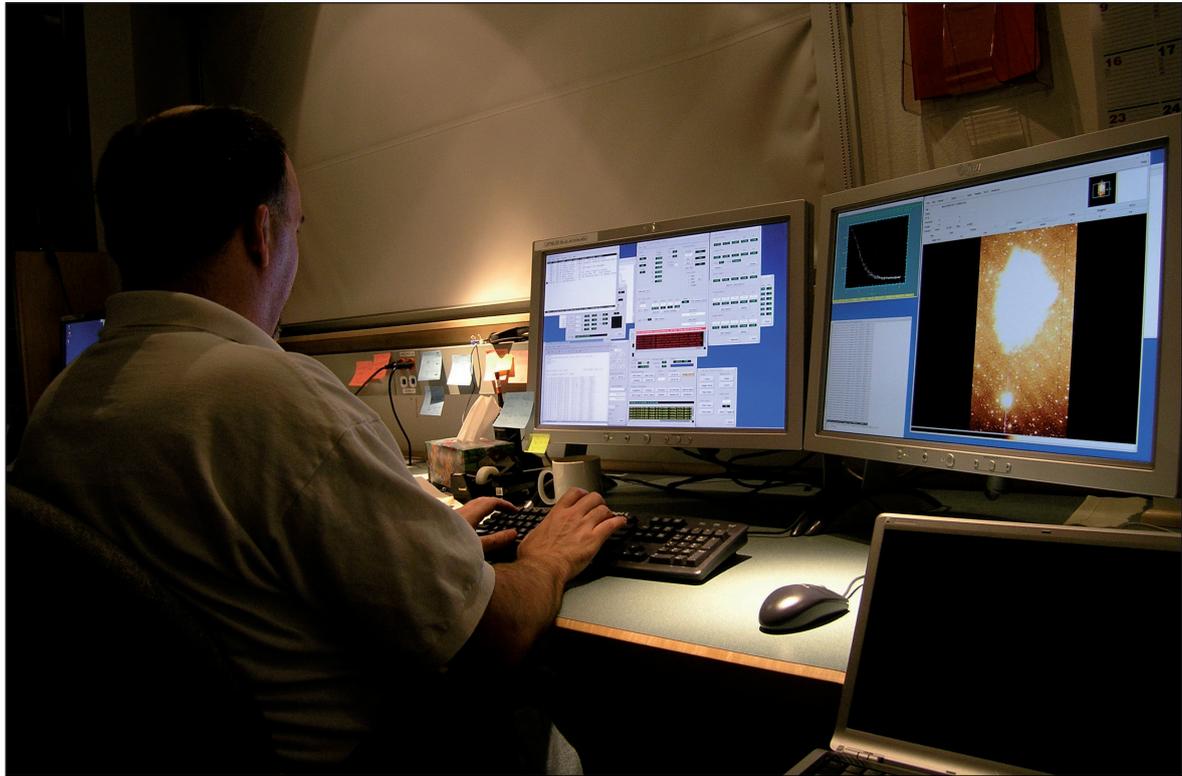
El astrónomo es un decodificador de la luz.

astros: ¿de qué está hecha la Luna?, ¿cuál es la materia de los cometas?, ¿cuál es la fuente de energía de las estrellas?, etc. Sólo podía analizar sus posiciones y medir, de forma grosera, la luz que emitían, pero no existía una teoría de la interacción de la materia con la radiación (la luz) que nos permitiera, a partir del análisis de la luz que nos llega de los objetos celestes, determinar su estructura interna y sus propiedades físicas.

Dos hechos vinieron a marcar el nacimiento de la Astrofísica o Astronomía Moderna, como también se la conoce. La invención de la fotografía y su rápida aplicación a la Astronomía, y el desarrollo de la espectroscopía y las primeras leyes empíricas que conectan la luz que emite un cuerpo con sus propiedades físicas. Kirchhoff y Bunsen construyeron, en 1860, el primer espectrógrafo para el análisis de la naturaleza y propiedades de los gases y establecieron las leyes fundamentales de la espectroscopía. Resumidas son estas tres:

- Un cuerpo caliente emite luz con un color dado por la temperatura del cuerpo.
- La radiación al atravesar una nube de gas fría es absorbida en longitudes de ondas preferenciales, características y específicas de cada elemento químico que compone el gas formando un espectro de absorción (Figura 7).

Figura 8. Un astrónomo trabajando en la sala de control de un telescopio...
(Cortesía LBT)



- La nube de gas al alcanzar el equilibrio térmico emite luz sólo en esas líneas preferenciales dando lugar a un espectro de emisión (Figura 7).

Esta herramienta (el espectrógrafo) y su código de interpretación les permitió descubrir nuevos elementos químicos como el rubidio o el cesio que posteriormente fueron aislados en laboratorios terrestres. Ya en 1814, Josep von Fraunhofer había obtenido un espectro del Sol que mostraba, sobre un continuo arco iris, la existencia de estrechas bandas oscuras, cuyas longitudes de onda características fueron medidas por Fraunhofer para 507 líneas. Él había observado que algunas líneas del espectro solar estaban situadas en la misma posición que las que se obtenían en el espectro de las nubes de sodio en el laboratorio, pero hubo que esperar a los resultados de Kirchhoff y Bunsen para que la asociación entre líneas espectrales y composición química quedara establecida de forma definitiva, y los astrónomos tuviéramos, por primera vez, un nuevo código para indagar la naturaleza de los objetos celestes.

Si unimos la capacidad de obtener espectros de objetos celestes con la de fijarlos sobre una placa fotográfica tenemos el comienzo de la Astrofísica. Los años siguientes fueron de espectacular desarrollo, aparecieron numerosas leyes empíricas que establecieron las constricciones observacionales de la teoría de la evolución estelar, la fuente de energía de las estrellas, el tamaño de la Vía Láctea, la existencia de otras galaxias y la escala de tamaños del Universo, la ley de expansión de Hubble y otros descubrimientos menos conocidos pero que han contribuido a que la

Astrofísica sea, hoy en día, una de las grandes aventuras de la humanidad.

LOS ASTRÓNOMOS

En este texto hemos comparado el trabajo del astrónomo con el de decodificador de la luz que llega a nuestras antenas, pero obviamente es un aspecto parcial de su labor, una faceta que he resalado para hilvanar el hilo conductor de un artículo dirigido, principalmente, a dar una visión general de la Astronomía. Pero el astrónomo (Figura 8) es algo más; diseña y construye las antenas y detectores que necesita para alcanzar sus objetivos científicos; planifica las campañas de observación como un estrategia militar para captar aquella porción de espectro que más y mejor información puede darle acerca de la naturaleza del objeto en estudio; escribe códigos informáticos para desentrañar la información que le llega al detector; analiza esta información en función de sus mejores teorías físicas; y propone modelos y nuevas teorías acerca de la naturaleza, origen y evolución de nuestro Universo y de sus componentes.

No me resisto a finalizar estas notas sin incluir unas frases entresacadas de la editorial del periódico británico *The Guardian*, correspondiente al 25 de julio de 2009, referidas a los astrónomos: *Los astrónomos del mundo compiten, cooperan y conferencian entre ellos; son una comunidad global en el mejor sentido de la palabra, y les debemos nuestra comprensión del espacio y del tiempo, de la luz, de la masa y de la gravedad: en una palabra, todo.*

Que así sea. **A**