

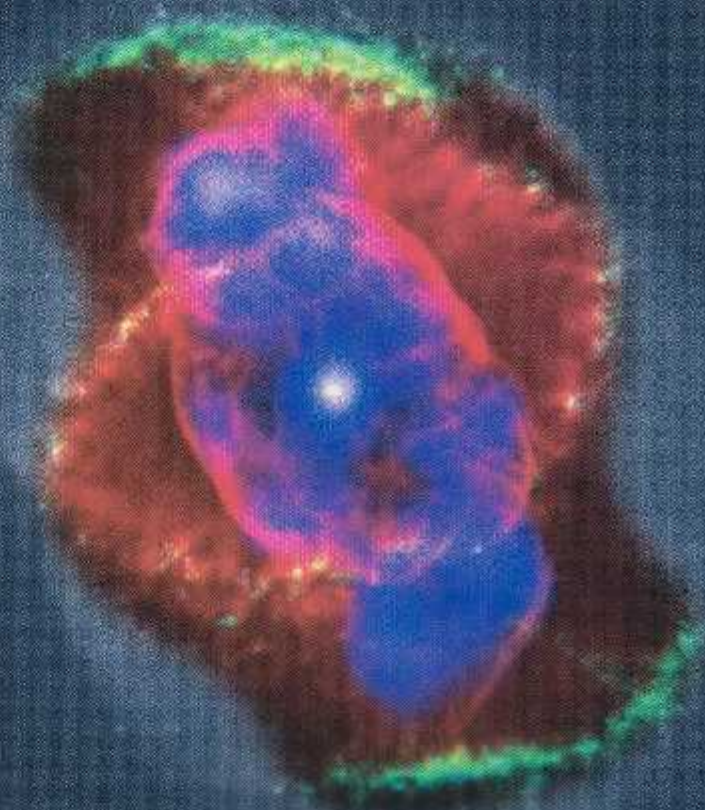
Nebulosas planetarias: la hermosa muerte de las estrellas

220

LA
BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

ASTRONOMIA

SILVIA TORRES
JULIETA FIERRO



NEBULOSAS PLANETARIAS: LA HERMOSA MUERTE DE LAS ESTRELLAS

Las nebulosas planetarias son el resultado de la explosión de una estrella que se desmenuza en pedruzcos al perder la mayor parte de su masa. Este tipo de nebulosas se forman cuando una estrella de baja masa (como el Sol) llega al final de su vida y se desmenuza en pedruzcos al perder la mayor parte de su masa. Este tipo de nebulosas se forman cuando una estrella de baja masa (como el Sol) llega al final de su vida y se desmenuza en pedruzcos al perder la mayor parte de su masa. Este tipo de nebulosas se forman cuando una estrella de baja masa (como el Sol) llega al final de su vida y se desmenuza en pedruzcos al perder la mayor parte de su masa.

Comité de selección de obras

Dr. Antonio Alonso
Dr. Francisco Bolívar Zapata
Dr. Javier Bracho
Dr. Juan Luis Cifuentes
Dra. Rosalinda Contreras
Dra. Julieta Fierro
Dr. Jorge Flores Valdés
Dr. Juan Ramón de la Fuente
Dr. Leopoldo García-Colín Scherer
Dr. Adolfo Guzmán Arenas
Dr. Gonzalo Halfiter
Dr. Jaime Martuscelli
Dra. Isaura Meza
Dr. José Luis Morán López
Dr. Héctor Nava Jaimes
Dr. Manuel Peimbert
Dr. José Antonio de la Peña
Dr. Ruy Pérez Tamayo
Dr. Julio Rubio Oca
Dr. José Sarukhán
Dr. Guillermo Soberón
Dr. Elías Trabulse

La Ciencia para Todos

Desde el nacimiento de la colección de divulgación científica del Fondo de Cultura Económica en 1986, ésta ha mantenido un ritmo siempre ascendente que ha superado las aspiraciones de las personas e instituciones que la hicieron posible. Los científicos siempre han aportado material, con lo que han sumado a su trabajo la incursión en un campo nuevo: escribir de modo que los temas más complejos y casi inaccesibles puedan ser entendidos por los estudiantes y los lectores sin formación científica.

A los diez años de este fructífero trabajo se dio un paso adelante, que consistió en abrir la colección a los creadores de la ciencia que se piensa y crea en todos los ámbitos de la lengua española —y ahora también de la portuguesa—, razón por la cual tomó el nombre de La Ciencia para Todos.

Del Río Bravo al Cabo de Hornos y, a través de la mar océano, a la Península Ibérica, está en marcha un ejército integrado por un vasto número de investigadores, científicos y técnicos, que extienden sus actividades por todos los campos de la ciencia moderna, la cual se encuentra en plena revolución y continuamente va cambiando nuestra forma de pensar y observar cuanto nos rodea.

La internacionalización de La Ciencia para Todos no es sólo en extensión sino en profundidad. Es necesario pensar una ciencia en nuestros idiomas que, de acuerdo con nuestra tradición humanista, crezca sin olvidar al hombre, que es, en última instancia, su fin. Y, en consecuencia, su propósito principal es poner el pensamiento científico en manos de nuestros jóvenes, quienes, al llegar su turno, crearán una ciencia que, sin desdeñar a ninguna otra, lleve la impronta de nuestros pueblos.

Primera edición, 2009.

Tomás, Silvia, y Julieta Fierro

Nebulosas planetarias: la hermosa muerte de las estrellas / Silvia Tomás, Julieta Fierro. — México:

FCE, S.R. Conacyt, 2009.

137 p.: ilus.; 21 x 14 cm. — (Colec./La Ciencia para Todos.; 200)

Texto para: nivel medio superior

ISBN 978-607-16-0072-1.

1. Astronomía 2. Nebulosas 3. Divulgación científica I. Fierro, Julieta, coord. II. 500. 00. 1

LC Q8855

Ortografía: 500.2 C.369 V.220

Distribución mundial

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Fotografía de la portada: Y. Chai y colaboradores, J. P. Harrington y E. Bakoswski, NASA.

D. R. © 2009, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco, 227, 14/38 México, D. F.
Empresa certificada ISO 9001:2000

Comentarios: lsociencias@fondodeculturaeconomica.com
editorial.fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55)5227-4672 Fax (55)5227-4694

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio, sin la autorización por escrito del titular de los derechos.

ISBN 978-607-16-0072-1

Impreso en México • Printed in Mexico

ÍNDICE

I. <i>Un poco de historia</i>	13
Las constelaciones y el Catálogo de Messier	14
William y Caroline Herschel	16
Urano	17
Los asteroides	19
El descubrimiento de las nebulosas planetarias	21
John Herschel	22
II. <i>Telescopios y radiación</i>	24
La pupila y el telescopio	24
El telescopio de Galileo	26
El telescopio de Newton	27
La radiación electromagnética	28
Más sobre la radiación	32
Telescopios modernos	33
III. <i>Las estrellas y otros temas</i>	35
La escala de magnitudes	36
Los colores de las estrellas	38
La fuerza de gravedad	40
Las masas de las estrellas	41
Distancias	43
Espectros	51
El efecto Doppler y la velocidad	52

El diagrama H-R	53	VI. <i>Las aportaciones mexicanas</i>	117
La materia entre las estrellas	55	Descubrimientos	117
La galaxia	58	Las observaciones	119
¿De qué están hechas las estrellas?	60	Nebulosas planetarias en luz ultravioleta y en rayos X	121
IV. <i>El Sol y la evolución de las estrellas</i>	62	Nebulosas planetarias en luz infrarroja	122
El Sol, estrella de la vida	62	Nebulosas planetarias en radiofrecuencias	123
La formación de las estrellas	69	Modelos matemáticos	123
Las estrellas rojas	71	Más de lo hecho en México	124
Las estrellas azules	72	Para terminar	125
La masa determina la vida de las estrellas	74		
Las estrellas reciclan el gas	75	Glosario	127
Somos polvo de estrellas	77		
V. <i>Al fin, las nebulosas planetarias</i>	79		
Las gigantes rojas	80		
Para terminar: una estrella pulsante	81		
Envolventes. El momento clave	82		
La combinación perfecta	83		
Expansión de la envoltura	84		
El tamaño de las nebulosas	86		
Las nebulosas planetarias brillan	87		
La composición de los gases	90		
Formas extraordinarias	92		
Expulsiones múltiples	97		
Granitos de arena	99		
Regresando a la estrella central	101		
Tiempo de vida	104		
Muchas estrellas tienen pareja	106		
Futuro de la Tierra y del resto de los planetas	108		
Buscando nebulosas planetarias	109		
Distancias	111		
Su lugar en el espacio	113		
Nebulosas planetarias en otras galaxias	114		
Nombres	115		

*A mis hijos Antonio y Mariana,
por todo lo que me han enseñado*

SILVIA TORRES

*A mi hermano Héctor,
quien me hizo ver la luz de la música*

JULIETA FIERRO

*Agradecemos a Luis Felipe Rodríguez,
por la lectura cuidadosa y por sus sugerencias*

I. Un poco de historia

Los astros son espectaculares; un ejemplo notable son las nebulosas planetarias, en las que hay anillos y lóbulos de gas brillante alrededor de una estrella de color azul o blanco. Con un telescopio modesto se pueden observar y aparecen como discos verdes.

Las nebulosas planetarias son las etapas finales de la evolución de las estrellas similares al Sol; es decir, nos hablan del futuro de nuestra estrella. El ser humano busca respuestas a preguntas fundamentales; queremos tener certeza de hacia dónde vamos. En este libro aprenderás lo que le sucederá al mundo dentro de 5 000 millones de años.

Este volumen se refiere a los objetos celestes; también trata sobre las maneras en que el ingenio humano ha logrado desentrañar sus cualidades. En ocasiones es más apasionante leer sobre cómo se averiguan los atributos astrales que la lista de datos.

El libro comienza por la historia. Se describe cómo William Herschel y su hermana Caroline descubrieron las nebulosas planetarias. Posteriormente se describirá la importancia de las observaciones y los instrumentos. Se dedicarán varios capítulos a la descripción de las estrellas y su evolución, ya que las nebulosas planetarias son estrellas en el proceso final de su existencia. Haremos especial énfasis en el estudio de los espectros, la calidad de la luz de los astros (figura 1.1).

Las secciones dedicadas a las nebulosas planetarias se inician aproximadamente a la mitad del libro. El motivo es que para comprenderlas es más sencillo si se tiene un antecedente general sobre la astronomía. También hemos incluido una sección en la que describimos las aportaciones que al estudio de estos fascinantes objetos han realizado astrónomos mexicanos. Al final del libro se incluye un glosario que tú puedes ampliar con tus comentarios y nuevas definiciones.

El libro se puede leer de corrido o por capítulos separados. Te sugerimos leerlo lentamente. En general, los temas de ciencia pueden parecer difíciles si no te detienes a reflexionar; parte de la dificultad está en que te familiarices un poco con el tipo de vocabulario o el uso de fórmulas. Las autoras estamos convencidas de que si le dedicas un poco de tiempo, disfrutará mucho con el conocimiento que adquieras.

LAS CONSTELACIONES Y EL CATÁLOGO DE MESSIER

Si observas un cielo estrellado a la misma hora, durante varias noches consecutivas, notarás que las estrellas forman grupos invariables; a estos grupos se les llama constelaciones. Los astrónomos han dividido las estrellas de la bóveda celeste en 88 constelaciones, las cuales son útiles para ubicar los astros, como si fueran los continentes del cielo.

Entre las constelaciones mejor conocidas está la Osa Menor, donde se encuentra la estrella Polar, que nos indica hacia dónde está el norte. Otra es Orión, que se ve especialmente hermosa durante los meses de invierno, cuando está despejado en México. Tiene forma de metate, o al menos así les parecía a los mexicas. Es un gran rectángulo formado por cuatro estrellas muy brillantes; en el centro hay tres del mismo brillo, que algunos llaman las Tres Marías o los Reyes Magos.

Las constelaciones son grupos arbitrarios de estrellas; los

nombres que usamos actualmente en el hemisferio norte son los que definieron los griegos, pero hubiesen podido ser otros, como los que inventaron los pueblos mesoamericanos. Para los griegos, Orión era un cazador; las tres estrellas que mencionamos antes eran su cinturón, que sostenía la espada apenas perceptible.

Además de estrellas, en cada constelación hay otra clase de objetos. Algunos son de aspecto nebuloso, como los restos de las estrellas y las galaxias. Un ejemplo de resto estelar es la nebulosa del Cangrejo, formada por filamentos incandescentes. Las galaxias son conglomerados estelares de cientos de miles de millones de estrellas, gas y polvo, y la llamada materia oscura que no produce ni absorbe luz. Las galaxias son tan remotas que se observan como nubes difusas aun con telescopios de tamaño considerable.

Hay objetos no estelares en el cielo y que se desplazan entre las constelaciones, como los asteroides y los cometas. Estos últimos se ven como estrellas con cola cuando están cerca del Sol y de la Tierra. Los cometas son cuerpos congelados más grandes que cadenas montañosas que giran en torno al Sol en órbitas muy elongadas (alargadas); es decir, se acercan y se alejan de nuestra estrella de manera periódica. Cuando se acercan al Sol, el calor de este astro evapora los hielos cometarios y el cometa se rodea de una nube. El Sol es una esfera de gas incandescente que se evapora produciendo viento. Cuando éste incide sobre los gases del cometa los arrastra, generando la cola que en ocasiones suele ser más grande que la distancia que nos separa del Sol.

Un astrónomo francés, Charles Messier, se dedicaba a la búsqueda de cometas, los cuales, cuando están lejos de la Tierra, se ven como una nube apenas perceptible. Para facilitar este trabajo, Messier decidió hacer un catálogo de objetos de aspecto nebuloso que no se movían entre las constelaciones, para distinguirlos de los cometas que se desplazan frente a las

estrellas. En 1781 elaboró una lista con 110 objetos difusos en el cielo, que se conoce como el Catálogo de Messier. Así, la nebulosa del Cangrejo se llama M1, y la galaxia de Andrómeda, M31. Éste fue el primer catálogo de objetos difusos que se publicó. Es interesante que Messier sea más conocido por su catálogo que por sus estudios cometarios (figura 1.2).

WILLIAM Y CAROLINE HERSCHEL

William Herschel descubrió las nebulosas planetarias con la ayuda de su hermana Caroline. William nació en Alemania en 1738, cuando en México estábamos en pleno virreinato. Era músico de formación y su ideal fue aprender a componer con Haendel, gran figura de ópera también de origen alemán, que vivía en Inglaterra. Él y Caroline se mudaron a ese país. En un inicio construían instrumentos musicales, pero se dieron cuenta de que sus habilidades también les serían útiles para elaborar otro tipo de aparatos: telescopios.

Con el tiempo renunciaron a la música y se convirtieron en astrónomos. Durante el día pulían vidrios para sus espejos y por la noche observaban el firmamento.

Herschel descubrió, igual que Messier, que en el cielo existen muchos objetos que no son estrellas, y que se alcanzan a ver con telescopios, y decidió catalogarlos. Para ello construyó un telescopio fijo. Las estrellas, igual que el Sol, salen en dirección este y se ponen en el oeste; como sabes, esto se debe al giro de la Tierra. De esta manera, los hermanos Herschel registraban las estrellas a medida que éstas pasaban delante del telescopio. William se ponía frente al telescopio y Caroline anotaba sus descubrimientos. Así, estos astrónomos descubrieron cientos de objetos nunca registrados antes, en particular las hermosas nebulosas planetarias.

Por su parte, la vida de Caroline Herschel merece especial

atención. Originalmente su actividad fue apoyar a su hermano en sus actividades musicales, siendo la cantante de sus conciertos, y también estaba a cargo de las tareas domésticas. Gradualmente se transformó además en su ayudante científica, quien lo auxiliaba en las tareas de registro de las observaciones y colaboraba en los minuciosos cálculos que se requerían. Más tarde, ella empezó a realizar sus propias observaciones y descubrió ocho cometas. Fue la primera mujer que recibió salario por su trabajo científico, y finalmente, a los 78 años, recibió la Medalla de Oro de la Sociedad Astronómica de Londres por sus contribuciones.

Es interesante mencionar que se conservan partituras compuestas por el astrónomo. Durante un congreso realizado en Polonia sobre el tema de nebulosas planetarias se deleitó a los científicos con un concierto para órgano de Herschel.

A continuación describiremos algunos de sus descubrimientos celestes, así como los de John, hijo de William.

URANO

De entre los planetas que no se ven a simple vista, éste es el primer planeta que fue descubierto.

Desde la Tierra, los planetas se ven como estrellas brillantes. Pero, a diferencia de éstas, parecen moverse entre las constelaciones. Su nombre viene del griego *πλανήτης*, *planētēs*, que significa vagabundo. Uno podría pensar erróneamente que el nombre indica que el sistema solar es una estructura aplanaada.

Desde la Tierra vemos los movimientos de los planetas sobre una misma franja en el cielo, que nuestro planeta cruza de oriente a poniente. Es la misma región sobre la que vemos la Luna y el Sol, y en la que suceden los eclipses; por esa razón, a esta banda se le denomina la eclíptica. Al grupo de constela-

ciones que están sobre la banda de la eclíptica se les llama Zodiaco. El nombre de esta banda no sólo nos remite al lugar donde están los planetas sino a las constelaciones que allí se encuentran.

Los nombres de los días de la semana nos recuerdan cuáles son los astros que se mueven entre las estrellas y que podemos ver a simple vista. Por ejemplo, miércoles es en honor a Mercurio y viernes a Venus. Recordemos que domingo es el nombre que se le dio por el cristianismo en honor al Señor; anteriormente, en la antigua Roma su nombre en latín era *dies solis* en honor al Sol, así como *dies saturni* al sábado, en honor a Saturno.

William Herschel observó objetos brillantes en la banda de la eclíptica, y descubrió Urano. Hizo estudios sobre estrellas dobles, en las que determinó que eran estrellas binarias, y también descubrió la radiación infrarroja que proviene del Sol.

En 1781 Herschel con su telescopio observó un astro de aspecto estelar que se movía respecto de las estrellas. Notó que era un planeta de color verde. Posteriormente notó que poseía varios satélites. Había descubierto Urano y sus lunas. En un principio el planeta Urano llevó el nombre de Herschel, así como Neptuno se llamó Leverrier, en honor a sus descubridores. Posteriormente, la Unión Astronómica Internacional, organización responsable de poner los nombres oficiales a los astros, los bautizó con sus nombres modernos: Urano y Neptuno, en un afán unificador. El resto de los planetas poseen nombres de dioses de la mitología griega. Urano es el dios de los cielos y Neptuno el del mar.

Algunos de los satélites de Urano llevan nombres de personajes de las obras de teatro de Shakespeare; así, se llaman Ariel, Belinda, Miranda, Puck, etc. A los dos satélites que descubrió Herschel se les llamó Titania y Oberón, como los personajes de la obra *Sueño de una noche de verano* de ese mismo autor. Además de poseer 27 lunas, Urano tiene un sistema de 11 anillos (figura 1.3).

Urano es un mundo sorprendente por varias razones; una es que va rodando sobre su órbita ya que su eje de rotación está inclinado 89 grados. Puesto que las estaciones se producen por la inclinación de los ejes de rotación, en el caso de Urano son notables. Hay regiones de su órbita donde uno de los polos de Urano apunta durante tiempos prolongados hacia el Sol, y aunque gire sobre su eje cada 17 horas, el Sol no sale ni se pone. Lo opuesto sucede 42 años más tarde, cuando Urano está en el otro extremo de la órbita y el Sol ilumina exclusivamente el otro hemisferio.

A raíz del descubrimiento de Urano, el rey de Inglaterra, Jorge III, nombró a Herschel astrónomo del rey, gracias a lo cual tuvo un salario muy digno y pudo vivir de esta ciencia.

El sueño de una noche de verano,
de William Shakespeare

Esta obra de teatro narra una fantasía poblada de hadas y otros espíritus; Titania y Oberón son los más poderosos. Durante la obra se suceden enredos de amor tanto de humanos como de seres fantásticos; Puck es el gracioso mensajero. La gente del pueblo se ve mezclada en los embrujos durante los cuales el carpintero se vuelve un asno del que se enamora Titania. Hay una representación de una comedia dentro de otra, lo cual resulta, además de ingenioso, una reflexión sobre el poder del teatro para narrar las pasiones humanas.

LOS ASTEROIDES

Estos son un conjunto de rocas que giran alrededor del Sol entre las órbitas de Marte y Júpiter. Se encuentran a más de 400 millones de kilómetros de distancia del Sol. La distancia entre la Tierra y nuestra estrella es de 150 millones de kilómetros.

Ahora se sabe que también existen asteroides en la región de la órbita de Plutón, en lo que se conoce como el cinturón de Kuiper. La palabra asteroide la inventó Herschel; significa semejante a una estrella. Viene de la voz griega *ἀστήρ*, *astēr*, para estrella.

En 1801, Giuseppe Piazzi descubrió el primer asteroide, al que se denominó Ceres; es el más grande de todos y su nombre honra a la diosa griega de la agricultura. Así como el resto de los asteroides, Ceres se ve como una estrella que se mueve entre las constelaciones. Hace poco, la Unión Astronómica Internacional consideró que tanto Ceres como Plutón merecen la denominación de "planetas enanos", pues ambos son mayores que el promedio de los asteroides y comparten esa región del espacio con cientos de miles de objetos pequeños.

La mayor parte de los asteroides tienen aspecto irregular, como pedazos de roca de formas caprichosas; algunos son alargados como cacahuates. Los del cinturón principal están compuestos de rocas, aunque otros son metálicos. Cuando los asteroides colisionan entre sí pueden fragmentarse; los pedazos que chocan sobre otros mundos se llaman meteoritos. Algunos ejemplos de fragmentos metálicos de asteroides son los meteoritos que se encuentran en el vestíbulo del Palacio de Minería, en la ciudad de México; se cuentan entre los ejemplares de mayor tamaño que se han descubierto. Se han fotografiado varios asteroides con sondas y se ha encontrado que algunos tienen satélites, como Ida, cuyo satélite es Dactyl, y Sylvia, que tiene dos satélites, Rómulo y Remo (figura 1.4).

Hace apenas unos años se han descubierto los llamados planetas enanos transneptunianos, los cuales están más allá de la órbita de Neptuno. Son rocas cubiertas de hielos de varias sustancias, como el agua, el metano, el bióxido de carbono y el amoníaco. Unos cuantos se asemejan más a los asteroides del cinturón principal, el que está entre Marte y Júpiter. Sus características se deben a que durante la formación del sistema solar

los mundos recién formados colisionaban más a menudo entre sí, arrojando fragmentos en todas direcciones que se localizan en distintas regiones del sistema solar.

EL DESCUBRIMIENTO DE LAS NEBULOSAS PLANETARIAS

Los hermanos Herschel también descubrieron las nebulosas planetarias. Vistas con un telescopio pequeño, algunas tienen forma circular de color verde, similar al aspecto del planeta Urano. Sin embargo, el disco no se ve nítido sino difuso, por lo que sus descubridores pensaron que eran planetas; de ahí el nombre "nebulosa planetaria".

Ahora sabemos que las nebulosas planetarias no tienen que ver con los planetas. Son las etapas finales de la evolución de una estrella. Cuando está por concluir la evolución de una estrella semejante al Sol, arroja al espacio su atmósfera extendida. Así, el centro de lo que fue un sol se convierte en una pequeña estrella rodeada de una envoltura de gas en expansión. La envoltura puede tener múltiples formas: puede ser esférica, alargada o irregular, y en algunos casos parecen mariposas.

Algunas nebulosas planetarias cercanas se alcanzan a ver con telescopios pequeños; a nuestros ojos semejan hermosas nubes verdes. Lamentablemente, aun con los instrumentos más poderosos nunca se ven tan espectaculares como en las fotografías.

Este libro tratará con mayor detalle el estudio de esos objetos, pero antes hablaremos de los telescopios.

JOHN HERSHEL

Llegó el momento en la vida de William Herschel en que se enamoró y se casó. Esto le resultó intolerable a Caroline, quien se mudó de casa y se dedicó a otras actividades. Mientras tanto William tuvo un hijo, John, quien también se dedicó a la astronomía.

El joven John Herschel calculó la atracción gravitacional de la superficie lunar y llegó a la conclusión de que era ocho veces menor que la de la Tierra.

Cuando Galileo descubrió que las zonas claras de la Luna son más elevadas, lo pudo hacer porque observó que cuando estas zonas reciben la luz del Sol en forma lateral proyectan sombra sobre las regiones vecinas. Galileo imaginó que las zonas oscuras eran mares, y no lavas solidificadas como sabemos ahora. Por eso llevan nombres como Mar de las Tormentas o de la Serenidad.

John Herschel pensó que si había agua en la Luna podría haber seres humanos, y que dada la atracción gravitacional tan baja, serían capaces de volar. Por consiguiente imaginó cráteres como fuentes de agua, rodeados de viviendas griegas con seres alados volando por los cielos y, en el fondo, la Tierra majestuosa.

Por su parte, John Herschel decidió continuar el trabajo de su padre en cuanto a elaborar catálogos estelares y otros objetos, pero desde el hemisferio sur.

Dependiendo en qué punto del globo terrestre te encuentres podrás observar distintas partes de la bóveda celeste. Si estuvieras en el Polo Norte, sólo podrías observar la mitad norte del cielo; en el Polo Sur sucedería lo mismo, observarías la otra mitad. En el Ecuador se puede observar toda la bóveda celeste; sin embargo, no se construyen grandes observatorios astronómicos ecuatoriales porque son sitios donde suele estar nublado.

John Herschel instaló su observatorio en Sudáfrica y desde allí continuó el trabajo de su padre sobre los objetos interesantes en el hemisferio sur. Más tarde regresó a Inglaterra, donde fue el primer astrónomo en introducir el nuevo proceso inventado por Daguerre en el estudio de los astros; nos referimos a la fotografía astronómica.

II. Telescopios y radiación

Desde que se inventó el telescopio y Galileo realizó las primeras observaciones, este instrumento representa el mayor apoyo de la astronomía. Cada vez se han construido mayores y mejores telescopios, así como accesorios para los mismos. La observación del cielo ha sido, y sigue siendo, fuente de nuevos descubrimientos que nos permiten comprender mejor el universo.

LA PUPILA Y EL TELESCOPIO

Uno de los sentidos más poderosos que tenemos es la visión. Nuestro ojo ha evolucionado para funcionar mejor durante el día, para detectar los objetos por la luz que reflejan del Sol. Cuando oscurece, nuestra pupila se dilata para permitir el ingreso de una cantidad mayor de luz (figura II.1).

Los objetos celestes, excepto el Sol y la Luna, son tan débiles que la pupila de nuestro ojo no es suficientemente grande para captar la luz necesaria para verlos con claridad. Un telescopio es una extensión de nuestra pupila; intercepta radiación y la concentra hacia nuestro ojo, o hacia algún dispositivo electrónico o fotográfico para su registro.

El motivo por el cual nos llega tan poca luz se debe a que las estrellas y otros cuerpos celestes están a enormes distancias. Considera una fuente de luz que radia en todas direcciones.

Piensa en la punta de una nariz; diferentes personas en varias posiciones la pueden ver porque ésta envía fotones hacia todos lados. Lo mismo sucede con la luz del Sol: viaja en todas direcciones. Sin embargo, la intensidad de luz que recibimos va disminuyendo con la distancia.

Imagina una fuente de luz que envía un solo pulso y que éste atravesara superficies esféricas cada vez más distantes y por lo tanto cada vez más grandes. La misma cantidad de luz se tendría que repartir en superficies inmensas si estuvieran muy distantes de la fuente. La superficie de una esfera es $4\pi r^2$. En esta expresión, r representa el radio de la esfera. Vamos a comparar cuánta luz llega a una esfera de radio unitario, $r = 1$, con otra esfera de cualquier radio. La manera de hacerlo es dividir la primera entre la segunda. Es como si quisieras comparar cuántas veces más pesa un gato que una hormiga; divides el peso del gato entre el del insecto.

Si sacamos el cociente nos da $4\pi/4\pi r^2$. La división resultante es $1/r^2$. Es decir que la luz de una fuente disminuye como el cuadrado de la distancia. Si nos alejamos el doble de la distancia recibimos cuatro veces menos luz, y si nos alejamos 1000 veces recibimos un millón de veces menos luz.

Para aclararte las ideas: es como si pegaras la pupila a una esfera imaginaria con una fuente de luz en el centro. Si la esfera fuera muy pequeña, la distancia entre tu pupila y la fuente sería corta y por consiguiente captarías mucha luz. En cambio, si tu pupila estuviese en contacto con una inmensa esfera, la fuente estaría muy alejada, así que captaría menos luz, la que se repartió en esta gran esfera (figura II.2).

Como no podemos acercarnos a los astros, lo que hacemos es construir telescopios enormes, con la mayor pupila posible, a fin de poder captar mayor cantidad de radiación (figura II.3).

EL TELESCOPIO DE GALILEO

Galileo fue la primera persona en registrar observaciones de los astros con el recientemente descubierto catalejo o antejo de pirata, que gracias a él se convirtió en un instrumento para mirar hacia las estrellas. Lo hizo por primera vez en 1609; por eso el año 2009 ha sido designado el "Año Internacional de la Astronomía".

Para que comprendas cómo funciona un telescopio te sugerimos que consigas dos lupas. Si son distintas es mejor, pero no es necesario. Puedes comprarlas en las papelerías. La manera de recrear el funcionamiento de un telescopio es poner las dos lupas alineadas con uno de tus ojos, una delante de la otra. La primera servirá para interceptar más luz del objeto que quieras observar y la segunda para enfocar la luz, como si fueran unos anteojos. Experimenta con objetos a varias distancias. Coloca el brazo de la lupa más distante lo más extendido posible y después ajusta el otro brazo hasta obtener una imagen nítida. Lo que seguramente comprobarás es que no ves los objetos más grandes, sino más brillantes. Esto se debe a que el propósito de un telescopio es justo esto: captar mayor cantidad de luz. También notarás que la imagen está invertida.

Galileo vivía en Venecia cuando le llegaron noticias del nuevo instrumento. Ya existían los lentes para ayudar a ver a las personas que tenían problemas de visión; lo que no se conocía era la combinación de éstos para ver objetos lejanos. Al recibir las noticias sobre el catalejo, Galileo diseñó una combinación de lentes que le permitiera duplicar el instrumento recientemente inventado. Tuvo la oportunidad de hacer estas lentes especiales ya que tuvo acceso a vidrio muy fino para construir lupas en los talleres de Murano, cerca de Venecia. Pulió sus lupas y fabricó sus propios telescopios. Pronto se dio cuenta de que cuanto mayor fuera el tamaño de la lente, mejores resultados obtenía. Con sus telescopios descubrió las mon-

tañas de la Luna, los satélites de Júpiter, las fases de la Luna, vislumbró los anillos de Saturno y se dio cuenta de que la Vía Láctea está formada por innumerables estrellas (figura 11.4).

EL TELESCOPIO DE NEWTON

Como comprenderás, no es sencillo construir lupas de varios metros de diámetro para poder captar gran cantidad de luz, lo que sería el sueño del astrónomo. Cuanto mayor es la lente, pierde transparencia, resulta más pesada, es mucho más difícil de construir y de mover. En la época de Galileo no pudieron construir telescopios de lentes, donde la luz de los distintos colores se enfocara en el mismo sitio. Es decir, los telescopios de lentes producían imágenes imperfectas; a este efecto se le llamó aberración cromática.

Más tarde, Newton ideó el telescopio reflector, que emplea un espejo para captar la luz además de espejos y lentes adicionales. Aunque lo construyó en 1670, su idea se difundió a partir de la publicación de su obra *Optiks*, más de 30 años después.

Si quieres entender cómo funciona vas a necesitar una de tus lupas y un espejo de tocador, de los que amplifican, o espejo de aumento (los venden en las tiendas de autoservicio). Debe ser de unos 10 centímetros de diámetro o un poco mayor. Sostén el espejo con una mano, apuntando hacia algo que esté a varios metros de ti. Observa cómo se ve desenfocado. Coloca la lupa delante del espejo; notarás que en la parte central del espejo puede observarse con claridad el objeto. Se ve nítido y brillante. No se ve más grande. También notarás que se observa de cabeza. Otra forma de ver este mismo efecto consiste en colocarte cerca de una ventana luminosa y disponer tu espejo de tal manera que proyecte su luz hacia el techo; notarás que formas la imagen del paisaje con la luz que refleja el espejo.

Un telescopio reflector se construye con un espejo parabólico (como el de tu espejo de aumento) que sirve como pupila para captar la luz, y después se colocan elementos ópticos adicionales para conducir el haz de luz hasta donde se desee enfocar (por ejemplo, el ojo o la cámara fotográfica).

Los telescopios que construyó Herschel fueron reflectores. Éstos podían ser muy grandes pues es más fácil pulir una sola superficie (la que refleja la luz del espejo) que una lente, que tiene dos superficies. El espejo se puede sostener por la parte posterior, ya que no afecta el propósito de captar radiación. Para catalogar sus descubrimientos Herschel observaba bandas del cielo entre el Ecuador y el Polo Norte. Colocaba su telescopio apuntando a una inclinación determinada. Durante la noche los astros se desplazan de este a oeste, como el Sol. Así que Herschel los observaba conforme iban pasando delante de su telescopio. En realidad es la Tierra la que se desplaza de oeste a este, girando en torno de su eje; esto da la impresión de que los astros se mueven en la dirección opuesta (figuras 11.5 y 11.6).

LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Como mencionamos, el propósito principal de los telescopios es concentrar la luz. Ésta es sólo una parte de lo que se conoce como radiación electromagnética, que incluye las ondas de radio y otras ondas.

Si le pides a alguna persona que cierre los ojos y frota vigorosamente las manos y se las acerca a algún lugar del cuerpo, podrá notar, sin que la toques, la radiación infrarroja que emanan, la sentirá como calor. No podemos detectar este tipo de radiación con los ojos, nuestro detector es la piel. Por lo contrario, no podemos detectar la radiación ultravioleta, pues no la sentimos mientras la recibimos; ésta es la responsable de broncearnos y por desgracia también produce cáncer. Sin em-

bargo, la requerimos para fijar la vitamina D, que entre otras funciones evita la descalcificación de los huesos.

La radiación electromagnética está constituida por ondas. Éstas viajan a la velocidad de la luz, que es de 300 000 kilómetros por segundo. Se trata de un campo magnético y uno eléctrico que se propagan de manera simultánea en forma de ondas. Se debe aclarar que la luz, o radiación electromagnética, es dual, pues se comporta a la vez como ondas y como partículas, es decir, como pelotitas. Por ejemplo, en un telescopio podríamos suponer que la luz es un conjunto de pelotitas que viajan por el espacio y que son capturadas por el telescopio. Dependiendo del experimento que hagamos, en ocasiones la luz se manifiesta principalmente como partículas, llamadas *fotoes*, o como ondas (figura 11.7).

Se ha clasificado la radiación electromagnética de acuerdo con la cantidad de energía que transporta, la cual está relacionada con la longitud de onda. Si amarras el extremo de una cuerda elástica y produces ondas con el extremo suelto, notarás que es más fácil producir una onda que muchas pequeñas (es más fácil mover suavemente los brazos que deprisa). Lo mismo le sucede a la radiación: la de longitud de onda corta transporta mayor energía que la de longitud de onda larga.

A continuación describiremos algunas propiedades de la radiación electromagnética y cómo se clasifica de mayor a menor energía.

La radiación de menor longitud de onda y mayor energía se denomina rayos gamma. Sus fotones poseen tanta energía que se pueden transformar en materia. Las fuentes astronómicas que los generan son las colisiones de hoyos negros o de estrellas de neutrones. Nuestra atmósfera impide que ingresen los rayos gamma del cosmos; por lo tanto, solamente se pueden observar desde satélites.

Otra radiación que no ingresa a la superficie debido a la atmósfera son los rayos X. Éstos también son muy energéticos.

tanto que atraviesan los músculos de nuestro cuerpo y son absorbidos por los huesos, por lo que se emplean para tomar radiografías. Lamentablemente, igual que los rayos gamma son dañinos. Aunque tuviésemos ojos capaces de ver rayos X no nos servirían de mucho, ya que en el medio ambiente no hay este tipo de radiación. Las fuentes de rayos X astronómicas son los discos de materia incandescente que giran en torno de los hoyos negros y los gases muy calientes entre las galaxias. Es necesario poner telescopios especializados a bordo de satélites para detectarlos.

En cuanto a la radiación ultravioleta, que es la que sigue en energía, la atmósfera también absorbe gran parte de ésta. La producen las estrellas azules, que son las de mayor temperatura, como las estrellas de mayor masa que el Sol, y los núcleos de las nebulosas planetarias. También la producen los gases calientes en el espacio. Los astrónomos observan el cielo en luz ultravioleta desde telescopios a bordo de satélites.

Nuestros ojos están diseñados para detectar luz visible. Este intervalo de energías es precisamente en el que emite más intensamente el Sol y también en el que nuestra atmósfera es transparente, por lo que deja pasar la luz. Las estrellas similares al Sol la producen. Las plantas verdes también están diseñadas para aprovechar la luz del Sol y almacenarla en el azúcar.

Los filamentos de las hornillas y los calentadores domésticos generan luz infrarroja. También las estrellas más frías y las nubes de polvo que rodean a las estrellas recién formadas emiten esta radiación. Por esto, las observaciones en luz infrarroja nos permiten observar esos objetos.

A medida que aumentamos la longitud de onda nos encontramos con las microondas, como las de los hornos. Su longitud de onda es de algunos centímetros; por eso, si colocas un guisado extendido en el horno y no permites que gire, algunas secciones se calientan y otras no. Es más, si metes una hormiga en el horno, sobre la charola rotatoria caminará en círculos

Radiación electromagnética

Los límites precisos entre cada región del espectro electromagnético son difíciles de establecer y varían entre los distintos autores. En este texto los explicaremos de la siguiente manera. Describiremos los intervalos de mayor a menor energía, lo que significa que son de menor a mayor longitud de onda:

Los rayos gamma son los de menor longitud de onda y por lo tanto corresponden a la radiación de mayor energía del espectro electromagnético. Esta radiación se genera por átomos radiactivos y en explosiones nucleares. Su longitud de onda es menor que 0.03 nanómetros.

Los rayos X son de longitud de onda muy corta y por lo tanto de gran energía. Su longitud de onda va de 0.03 a 3 nanómetros. Normalmente se describen los rayos X en términos de energía. Es decir, de 40 a 0.4 keV.

La luz ultravioleta es de longitud de onda intermedia entre la luz visible y los rayos X. Varía de 3 a 350 nanómetros.

La luz visible es la que nuestros ojos perciben. Comprende entre los 350 y los 700 nanómetros.

La luz infrarroja tiene mayor longitud de onda que la luz visible; su longitud es de 700 nanómetros (= 0.7 micras) a 30 micras. A la de menor longitud de onda se le conoce como luz infrarroja cercana, ya que está más próxima a la luz visible.

Las microondas siguen en longitud, van de 30 micras a 30 centímetros. En algunos casos se agrupan con las ondas de radio.

Las ondas de radio corresponden a las longitudes de onda más largas del espectro electromagnético, y corresponden a las mayores de 30 centímetros. Sin embargo, las que son mayores de 10 metros no penetran la atmósfera.

para evitar quemarse. Las moléculas giran y oscilan a varias velocidades; cuando pasan de un estado de mayor energía a uno de menor energía, emiten radiación en forma de microondas, y al analizar esta radiación podemos conocer las propiedades de las moléculas que las generan. Los astros también producen esta radiación; en particular, las moléculas en el espacio pueden ser observadas en microondas.

La radiación de mayor longitud de onda corresponde a las ondas de radio, con las que se transmiten las señales que escuchamos en nuestros aparatos. En el universo, el gas frío de hidrógeno y algunas moléculas del medio interestelar las producen. Los radiotelescopios se ocupan para detectar el gas de hidrógeno frío que emite radiación con longitud de onda de 21 centímetros. También se detecta el gas ionizado que se está enfriando gracias al análisis de las ondas de radio.

MÁS SOBRE LA RADIACIÓN

Lo ideal sería contar con un detector universal, que fuera capaz de interceptar y almacenar todo tipo de radiación. Pero no es así. Al igual que nuestro cuerpo, en el que los ojos detectan la luz visible y la piel la radiación infrarroja, se requieren instrumentos especiales para cada tipo de radiación; incluso algunos instrumentos deben estar en órbita, ya que nuestra atmósfera absorbe la radiación antes de que llegue a la superficie terrestre.

No es lo mismo ver a un perro que olerlo o tocarlo. Sin embargo, cada sentido nos brinda información complementaria. Para conocer un cuerpo celeste lo ideal sería analizar cuánta radiación emita.

Los telescopios ópticos e infrarrojos suelen colocarse en sitios elevados para evitar al máximo las perturbaciones atmosféricas. Imagina lo que sería una excursión para observar colibríes desde el fondo de una alberca; el agua se enturbia y deforma la imagen. Algo equivalente sucede con la atmósfera: su turbulencia deforma la imagen. Si colocas un popote dentro de un vaso con agua notarás que se ve roto, porque el agua cambia la dirección de la luz que la atraviesa. La atmósfera también cambia la dirección de la radiación.

Los radiotelescopios que detectan ondas muy largas se

pueden colocar en sitios menos elevados porque algunas ondas de radio atraviesan la atmósfera sin mayor problema.

TELESCOPIOS MODERNOS

El sueño de Galileo y de Herschel se ha cumplido, porque se han construido telescopios cada vez de mayor tamaño. Y ellos ni siquiera se imaginaron la posibilidad de observar en otras longitudes de onda. Los astrónomos son personas muy ambiciosas que desean conocer todo lo posible del universo. Así, han puesto en operación telescopios en todas las longitudes de onda para observar la radiación que emiten los astros en todas ellas. Esto ha sido posible gracias a los avances tecnológicos logrados tanto en los telescopios y en los detectores, como en la posibilidad de almacenar e interpretar grandes cantidades de datos por medio de las computadoras (figura 11.8).

Los telescopios de rayos gamma y rayos X son instrumentos muy diferentes de los telescopios que conocemos, y además deben ponerse a bordo de satélites fuera de la atmósfera.

Los telescopios ultravioleta, aunque son semejantes a los ópticos, requieren también estar por encima de nuestra atmósfera.

En cuanto a los telescopios ópticos, podemos decir que se han construido algunos de gran tamaño que se han instalado en los mejores sitios del planeta para realizar observaciones. También se han enviado telescopios ópticos al espacio para superar la distorsión de la turbulencia atmosférica. El tamaño y número de los telescopios ópticos han registrado un aumento sin precedentes. Actualmente hay más de una docena de telescopios en operación o en construcción cuyo espejo es de más de 6.5 metros de diámetro, y hay planes para construir telescopios de 20 metros y aun de 40. Los que tienen espejo de una sola pieza alcanzan tamaños de ocho metros de diámetro; otro

diseño muy usado en los telescopios mayores de 10 metros son los mosaicos de varios espejos.

Algunos de los telescopios infrarrojos son semejantes a los ópticos, aunque sus detectores son distintos. Estos instrumentos requieren estar en sitios donde haya muy poca humedad en la atmósfera, pues el vapor de agua no permite que la luz infrarroja penetre. Igualmente, hay telescopios infrarrojos en órbita.

Los telescopios de microondas son también cada vez mayores, por lo que se ha podido detectar la presencia de gran número de moléculas en el espacio con gran exactitud en su posición. En México se ha construido una enorme antena de 50 metros de diámetro diseñada para captar la radiación de microondas que emiten las moléculas del medio interestelar; está en el volcán Sierra Negra, en el estado de Puebla (figura 11.9).

Como mencionamos antes, un telescopio de gran superficie permite captar más luz, y también, por su mayor diámetro, permite ver detalles más finos: los cráteres muy pequeños en la Luna, las estrellas dobles muy próximas entre sí, la posición de pequeñas nubes de gas en galaxias, etc. Se construyen arreglos de telescopios para percibir más delicados pormenores, cuanto más separados estén los telescopios que observan el mismo objeto. Los radiotelescopios no solamente se usan en forma de grandes antenas, sino que se utilizan arreglos de múltiples antenas para determinar la posición de las fuentes con gran precisión. En ocasiones se emplean simultáneamente radiotelescopios en muy diversas partes del globo terrestre para determinar detalles minúsculos de los astros.

III. Las estrellas y otros temas

Las siguientes secciones del libro tratan sobre las estrellas. En este capítulo, además de describir la escala de magnitudes, los colores y los métodos para determinar la distancia de las estrellas y las galaxias, también reseñaremos brevemente que hay materia interestelar, y cómo es nuestra galaxia.

Para comprender la manera en que están constituidas las estrellas dedicaremos varias páginas a sus propiedades y transformaciones. Nuestro conocimiento del cosmos se ha logrado mediante la aplicación de las leyes de la física a los problemas de los astros, así que incluiremos varios ejemplos de física.

A simple vista, las estrellas se ven como puntos brillantes en el cielo. En realidad son objetos que se asemejan al Sol, unos más brillantes y masivos, otros menos. Aunque son enormes, están tan alejados que se ven como puntos luminosos (figura 11.1).

Una de las propiedades que se pueden medir de las estrellas es el brillo que recibimos; para eso se desarrolló la escala de magnitudes, que describiremos un poco más adelante. Otra propiedad es el color. Si comparas una estrella con otras notarás que tienen una pequeña coloración; algunas son más azules y otras más amarillas. Las fotografías tomadas mediante filtros y después sumadas, las muestran de muchos colores. Nosotros no distinguimos tanto los tonos porque nuestros ojos no los perciben cuando la luz es tenue; basta que pienses en

cómo se ven los colores a mediodía o una vez que se pone el Sol. Se ven más nítidos entre más luz haya en el medio ambiente. En cambio, cuando se pone el Sol no se distinguen bien los tonos. Éste es el motivo por el cual los pintores siempre andan en busca de "buena luz".

Uno de los diagramas más útiles de la astrofísica moderna se construye graficando dos propiedades estelares: la magnitud y el color. Es decir, en ese diagrama se puede representar tanto el brillo como el color de las estrellas. Como veremos más adelante, el color de la estrella tiene que ver con su temperatura. Este diagrama nos muestra, entre otras cosas, cómo evolucionan las estrellas y nos ayuda a comprender mejor las nebulosas planetarias.

LA ESCALA DE MAGNITUDES

Como habrás notado, no todas las estrellas se ven igualmente brillantes; incluso hay algunas que apenas se logran observar. Los astrónomos clasifican el brillo *aparente* de las estrellas en lo que denominan magnitudes. Se le llama brillo aparente porque gran parte de las diferencias de brillo se deben a las diferencias de distancia. Si todas las estrellas estuvieran a la misma distancia, su brillo aparente nos daría información sobre lo intensas que son, pero debido a que se hallan a distancias muy diversas, la magnitud sólo indica la manera en que apreciamos su brillo *desde la Tierra*. Recordemos que en realidad todas las estrellas son objetos similares al Sol, pero situados tan lejos que se ven como puntos de luz.

En la escala de magnitudes, los números grandes corresponden a brillos tenues, a diferencia de otras, donde unidades grandes corresponden a componentes grandes. Esto es una fuente de confusión, pero a la larga uno se acostumbra. En la escala de magnitudes, una estrella muy brillante tiene una magnitud de 1 y a la más débil que se puede ver a simple vista se le

asigna una magnitud de 6, la que fue definida por Hiparco en el siglo II antes de nuestra era. En la escala de magnitudes, con binoculares se logran ver estrellas hasta de magnitud 10, y con el Telescopio Espacial Hubble se han obtenido imágenes de estrellas hasta de magnitud 30.

En los mapas de la bóveda celeste se suele anexar un cuadro donde se señalan las magnitudes estelares: cuanto mayor es el círculo que las representa, la estrella es más brillante y menor es el valor de la magnitud (figura III.2).

Una diferencia de una magnitud corresponde a un brillo 2.5 veces mayor. Por consiguiente, si la diferencia de magnitud entre dos estrellas es 3, significa que una es 15.6 veces más brillante que la otra. Así, la escala de magnitudes no es lineal; es decir, las diferencias de magnitud de 1, 2, 3 unidades corresponden a brillos 2.5, 6.3 y 15.6 mayores. En realidad, nuestros ojos tampoco responden linealmente a diferencias de luz. Cuando estamos en un cuarto del todo oscuro y encendemos un foco nos damos cuenta de inmediato; en cambio, si en el mismo cuarto hay 100 focos encendidos y prendemos uno más, casi no lo percibimos. Ante el mismo estímulo —encender un foco—, nuestro sistema de detección luminosa responde de distinta manera, de acuerdo con la cantidad de luz del ambiente.

En el cuadro III.1 se muestran las magnitudes de algunos objetos brillantes. Cabe reiterar que, debido a la forma en que se definieron las magnitudes, los astros más brillantes que algunas estrellas como el Sol o la Luna tienen magnitudes negativas.

El astrónomo griego Hiparco diseñó la escala de magnitudes en el siglo II antes de nuestra era. Él no contaba con instrumentos para efectuar sus mediciones, así que la escala de 1 a 6 le pareció adecuada. No fue hasta la invención de los telescopios y la fotografía que se pudo establecer con más precisión la escala de magnitudes. Posteriormente se emplearon fo-

CUADRO III.1. *Magnitudes de algunos objetos celestes, de mayor a menor brillo*

Sol	26	El signo negativo significa que es mucho más brillante que el resto de las estrellas.
Luna llena	18	
Venus	-4	Venus presenta fases como la Luna, y la vemos a diferentes distancias, así que su brillo cambia.
Júpiter en su máximo	-2	
Sirio	-1	
Vega	0	En la constelación de Lira.
Aldebarán	1	En la constelación del Toro.
Estrella Polar	2	
Próxima Centauri	11	Es la estrella más cercana, pero no se alcanza a ver a simple vista.

tómetros —instrumentos que miden la cantidad de luz— para estas mediciones.

LOS COLORES DE LAS ESTRELLAS

Como mencionamos antes, es posible detectar el color de algunas estrellas si se comparan entre sí. Desde nuestras latitudes podrás observar en el verano la estrella Arturo cerca del cenit y notarás que tiene una coloración rojiza si se compara con las vecinas. A finales o principios de año, en la constelación de Orión notarás que la estrella Betelgeuse es de color más rojo que las demás, mientras que Rigel es blanca. Cerca de ahí, en el Can Mayor, Sirio es azul, mientras que Aldebarán, en el Toro, es amarilla.

Los astrónomos pueden tomar imágenes del cielo con filtros de colores. Si consigues papel celofán rojo y azul y confeccionas un visor con tres capas del mismo color para cada ojo y

volteas a ver a tu alrededor, notarás la clara diferencia al observar el mundo con filtros de colores, sobre todo si alternas un ojo con un filtro de color distinto al otro.

Los astrónomos emplean filtros de colores para observar los astros; así, con una sola fotografía pueden descubrir estrellas que emiten principalmente luz azul, verde, amarilla, naranja o roja, y mediante varios filtros reconstruyen la manera en que se vería desde el espacio.

De hecho, la televisión funciona mezclando luz azul, verde y roja. Si pones una gota de agua sobre el monitor de la televisión, podrás ver directamente los tres colores que se emplean para ver todos los demás.

Se emplean filtros de colores y una escala muy cuidadosamente calibrada para dar un valor numérico a los diferentes colores de los astros. Los filtros de colores empleados al examinar las estrellas permiten conocer una de sus propiedades fundamentales: la temperatura de su superficie. Las estrellas más frías son rojas y las más calientes azules, en tanto que las amarillas y verdes poseen temperatura intermedia.

Comprendemos que en decoración se dice que el rojo es caliente y el azul frío, pero en física, y por lo tanto en astronomía, es justamente lo contrario.

También las nubes de gas y de polvo situadas entre las estrellas son de colores, y los astrónomos emplean filtros para resaltar sus propiedades.

Seguramente has visto el filamento de una lámpara o de un calefactor. A temperatura ambiente es gris, pero conforme se calienta adquiere color rojo, naranja y amarillo. Podríamos medir la temperatura del filamento mirando su coloración. Sabemos que no debemos tocarlo cuando está rojo, aunque sea muy profundo. De manera equivalente, podemos estimar la temperatura de las estrellas mediante su color. Las estrellas rojas tienen temperaturas de unos 2 000 °C; en cambio, las azules alcanzan unos 40 000 °C o más. En realidad todas las estrellas

tienen luz de muchos colores, como el Sol, pero el ojo humano percibe uno solo.

Si tomamos un disco compacto (CD), que tiene una multitud de ranuras alineadas entre sí, y lo acercamos a una lámpara para ver su reflejo, notamos que vemos la luz de la lámpara en muchos colores que forman un arco iris. Si en este mismo disco compacto vemos el reflejo de un tubo de neón o de la flama de la estufa, notaremos que los colores que refleja son distintos. Cada fuente luminosa irradia colores característicos.

El Sol también produce luz de todos los colores. Cuando vemos un arco iris los percibimos. Sin embargo, el Sol es de color amarillo porque emite principalmente en este color. Lo mismo sucede con las estrellas; aunque producen luz de muchos colores, su radiación preponderante es roja, verde o azul, y por eso tienen un tinte que se ve con toda claridad en las fotografías.

LA FUERZA DE GRAVEDAD

Referirnos a la fuerza de gravedad es obligado en un texto de astronomía, ya que es la fuerza que domina en el cosmos y nos ayuda a comprender algunas propiedades de los astros, como el hecho de que sean redondos.

Uno de los grandes pensadores que arrojaron luz sobre la fuerza de gravedad fue Isaac Newton. Lo primero que notó es que la Tierra atrae a todos los cuerpos hacia el centro. Es decir, que la gravedad es una fuerza central, lo que provoca que nuestro mundo y otros, incluidas las estrellas, sean esféricos.

La segunda observación fue que los astros también ejercen entre ellos atracción gravitacional. Newton descubrió que la atracción gravitacional aumenta con la masa, esto es, la cantidad de materia que poseen los cuerpos. Así, el peso, o la atracción gravitacional que la Tierra ejerce sobre un elefante, es mayor que la que ejerce sobre una hormiga.

Newton también descubrió que la fuerza de gravedad disminuye a mayor distancia, con el cuadrado de la distancia, como la intensidad de la luz. Por eso nos parece imperceptible la atracción gravitacional de otros cuerpos mucho más masivos que el Sol que pueblan el Universo, ya que están muy alejados.

Otra persona que aportó conocimiento fundamental sobre la manera en que actúa la gravedad fue Albert Einstein. Él propuso que la atracción entre los cuerpos no es instantánea como suponía Newton, y que en realidad los cuerpos no se atraen sino que deforman el espacio y el tiempo en su cercanía, afectando las trayectorias de los cuerpos. Si lanzas al aire varias pelotas, notarás que cada una sigue una trayectoria curva, pero todas siguen la curvatura del espacio tiempo de su entorno.

LAS MASAS DE LAS ESTRELLAS

¿Cómo se calcula la masa de una estrella? Recordemos que la masa es la cantidad de materia que posee un objeto.

La masa de una estrella se determina al observar cómo otro objeto gira en torno de ella. Afortunadamente, un gran número de las estrellas forman parte de sistemas dobles.

Para comprender cómo se calcula la masa de un objeto celeste pensemos en la Luna. Ésta siente la atracción gravitacional de la Tierra; sin embargo, no se desploma sobre nosotros porque está girando. Tal vez si realizas un pequeño experimento colocando agua dentro de una cubeta y haciéndola girar sobre tu cabeza, notarás que el agua no se cae (si no lo has hecho antes, te invitamos a hacerlo ahora). Existe un balance entre la fuerza gravitacional, la de atracción y la de giro. Piensa en una honda; pones a girar una piedra en la honda y cuando la sueltas sale disparada. La piedra en la honda girará mientras mantenga una tensión en la cuerda. La Luna gira en torno de la

Tierra porque nuestro mundo la atrae; cae continuamente hacia la Tierra, y al mismo tiempo sigue moviéndose, lo que produce que rote en torno de la Tierra.

La manera de calcular la masa de un astro es observar a qué velocidad y distancia se desplaza otro cuerpo en torno de él.

La fuerza de gravedad es $F = Mm/d^2$. En esta expresión, F significa la fuerza, M la masa del cuerpo que atrae, m la masa del cuerpo atraído y d la distancia que los separa.

Para que un cuerpo gire, se requiere una fuerza que lo mantenga girando. Esta fuerza se puede expresar como $F = mv^2/d$. En este caso, F es la fuerza que mantiene al cuerpo girando, que tiene que ser igual a la de la gravedad. Si la gravedad fuera menor que ésta, el cuerpo se alejaría, como la piedra de la honda, y si la gravedad fuera superior, el cuerpo en órbita podría caer hacia el cuerpo con mayor masa. En esta expresión, m representa la masa del cuerpo que gira. Como el lector comprenderá, se requiere mayor fuerza para mantener girando a un cuerpo masivo que a uno liviano, y por eso la fuerza que lo hace girar depende de su masa. Como v es la velocidad de giro, se requiere mayor fuerza para hacer girar un cuerpo rápidamente que para hacerlo girar lentamente. Y finalmente, d es la distancia que separa el cuerpo que gira del que lo atrae. Como es más difícil dar una curva cerrada que una abierta, la fuerza depende del inverso de la distancia. Es decir, ésta aumenta cuanto menor sea d . Hemos eliminado las constantes que existen en las diversas expresiones para resaltar lo que es fundamental, por eso el lector no se deberá sorprender si éstas faltan y no tienen sentido las unidades.

Si un cuerpo está girando alrededor de otro cuerpo y no se cae, ni se aleja del otro, eso significa que la fuerza de gravedad equilibra a la que se requiere para girar. De tal suerte que para que un cuerpo gire en torno del otro de manera estable se requiere que $F = Mm/d^2 = mv^2/d$. O, lo que es lo mismo, que M/d

$= v^2$; o bien, $M = dv^2$. Esta última expresión es la que permite calcular la masa del cuerpo en torno al que está girando el de masa m . Es decir, la velocidad del cuerpo que gira depende de la masa del cuerpo que lo atrae, M , y de la distancia que los separa. Como mencionamos antes, hemos eliminado una constante que se encarga de que las unidades sean congruentes para resaltar lo esencial. Repetimos, si se conoce la velocidad del cuerpo que gira y la distancia del cuerpo que atrae, se puede calcular la masa de este último. Esta descripción simplificada se aplica a cuerpos ligeros, como planetas, que giran alrededor de una estrella pesada, como el Sol. En realidad ambos cuerpos giran al mismo tiempo en torno de lo que se llama el centro de masa (figura III.3).

Lo que resulta interesante de esta expresión es que podemos calcular la masa de un objeto, sea visible o invisible. Por ejemplo, si observamos cómo gira una estrella en torno de un hoyo negro podemos calcular su masa, aun cuando no lo podamos ver, ya que estos objetos no permiten que la luz que emiten se escape de su horizonte, es decir, del sitio desde donde la luz no logra escapar de la fuerza de gravedad del objeto colapsado.

Las masas de las estrellas se calculan observando estrellas dobles o bien estrellas que posean planetas. La masa del Sol es de 2×10^{30} kilogramos,¹ ó 333 000 veces mayor que la de la Tierra. Y las masas de las estrellas van de un centenar de veces la del Sol a ocho centésimos de ésta.

DISTANCIAS

Uno de los grandes problemas de la astronomía es determinar las distancias a las que se encuentran los diferentes cuerpos. Si

¹ Esta forma de escribir números muy grandes o muy pequeños es muy usada en la ciencia. Así, 10^4 significa que es un 1 seguido de cuatro ceros = 10 000; y por lo tanto 10^{-2} significa que es un 1 seguido de 20 ceros.

observamos una foto del cielo estrellado nos resulta sumamente difícil imaginar a qué distancia está cualquiera de los objetos celestes. Así, aunque observemos a la Luna mes con mes, nos resulta imposible estimar qué tan alejada está sólo con verla.

No nos sucede lo mismo con los objetos de la vida cotidiana. Es posible estimar la distancia de un objeto cuando se ha tenido experiencia directa con él; así, si vemos a una persona a cierta distancia, podemos tantear qué tan alejada está. Sin embargo, las estrellas están tan lejanas que aun con un gran telescopio se ven como puntos luminosos. No podemos observar su tamaño y compararlo con el de un objeto conocido, como el del Sol o alguna otra estrella y así estimar sus dimensiones.

Las distancias en astronomía se calculan paso a paso; de la distancia de los objetos cercanos se infiere la de los más distantes.

El radar

Un radar es un instrumento que produce pulsos en ondas de radio. Éstas avanzan por el espacio a la velocidad de la luz, rebotan con algún objeto y regresan al sitio desde donde se emitieron. Midiendo el tiempo de ida y vuelta se puede calcular la distancia del objeto en el que rebotaron. Si el tiempo entre el que se emitió una señal y llegó reflejada es de dos segundos, sabremos que el objeto está a 300 000 kilómetros.

Con este sistema se determina la distancia de los planetas. De esta manera, se ha estimado que Marte se encuentra a 80 millones de kilómetros cuando está más cerca de nosotros, y a 380 millones de kilómetros cuando está más alejado, lo cual muestra claramente que es conveniente aprovechar su cercanía si se planea enviar sondas para explorarlo.

La base de las distancias en astronomía es la unidad astronómica (UA) la distancia promedio que nos separa del Sol: 150 millones de kilómetros. Para medir esta separación sería ideal

enviar una señal de radar al Sol y medir el tiempo que le toma rebotar y regresar. El problema es que las señales de radar no rebotan en el Sol, sino que lo atraviesan.

Para resolver el problema se emplea a Venus como intermediario. Se mide su distancia cuando está más cerca y más lejos del Sol. Al sumar estas dos distancias se obtienen dos unidades astronómicas; basta con dividir entre dos para obtener una UA que, como mencionamos antes, es de 150 millones de kilómetros.

La unidad astronómica es una medida útil para describir el sistema solar; por ejemplo, Plutón está a 40 UA y Sedna, uno de los asteroides distantes, a 90 UA.

La mayor parte de los astros están millones de veces más alejados, y por eso se emplea otra unidad para describir sus distancias: el pársec.

La paralaje

La manera de encontrar la distancia de las estrellas cercanas se llama paralaje, y se refiere a la diferencia en ángulo de observar un mismo objeto desde dos puntos distintos. Para comprenderlo puedes hacer lo siguiente: coloca un dedo extendido delante de tu cara, bastante cerca, y obsérvalo alternadamente con cada ojo; notarás que parece ubicarse en sitios distintos respecto de algún objeto distante, como un cuadro o un edificio. Ahora repite el experimento extendiendo el brazo. Notarás que el dedo parece brincar de un sitio a otro respecto de los objetos lejanos. Cuanto más alejado está tu dedo es menor su movimiento visto con un ojo y el otro. Es decir que podríamos estimar la distancia del dedo observando cuánto se desplaza respecto del cuadro o del edificio. A la diferencia de la posición de un objeto cercano respecto de uno lejano visto desde dos puntos de vista distintos se le conoce como paralaje.

Para aplicar el método de la paralaje a las estrellas se em-

plea el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. Podemos observar una estrella desde dos puntos de vista diferentes; así, las estrellas cercanas parecen desplazarse ligeramente respecto a las lejanas cuando se observan desde dos puntos alejados de la órbita terrestre.

Este método de ubicar estrellas tiene varias dificultades. El primero es que la mayor parte de los astros que se ven de noche en algún sitio de la órbita terrestre estarían del lado día cuando nuestro mundo está del lado opuesto de la órbita. Así que en general la paralaje no se puede medir con la separación máxima entre dos posiciones de la Tierra, sino la que permita observar las estrellas de noche. Sin embargo, se ha logrado medir la paralaje de las estrellas más cercanas.

Otra dificultad que presenta la paralaje proviene de la turbulencia atmosférica. Como hemos explicado en la sección "Los colores de las estrellas", por la turbulencia de la atmósfera la luz de las estrellas se deforma al atravesar nuestra capa de aire, lo que da lugar a que las estrellas parecen temblar, el titilar de las estrellas; entre más turbulenta está la atmósfera, más centellean. Los mejores observatorios del mundo se construyen en sitios elevados con atmósferas estables; es decir, donde la cantidad de atmósfera es la menor posible (donde es menor la presión atmosférica) y el centelleo de las estrellas es menor, pues lo ideal es que se vean como puntos de luz. Además, los telescopios modernos están diseñados para deformarse instantáneamente de acuerdo con las perturbaciones atmosféricas y por consiguiente compensar por el titilar de los astros.

Asimismo, todas las estrellas están en constante movimiento; aunque sus velocidades puedan ser de decenas de kilómetros por segundo, sólo se mide el traslado angular al comparar fotografías tomadas con muchos años de diferencia. Lo que se puede medir es el cambio de posición de las estrellas más cercanas respecto de las lejanas. Así que al determinar la paralaje estelar se tiene que compensar por el movimiento estelar.

El pársec

Los astrónomos utilizan unidades particulares llamadas pársecs para medir la distancia de las estrellas. El pársec es la distancia a la que se encontraría una estrella si el ángulo que subtendiera desde la distancia de la órbita de la Tierra fuera de un segundo de arco. Es decir, si existiera una estrella cuya paralaje fuera un segundo de arco estaría a un pársec de distancia.

Para que tengas una idea de lo pequeño que es un segundo de arco, piensa en el tamaño que tendría una moneda de un peso, que estuviera en el Zócalo, vista desde el Castillo de Chapultepec. Este ángulo corresponde a un segundo de arco.

Otra manera de entender la dimensión de un segundo de arco es a partir del tamaño de la Luna llena. La Luna es del mismo tamaño aparente que el Sol, por eso lo cubre durante los eclipses. También es del mismo tamaño del ancho de tu pulgar con el brazo extendido; ésta es la razón por la que puedes cubrir la Luna con tu dedo. El ancho de la Luna es igual a medio grado. Es decir, tiene 30 minutos de arco y, por lo tanto, 1800 segundos de arco. Una estrella con paralaje de un segundo de arco, si estuviera a un pársec de distancia, se desplazaría 1800 veces menos que el ancho de la Luna si la pudiésemos observar desde el Sol y desde la Tierra al mismo tiempo.

Un pársec es igual a 3.085678×10^{13} kilómetros (es decir, 30.8 trillones de kilómetros). Cabe notar que todas las estrellas están a más de un pársec de distancia. La más cercana se encuentra a 1.3 pársecs, y la mayoría de las estrellas a más de 1000, es decir, a más de un kilopársec.

En algunas publicaciones aparece otra unidad de distancia astronómica: el año luz = 9.46053×10^{12} kilómetros. Ésta es la distancia que recorre la luz en un año viajando a 300 000 kilómetros por segundo. Un pársec es igual a 3.26 años luz.

De 1989 a 1993 estuvo en operación un satélite llamado Hipparcos, cuyo propósito fue determinar paralajes con altísima precisión; es decir, establecer las distancias de un gran número de estrellas cercanas. Midió las paralajes de más de 100 000 estrellas con una precisión 200 veces mayor que la alcanzada desde Tierra. Fue necesario poner en órbita un te-

telescopio con este fin, puesto que al estar fuera de nuestra atmósfera su exactitud es mucho mayor.

La paralaje espectroscópica

En la sección de la pupila del telescopio vimos que la intensidad de una fuente de luz disminuye como el cuadrado de la distancia. Si todas las estrellas fueran idénticas al Sol, podríamos estimar su distancia midiendo su brillo; entre más distantes, menor brillo.

Si todas las fuentes de luz fuesen focos de 60 watts sabríamos que los brillantes estarían cerca y los débiles lejos. Pero todos sabemos que hay focos distintos, desde los pequeñitos para aparatos electrónicos, hasta los muy potentes como los de los aviones.

Para corregir las diferencias de brillo de un foco bastaría con ver sus especificaciones; así tendríamos un catálogo de brillos posibles; y si supiéramos los datos del foco, comparando el brillo que observamos se podría determinar su distancia. Si sabemos que es de 100 watts, bastaría con compararlo con otro igual cuya distancia conocemos. De otra manera no sabríamos si estamos viendo dos focos igualmente brillantes o si se trata de un foco de 120 watts más alejado que uno de 40 más cercano.

Pues resulta que si es posible distinguir entre las estrellas como el Sol o las gigantes y enanas al estudiar su espectro, que es el nombre técnico para el arco iris.

Se pueden agrupar las estrellas por el aspecto de sus espectros; a eso se le llama tipo espectral. Así, a las estrellas cercanas se les mide su brillo, su paralaje y se les toma su arco iris. De esta manera se clasifican los diferentes tipos de espectro de las estrellas con su brillo intrínseco. Posteriormente, si queremos determinar la distancia de una estrella más alejada se le toma

su espectro, así sabemos de qué tipo es. Comparamos su brillo con el de alguna estrella del mismo tipo cuya paralaje conocemos, a fin de determinar su distancia. A este método para calcular distancias se le conoce como paralaje espectroscópica.

Las estrellas variables

La mayor parte de las estrellas son variables; o sea, su brillo aumenta y disminuye. Algunas cambian de brillo de manera repetitiva (periódica); entre las más conocidas se cuentan las estrellas variables cefeidas, ya que la primera se descubrió en la constelación de Cefeo. Lo que se detecta es que la luz que emiten varía con el tiempo, en cuestión de horas, o de días, en ciclos que se repiten incansablemente. En muchos casos esto se debe a que el diámetro de la estrella cambia; por lo tanto, la superficie que emite luz se modifica y por consiguiente la cantidad de radiación que recibimos. Al fenómeno de cambio periódico del tamaño de una estrella se le llama pulsación.

Al tiempo transcurrido entre dos pulsaciones completas de una estrella se le llama periodo, y depende de su densidad promedio. Cuanto más densas son, más corto es su periodo de pulsación, es decir, les toma un tiempo menor completar un ciclo. En realidad P , el periodo de pulsación, es proporcional al inverso de la raíz cuadrada de la densidad: $P = \text{constante} / (\text{densidad})^{1/2}$. En la secuencia principal (de la que hablaremos más adelante), una estrella de 10 masas solares es 4.9 veces más grande que el Sol y por lo tanto es 12 veces menos densa que él; en cambio, una estrella de 1/2 masa solar tiene 3.7 veces mayor densidad que el Sol. Por lo tanto, una estrella de 10 masas solares pulsa siete veces más lentamente que una de 1/2 masa solar.

Piensa en varias campanas; probablemente has notado que entre más grandes son su sonido es más grave, porque oscilan

más lentamente. Las estrellas gigantes son las que tienen mayor tamaño, menor densidad y pulsan más lentamente.

Las variables cefeidas se encuentran en el plano de nuestra galaxia y en otras galaxias donde hay estrellas relativamente jóvenes como el Sol y aún más jóvenes. A partir de la observación de estas estrellas en lugares cuya distancia se conoce se ha determinado que obedecen una relación periodo-luminosidad. En otras palabras, todas las estrellas variables cefeidas del mismo periodo de pulsación tienen la misma luminosidad. Una vez que se determina que una estrella variable es de este tipo, significa que también se le ha medido su periodo de pulsación. Al compararla con la calibración de la relación periodo-luminosidad se determina su luminosidad. Ésta nos dice cuán brillante debería ser si estuviera a una distancia conocida, por ejemplo la del Sol; comparando el brillo observado con el que pudiera tener, se puede calcular la distancia, puesto que sabemos que ésta depende del brillo.

Con el método de pulsación de estrellas cefeidas se pueden medir distancias hasta galaxias relativamente cercanas.

Otros métodos

En el caso de objetos más lejanos, se recurre a otros procedimientos para estimar sus distancias. Todos estos métodos se basan en obtener muestras de objetos cercanos a los que se le conoce la distancia y decidir si existe alguna propiedad que pueda identificarse independientemente de su distancia. Por ejemplo, hay un tipo de supernovas, las de tipo Ia, que parecen tener el mismo brillo intrínseco. Una supernova de tipo Ia es una estrella que produce una explosión en la que su brillo aumenta millones de veces y por lo tanto se puede observar aunque sea muy lejana. Las supernovas de tipo Ia se identifican por la manera en que varía su brillo después de la explosión.

A este comportamiento se le llama "curva de luz". Así, de entre las explosiones de supernova que se observan en galaxias distantes, se pueden seleccionar aquellas que cumplan el criterio señalado, y de ahí se determina la distancia de la galaxia en la que están ubicadas. Este método, aunque incierto, es muy poderoso, pues nos permite determinar la distancia de galaxias muy lejanas. La incertidumbre radica en que la intensidad y variación de la curva de luz no son idénticas.

En realidad, la determinación de distancias es problemática, y cada uno de los métodos tiene un intervalo de distancias donde se limita su aplicación, por lo que depende del método anterior (figura III.4).

ESPECTROS

Reiteramos que la astronomía es una ciencia que se hace a distancia, por medio del análisis de la radiación que recibimos de los astros. El estudio de la luz nos permite conocer sus propiedades. En general se puede tomar una fotografía, lo que nos permite conocer el brillo, el color, la posición y la forma del objeto (cuando se trata de grupos de estrellas o de nubes de gas). También se puede descomponer la luz en su arco iris; a esto se le conoce como espectroscopia.

Cuando se observa el espectro de un objeto se separa en los distintos colores la luz que nos llega mezclada y que nuestros ojos solamente perciben como un solo color. Los espectros de los astros nos sirven para conocer su temperatura, densidad, composición química y velocidad (figura III.5).

En general, la temperatura ambiente de la Tierra, 20 °C, no es suficiente para que los elementos se vuelvan incandescentes; es decir, que emitan luz. Sin embargo, si los calentamos lo hacen. Así, por ejemplo, el filamento de una hornilla emite luz roja o naranja si lo calentamos mediante una corriente eléctrica. Los focos producen luz visible porque calentamos

su filamento, o porque calentamos los gases que contienen los tubos.

Hemos explicado que las estrellas emanan luz dependiendo de su temperatura. Pero también las nubes de gas caliente emiten luz, que corresponde a los distintos elementos químicos que las forman. Los gases de cada elemento químico emiten luz de determinados colores a cierta temperatura. En los laboratorios se pueden encender tubos de distintos gases a los que se les transmite una corriente eléctrica para elevar su temperatura y se analiza la luz que producen. De esta manera se compara la luz producida en un laboratorio, donde se controlan los experimentos, con la que observamos de los astros. Por ejemplo, el gas hidrógeno a 10 000 °C. emite luz roja, y el oxígeno, verde. Las longitudes de onda de esta radiación son 656 y 501 nanómetros.² Si un objeto celeste produce radiación de 656 y 501 nanómetros, sabremos que contiene gas hidrógeno y oxígeno a 10 000 °C. En general, esta radiación es la que se observa en las nebulosas planetarias.

Las densidades a las que se encuentran las nebulosas planetarias suelen ser aún más bajas que en los vacíos más extremos que se consiguen en los laboratorios de física terrestres.

EL EFECTO DOPPLER Y LA VELOCIDAD

Sabemos que cuando una ambulancia se acerca cambia el tono de su sirena; lo mismo ocurre cuando se aleja. Idéntico fenómeno sucede con los ruidos de una motocicleta en movimiento, o del metro. Esta característica se conoce como el efecto Doppler del sonido. Si la fuente de sonido se acerca a nosotros, las ondas se acortan produciendo un sonido más agudo; en cambio, si se aleja, las ondas se alargan y el sonido se vuelve

² Un nanómetro es una mil millonésima de metro y se abrevia nm).

más grave. El nombre viene del descubridor del efecto: Christian Doppler.

Te sugerimos hacer lo siguiente: coloca un despertador encendido dentro de una bolsa de plástico con asas y pide a otra persona que la haga girar con el brazo extendido, de manera que el despertador se acerque y se aleje de ti. Notarás que el timbre cambia; no es igual que cuando el despertador está en reposo. Puedes percibir que cuando el despertador se acerca el sonido es más agudo, y cuando se aleja, más grave.

Resulta que a la luz, y en general a la radiación electromagnética, también le ocurre un cambio de longitud de onda cuando se aleja o se acerca al observador. La luz visible se vuelve más roja cuando se aleja y más azul si se acerca. La longitud de onda aumenta cuando la fuente se aleja de nosotros y se acorta cuando se aproxima, igual que en el caso del sonido. Nosotros no podemos percibir el efecto Doppler sobre la luz en forma sencilla, pues el corrimiento depende de la velocidad de las ondas, y la velocidad de la luz es mucho mayor que la velocidad del sonido, por lo que los movimientos solamente se pueden percibir mediante equipo muy especializado (figuras III.6 y III.7).

EL DIAGRAMA H-R

El diagrama H-R ha resultado un gran apoyo para la astronomía. Su nombre proviene de los investigadores que lo propusieron como una ayuda para entender el comportamiento de las estrellas: Ejnar Hertzsprung y Henry Norris Russell.

Como hemos visto antes, existen dos características de las estrellas que podemos medir con cierta facilidad: el brillo y el color. El color está directamente relacionado con la temperatura. El diagrama H-R se obtiene de graficar estas dos propiedades estelares.

Si todas las estrellas tuviesen el mismo brillo y la misma

temperatura, la gráfica sería un solo punto. Si tuvieran cualquier brillo y la misma temperatura, sería una línea vertical. Y si hubiese estrellas de todas las temperaturas y de todos los brillos, el diagrama estaría uniformemente tapizado de puntos.

Se trata de graficar la luminosidad que emiten las estrellas y compararlas con el color que tienen. Como el brillo que recibimos depende de la distancia a la que se encuentre la estrella, para preparar este diagrama necesitamos calcular el brillo que tendrían las estrellas si estuvieran todas a la misma distancia. También se puede lograr si se grafica el brillo de un conjunto de estrellas que sepamos que se encuentran a la misma distancia de nosotros. Esto es lo que ocurre en el caso de ciertas agrupaciones en el cielo, llamadas cúmulos de estrellas. Al representar el brillo y el color, como hemos descrito antes, encontramos que ocupan espacios muy bien definidos en este diagrama.

En las gráficas de brillo y color de las estrellas cuya distancia conocemos, se encuentra que muchas de las estrellas caen sobre una línea ligeramente ondulada que recorre el cuadro de la parte superior izquierda a la inferior derecha. Esto significa que las estrellas más brillantes son más calientes y azules, y que las menos brillantes son más frías y rojas. A esta banda se le conoce como la secuencia principal, pues allí se ubica la mayor parte de las estrellas de toda la galaxia.

El motivo por el cual hay un gran número de estrellas en esa banda es porque se encuentran en una fase muy prolongada de su existencia. Están transformando hidrógeno en helio mediante las reacciones termonucleares. Y esto tiene como consecuencia que a cada masa estelar corresponde una diferente configuración: tamaño, brillo, presión y densidad en el centro y en el resto de su interior, etc. Estas condiciones controlan la velocidad con la que la estrella quema su combustible, lo cual tiene que ver con el brillo en la superficie (figura III.8).

Además, podemos darnos cuenta de que esta secuencia in-

cluye estrellas azules (muy calientes), las cuales son muy brillantes; éstas resultan ser un poco mayores que el Sol. Un brillo tan intenso requiere que consuman mucho combustible. También comprende estrellas rojas (de menor temperatura), que son un poco menores que el Sol. Estas estrellas son mucho menos brillantes, por lo que consumen combustible de manera más lenta. El Sol también se encuentra sobre la secuencia principal. Su posición es a la mitad de ésta. Es una estrella de masa intermedia, por lo que su tamaño y brillo también lo son.

Además de las estrellas de la secuencia principal, se encuentran estrellas muy brillantes, y de gran tamaño, a las que se llama gigantes, y otras que son mucho más débiles, a las que se conoce como enanas blancas.

En este diagrama, las estrellas de mayores dimensiones se encuentran en la parte superior derecha, y las de menor tamaño están ubicadas en la parte inferior izquierda.

LA MATERIA ENTRE LAS ESTRELLAS

El espacio entre las estrellas no está vacío: existen en él gas y pequeñas partículas sólidas; a esto se le llama materia interestelar. Aunque las densidades a las que se encuentran son bajísimas, los volúmenes del espacio son tan grandes que la cantidad de materia que hay en éste no es despreciable. Hay sitios en donde la materia es más densa y forma nubes, mientras que en otros se encuentra más diluida, llenando todo el espacio (figura III.9).

El gas

El gas que hay entre las estrellas es principalmente hidrógeno y helio, mezclados con pequeñas cantidades de todos los demás elementos químicos.

Este gas puede estar a distintas temperaturas y densidades, y se manifiesta de diferentes formas. En las nubes más frías se encuentra en forma de moléculas, de H_2 , CO , etc., y emite radiación de microondas. En las nubes donde el hidrógeno es neutro emite ondas de radio, y en las nubes donde el hidrógeno está caliente se observa en luz visible. En algunos sitios que se encuentran a altísimas temperaturas se puede observar el gas en rayos X.

El estudio del gas permite determinar la estructura de la galaxia y los movimientos de éste en las distintas partes de los brazos espirales. También permite derivar la composición química, densidad y temperatura del gas en las distintas regiones, así como la interacción entre el gas y las estrellas. En las nubes densas su estudio nos permite entender los procesos de formación de nuevas estrellas.

El polvo

Así denominamos las partículas sólidas muy pequeñas que están presentes en el espacio interestelar. Estas partículas son semejantes al polvo que encontramos sobre los muebles de la casa.

El polvo se descubrió porque hay zonas en el cielo que parecen estar desprovistas de estrellas; ahí se ve el cielo muy oscuro, en contraste con el brillo en zonas cercanas. Resulta que la ausencia de estrellas se debe a que hay nubes densas de gas y polvo delante de ellas, en las que el polvo impide ver las estrellas más alejadas, ya que absorbe su luz.

Para comprender los efectos del polvo interestelar, pensemos en un atardecer. El cielo se cubre de tonos anaranjados. Cuando se pone el Sol, su luz debe atravesar una capa más ancha de la atmósfera que cuando está cerca del cenit. Las moléculas suspendidas en la atmósfera absorben más la luz azul que la roja, y por consiguiente el cielo toma tonos más cer-

canos al rosa. Incluso las nubes reflejan este color. Un efecto semejante sucede con el polvo: absorbe más la luz azul que la roja; por ello, cuando hay polvo en la atmósfera estas manifestaciones coloridas en tonos naranja son aún más pronunciadas.

Además, el polvo interestelar es responsable de varios efectos visibles desde la Tierra. En ciertas condiciones, por ejemplo visto de lado, puede reflejar la luz de las estrellas; asimismo, cuando está delante de ellas, la puede absorber. Similarmente a lo que sucede en nuestra atmósfera, absorbe más la radiación azul que la roja. Este efecto se debe tomar en cuenta en los estudios de la distancia y brillo de las estrellas, pues las observaciones se tienen que compensar por absorción del polvo. Por otro lado, al afectar la luz de los objetos que se encuentran detrás de las nubes, nos permite conocer las características de las partículas de polvo que lo causan. Comparando la diferencia de absorción entre los dos colores, por ejemplo rojo y azul, se puede estimar la cantidad de polvo que hay entre nosotros y el objeto que emite luz.

Otro efecto que producen las nubes de polvo interestelares ocurre cuando hay nubes densas cercanas a las estrellas. Ahí el polvo se calienta y emite radiación infrarroja o de microondas, lo que permite su detección. Así podemos conocer cuánto polvo hay, de qué está formado y cómo se distribuye.

El polvo interestelar está constituido por los elementos como carbono, silicio, magnesio y oxígeno, que no son muy abundantes en el espacio interestelar; además, está recubierto de hielos de amoníaco, metano y agua. Aunque en el cosmos los elementos más abundantes son el hidrógeno y el helio, éstos no son parte importante del polvo, ya que el hidrógeno tiene una sola valencia química y en general forma moléculas relativamente pequeñas, como H_2 , H_2O , OH , etc. Por su parte, el helio no se combina, pues es lo que los químicos llaman un "gas noble".

Suponemos que es difícil formar polvo, ya que está constituido de moléculas complejas. Estas se forman a partir de moléculas simples, que al chocar con otras se unen hasta constituir partículas de mayor tamaño. Cuando se ha formado un granito de polvo, éste se puede cubrir fácilmente por hielos de otros compuestos más abundantes en el espacio, los cuales contienen hidrógeno, entre otros elementos. Sitios formadores de polvo son los vientos suaves que arrojan algunas estrellas llamadas gigantes rojas.

Como todo en la naturaleza, el polvo cambia, en particular cuando choca con otros granos o cuando lo iluminan estrellas de alta energía y se evapora. En este caso sólo el polvo refractario sobrevive. Este, a su vez, puede aglutinar otras partículas para formar objetos de gran tamaño. Uno de los problemas de gran interés es determinar cuáles son las condiciones para que se forme el polvo y cuáles son los procesos que lo destruyen. En algunos laboratorios terrestres se realizan experimentos para reproducir estos efectos (figura III.10).

LA GALAXIA

Los conglomerados estelares por excelencia son las galaxias. Son grupos de cientos de miles de millones de estrellas, gas, polvo y materia oscura. Las galaxias más pequeñas son irregulares, suelen tener mucho gas que no ha sido transformado en estrellas. Entre las de mayor masa se encuentran las galaxias espirales, en las que las estrellas y el gas están principalmente en un disco, o plano, de la galaxia que está girando; en ellas, el gas y las estrellas jóvenes se distribuyen en lo que se llaman brazos. Otras galaxias son las elípticas, de formas que van de casi esféricas hasta más aplanadas. Estas están formadas por estrellas y casi no tienen gas.

El Sol forma parte de una galaxia. Fue difícil saber cómo es ésta porque el sistema solar está inmerso en el plano de la mis-

ma. En la noche, en lugares alejados de las luces artificiales, se puede ver la Vía Láctea, que es justamente la parte visible del plano de la galaxia. Está formada por incontables estrellas; está tan poblada que no nos permite ver las estrellas lejanas ni las demás galaxias localizadas en esa dirección. Vivimos en un conglomerado estelar de 100 000 millones de estrellas, cada una con sus respectivos planetas y cuerpos menores. La galaxia también posee gas, polvo y lo que se conoce como materia oscura, que se descubrió por la atracción gravitacional que ejerce sobre los objetos visibles.

Para conocer la forma de nuestra galaxia tenemos que recurrir a dos tipos de estudios. El primero es a partir de observar otras galaxias, suponer que la nuestra se les asemeja y tratar de verificar si este modelo se aplica. Otro método consiste en observar la luz de hidrógeno neutro en 21 centímetros de longitud de onda. Esto se puede hacer, ya que las ondas de radio pueden atravesar la galaxia sin ser absorbidas. El hidrógeno neutro es muy abundante en el medio interestelar. La intensidad de la emisión es mayor en el plano y especialmente en los brazos espirales, ya que ahí su densidad es más elevada.

Nuestra galaxia es del tipo espiral. Esto significa que es una estructura muy aplanada, como un disco, que es la región donde se ubica la gran mayoría de las estrellas. En el disco se encuentran los que se llaman los brazos espirales, que es de donde toma su nombre este tipo de galaxias. Los brazos espirales son los lugares donde se están formando las estrellas. Además del disco hay un conjunto de estrellas distribuidas en forma de espira; a este conjunto se le llama halo. Cerca del centro de la galaxia se hallan otros grupos de estrellas muy numerosos, a los que se llama bulbo de la galaxia. En el centro de la galaxia las estrellas están muy concentradas, y sólo mediante observaciones infrarrojas se las puede apreciar, ya que hay gran cantidad de polvo sobre el plano de la galaxia que impide hacerlo con luz visible. Por medio de estudios de gran precisión se logró

determinar los movimientos de las estrellas más cercanas al centro de la galaxia. Se encontró que éstas giran alrededor de un objeto invisible y de gran masa. ¡Ahí hay un hoyo negro de tres millones de masas solares!

Las dimensiones de la galaxia son enormes; tiene un diámetro aproximado de 30 000 pársecs; es decir, la luz tarda 100 000 años en ir de un extremo a otro. El sistema solar se encuentra sobre el plano de la galaxia, en una región a distancia intermedia entre el centro y la orilla. Se encuentra a 7700 pársecs de distancia del centro (la luz tarda en llegar del centro de la galaxia a la posición del Sol 25 000 años).

Aunque hay nebulosas planetarias en toda la galaxia, se encuentran en gran número en el bulbo y en el disco; por el contrario, hay muy pocas de ellas en el halo, la región donde están las estrellas más antiguas.

¿DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS ESTRELLAS?

Una de las formas de estudiar la naturaleza es simplificar los sucesos lo más posible para poderlos entender. Una vez que se aclaran las ideas básicas, es posible proponer modelos más complicados. Es como la geografía: se hacen mapas para orientar a las personas, para indicar las elevaciones, los poblados y los recursos naturales. Los mapas no son los países; sin embargo, son muy útiles para analizarlos.

Se ha descubierto que todas las cosas se componen de partículas sumamente pequeñas llamadas átomos. Los átomos se combinan de maneras muy distintas para formar los objetos. Los seres vivos, las rocas y las estrellas están constituidos por átomos.

No todos los átomos son iguales. A la variedad de éstos se le llama elementos y se les clasifica por sus propiedades químicas; así se representan en la tabla periódica de los elementos.

Algunos ejemplos son el oxígeno, el carbono, el oro y el aluminio. Lo extraordinario es que la combinación de los elementos produce *todas* las cosas que conocemos. Por ejemplo, los seres vivos están formados principalmente de átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. La arena del mar, el vidrio y los paneles solares y chips de una computadora se componen principalmente de átomos de silicio.

Los químicos son capaces de analizar de qué clase de átomos están compuestas las cosas, y los astrónomos han descubierto que los astros están formados por los mismos elementos que existen en la Tierra. Lo hacen analizando los espectros.

Cada elemento químico produce ciertos colores, que le son únicos, cuando se calienta. Al analizar un espectro sabemos qué tipo de átomos lo produjeron.

A partir de estas observaciones, ahora se sabe que hay cierta uniformidad entre las estrellas. De los 92 elementos químicos que existen en forma natural, en las estrellas se han observado 74. Seguramente, las estrellas también poseen los elementos restantes, pero se encuentran en cantidades tan pequeñas que no son detectables. Podemos decir que en la mayoría de las estrellas domina el hidrógeno (casi 90% por número), seguido del helio (con 9.9% por número). Y existe apenas una traza del resto de los elementos (0.1% por número), entre los que se encuentra en mayor proporción el oxígeno, seguido por el carbono, neón y nitrógeno.

IV. El Sol y la evolución de las estrellas

Hemos descrito muchas propiedades de las estrellas. Ahora deseamos explicar cómo son las estrellas por dentro. La cantidad de materia o masa con la que se forman determina muchas de sus propiedades y también los cambios que ocurren en ellas.

Puesto que este libro es sobre objetos que fueron como el Sol, ahora hablaremos sobre la estrella más cercana a nosotros con cierto detalle. También describiremos cómo son las demás estrellas y su evolución. Asimismo, se explicará cómo han afectado el medio que las rodea.

EL SOL, ESTRELLA DE LA VIDA

Desde épocas muy remotas, los humanos se dieron cuenta de que el Sol es imprescindible para la vida. Basta con imaginar lo que sería estar sin luz solar durante varios días. El Sol nos da luz y calor, marca las diferencias entre día y noche, lo que nos da la medida del tiempo. Las plantas captan su energía y la emplean para su alimento y el nuestro.

El Sol ha existido durante 4600 millones de años. En este lapso, la vida en la Tierra ha evolucionado y se ha transformado, dando lugar a seres diversos y extraordinarios. La vida requiere consumir energía para crecer, transformarse y reproducirse, así como para moverse y desarrollar el resto de sus

funciones; el Sol suministra de manera directa o indirecta toda esta energía (figura 14:1).

El Sol es tan brillante que opaca a las estrellas. Éstas recorren la bóveda celeste también durante el día, pero el Sol ilumina nuestra atmósfera y nos impide verlas. El Sol está a 150 millones de kilómetros de la Tierra; esto significa que si viajáramos allá a una velocidad de 150 kilómetros por hora, como un coche de carreras, llegaríamos en un millón de horas: ¡en un poco más de 100 años!

Si la Tierra estuviera más cerca del Sol, su temperatura sería demasiado alta para que se desarrollara la vida, y si estuviera más lejos sería demasiado baja. En Mercurio la temperatura es de 400 °C y en Júpiter de -150 °C; más alta que la de un horno y mucho más baja que la de un congelador, respectivamente.

El Sol está constituido mayormente de hidrógeno; la cantidad de este elemento es de 74% de la masa. También contiene helio, que aporta 24% de la masa. Apenas 2% de la masa la constituye el resto de los elementos: principalmente carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, magnesio, silicio y hierro. El Sol está formado por gases muy tenues cerca de la superficie y muy densos hacia el centro.

No podemos ver el interior del Sol, por lo que es necesario recurrir a las leyes de la física para determinar sus condiciones. Por ejemplo, sabemos que el centro debe estar a enormes presiones, pues las capas interiores tienen que sostener el peso de las capas superiores.

El transporte de calor en el interior del Sol

Una de las propiedades de la naturaleza es que el calor fluye de los cuerpos calientes a los fríos. Ésta es la razón por la que nunca verás que se congela el agua de la cacerola que está so-

bre el fuego, ya que la lumbre la calienta. Si tocamos un objeto metálico que esté a temperatura ambiente solemos sentirlo frío, ya que el calor de nuestro cuerpo fluye hacia él.

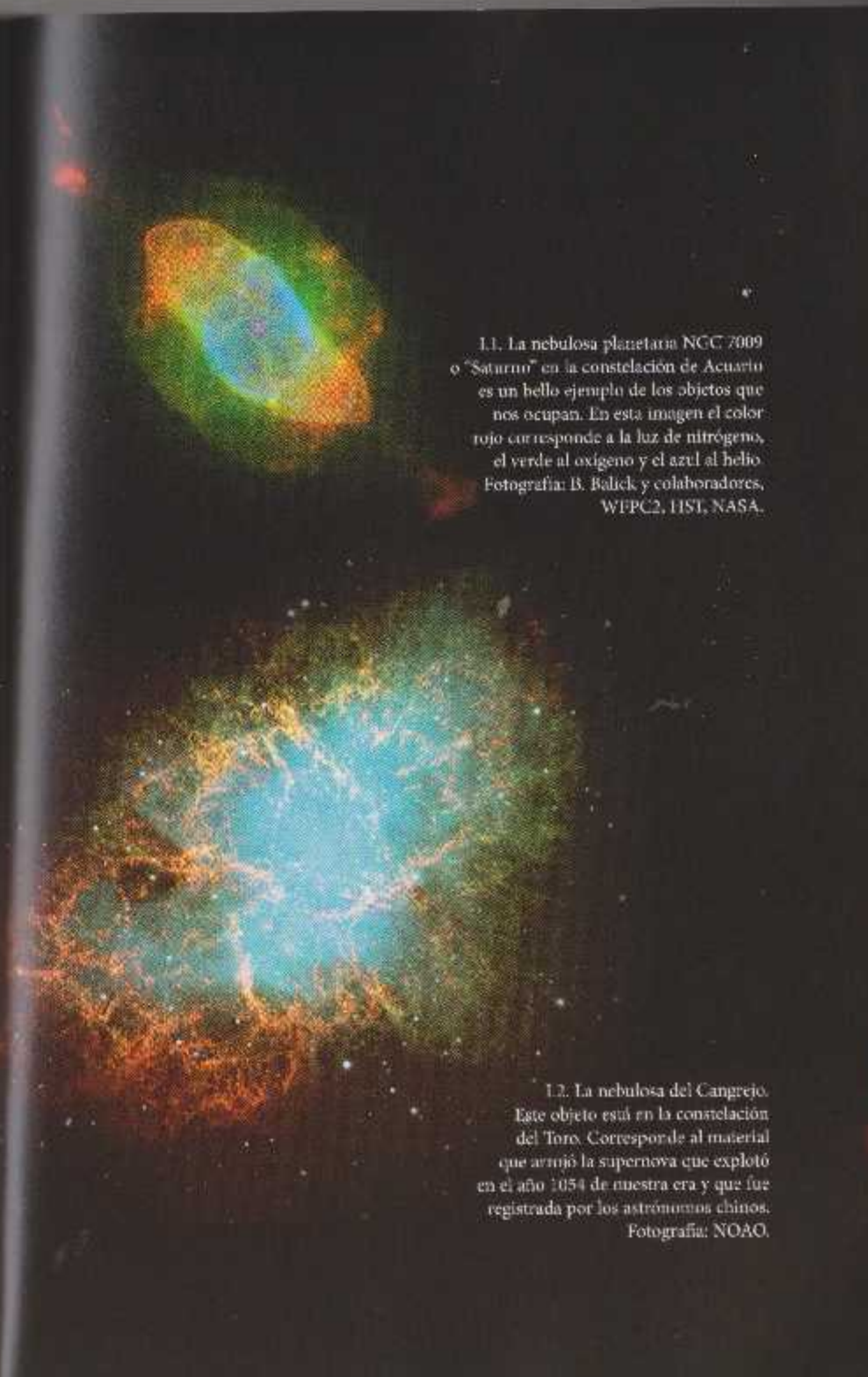
Esta manera de transportar calor, llamada conducción, no es muy eficiente a grandes escalas. Así, el interior de la Tierra presenta altas temperaturas, mientras que en la superficie está a la temperatura ambiente. Esto lo podemos constatar por la lava que viene del interior de la Tierra a altísimas temperaturas, y sin embargo no sentimos su calor, ya que las rocas que nos separan de ella son aislantes; es decir, malas conductoras de calor. Lo mismo sucede en el caso del Sol y de las estrellas: la energía que se produce en su centro no se transmite muy eficientemente hacia afuera, por lo que su superficie es mucho más fría que el interior.

Otra manera de transportar el calor es por medio de la radiación, como la luz. Como sabes, si te pones frente al Sol sientes cómo su radiación te calienta. La radiación (es decir, la luz) atraviesa el espacio y recorre la distancia que nos separa del Sol. La radiación es una manera muy eficiente de transportar calor.

Además de fluir de los lugares de mayor a los de menor temperatura, por medio de la conducción (el contacto directo) y la radiación (como la luz), el calor puede transportarse por algo que se llama convección; es como cuando se mezcla un líquido.

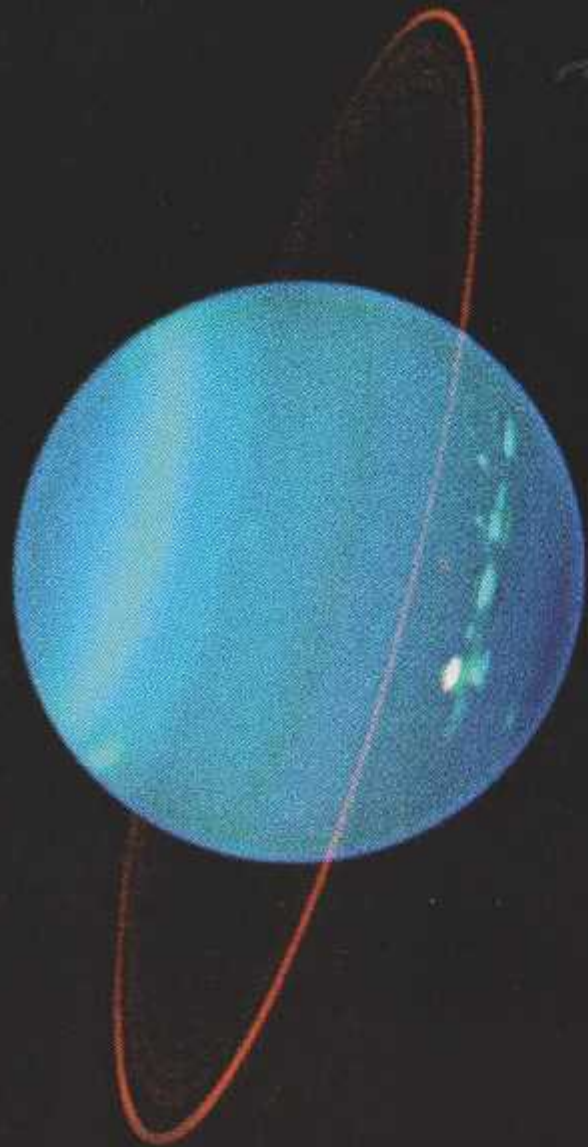
Si algún día te asomas a la cazuela del mole mientras esté hirviendo, notarás que burbujea. Lo que sucede es que el mole que está en contacto con el fondo de la cacerola que absorbe calor de la radiación de la flama está a mayor temperatura. Este mole caliente del fondo se eleva, dejando espacio al mole menos caliente, que desciende. Podemos imaginar la superficie del Sol como la de la cacerola de mole, con burbujas de gas caliente que se elevan mientras que el gas frío de la superficie desciende.

En el interior de las estrellas hay transporte de calor, en ciertas condiciones por medio de radiación y, en otras, por



1.1. La nebulosa planetaria NCC 7009 o "Saturno" en la constelación de Acuario es un bello ejemplo de los objetos que nos ocupan. En esta imagen el color rojo corresponde a la luz de nitrógeno, el verde al oxígeno y el azul al helio. Fotografía: B. Balick y colaboradores, WFC2, HST, NASA.

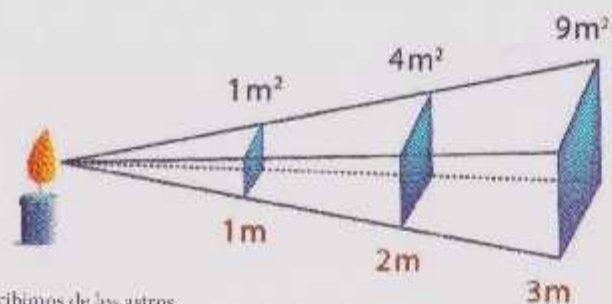
1.2. La nebulosa del Cangrejo. Este objeto está en la constelación del Toro. Corresponde al material que arrojó la supernova que explotó en el año 1054 de nuestra era y que fue registrada por los astrónomos chinos. Fotografía: NOAO.



13. La sonda Vikingo fotografió a Urano, sus anillos y satélites.
Fotografía: Erich Karkoschka NASA/ESA.



14. Son varios los fragmentos de meteoritos metálicos que se impactaron en Chihuahua y que se han recuperado. Además del que se muestra aquí, del Instituto de Astronomía de la UNAM, hay otros que se encuentran en el Palacio de Minería en la ciudad de México.
Fotografía: J. C. Yastis.

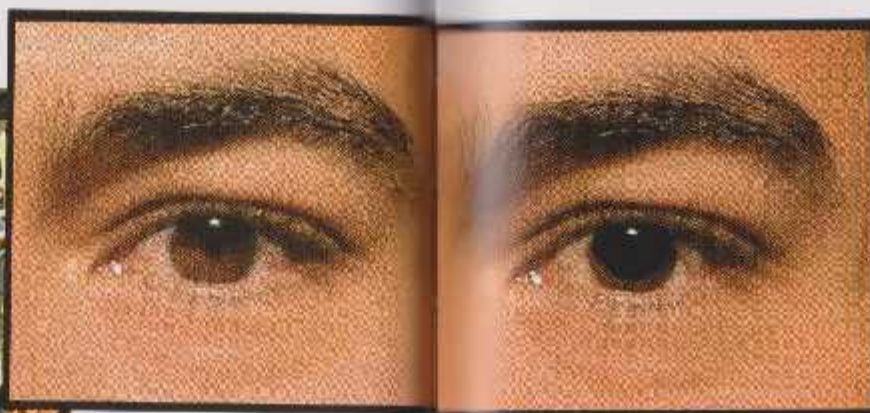


II.2. La luz que recibimos de los astros disminuye con el cuadrado de la distancia que nos separa de ellos.



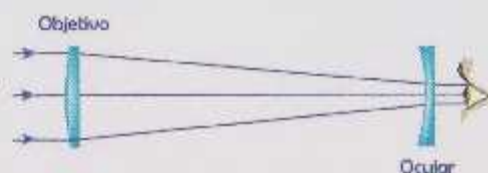
II.3. Toda la luz que recibe nuestro ojo entra por la pupila. La cantidad de luz que recibe un telescopio es mayor cuanto mayor sea el tamaño de su apertura, ya que es como tener una enorme extensión de nuestra pupila.

Fotografía: J. C. Yustis.

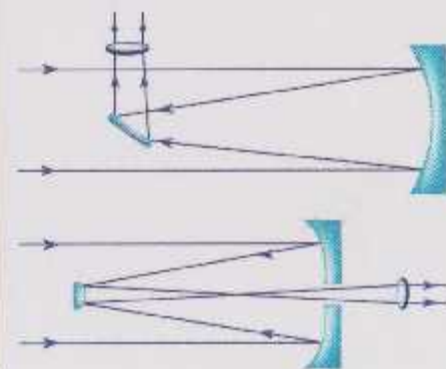
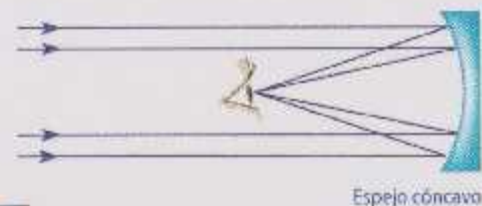


II.1. Nuestra pupila se dilata en la oscuridad, lo que le permite recibir más luz y ver objetos débiles. Fotografía: J. C. Yustis.

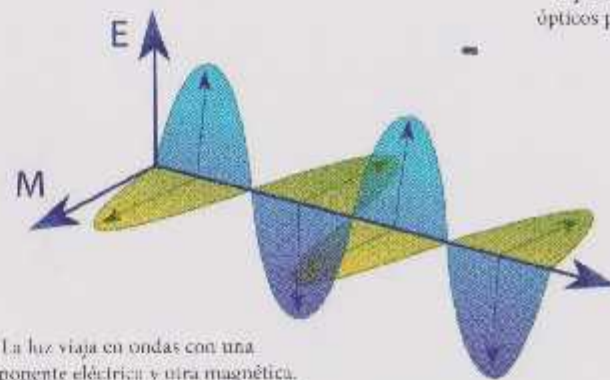
II.4. Un telescopio refractor se compone de varias lentes. Galileo construyó su telescopio con una lente cóncava y otra convexa.



II.5. En un telescopio reflector el principal elemento óptico es un espejo cóncavo.



II.6. El telescopio reflector requiere otros elementos ópticos para poder formar imágenes.



II.7. La luz viaja en ondas con una componente eléctrica y otra magnética.



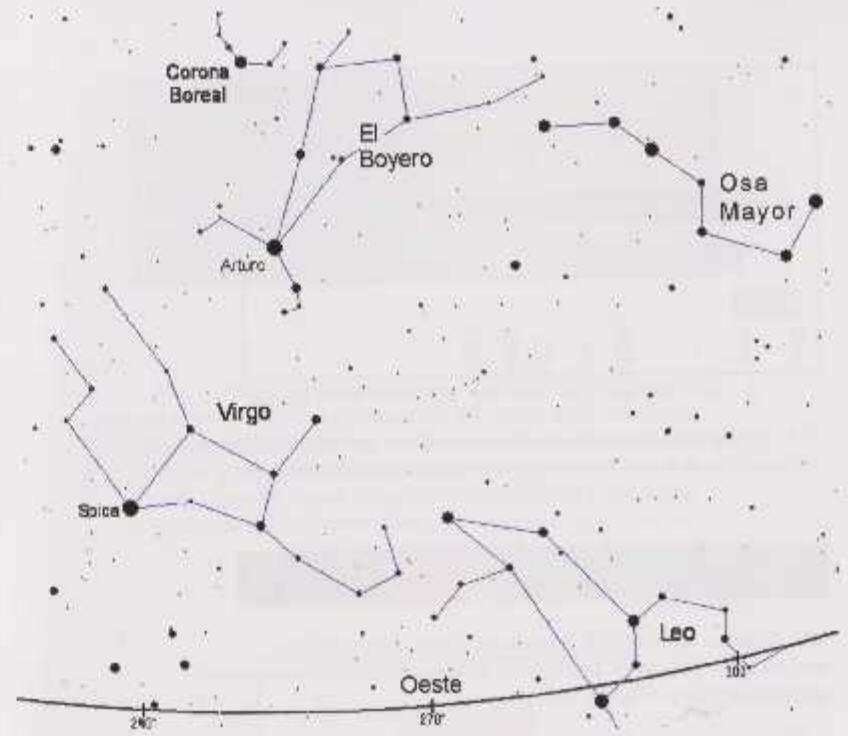
11.8. En el Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir, en Baja California, está instalado el telescopio de 2.1 metros de diámetro en su espejo principal.
Fotografía: M. A. Moreno.



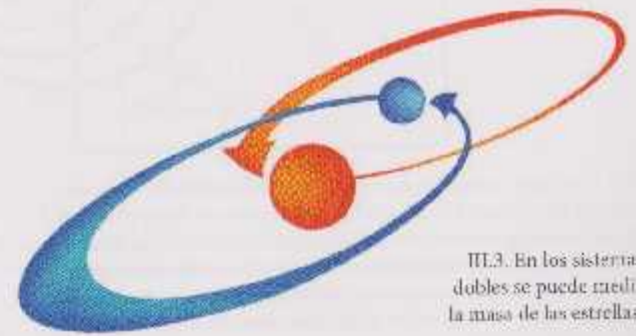
11.9. El Gran Telescopio Milimétrico es una antena de 50 metros en el volcán Sierra Negra, en el estado de Puebla.
Fotografías cortesía del Instituto Nacional de Astronómica, Óptica y Electrónica.



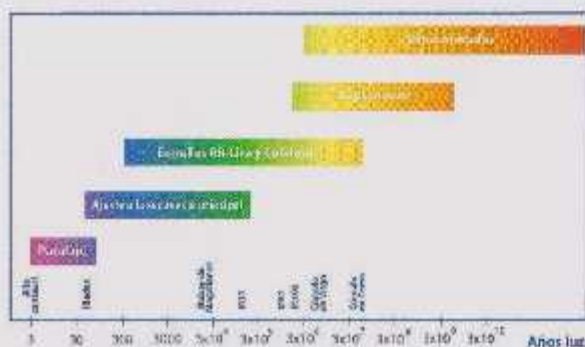
III.1. Se muestra una región donde se han formado estrellas recientemente (apenas hace un millón de años) llamada NGC 3603. En esta imagen se pueden ver estrellas, gas y polvo en el espacio. Las estrellas tienen diferente brillo y color. Fotografía: NASA, ESA y el Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA.



III.2. Este es un mapa de una región del cielo donde se señalan las estrellas; el brillo se representa por el tamaño de los círculos. A las estrellas de mayor brillo se les asigna magnitudes menores.



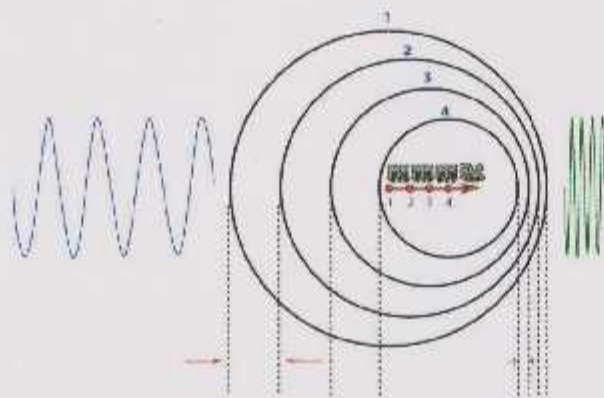
III.3. En los sistemas dobles se puede medir la masa de las estrellas.



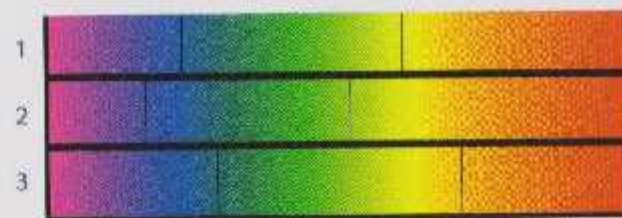
III.4. Descripción esquemática de diversos métodos que se aplican en astronomía para determinar distancias y sus intervalos de aplicación.



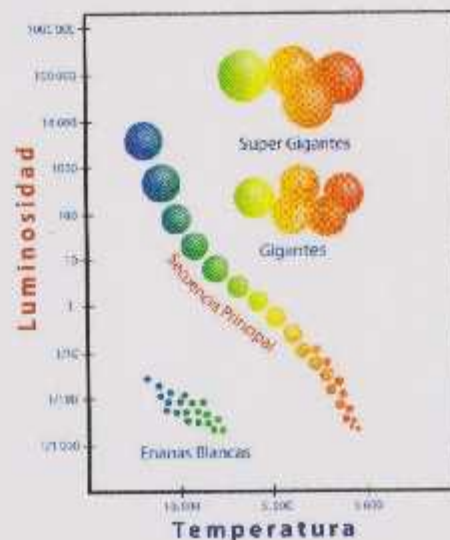
III.5. Este es el espectro de la luz solar en el que las líneas tenues oscuras (verticales) son la huella de los distintos elementos químicos que están en la superficie del Sol.



III.6. Una fuente sonora en reposo emite ondas igualmente espaciadas en todas direcciones. Un observador recibe ondas de diferente longitud de una fuente en movimiento, por lo que percibe diferencias de tono. En caso de que la fuente se acerque, la longitud de onda que reciba será más corta (tono más agudo), y en el caso de que ésta se aleje, la longitud de onda será mayor (tono más grave).



III.7. También con las ondas de luz se presenta el efecto Doppler. Dependiendo del desplazamiento de la huella de los elementos se puede medir la velocidad con la que se aleja o acerca una fuente de luz. Si suponemos que el espectro superior corresponde al de una fuente en reposo, el segundo correspondería a una fuente que se acerca (corrimiento hacia el azul) y el tercero a una que se aleja (corrimiento hacia el rojo).



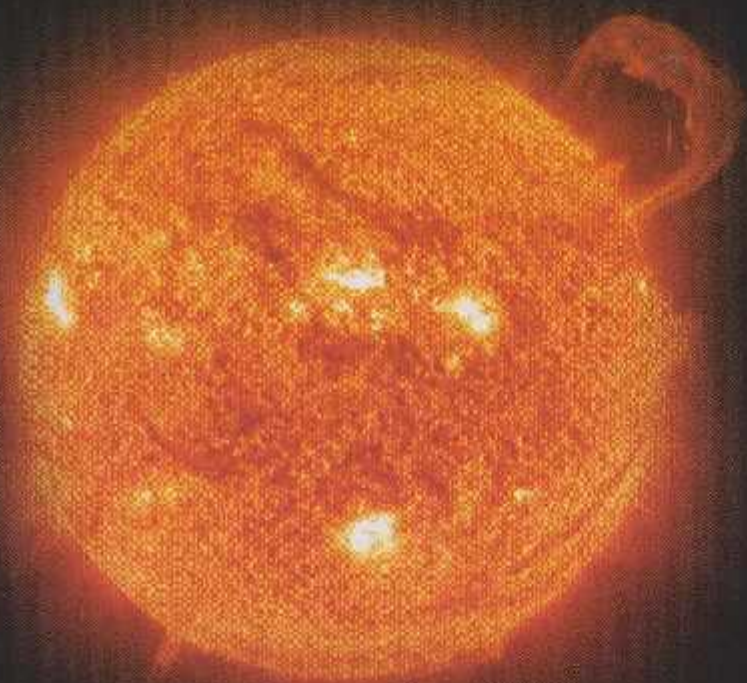
III.8. Al graficar las estrellas por su brillo y color, se encuentra que ocupan espacios definidos en este diagrama. A la banda que lo cruza diagonalmente, de la parte superior izquierda a la inferior derecha, se le llama *secuencia principal*.



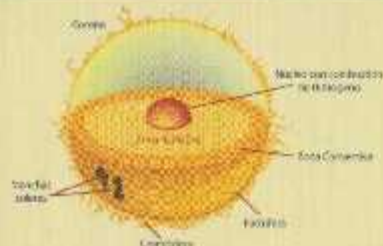
III.9. La materia interestelar también se puede observar por el polvo que refleja la luz, o por el polvo que nos impide ver lo que hay detrás. Ésta es una sección de la nebulosa NGC 2264, llamada también del Árbol de Navidad.
Fotografía: T. A. Rector y B. A. Wolpa, NOAO/AURA/NSF.



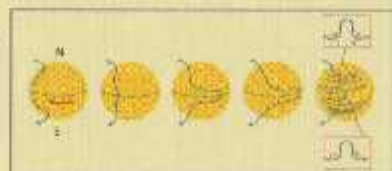
III.10. Existen sitios oscuros del cielo donde no se distinguen estrellas ni gas brillante, aun con telescopios poderosos. La ausencia aparente de estrellas se debe a que hay una nube densa de gas y polvo que impide ver las estrellas que se encuentran detrás. A esta nube densa frente al cúmulo de estrellas NGC 281 se le conoce como glóbulo de Bok.
Fotografía: NASA/ESA y el Hubble Heritage Team STScI/AURA.



IV.1. La superficie del Sol no está quieta. Continúa presentando emisiones de materia. Fotografía: Consorcio SOHO (BIT/NASA/ESA).



IV.2. Diagrama en el que se representan las distintas partes del Sol.



IV.3. Representación de cómo se modifica el campo magnético solar.



IV.4. La Gran Nebulosa de Orión es una región de formación estelar. Las estrellas más brillantes en el centro se formaron hace apenas 100 000 años. Fotografía: NASA, ESA, M. Robberto y el Hubble Heritage Team.



IV.5. En 1987 estalló una supernova en la galaxia vecina, la Nube Mayor de Magallanes. Esta imagen fue obtenida 12 años después y en ella se puede apreciar una estrella rodeada por un conjunto de anillos.
Fotografía: Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA).



IV.6. La nebulosa planetaria M27, o NGC 6853, en la constelación de Vulpécua, es el resultado del material arrojado al espacio por una estrella de masa intermedia.
Fotografía: N. A. Sharp, programa REU, NOAO/AURA/NSF.



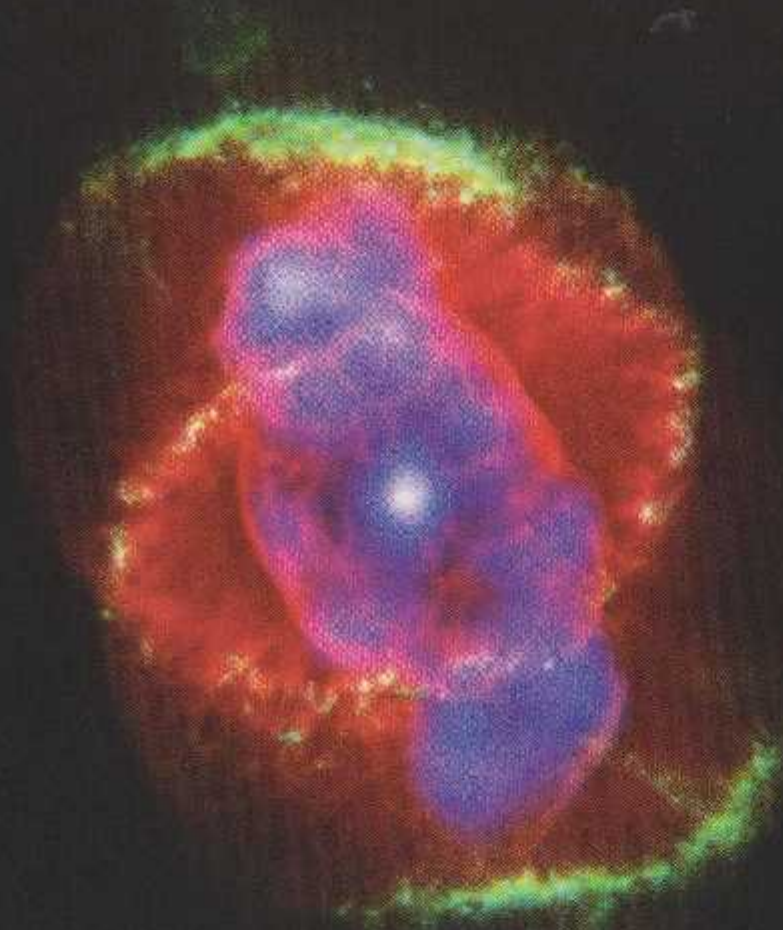
V.1. Nebulosa planetaria NGC 6751 en la constelación del Águila. Al centro está la estrella que la ilumina, las otras estrellas están en la misma dirección, adelante o atrás de la nebulosa, pero no tienen relación con ésta. Fotografía: NASA/ESA y el Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



V.2. Algunas nebulosas planetarias son espectaculares, como es el caso de la nebulosa del Esquimal, o NGC 2392. Fotografía: A. Fruchter, NASA.



V.3. La nebulosa NGC 6302, o de la Mariposa, es muy joven. Su envoltente muestra velocidades de expansión muy elevadas. Fotografía: A. Zijlstra y colaboradores ESA/NASA.




V4. Imagen compuesta de la nebulosa NGC 6543 u Ojo de Gato.
La zona azul corresponde a radiación de rayos X donde el gas se encuentra a altísimas temperaturas. La zona roja corresponde al gas de hidrógeno y la luz verde al gas de oxígeno.
Fotografía: Y. Chui y colaboradores, J. P. Harrington y K. J. Borkowski, NASA.



V5. Abell 39 es una nebulosa circular en la constelación de Hércules.
Fotografía: G. Jacoby y colaboradores WIYN/AURA/NOAO/NSE.



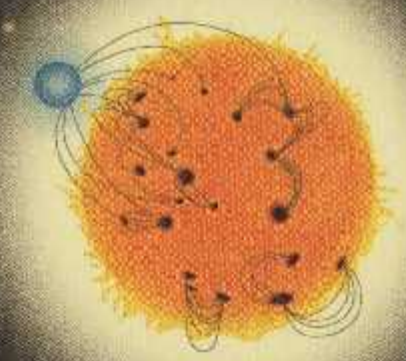
V6. La sombra de las pompas de jabón se ven más intensas en los bordes.



V.7. NGC 3132 es un ejemplo de una nebulosa planetaria elíptica. Fotografía: Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA).



V.8. La M2-9 es una nebulosa planetaria extremadamente alargada, o bipolar. Fotografía: B. Balick y colaboradores, WFPC2, HST, NASA.



V.9. Algunas de las hermosas estructuras de las nebulosas planetarias se pueden explicar si se toman en cuenta los campos magnéticos y las interacciones de sus núcleos binarios.



V.10. La nebulosa planetaria Hubble-5 es un ejemplo de una nebulosa con estructura multipolar.
Fotografía: B. Balick (University of Washington) y colaboradores, WFPC2/HST/NASA.



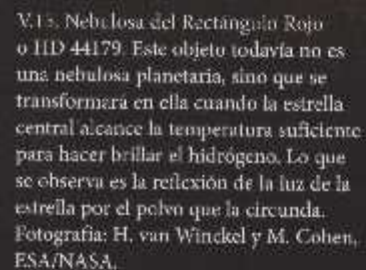
V.11. M4-3 es otro ejemplo de nebulosa multipolar.
Fotografía: R. Sahai y colaboradores, Hubble Heritage Team, ESA/NASA.



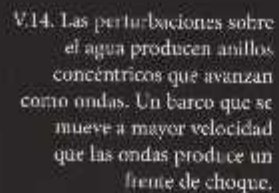
V.12. NGC 5307 es una nebulosa planetaria con simetría respecto al centro. Tiene forma de S.
Fotografía: H. Bond (STS-1) y R. Ciardullo (Pennsylvania State University), WFPC2/HST/NASA.



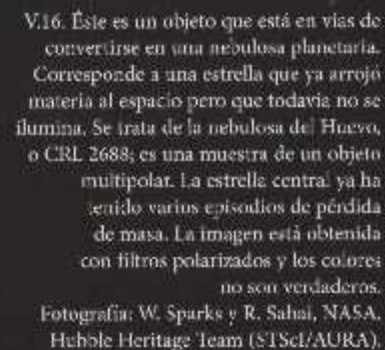
V.13. En esta imagen de la nebulosa Ojo de Gato o NGC 6543 se destacan estructuras externas más débiles. Algunas de sus estructuras presentan forma circular y otras, forma de S. En imágenes de exposición muy larga se puede apreciar que la estrella sufrió varias fases de pérdida de masa.
Fotografía: NASA/ESA/HST y Hubble Heritage Team.



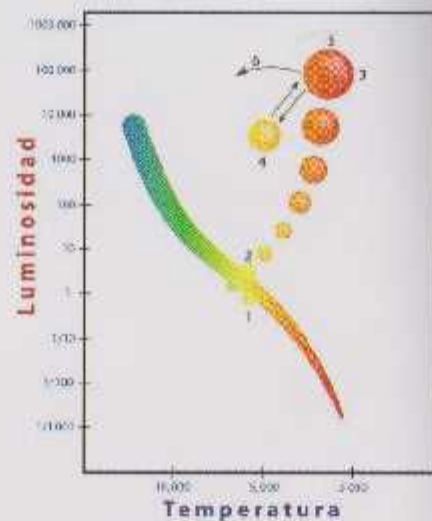
V.15. Nebulosa del Rectángulo Rojo o HD 44179. Este objeto todavía no es una nebulosa planetaria, sino que se transformará en ella cuando la estrella central alcance la temperatura suficiente para hacer brillar el hidrógeno. Lo que se observa es la reflexión de la luz de la estrella por el polvo que la circunda. Fotografía: H. van Winckel y M. Cohen, ESA/NASA.



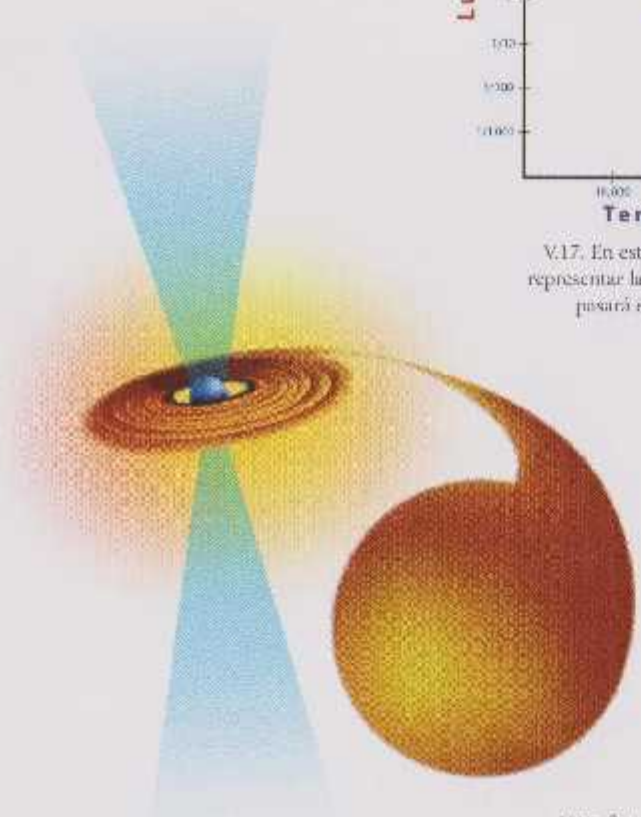
V.14. Las perturbaciones sobre el agua producen anillos concéntricos que avanzan como ondas. Un barco que se mueve a mayor velocidad que las ondas produce un frente de choque.



V.16. Este es un objeto que está en vías de convertirse en una nebulosa planetaria. Corresponde a una estrella que ya arrojó materia al espacio pero que todavía no se ilumina. Se trata de la nebulosa del Huevo, o CRL 2688; es una muestra de un objeto multipolar. La estrella central ya ha tenido varios episodios de pérdida de masa. La imagen está obtenida con filtros polarizados y los colores no son verdaderos. Fotografía: W. Sparks y R. Sahai, NASA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



V.17. En este diagrama H-R se puede representar las distintas fases por las que pasará el Sol en su evolución.



V.18. Ésta es una ilustración de cómo se piensa que hay transferencia de masa entre dos estrellas binarias cercanas. Adicionalmente se representa un posible flujo bipolar como consecuencia del disco que circunda a la estrella compacta.



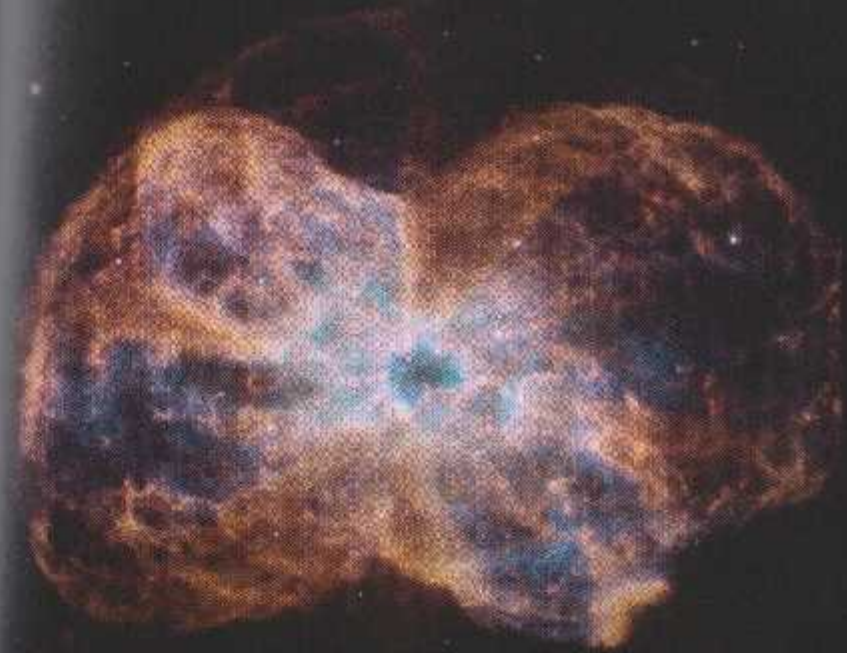
V.11. Guillermo Haro (1913-1988). Trazó el camino para el desarrollo de la astronomía en nuestro país. Realizó contribuciones muy importantes al estudio de las nebulosas planetarias y sobre otros temas.



V.12. Solamente presentamos algunos de los astrónomos en México que han realizado investigación en nebulosas planetarias. En el orden acostumbrado: Yolanda Gómez, Silvia Torres, Miriam Peña, Manuel Peimbert, Luis Felipe Rodríguez, José Alberto López, Antonio Peimbert y Christophe Morisset.



Nebulosa de la Hélice, o NGC 7293, en luz infrarroja donde se pueden apreciar los detalles de los nudos fríos.
Fotografía: J. Hora y colaboradores, IPL-Caltech, NASA.



Nebulosa planetaria NGC 2440.
Fotografía: cortesía del Hubble Heritage Team (STScI/AURA).



Nebulosa planetaria IC 418 o del Espirógrafo.
Fotografía: NASA/ESA y Hubble Heritage Team.

convección. En las zonas en que el calor se transporta por medio de la radiación, ésta se absorbe y se emite en todas las direcciones de la estrella. La radiación recorre distancias muy cortas, ya que es absorbida en las regiones vecinas. En este proceso de emisión y absorción hay un flujo neto de energía del centro hacia afuera. En otras capas de las estrellas el proceso anterior no se da abasto para transportar la energía, por lo que recurre a la convección para lograrlo. Esto significa que los gases del interior de las estrellas se revuelven en algunas de sus capas.

En el interior del Sol ocurren los dos procesos. En la zona más interna se transporta la energía por radiación y en sus capas externas se produce convección. Cuando la luz llega a la superficie puede salir libremente y llegar hasta la Tierra, a los demás planetas y a los confines del universo (figura 14.2).

Las reacciones termonucleares

El Sol produce luz y calor. Durante mucho tiempo, las personas se preguntaron a qué se debía su energía. Algunos pensaron que podría estar quemando carbón, pero se dieron cuenta de que éste no alcanzaría, dada la edad de la Tierra, puesto que ya sabían que existían restos fósiles de dinosaurios y supusieron que el Sol habría existido ese mismo tiempo.

Cuando Albert Einstein descubrió que la materia se podría transformar en energía, y propuso su ecuación: $E = mc^2$, de inmediato los astrónomos —en particular Arthur Eddington— advirtieron que la transformación de materia en energía era la fuente de luminosidad del Sol y del resto de las estrellas. La ecuación de Einstein significa eso, que se puede obtener energía a partir de la materia. Hans Bethe fue el científico que describió la teoría explicando la generación de energía nuclear en el Sol.

La fusión nuclear

El motivo por el cual se transforma el hidrógeno en helio, y el helio en carbono y oxígeno, es debido a la fusión nuclear. Fusión significa unión.

Si la temperatura es suficientemente alta, como ocurre en el centro de las estrellas, los átomos se golpean continuamente entre sí, de manera que logran acercarse lo suficientemente unos a otros para que intervenga la fuerza nuclear. Como ya se ha dicho, cuatro átomos de hidrógeno se alcanzan a unir y forman un átomo de helio, liberando gran cantidad de energía.

Análogamente, a mayores temperaturas tres átomos de helio se fusionan en un átomo de carbono, y éste a su vez puede fusionarse con otro átomo de helio para transformarse en oxígeno. Esto se logra ya que cada átomo de helio tiene cuatro partículas en el núcleo (dos protones y dos neutrones); al unir tres de ellos se obtiene un núcleo con 12 partículas, es decir, carbono. Si se le une otro helio se obtiene un núcleo con 16 partículas, que es el oxígeno. Este, a su vez, puede formar elementos cada vez más pesados, como el neón, magnesio, silicio, etc., hasta llegar al hierro (de peso atómico 20, 24, 28, 32... y 56, respectivamente).

El tipo de fusión que logran las diferentes estrellas depende de las temperaturas que alcancen en su interior, pues para producir elementos más pesados se requieren mayores temperaturas.

Elementos como el nitrógeno provienen de la fusión del carbón con hidrógeno cuando se alcanza a mezclar material del interior con material de las capas exteriores que todavía contienen hidrógeno. Otros elementos se forman por captura de neutrones; esto puede ocurrir en condiciones muy especiales en la superficie de algunas estrellas (captura lenta), o por captura rápida durante la explosión misma de las supernovas. Mediante la captura de neutrones se forman los elementos de mayor peso atómico que 56 (hierro).

En el interior de nuestra estrella se están transformando cada segundo 300 millones de toneladas del gas hidrógeno en helio. Si pusiéramos en un lado de una balanza el hidrógeno que se consumió y en el otro el helio recién producido, éste pe-

saría menos; la diferencia de materia es transformada en energía, que se manifiesta como radiación. Lo que significa que la masa del Sol disminuye en dos toneladas cada segundo.

Estas transformaciones se conocen como reacciones termonucleares y ocurren en el interior de las estrellas, donde la temperatura es de varios millones de grados.

Dentro del Sol hay diferentes secciones. En la parte central es donde se llevan a cabo las reacciones termonucleares. Del centro hacia afuera la temperatura va disminuyendo; en el centro es de 15 millones de grados y en la superficie es de apenas 5000 °C.

En gran parte del interior del Sol los fotones, producidos en el núcleo, viajan a través de los gases incandescentes transportando la energía que se genera en la región más central. Los fotones tardan casi un millón de años en salir del Sol, aunque cada uno viaja a la velocidad de la luz, 300 000 kilómetros por segundo. La razón de lo lento de su viaje al exterior es que la materia del Sol continuamente los absorbe y los vuelve a emitir; al hacerlo los cambia de dirección. Es como si los fotones estuvieran rebotando entre las partículas del interior del Sol como pelotas en un juego de ping-pong.

Las capas externas del Sol son muy opacas; en ellas se produce la convección. Estas capas asemejan un inmenso caldero.

Los fotones que escapan de la superficie del Sol viajan libremente por el espacio en todas direcciones. Los que llegan del Sol a la Tierra tardan ocho minutos en llegar.

La superficie del Sol

Lo más llamativo de la superficie del Sol son las manchas oscuras que presenta. Las manchas se ven como huecos negros con un borde menos oscuro; en su parte central la temperatura es de 4000 °C; es decir, 1000 grados más frías que el resto de la

superficie de nuestra estrella. Las manchas nos han ayudado a medir la velocidad con que gira el Sol; las del Ecuador tardan 30 días en dar una vuelta, mientras que hacia los polos el Sol gira más despacio.

El Sol se comporta como un inmenso imán. Así como la Tierra atrae a los imanes de las brújulas porque a su vez es como si tuviera un imán de barra en su centro, el Sol también se comporta como un imán, pero de manera más complicada, porque es como si el imán del Sol estuviera hecho de un manojo de ligas (figura 1v.3).

Resulta que el Sol no gira igual en todas sus partes, puesto que no es un mundo sólido sino gaseoso; además de girar más rápidamente en el Ecuador que en los polos, también en el interior gira a velocidades distintas. Así que el imán hecho como de ligas en el interior del Sol se estira y se enrolla. Cuando el extremo de una de estas ligas imaginarias brota en la superficie del Sol forma una protuberancia brillante; por donde emerge se forman manchas.

Cada 11 años sucede algo sorprendente: las ligas se estiran tanto que se rompen y se vuelven a acomodar en un manojo semejante a una barra imantada, pero con polaridad opuesta. De allí en adelante se vuelve a estirar y enrollar en otro ciclo de 11 años. Es decir, se alternan las posiciones de los polos norte y sur magnético solares.

La superficie del Sol es como la de un caldero visto por arriba, puesto que la última capa del Sol está en proceso de ebullición. Vemos burbujas de gas subir y bajar continuamente transportando el calor del interior del Sol. Cada burbuja es enorme, pues miden 1000 kilómetros; esto es, el equivalente a la distancia entre el Distrito Federal y Monterrey.

En las zonas superiores de la atmósfera solar se ven explosiones que semejan rayos incandescentes que recorren la superficie en pocos minutos. Más allá de la superficie del Sol está la Corona; esta zona es muy extendida y resulta espectacular a

simple vista durante los eclipses de Sol. En comparación con el disco solar, su brillo es muy tenue, y por eso no la podemos ver todos los días.

Como vimos antes, el Sol es una esfera de gas incandescente. Esta esfera está en proceso de evaporación; es decir, arroja partículas al espacio. Estas partículas son átomos de las sustancias hidrógeno y helio principalmente. Se mueven a un millón de kilómetros por hora (280 kilómetros por segundo). En realidad, todas las estrellas arrojan partículas; este proceso se conoce como viento estelar; en el caso del Sol se le llama viento solar.

Cuando las partículas del viento solar llegan a la Tierra, nuestro campo magnético las atrapa y las desvía; en ciertas condiciones caen sobre la atmósfera superior produciendo unas iluminaciones magníficas que se pueden ver en las latitudes cercanas a los polos. A estos fenómenos se les denomina *auroras*. Sobre la superficie de la Tierra las auroras se ven como cortinas transparentes de colores intensos que ondulan en el cielo. Se llama *aurora boreal* o *austral* dependiendo si ocurren en el hemisferio norte o sur, respectivamente. Las auroras se han fotografiado desde el espacio, donde se aprecia que se iluminan regiones muy extendidas como anillos alrededor de los polos. El Sol también produce auroras en otros mundos, como en Júpiter o Saturno.

LA FORMACIÓN DE LAS ESTRELLAS

En las inmensidades del espacio entre las estrellas hay grandes cantidades de gas y polvo; a las concentraciones de mayor densidad se les conoce como nubes interestelares. Dentro de las nubes más densas se forman las estrellas. Un bello ejemplo es la nebulosa de Orión.

Si entre las estrellas recién formadas se encuentran algunas de gran masa, éstas iluminan el gas circundante y lo hacen brillar. Si tuviéramos ojos capaces de observar ondas de radio,

notaríamos que la nebulosa de Orión es tan sólo parte de una nube de gas y polvo mucho mayor, dentro de la cual hay múltiples brotes de formación estelar.

Todas las estrellas nacen dentro de nubes de gas y polvo. Cuando la fuerza de gravedad domina la nube, ésta se contrae y, al hacerlo, se calienta; también debido a la rotación se aplanan. En la región central se forma una estrella, o varias, y en la parte exterior y aplanada de la nube se forman los planetas, satélites, anillos, asteroides y cometas.

La razón por la que una nube se calienta cuando se contrae es simple. Imagina que amarras una piedra a un hilo y la dejas caer dejando que el hilo corra entre tus dedos. Notarás que éstos se calientan. De manera equivalente, cuando una nube de gas y de polvo se contrae para dar origen a una estrella, ésta se calienta. Llega un momento en que el centro de la nube llega a tan alta temperatura y densidad que se producen reacciones termonucleares y nace una estrella.

No podemos observar directamente el nacimiento de una estrella con luz visible porque en el momento en que ésta se enciende se halla rodeada de materia que continúa contrayéndose sobre el núcleo caliente. Además, la estrella recién formada se encuentra sumergida en los restos de la nube que le dio origen. La energía producida en el interior de la estrella tarda miles de años en llegar a la superficie. Es más, cuando logra emerger produce tanto calor que evapora el gas más cercano y lo aleja de sí; en otras palabras, en lugar de ver la contracción de la nube observamos sus gases en expansión.

En muchas ocasiones las estrellas nacen en grupos; los más frecuentes son los pares de estrellas. Las estrellas dobles, o binarias, son muy útiles en astronomía, pues a partir de sus movimientos podemos determinar sus masas. En los casos en que los movimientos de las estrellas dobles estén orientados de tal suerte que se eclipsen por el paso de una delante de otra, se puede determinar su diámetro midiendo la duración del evento (figura 14.4).

Si los pares de estrellas están muy cercanos puede llegar a transferirse materia de una de ellas a la otra, modificando a la que recibe el material. Puesto que la duración de la vida de una estrella depende de la cantidad de materia que posee, si alguna absorbe materia de una compañera sus propiedades cambian y su tiempo de vida se acortará.

El grupo de estrellas llamadas Pléyades está conformado por astros muy jóvenes; se formaron hace apenas 75 a 100 millones de años. Todavía se puede observar gas y polvo cerca de ellas, ya que este último refleja la luz de las estrellas cercanas. En el caso de la nebulosa de Orión las estrellas más brillantes son aún más jóvenes, pues tienen apenas 100 000 años de haberse formado. Esta agrupación está rodeada de la nube que le dio origen. El gas de la nube se ilumina por la luz de las estrellas calientes y brilla en forma espectacular.

LAS ESTRELLAS ROJAS

Las estrellas de menor masa son las más numerosas y son rojas. No sólo porque se forman con mayor frecuencia sino porque viven mucho más que el resto. El motivo es que por ser más frías en su exterior, son mucho menos brillantes. Adicionalmente, sus reacciones termonucleares son de menor intensidad. Esto se debe a que en su núcleo la temperatura es más baja que en las estrellas como el Sol y por consiguiente son menos eficientes las colisiones de alta velocidad, que son necesarias para que se lleve a cabo la fusión de átomos como el hidrógeno o el helio. Como te dicta la experiencia en la vida diaria, aunque haya átomos en todos los cuerpos, éstos normalmente no se fusionan porque no colisionan entre sí en condiciones de altísimas temperaturas.

Las estrellas de menor masa que el Sol son más pequeñas que éste y tienen menor temperatura en su superficie, por lo que son rojas. Dependiendo de su masa, pueden vivir cientos de

veces más que el Sol. El tamaño de una estrella de 10% de la masa del Sol es apenas de 11% del tamaño de éste, aunque su brillo es 1000 veces más débil durante su fase de secuencia principal. Su temperatura en el centro apenas alcanzaría los cinco millones de grados. Al terminar su evolución; es decir, cuando se les agota el combustible nuclear, se enfrían muy lentamente hasta convertirse en estrellas enanas cada vez más débiles.

Todos los elementos químicos nuevos que se fabricaron en el núcleo permanecen allí, pues estas estrellas enanas rojas no han tenido tiempo de terminar su evolución en toda la edad de la galaxia, ni se disgregan al concluir su evolución. Por lo tanto, no participan en el reciclamiento del material interestelar. Es decir, las estrellas más pequeñas no modifican el material externo.

El límite para que un astro pueda transformar el hidrógeno en helio es aquel cuya masa es de 8% de la masa del Sol. Por lo tanto, condensaciones menores de gas producen mundos como Júpiter y Saturno.

Las estrellas de masa menor que 8% de la masa del Sol deberán su brillo a la pérdida de energía gravitacional debido a la contracción, pero no debido a energía nuclear en su interior. Como son objetos de muy poco brillo y de temperatura superficial muy baja, de apenas 2000 grados, se les denomina *enanas café*.

No está bien definida la transición entre una estrella enana roja y una enana café, que son objetos mayores que Júpiter en los que no ocurren reacciones termonucleares pero que radian energía proveniente de su contracción.

LAS ESTRELLAS AZULES

Las estrellas de mayor masa son más brillantes y resultan ser azules, pero son las menos comunes. Así como hay miles de estrellas enanas rojas por cada objeto como el Sol, existen miles de astros como el nuestro por cada estrella azul. Este tipo

de estrellas es más difícil de formar porque requiere cantidades considerables de materia que al contraerse se calienta y tiende a dispersarse.

Además, las estrellas azules son voraces. Consumen su combustible nuclear mucho más rápidamente que el Sol. Adicionalmente, sus temperaturas en el núcleo son muy altas, lo que favorece las colisiones del material nuclear para formar nuevos elementos y por supuesto transformar parte de la materia en energía.

Las estrellas azules sólo viven unos cuantos millones de años. Por lo tanto, no se piensa que en sus posibles planetas se pudiera desarrollar vida inteligente, pues para ello, al menos en la Tierra, se requirieron miles de millones de años.

Cuando estas estrellas agotan el hidrógeno en el núcleo, se calientan más y empiezan a consumir el helio para transformarlo en carbón, y posteriormente el carbón para transformarlo en elementos más pesados, produciendo oxígeno, nitrógeno, neón, magnesio y silicio. Estas transformaciones en el interior las llevan a convertirse en estrellas gigantes. Cuando las estrellas 10 veces mayores que la masa del Sol ya no disponen de material que puedan fusionar en el núcleo, se colapsan; es decir, implotan hacia el núcleo. Después ocurre un rebote, en lo que llamamos explosión de supernova.

Puedes simular la implosión si colocas dos pelotas distintas, una encima de la otra, y las sostienes con las dos manos. Hévalas sobre el piso y suéltalas al mismo tiempo. Funciona mejor si colocas la más pesada debajo y la más ligera arriba. Notarás que la que pusiste arriba sale volando mientras la otra permanece cerca del suelo.

Cuando explota una estrella de gran masa, el núcleo de la estrella se contrae, mientras que las capas superiores son lanzadas a velocidades de miles de kilómetros cada segundo. Este evento se conoce como explosión de una supernova.

Durante la explosión, los gases arrojados viajan a velocidad

des tan elevadas que continúan las transformaciones nucleares, pues los núcleos de los átomos existentes capturan neutrones de tal suerte que se crean los elementos más pesados como el plomo o el uranio. Es decir, los elementos más pesados que el hierro en la tabla periódica, los de número atómico mayor, se generan durante las explosiones estelares. Estos elementos son los menos abundantes del cosmos.

LA MASA DETERMINA LA VIDA DE LAS ESTRELLAS

En resumen, la masa con la que se forman las estrellas determina su duración. En general, los cuerpos de menos de 1% de la masa del Sol no alcanzarán suficiente temperatura para tener reacciones nucleares en su interior, y serán como Júpiter. Las estrellas que tengan entre 1 y 8% de la masa del Sol, tendrán una evolución muy lenta y lograrán realizar reacciones termónucleares incompletas, pues no podrán transformar el hidrógeno en helio, pero sí podrán consumir el deuterio con el que se formaron; éstas son las enanas café. Las estrellas que se formaron con masas entre 8 y 60% de la masa del Sol, podrán transformar plenamente el hidrógeno en helio, pero este material no escapará de su superficie. Los astros que tengan entre 60% y ocho veces la masa del Sol, tendrán un comportamiento semejante al del Sol. Mientras que los objetos de más de ocho veces la masa del Sol, tendrán una evolución muy rápida, dando lugar a supernovas con residuos que pueden ser estrellas de neutrones u hoyos negros. Se piensa que son las estrellas de más de 40 masas solares las que dan lugar a un hoyo negro (figura IV.5).

Estos resultados se refieren a la evolución de las estrellas aisladas. El problema se complica en el caso de las estrellas dobles, que intercambian masa, pues la evolución de la estrella que recibe el material se ve muy afectada, dependiendo de la fase en la que se encuentre y la cantidad de material que reci-

ba. Como la combinación posible de pares de estrellas es muy variada, el estudio de la evolución de las estrellas dobles es mucho más complejo.

LAS ESTRELLAS RECICLAN EL GAS

Cuando se formó el universo, hace 13 700 millones de años, sólo se crearon dos tipos de átomos: el hidrógeno y el helio. Las primeras estrellas se conformaron a partir de la contracción de las nubes de gas que contenían exclusivamente esos elementos tan simples. Ello significa que las generaciones estelares iniciales estaban formadas únicamente por hidrógeno y helio, y que fue durante su evolución que crearon los demás elementos. Cuando estas primeras estrellas concluyeron su evolución, arrojaron materia al espacio, parte de ella enriquecida con los elementos químicos nuevos que ellas mismas sintetizaron, como el carbono y el oxígeno.

Las estrellas medianas, similares al Sol, consumen hidrógeno dentro de sus núcleos para producir helio; posteriormente transforman este último en carbono, nitrógeno y oxígeno. Estas sustancias se mezclan con el material original en las capas de convección. Al concluir su existencia, se inflan y arrojan su atmósfera extendida al espacio (figura IV.6).

Las estrellas que explotan como supernovas no sólo enriquecen el medio interestelar con las sustancias antes mencionadas, sino que dentro de sus núcleos producen átomos como magnesio y hierro, y por si fuera poco, al estallar, el resto de las sustancias, desde plomo hasta uranio.

Toda la materia expulsada por las generaciones estelares viaja por el espacio mezclándose con otras nubes que a la larga dan origen a nuevas estrellas con sus respectivos planetas. Conforme se suceden las generaciones estelares aumenta cada vez más la concentración de elementos como el oxígeno y el azufre en el medio interestelar.

De hecho, una manera de determinar la edad de un astro consiste en medir su cantidad de oxígeno: cuanto menor sea, el cuerpo se habrá formado en épocas más remotas.

No es de extrañar que la vida esté formada principalmente por hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, pues son éstas justamente las sustancias más abundantes en el cosmos. Si dentro de una nube de materia interestelar que ha sido enriquecida con sustancias provenientes de la muerte de otras estrellas se forman planetas, alguno de éstos podrán tener condiciones óptimas de temperatura y humedad como para que se agreguen los átomos en moléculas cada vez de mayor tamaño, hasta generar expresiones tan complejas como la vida.

Dentro de 6300 millones de años, el Sol se convertirá en una estrella gigante roja, y 1460 millones de años más tarde, en nebulosa planetaria. No sólo todo lo que lo forma, sino lo que contiene la Tierra, será gasificado y expulsado al medio interplanetario, donde servirá de sustancia para formar nuevos mundos.

Conforme se suceden las generaciones estelares hay cada vez menos nubes de gas y de polvo disponibles para formar nuevas estrellas. Como hemos mencionado, las hay entre ellas que no arrojan materia al espacio al concluir su evolución: son las más pequeñas, que simplemente se enfrían. La materia que constituye los núcleos de las antiguas estrellas masivas, y que está atrapada en núcleos compactos, tampoco enriquece la materia interestelar con nuevos elementos. Así, en las diferentes galaxias hay tasas distintas de formación estelar, desde sitios donde ha cesado el nacimiento de estrellas hasta lugares donde en este momento están condensándose miles de estrellas.

Las supernovas son las que enriquecen el medio interestelar con todos los elementos químicos distintos del hidrógeno. Las estrellas más masivas explotan al final de sus vidas y como resultado producen los elementos químicos más pesados que el hierro. Pero también las nebulosas planetarias contribuyen

al proceso de enriquecer el medio interestelar, aunque lo hacen solamente con helio, carbono y nitrógeno fresco. La contribución de cada una de estas últimas es muy modesta; sin embargo, son mucho más numerosas que las supernovas, por lo que su efecto neto es importante. Durante toda la historia de la galaxia ha habido un entramado de formación y destrucción de estrellas, cada una de ellas a su propio ritmo, ya que los tiempos de vida son muy distintos para las estrellas de mucha masa, que para las estrellas de poca masa. Cada una de las estrellas que se destruye contribuye a modificar un poco el medio interestelar; así, la siguiente generación de estrellas se forma de un material ligeramente diferente del anterior. Se requieren varias generaciones de estrellas para enriquecer el medio interestelar a fin de que se puedan formar sistemas solares como el nuestro, donde la abundancia de elementos como el oxígeno y el carbono es considerable.

Por medio del estudio de las nebulosas planetarias y otras nubes gaseosas se ha descubierto que en las regiones centrales de la galaxia hay una abundancia mayor de elementos como el oxígeno, hierro y otros elementos distintos del hidrógeno que en las partes externas. Esto se debe a que la tasa de formación estelar es mayor en el centro que en la orilla, debido a que la cantidad de materia disponible para la creación de estrellas es mayor.

SOMOS POLVO DE ESTRELLAS

Si reflexionamos un momento, nos damos cuenta de que nosotros mismos estamos constituidos de una gran variedad de elementos químicos. La base de nuestro cuerpo son el oxígeno, carbono, hidrógeno y nitrógeno. Además tenemos, aunque en menor proporción, calcio, fósforo, potasio, azufre, sodio, cloro, magnesio, yodo y hierro. Adicionalmente, requerimos para vivir cromo, cobalto, cobre, flúor, manganeso, molibdeno, sele-

nio, estaño, vanadio y zinc; estos últimos en pequeñísimas cantidades. Bueno, pues recordemos que hemos dicho que el hidrógeno y el helio se formaron desde los primeros momentos de la gran explosión, pero el resto de los elementos se originaron en el interior de las estrellas y fueron después lanzados al espacio y de ahí surgió el sistema solar, del que formamos parte. Es decir, gran parte de nuestro cuerpo estuvo en el interior de alguna estrella. ¡Somos polvo de estrellas!

V. Al fin, las nebulosas planetarias

Cada una de las bellísimas estructuras que llamamos nebulosas planetarias es el conjunto de una estrella muy caliente rodeada por una envoltura en expansión. Esta combinación se da al final de la vida de algunas estrellas como el Sol, y dura un tiempo breve. En otras palabras, es el antiguo núcleo de una estrella parecida al Sol rodeado de una nube de gas que se aleja lentamente.

El antiguo núcleo que ahora es una estrella muy compacta, casi una enana blanca, está en el centro de la nebulosa planetaria. Por tener una temperatura elevada en la superficie, emite radiación de alta energía, la cual es capturada por los átomos de la envoltura. Estos átomos se ionizan y excitan y, cuando regresan a su estado de menor energía, emiten radiación. Mientras la estrella central emita radiación de alta energía, los átomos de la envoltura continuarán capturándola; se repetirá el proceso y el gas que rodea a la estrella se verá brillante.

Nos hemos retrasado en describir las nebulosas planetarias pues creímos necesario presentar un conjunto de antecedentes sobre las observaciones y sobre las estrellas en general. Ahora ha llegado el momento de presentar las nebulosas planetarias en mucho mayor detalle. Describiremos cómo se llega a esta fase, y cómo termina la misma. También daremos detalles sobre las partes que la configuran: la estrella y la envoltura (figura v.1).

Describiremos primero las etapas por las que transita la estrella que va a dar lugar a este bello fenómeno.

Las etapas finales de estrellas como el Sol comienzan cuando se les agota el hidrógeno en el centro. El Sol, como hemos descrito, lleva 4 600 millones de años en prácticamente las mismas condiciones que las actuales. Se espera que dentro de 6 300 millones de años haya consumido todo el hidrógeno en el núcleo, lo que hará que éste se contraiga provocando que las capas externas se hinchen hasta convertirse en una estrella supergigante roja. Mientras consume su hidrógeno en el centro, se calientan las capas que rodean al núcleo. Cuando se agota el combustible central la estrella obtiene su energía del quemado de hidrógeno en un cascarón en torno al núcleo. La etapa de transformación hasta convertirse en supergigante roja dura 1 300 millones de años. Cuando el Sol sea una estrella supergigante roja tendrá un tamaño 170 veces mayor que el actual y un brillo 2 300 veces superior. La estrella supergigante alcanzará el tamaño de la órbita de Mercurio. Más adelante describiremos el futuro del sistema solar.

Llega un momento en que el núcleo de la supergigante se ha calentado tanto que se inicia la transformación del helio en elementos más pesados, produciéndose carbono; a su vez, parte del nuevo carbono se convierte en oxígeno al fusionarse con helio. El inicio de esta transformación marca otro cambio en el astro. Se detiene la expansión de la estrella, la cual se contrae a otra fase de quemado de combustible en el centro; mientras tanto es una estrella gigante amarilla de tamaño 10 veces el actual y de luminosidad 40 veces la del Sol. Esta etapa es breve; en realidad, la vida del Sol estará cerca del fin.

Para comprender el motivo por el cual las estrellas de una masa solar se inflan para convertirse en estrella supergigante roja puedes usar una secadora de pelo de dos velocidades y

un globo ligeramente inflado. Enciende la secadora en la presión baja, de tal manera que el aire salga hacia arriba, coloca el globo en la salida del chorro de aire; no muevas la secadora. El globo quedará suspendido. Ahora aumenta la presión del aire; notarás que el globo se eleva y permanece flotando. Cuando aumenta la presión de la secadora el globo se eleva, al vencer éste a la fuerza de gravedad. Igualmente, el Sol aumentará de tamaño, ya que su presión interna es mayor que la fuerza de gravedad.

PARA TERMINAR: UNA ESTRELLA PULSANTE

Al agotar el helio en el centro, 120 millones de años más tarde, el astro habrá de expandirse una vez más, llegará a alcanzar un tamaño 200 veces mayor y luminosidades hasta 5 000 veces más intensas que el Sol actual. Así, dentro de 7 800 millones de años el Sol será de mayor tamaño que la órbita de Mercurio y Venus.

Una vez que las estrellas han consumido su combustible en el centro, cuando han agotado tanto el hidrógeno como el helio, todavía les es posible realizar transformaciones nucleares. Aunque su núcleo, ahora de carbono y oxígeno, no alcanza la temperatura para reacciones nucleares, éstas continúan ocurriendo en cascarones alrededor del centro; en uno se transforma el helio y en otro, más externo, se transforma el hidrógeno. La etapa de fusión del helio en un cascarón ocurre de manera irregular y por consiguiente la estrella tiene pulsos. Es decir, aumenta y disminuye su tamaño.

Si te regresas al experimento de la secadora de pelo, recordarás que al aumentar la presión el globo sube y al disminuirla descende. El aumento y disminución de tamaño de una estrella que pulse se observa desde la Tierra como un aumento y una disminución de brillo, ya que aumenta y disminuye la can-

tividad de luz que emite. En general, a mayor temperatura superficial y a mayor tamaño corresponde una estrella más brillante.

Durante las etapas de supergigante, la estrella estará perdiendo masa en el espacio en forma de viento a un ritmo muy acelerado. La pérdida de masa será mayor durante la etapa de pulsos, cuando la variación es muy intensa. El material expulsado se aleja de la estrella y ya nunca regresa a formar parte de la misma.

ENVOLVENTES. EL MOMENTO CLAVE

Es de sorprender que una estrella común como el Sol se convierta en un núcleo estelar, despojado de sus capas superiores, rodeado de una majestuosa envoltura colorida.

Cuando una estrella semejante al Sol se convierte por segunda ocasión en supergigante roja, con un radio igual a 200 veces el radio del astro que le da origen, la atracción en la superficie disminuye 40 000 veces. Esto se debe a que la fuerza de gravedad disminuye como el cuadrado de la distancia. Si algo pesaba 40 000 gramos, o casi 40 kilos, en la superficie de la estrella solar, sólo pesará un gramo en la superficie de la supergigante.

Lo anterior significa que es más fácil que se evaporen las estrellas supergigantes rojas que las estrellas del tamaño del Sol, y por lo tanto sus vientos se hacen muy eficientes; tanto que despojan al núcleo de su envoltura.

Los astros se mantienen unidos por la fuerza de gravedad. Cuando alguna de sus partes supera cierta velocidad, se puede escapar. Para que una sonda espacial terrestre logre llegar al espacio exterior es necesario que sea lanzada a velocidades mayores de 40 300 kilómetros por hora (11.2 kilómetros por segundo); a esta velocidad se le conoce como *velocidad de escape*; lo mismo sucede con las partículas más calientes de nuestra atmósfera que alcanzan esta velocidad. Un ejemplo de lo que su-

cedería si la velocidad de escape fuera mucho menor sería la Luna, la cual no tiene atmósfera porque todos sus gases vencieron la velocidad de escape, que allá es mucho menor que en la Tierra, de tan sólo 8 600 kilómetros por hora (2.4 kilómetros por segundo).

LA COMBINACIÓN PERFECTA

Cuando las estrellas se despojan de su atmósfera arrojándola al espacio, hay una fase en la que las estrellas centrales están muy calientes y la nube de gas que lanzó la estrella está todavía próxima a ésta: es cuando se convierten en nebulosas planetarias. Esto es, al mismo tiempo que el antiguo núcleo de la estrella se convierte en un astro muy caliente, la envoltura en expansión todavía se encuentra cercana a la estrella. Como describiremos a continuación, esta etapa es breve, pues tanto la estrella central como la nube que la rodea se modifican en tiempos relativamente cortos. Dado que las estrellas como el Sol son tan numerosas, alcanzamos a ver una muestra considerable de nebulosas planetarias.

Aunque la estrella ya no produce reacciones termonucleares, su núcleo está muy caliente, por lo que todavía tiene mucha energía interna que la hace brillar. Después de la segunda ocasión en que se convierte en supergigante roja, se separa de su exterior, disminuye de tamaño y su radio se reduce de 100 veces el radio del Sol, hasta alcanzar el tamaño del radio de la Tierra. Durante esta transición la superficie se calienta hasta que de manera gradual alcanza una temperatura en su superficie superior a los 30 000 °C. En estas condiciones emite luz ultravioleta. Esta luz ioniza los gases de la envoltura cercana de manera que la hace brillar. Justamente, estos gases que formaron la antigua atmósfera de la estrella son la nebulosa planetaria. Estos extraordinarios objetos se ven con un telescopio pequeño como esmeraldas difusas en el cielo, y con imágenes

tomadas con telescopios mayores, como majestuosas nubes de colores brillantes.

Los componentes más notables de las nebulosas planetarias son la estrella central y la envolvente. ¡La combinación perfecta ocurre cuando el antiguo núcleo estelar convertido en estrella emite suficiente radiación para mantener brillante su envolvente! (figura v.2).

EXPANSIÓN DE LA ENVOLVENTE

Hemos puesto mucha atención a la estrella precursora de la nebulosa planetaria. Ahora es momento de ocuparnos de la envolvente. Ésta se separa de la estrella que la arrojó, desplazándose por el medio interestelar a una velocidad promedio de 80 000 kilómetros por hora (22 kilómetros por segundo). La velocidad se mide por medio del efecto Doppler de la luz.

En casi todos los casos, al descomponer la luz de las nebulosas planetarias mediante un prisma y formar su espectro, se puede apreciar que son dos los componentes de cada color particular en el que emite la nebulosa. Uno de esos componentes corresponde a la parte de la nebulosa que se aleja de nosotros y otra a la que se acerca. En realidad, ambas partes se ale-

El efecto Doppler

Recordemos que el efecto Doppler de la luz hace que ésta se observe más roja o más azul, dependiendo si la fuente se aleja o acerca al observador. La expresión que describe el efecto Doppler es $\Delta\lambda/\lambda = v/c$. En esta relación, v es la velocidad con la que la fuente se acerca o se aleja del observador; c es la velocidad de la luz; λ es la longitud de onda que se observa. Así, a mayor velocidad, v , corresponden mayores desplazamientos del color, $\Delta\lambda/\lambda$.

Puesto que c es muy grande, nosotros no observamos el efecto Doppler de la luz en nuestra experiencia cotidiana.

jan de la estrella central, pero una de ellas viene hacia nosotros y otra se aleja, por lo que se aprecia el movimiento de los gases que se acercan y los que se alejan de nosotros. En general se observan movimientos de expansión de 54 000 a 180 000 kilómetros por hora (15 a 50 kilómetros por segundo), aunque en algunas nebulosas planetarias se alcanzan a medir expansiones mayores de 360 000 kilómetros por hora (100 kilómetros por segundo) (figura v.3).

Otra manera de medir la velocidad de expansión de la nebulosa planetaria es tomar dos fotografías del objeto con varios años de separación. En la segunda imagen la nebulosa se verá más grande porque se ha expandido. En general es necesario esperar muchos años para lograr percibir este efecto, porque aunque la velocidad de expansión es altísima, los objetos se encuentran a enormes distancias. Solamente se ha medido la expansión de aquellas nebulosas que están relativamente cercanas y que se expanden a alta velocidad. Esta medición de la expansión lateral de las nebulosas se ha logrado con los telescopios ópticos y de radio, que tienen muy alta calidad de imagen.

Por cierto, como describiremos más adelante, este movimiento lateral acoplado al movimiento en la dirección del observador sirve para determinar la distancia a la que se encuentra el objeto.

Una vez que se separa de la estrella, la envolvente de la planetaria continúa expandiéndose hasta que eventualmente se diluye y se confunde totalmente con el medio que está entre las estrellas. Al mismo tiempo, la estrella se habrá enfriado y perderá brillo, por lo que no podrá mantener ionizado el gas que se aleja. La fase de nebulosa planetaria habrá terminado.

Otro dato de gran interés es el tamaño de las nebulosas. Como sucede frecuentemente en astronomía, nuestra determinación del tamaño de los objetos depende de la distancia a la que se encuentran. Y esta última cantidad es muy difícil e incierta de medir.

Mediante las fotografías se conoce el tamaño angular de las nebulosas; si además se conociera la distancia a la que se encuentra cada una, podrían aplicarse directamente las leyes de la trigonometría para determinar su tamaño. Por ejemplo, una de las nebulosas más cercanas es la de la Hélice y es de la que mejor se conoce su estructura. Por otros elementos sabemos que se encuentra a 210 pársecs (685 años luz) de distancia respecto del sistema solar; la región interna tiene un radio de 0.18 pársecs (0.57 años luz) y la externa de 0.61 pársecs (dos años luz). Es un hermoso objeto que semeja una gruesa rueda alrededor de la estrella central; la rueda está constituida por un conjunto de aproximadamente 20 000 nubes muy densas, que semejan cometas cuyas "cabezas" están dirigidas hacia el centro de la estructura y las "colas" de los mismos apuntan hacia afuera. Cada una de estas pequeñas estructuras alargadas tiene una extensión de 70 000 veces la distancia de la Tierra al Sol.

Los tamaños medidos de las nebulosas planetarias son diversos. Las más compactas y jóvenes que se conocen son de 30 millones de kilómetros (apenas 2 000 veces el radio de la órbita de la Tierra), y las de mayor extensión y más antiguas tienen hasta 10 billones de kilómetros (es decir, son 300 veces mayores).

Los tamaños que señalamos están determinados tanto por la naturaleza misma de los objetos como por nuestra capacidad para reconocerlos. En el caso de objetos muy jóvenes y pequeños, la estrella no ha alcanzado temperaturas suficientemente altas para hacer brillar el gas, por lo que no podemos reconocerlos a gran distancia. En el caso de objetos muy exten-

Ionización y excitación de los átomos

En la Tierra los átomos suelen estar neutros, y contienen igual número de protones y electrones. En cambio, en las estrellas y en las nebulosas planetarias están ionizados, lo que significa que los electrones se separan de los núcleos.

Cuando los electrones de las nebulosas se "recombinan" con los núcleos, se emite radiación electromagnética que nos permite verlos.

A su vez, los átomos pueden encontrarse en un estado de mínima energía (estado base), que es cuando los electrones están más cerca del núcleo, o con mayor energía (excitados) y que corresponden a los casos en los que los electrones están más alejados. Las transiciones entre estos estados requieren energía, para que el átomo se excite, o por lo contrario liberan ésta para llegar a un estado de menor excitación.

Cuando los electrones están desprendidos se dice que el átomo está ionizado, cuando los electrones están ligados, pero lejos del núcleo se les denomina átomos excitados.

didados, éstos se han transformado en objetos tan tenues y débiles que es muy difícil identificarlos como nebulosas brillantes. Sin embargo, ambos límites de tamaño se están superando, pues cada vez contamos con mejores medios para identificar las nebulosas planetarias.

Por su parte, la gran mayoría de las nebulosas planetarias que están en otras galaxias se ven apenas como puntos de luz, por estar tan alejadas de nosotros.

LAS NEBULOSAS PLANETARIAS BRILLAN

Los gases de la nebulosa brillan porque absorben la luz ultravioleta que emana de la estrella central. La luz ultravioleta ioniza sus átomos, arrancándoles sus electrones. Cuando éstos se recombinan con los átomos de la nebulosa, emiten luz.

Sin embargo, estos gases ionizados que se han desprendido de sus electrones al absorber radiación ultravioleta no permanecen ionizados, sino que capturan otro electrón, y para ello es necesario que pierdan energía, lo que logran emitiendo luz. Es decir, la envoltura de una nebulosa planetaria brilla porque emite radiación.

Los átomos de hidrógeno son los que dominan el estado de estas nebulosas. Este elemento requiere luz ultravioleta de alta energía para ionizarse. Cada uno de los elementos necesita diferente energía para lograrlo. Por ejemplo, los átomos de helio son los que requieren mayor energía; en cambio, los de otras sustancias como el oxígeno o el nitrógeno se pueden ionizar con radiación de la misma energía con la que se ioniza el hidrógeno.

Adicionalmente, debido a los movimientos de los átomos y de los electrones hay choques entre ellos, lo que produce que se exciten los átomos. Una vez excitados, estos átomos tienen la posibilidad de regresar a su estado base emitiendo luz también en colores muy específicos.

En la envoltura hay átomos que están ionizados y hay otros que están neutros aunque excitados. En realidad se trata de un proceso dinámico de intercambio continuo de energía. Por un lado, los gases absorben energía ultravioleta de las estrellas, por lo que se ionizan y excitan, pero a continuación capturan otros electrones que se les acercan y pierden energía emitiendo luz. El efecto neto es que la luz ultravioleta que emite la estrella se transforma en luz de otros colores que emanan de los gases de la nebulosa. Lo interesante de estos procesos es que la luz que emiten los gases de las nebulosas es en colores muy precisos y particulares. La luz verde característica de las nebulosas planetarias se debe al oxígeno, y la roja al hidrógeno y nitrógeno. Estas nebulosas también emiten radiación de otros colores que corresponden a diferentes elementos, como helio, azufre, argón y carbono.

El elemento más abundante en la naturaleza es el hidrógeno, y en las nebulosas planetarias las condiciones de este elemento son las que determinan el estado del resto de los gases. Cuando la envoltura absorbe la radiación ultravioleta, se ioniza el hidrógeno, que al recombinarse produce energía en longitudes de onda particulares. De hecho, a cada elemento corresponde una colección de luces de longitudes de onda específicas, como si fueran las huellas digitales de los elementos. Por los estudios realizados en laboratorios terrestres conocemos las huellas de los distintos elementos químicos, lo que permite identificar cada uno de ellos. El hidrógeno produce luces de distintos colores, como el violeta, el aguamarina y el rojo. La luz roja es la más brillante, y por lo tanto es la que podemos fotografiar mejor con las cámaras electrónicas que se instalan en los telescopios. El oxígeno doblemente ionizado emite luz verde, característica de las nebulosas planetarias; generalmente esta luz la producen los gases cercanos a la estrella central. En esa misma zona se encuentra el helio ionizado; éste produce luz de varios colores, y la más intensa es amarilla. Tanto las luces del oxígeno como las del helio se localizan cerca de la estrella porque corresponden al gas de helio ionizado y al de oxígeno doblemente ionizado, que requieren luz ultravioleta de mucha energía. Esta luz la capturan cerca de la estrella, mientras que en lugares más externos no hay energía disponible para mantenerlos en ese estado, ya que fue capturada en las regiones interiores.

En general, los gases que requieren más energía se encuentran más concentrados en el centro, y los que requieren menos energía se encuentran en la periferia. También sabemos que en las partes externas, donde no alcanza a llegar la luz ultravioleta, se encuentra el gas más frío, por lo que está neutro y también en forma de moléculas. Todos estos datos se obtienen de fotografías en los diversos colores que dejan pasar la luz característica de las diferentes transiciones de los distintos elementos.

Los astrónomos emplean filtros de varios colores para destacar la emisión de los distintos elementos, así como para resaltar las múltiples envolventes (figura v.4).

LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES

Como hemos dicho, en el interior de las estrellas que van a dar lugar a nebulosas planetarias se ha formado nuevo helio, nitrógeno, carbono y oxígeno que no existía anteriormente. Gran parte de este material permanecerá en las capas centrales y no escapará, sino que pasará a formar parte de la pequeña estrella que se convertirá en enana blanca.

Es interesante notar que las capas externas de las estrellas no participaron de la combustión nuclear, por lo que mantienen la misma composición química de la nube que les dio origen. La atmósfera que se pierde y forma la nebulosa planetaria está formada de gases que prácticamente no se modificaron desde que se formó la estrella inicialmente. Apenas una pequeña fracción de los nuevos elementos recientemente creados logra escapar al espacio interestelar. Por esta razón ha resultado de gran interés establecer la composición química del gas de las nebulosas planetarias, pues son muy brillantes y la determinación es relativamente directa y confiable. En principio podemos decir que los gases de las nebulosas guardan la memoria de los gases de los que se formó la estrella que les dio origen.

Esto es una simplificación del problema porque, como hemos explicado, en realidad las nebulosas llegan a mostrar modificaciones ligeras sobre lo que creemos que es el material original. Estas modificaciones se manifiestan en diferencias en la proporción de helio, nitrógeno y carbono. Ello es posible porque durante las etapas tardías de la supergigante roja, el último medio millón de años, cuando la estrella produce elementos como el carbono y el nitrógeno se establece un mecanismo que

extrae elementos del núcleo y los conduce a la superficie, donde el material más externo es expulsado en forma de viento. Al cabo de 100.000 años, la estrella ya perdió todo el material posible, ya que a pesar de la enorme temperatura de sus gases, la gravedad del antiguo núcleo estelar impide que se continúe evaporando la estrella.

En otras palabras, si medimos la composición química del medio interestelar y la comparamos con la del Sol, podemos estimar si el material del que se formó la estrella original estuvo sujeto a más o menos pasos por el interior de varias generaciones de estrellas. Si tiene mayor proporción de elementos químicos como el oxígeno, azufre y argón, es que el gas de la estrella madre se formó después de las que tienen menor cantidad de estos elementos, pues le antecedió un número menor de generaciones estelares. Éste es uno de los datos que poseen los astrónomos para reconstruir la evolución química del universo.

En muchos casos resulta más fácil observar la nebulosa brillante y espectacular que la estrella central, por ser más débil. Por lo tanto, a partir de la envolvente de una nebulosa planetaria se puede estimar el tipo de radiación que emite la estrella central, ya que, como hemos explicado, gran parte de ésta es atrapada por la envolvente y reemitida, produciendo los hermosos colores que la caracterizan. A partir de la luz de los distintos elementos podemos determinar la proporción de cada uno en el gas que lo emite. Así determinamos la composición química de los gases que forman la nebulosa planetaria.

Las observaciones se complementan con modelos numéricos de la estructura de ionización de las planetarias. A partir de los elementos que conoce, el investigador propone cómo piensa que es la estrella central y la nebulosa, y mediante modelos numéricos calcula cómo sería la emisión de la envolvente. Compara sus resultados con las observaciones y ajusta los datos de las propiedades de la estrella y de la nebulosa hasta que los cálculos de la computadora coinciden con las observa-

Modelos numéricos

En muchas áreas del conocimiento se aplican los llamados modelos numéricos para resolver un conjunto de ecuaciones sin solución algebraica directa mediante el cálculo de datos en cada punto. Esto es posible gracias al extraordinario crecimiento de computadoras cada vez más veloces y que permiten resolver mayor número de ecuaciones de gran complejidad.

ciones de las luces de la envolvente y el resto de las características que se observan. Así, el investigador no sólo conoce las propiedades del gas brillante que rodea a la estrella, sino que también encuentra otras características como pueden ser las propiedades de la estrella, ya que se requiere que ésta tenga la temperatura capaz de producir suficiente energía para explicar la emisión de la envolvente. De esta manera se obtiene información detallada sobre la emisión de la estrella central y del comportamiento de los gases que la rodean; su temperatura, densidad y composición química. Por supuesto que la veracidad de los resultados depende de las hipótesis que se proponen. Si el modelo matemático es incorrecto (es decir, si las ecuaciones no son las apropiadas), los resultados también lo serán.

FORMAS EXTRAORDINARIAS

Aunque se reconoce que las formas de las nebulosas son muy variadas, los astrónomos han tratado de clasificarlas por su apariencia, en sus intentos de entender los mecanismos que originan las nebulosas planetarias.

No es fácil agruparlas en unas cuantas clases, por lo que diferentes astrónomos han propuesto distintas clasificaciones, con la complicación de que conforme se obtienen más imágenes se descubren más detalles interesantes. En primera instan-

cia se describen las formas globales. Podemos señalar que las distintas estructuras se encuentran tanto en nebulosas planetarias muy jóvenes como muy antiguas, por lo que se cree que sus rasgos permanecen durante miles de años. De manera relativamente simple se pueden agrupar en esféricas, elipsoidales, bipolares y multipolares; las describiremos a continuación. Es necesario hacer notar que además de las configuraciones generales se presentan detalles adicionales. Por ejemplo, existen objetos que presentan nubosidades en lados opuestos de la estrella central, a los que se denomina con simetría de punto. También se ha encontrado que las capas de la nebulosa planetaria pueden ser múltiples, y en diversos casos, que distintas partes de la nebulosa corresponden a diferente clasificación. Pero lo más interesante no es clasificarlas sino entender los mecanismos que han dado origen a las distintas formas (figura v.5).

Formas esféricas

Empezaremos por los objetos redondos. Algunos de ellos se ven como cuerpos completos y llenos, pero otros se observan huecos y brillantes solamente en los bordes, como anillos. Treinta y seis por ciento de las nebulosas planetarias tienen formas esféricas donde se notan varios anillos concéntricos del material eyectado. En general se trata de estructuras esféricas, pero nosotros las vemos como anillos por un efecto de proyección. Si observamos pompas de jabón notaremos que se ven como círculos con algunos brillos. El efecto es más notable si observamos sus sombras; vemos más sombreados los bordes, como círculos de sombra, en lugar de ver igualmente sombreado todo el círculo.

Estas formas se explican si la estrella lanzó un conjunto de material al mismo tiempo y en todas direcciones; éste conservaría esa forma como si fuera precisamente una pompa de jabón (figura v.6).

Formas elípticas

Treinta y dos por ciento de los objetos presentan configuraciones ovaladas. Estas figuras representan un cambio leve sobre las anteriores, pues en realidad se trata de estructuras simples relativamente alargadas. Posiblemente las estrellas que les dieron origen tuvieron una ligera asimetría por los polos, por lo que lanzaron el material a mayor velocidad en algunas direcciones (figura v.7).

Formas bipolares

Es el nombre que reciben las configuraciones alargadas en dos direcciones opuestas. Ocurren en 32% de los casos. Algunas nebulosas planetarias tienen una forma relativamente cilíndrica, mientras que otras aparecen con la cintura muy marcada; a las primeras se les denomina de *mariposa* y a las segundas de *reloj de arena*. Hay algunas nebulosas bipolares que son muy anchas y otras que son muy alargadas (figura v.8).

Las formas bipolares son más difíciles de explicar, y de hecho hay mucha discusión en cuanto a la naturaleza del fenómeno que les da origen, pues son varios los procesos que se pueden imaginar para haber formado estos objetos. Dada la frecuencia con que se presentan formas bipolares en gran variedad de astros, se ha dedicado esfuerzo a tratar de entender la causa de estas formas. Mencionaremos aquí diversas posibles explicaciones y a continuación describiremos algunas con más detalle. En general se considera que esta configuración bipolar es el resultado de al menos dos fases distintas de pérdida de masa. En un caso se trata de una estrella en rotación, y en otro se trata de una estrella doble.

A menudo se descubre que en la parte central hay un astro rodeado de material denso y frío, en forma de cinturón, que se observa por medio de las moléculas del gas que ahí se encuen-

tran. Así, aunque la estrella central arroje gases en todas direcciones, este cinturón limita la expansión de ese material por el ecuador y sólo permite el movimiento por los polos. La presencia de cinturones o "donas" se interpreta como el resultado de una primera fase de pérdida de masa, que ocurrió por el ecuador. En las fases posteriores, la materia arrojada sólo puede salir por los agujeros de la dona, ya que en las direcciones ecuatoriales la dona se lo impide.

Las estructuras en forma de dona pueden tener orígenes variados. Uno proviene de la alta rotación estelar. Cuando las estrellas supergigantes lanzan material al espacio suele ser en todas direcciones; sin embargo, adquiere una forma aplanada porque las estrellas giran. Imagina una bailarina de falda amplia; cuando da vueltas, su falda se levanta y se aplanan. Similarmente, cuando la estrella está en su máxima extensión, los gases en el ecuador pueden escapar muy fácilmente debido al giro de la estrella. Una vez separados de la estrella, ésta se encuentra rodeada de un cinturón de materia eyectada que se encuentra en el mismo plano que el ecuador de la estrella. En el lanzamiento posterior de material por parte de la estrella, los gases que salen por el ecuador se encuentran con un obstáculo, mientras que los que salen en las otras direcciones pueden viajar libremente. En el caso de las estrellas con alta velocidad de rotación, éste sería el mecanismo para formar nebulosas bipolares. Hay indicaciones adicionales que hacen pensar que son las estrellas de mayor masa las que dan lugar preferentemente a nebulosas bipolares.

Sin embargo, algunas de las nebulosas planetarias tienen formas tan alargadas que no es posible explicarlas de esta manera. Se ha propuesto la posibilidad de que la estrella, a semejanza del Sol, tenga campos magnéticos. Estos campos, asociados a la rotación de la estrella, podrían favorecer que una vez desprendida la estrella de su cinturón ecuatorial, la pérdida de material de la estrella se canalice por las regiones polares. Da-

rían lugar a estructuras muy extendidas en las direcciones del polo y muy reducidas en las direcciones del ecuador. Sólo en unos cuantos casos se ha logrado medir la presencia de campos magnéticos, en las donas y en las estrellas centrales de nebulosas planetarias. Es de suponerse que su presencia influye en las estructuras de las envolventes. Como hemos explicado, los átomos están ionizados; en este caso, los núcleos tienen carga positiva, y los electrones, negativa. Los campos magnéticos actúan sobre las partículas cargadas eléctricamente, desviándolas de sus trayectorias (figura v.9).

Otra posible explicación de una estructura de dona alrededor de la estrella es la presencia de una estrella compañera. En este caso se trataría de un sistema doble o binario, en el que una de las estrellas le pasa material a otra; este material se localiza en el plano de giro del sistema y da lugar a que la estrella que recibe el material se encuentre rodeada de un anillo aplastado (un disco con un agujero central rodeando a la estrella). Esta combinación puede producir lanzamiento de material por los polos. La configuración de una estrella central rodeada por un disco en rotación se da en varias etapas de la vida de las estrellas y en muchos casos ocurre el lanzamiento de materia en chorros muy angostos a grandes distancias.

Posiblemente las nebulosas planetarias alargadas provienen de diversos orígenes, tanto de estrellas en rotación como de sistemas de estrellas dobles. Para explicar algunas formas particularmente complejas se recurre a la elaboración de modelos. Como vimos, un modelo es una explicación simple, de unos cuantos pasos, para entender lo que se observa. Un modelo suele incluir cálculos. En estos casos los modelos matemáticos se construyen para representar una pareja de estrellas cercanas entre sí, o una estrella sencilla en rotación con campos magnéticos, o donde se combinen ambas complicaciones, una pareja de estrellas con campos magnéticos intensos.

Volviendo al tema de los flujos bipolares, éstos aparecen de

distintos colores. En ocasiones, en los extremos de los chorros de color verde aparecen filamentos rojos; esto se debe a que el gas que los produce se encuentra en distinto estado de ionización. Como vimos antes, el oxígeno produce el color verde, y el hidrógeno y nitrógeno, el rojo. Los chorros empujan la materia por la que avanzan y la iluminan. La materia distante de los chorros es parte de la misma estrella que emergió como viento estelar en una etapa previa de su evolución.

Formas multipolares y con simetría de punto

Además de las formas simples que hemos descrito hay algunas nebulosas en las que se observan varios pares de extensiones. A éstas se les llama multipolares. La explicación que se propone para estas formaciones tan complejas es que se trata de una estrella doble que está recorriendo una órbita, alrededor de su pareja, y en la que su eje de rotación cabecea (a este movimiento se le llama *precesión*) y que además ha tenido diferentes episodios de pérdida de masa. Así, al lanzar el material preferentemente por los polos, éstos ya están desalineados del lanzamiento anterior, lo que da lugar a estructuras "multipolares" (figuras v.10 y v.11). En este mismo grupo de objetos podemos incluir los que muestran estructuras que tienen simetría alrededor de la estrella. Frecuentemente se trata de nudos de material que aparecen directamente opuestos entre sí y en ocasiones dan lugar a nebulosas en forma de la letra S (figura v.12).

EXPULSIONES MÚLTIPLES

A partir de las observaciones de las estructuras de las nebulosas se deduce que la eyección de materia de las nebulosas planetarias en realidad ocurre en tiempos largos, y en algunos ca-

sos sucede en forma de múltiples episodios de pérdida intensa. Pero podemos simplificar este esquema haciendo una generalización. Cuando la estrella es una supergigante roja y, durante parte de su evolución posterior, pierde gran cantidad de material por medio de vientos suaves y continuos; posteriormente, cuando ya son de menor tamaño, la pérdida de masa ocurre en menor escala, pero a mayor velocidad.

La pérdida de materia a alta velocidad ocurre en muchas estrellas centrales de las nebulosas planetarias. En buena parte de estas estrellas, que han reducido ya su tamaño, se observa que continúan lanzando viento, y por lo tanto perdiendo masa. Esta pérdida es menos eficiente pero mucho más violenta, pues, como hemos descrito anteriormente, la velocidad de escape es mucho mayor. Esto significa que este material que escapa a gran velocidad va a impactarse con el material lanzado anteriormente y que se aleja más lentamente. En las envolventes hay material chocado, como a continuación explicaremos.

Parte de las estructuras de las nebulosas se puede explicar como una sucesión de vientos que expulsó la estrella central en distintos tiempos. Otras estructuras requieren adicionalmente de expulsiones supersónicas; es decir, frentes de choque, para explicarlas (figura v.13).

Ondas de choque

Cuando dejamos caer gotas en el agua de un estanque quieto, se forman círculos concéntricos que avanzan a partir de la zona de contacto; a este efecto se le conoce como movimiento ondulatorio. Si llueve, se forman anillos en torno de cada gota; estos círculos se atraviesan unos a otros a la velocidad de las ondas en el agua.

En nuestro ejemplo, si un barquito avanza suavemente en el estanque también produce ondas. Pero si su velocidad es

mayor que la de propagación de las ondas, genera una onda en forma de proa; a esto se le conoce como onda de choque. En el caso de los aviones supersónicos se genera una onda en forma de cono.

El sonido también se desplaza por medio de ondas. Cuando nosotros hablamos, el aire en torno a nuestra boca se comprime y estira. Esta perturbación avanza por el aire hasta el oído del escucha, su tímpano oscila y pone a oscilar vellosidades que el sistema nervioso interpreta como sonido. Cada medio tiene su propia velocidad de propagación. En el aire el sonido se desplaza a 300 metros por segundo. Es decir, cuando hablamos, el aire de nuestra boca no se mueve hasta donde está el escucha; es la onda que generamos la que se propaga. Si un objeto se desplaza en el aire a mayor velocidad que la del sonido, es decir, a más de 300 metros por segundo, decimos que su velocidad es supersónica, ya que viaja más rápido que el sonido que produce.

Vamos a suponer que la estrella arrojó un viento suave de velocidad relativamente baja y después uno supersónico; este último llegará hasta donde está el primero, lo comprimirá y parte de esta materia rebotará y se calentará a altísimas temperaturas. Así, el material muy cercano a las estrellas más calientes se puede observar mediante rayos X. Varios de los bellísimos detalles de las estructuras de las nebulosas planetarias se explican también como el resultado de ondas de choque. Asimismo, estos vientos chocados explican las estructuras similares a encajes que se observan en las nebulosas planetarias (figura v.14).

GRANITOS DE ARENA

Hemos mencionado el gas en las nebulosas planetarias; pero además de gas, en estos objetos hay polvo mezclado con el gas. Esto lo sabemos por diferentes tipos de observaciones. Lo que

más llama la atención es que se le encuentre en estructuras como las nebulosas planetarias, las cuales apenas hace unos cuantos años formaban parte de la estrella misma. Así que el constatar la presencia del polvo en éstas nos da pistas sobre los procesos de formación del polvo.

En las nebulosas planetarias se observa polvo además de gas. Resulta que la estrella calienta el polvo, y éste emite radiación infrarroja. Como el polvo que está en la parte de enfrente del gas opaca la luz visible, podemos ver su distribución por las sombras que proyecta, y combinado con las observaciones en la radiación infrarroja, se estiman las características del polvo. Algunas de las imágenes más espectaculares de la astronomía son las que presentan estrellas, gas y polvo.

El polvo se forma cuando la estrella supergigante roja emite su viento suave, permitiendo que sus partículas se aglomeren. El viento de la estrella arrastra el polvo, así como un río arrastra barquitos de papel. El polvo, según su distancia respecto de la estrella, se encuentra a distintas temperaturas. El más cercano a la estrella es más caliente y emite emisión infrarroja, y conforme está a mayor distancia emite radiación en el infrarrojo más lejano. Esta emisión permite su detección y entender su distribución.

Sin embargo, no solamente hay evidencia de polvo en las nebulosas planetarias, sino que la hay en aquellos objetos que se convertirán, en unos cuantos miles de años, en nebulosas planetarias: a estos objetos se les llama protonebulosas planetarias o prenebulosas planetarias. Y ahí también se ha encontrado que hay gran cantidad de polvo. Más aún, en muchas estrellas supergigantes amarillas se observa luz infrarroja que sabemos que proviene de polvo tibio, por lo que posiblemente éste se localice en anillos o cascarones cercanos rodeando a la estrella, aun antes de que estas configuraciones se manifiesten como nebulosas planetarias. La huella del polvo en luz infrarroja es una pista para detectar la presencia de estrellas que se

convertirán en nebulosas planetarias en unos cuantos miles de años.

Como habíamos descrito, el polvo está constituido por compuestos de silicio, oxígeno y carbono, entre otros elementos. Suponemos que el polvo se forma a partir de moléculas simples, que al chocar con otras se unen, formando partículas de mayor tamaño. Una vez constituido un granito de polvo, éste se puede cubrir fácilmente por hielos de otros compuestos más abundantes en el espacio. Todo eso nos hace pensar que es difícil formar polvo. Por otro lado, es posible que el polvo se forme a partir de la destrucción de planetas que hayan estado rodeando la estrella antes de que ésta se hinchara hasta expulsar sus capas externas (figura V.15).

REGRESANDO A LA ESTRELLA CENTRAL

Una vez que la estrella se desprende de su atmósfera, queda el núcleo incandescente. En unos cuantos cientos de años pasa, de ser una estrella enorme con una temperatura modesta de 5 000 °C en la superficie, a ser una pequeña estrella que alcanza temperaturas en la superficie hasta de 150 000 °C; es decir, hasta 30 veces mayor que la temperatura inicial. Las estrellas centrales de las nebulosas planetarias son las estrellas más calientes que se conocen. Como vimos antes, cuando la estrella alcanza una temperatura en su superficie mayor que 30 000 °C vuelve incandescentes los gases de la atmósfera que expulsó. Esta fase es relativamente breve, pues dura entre 20 000 y 70 000 años.

En su interior, este antiguo núcleo estelar ya está muy concentrado y denso y se transformará en una estrella enana blanca. Independientemente de la masa original, el resultado final es una estrella de apenas 60% de la masa del Sol. Su contracción continúa hasta que ya no es posible hacerlo más, pero ya

tampoco puede llevar a cabo reacciones termonucleares, sólo puede irse apagando. En otras palabras, la estrella brilla por la energía acumulada, perdiendo su calor interior. A pesar de ser una estrella apagada, la estrella central de una nebulosa planetaria irradia principalmente luz ultravioleta. Esta luz viaja por el espacio hasta toparse con el gas que la rodea.

Reiterando, en una estrella enana blanca ya no se pueden llevar a cabo reacciones termonucleares y la radiación de la estrella proviene de su enfriamiento. Esta pérdida de energía lleva a que gradualmente la estrella se transforme en una estrella enana negra, carente de luz. Sin embargo, el tiempo para que esto ocurra es enorme, y es mayor que la edad del universo. El enfriamiento es más lento cuanto menos brillante sea la estrella, por lo que ninguna de las estrellas enanas blancas que se han formado en toda la historia del universo ha tenido tiempo de llegar al estado de enana negra.

Una estrella enana blanca es del tamaño de la Tierra, es decir, tendría un radio 100 veces menor que la estrella de la que proviene. En la estrella enana blanca la materia está tan condensada que una cucharadita de azúcar colocada sobre su superficie pesaría tanto como un microbús en la Tierra (figura v.16).

La evolución de la estrella en el diagrama H-R

Ahora acudiremos al diagrama Hertzsprung-Russell para ilustrar el caso de las estrellas que dan lugar a las nebulosas planetarias. Esta representación es un gran apoyo para describir los datos observacionales principales de que disponemos de las estrellas. Recordemos que en este diagrama se grafica el brillo de una estrella respecto de su color o temperatura. En el mismo, la parte superior corresponde a estrellas más brillantes (y la inferior a las más débiles), y la parte izquierda a estrellas más calientes (y la derecha a estrellas más frías). Por esas mis-

mas razones, las estrellas de mayor tamaño se ubican en la esquina superior derecha (y las de menor tamaño en la esquina inferior izquierda). Asimismo, la "secuencia principal" es el sitio donde se localizan las estrellas que están quemando hidrógeno en el núcleo. Podemos representar ahí las distintas etapas por las que transcurren las estrellas semejantes al Sol, y en general los cambios que le ocurren a una estrella desde que se forma hasta que llega a sus etapas finales.

Como hemos dicho repetidamente, las nebulosas planetarias se originan a partir de estrellas que fueron semejantes al Sol. Por lo tanto, al iniciar su vida las progenitoras se encuentran en la parte media de la secuencia principal. Allí pasan la mayor parte de sus vidas, cerca de 11 000 millones de años en los que en su núcleo se transforma hidrógeno en helio y energía. Cuando ya agotó su hidrógeno en el centro se desplaza lentamente en el diagrama a la parte superior derecha, a la fase de supergigante roja. Este desplazamiento es lento, pues sigue transformando hidrógeno en helio en cascarones en su interior. Su expansión (ascenso en el diagrama) se interrumpe porque inicia el quemado de helio en el centro, por lo que se contrae un poco y brilla con menos intensidad. Esto corresponde a una fase en la que tiene un tamaño 10 veces mayor que el Sol y un brillo 40 veces el solar. Una vez agotado el helio en el centro, se vuelve a hinchar hasta alcanzar un tamaño 200 veces el solar; es decir, regresa hacia la región de las supergigantes, otra vez en la parte superior del diagrama. Es ahí donde le ocurre la mayor pérdida de masa y forma la envoltura. Al perder sus capas externas y aumentar su temperatura superficial, la estrella se traslada a la parte izquierda del diagrama. A medida que se transforma en una enana blanca que no cambia de dimensiones y que se enfría gradualmente, ocupa un lugar en el diagrama correspondiente a una estrella muy pequeña.

Sobre el diagrama H-R marcamos el inicio de la fase de secuencia principal del Sol —que es la fase lenta de quemado de

hidrógeno en el centro—, con (1) y su conclusión, con (2). Asimismo señalamos el lugar que le corresponde a una estrella supergigante roja con (3). Esta posición es en la parte superior derecha del diagrama H-R, donde se encuentran las estrellas más grandes, más brillantes y más frías. El quemado de helio en el núcleo se lleva a cabo en la llamada “rama horizontal” indicada con (4), la fase de estrella pulsante, que es cuando pierde la mayor parte de su masa, con (5), y su transición hasta convertirse en núcleo de nebulosa planetaria, con (6).

En este diagrama sólo se representa la temperatura superficial y el brillo, pero faltan datos importantes que se refieren al tiempo transcurrido en cada etapa. Algunas son bastante prolongadas, mientras que otras son sorprendentemente cortas. Para ayudar a entender la duración de estas fases, en el cuadro V.1 se describe el tiempo que pasa la estrella en las distintas etapas (figura V.17).

TIEMPO DE VIDA

Como se puede ver en la tabla, la fase de las nebulosas planetarias es apenas una pequeña fracción de la vida de una estrella como el Sol. Depende de la presencia de gas abundante cerca de una estrella caliente que recientemente se haya desprendido del mismo. La estrella estará en esas condiciones durante tiempos breves. Se calcula que este intervalo no es mayor de 100 000 años para las estrellas residuales de menor masa, y de 10 000 años para las de mayor masa. A su vez, el gas estará alejándose de la estrella y por lo tanto brillará cada vez con menos intensidad. La combinación por lo tanto es frágil y será pasajera. Esto significa que las nebulosas planetarias sólo se observan como tales apenas un intervalo que dura entre 30 000 y 70 000 años. Por supuesto, esta cifra también depende del tipo de instrumento con el que se observen. Si se usa un telescopio más potente, o se aumenta considerablemente el tiempo de observación, se al-

CUADRO V.1. La historia de una estrella como el Sol, desde su formación hasta su transformación en enana blanca*

Fase	Identificación en el diagrama	Duración (en millones de años)	Tiempo transcurrido (en millones de años)
Contracción	Llegada a 1	30	30
Secuencia principal	1 a 2	10 880	10 910
Hacia las supergigantes rojas	2 a 3	1 320	12 230
Quemado de helio en el centro (rama horizontal)	4	120	12 350
Supergigante pulsante	5	20	12 370
Prenebulosa planetaria	6	000.1	12 370
Núcleo de nebulosa planetaria hasta enana blanca		0.03	12 370
Enfriamiento de la enana blanca hasta llegar a una luminosidad 1/1 000 del Sol		1 700	...

* Estas cifras están adaptadas de Sackmann *et al.*, *Astrophysical Journal*, vol. 418, 1993, p. 457.

canzan a detectar objetos más débiles. En las imágenes de larga exposición se encuentra en algunas nebulosas planetarias que existe material más tenue a mayor distancia de lo que se conocía previamente y que en ocasiones es la huella de múltiples eyecciones.

Para una estrella como el Sol, el tiempo transcurrido desde su formación hasta su conversión en enana blanca es de 12 400 millones de años, y el lapso en que será visible como nebulosa planetaria es de cerca de 50 000 años, lo que representa apenas 1/248 000 del tiempo de vida total del Sol. Entonces podemos

suponer que por cada nebulosa planetaria que observemos existen más de un cuarto de millón de estrellas similares al Sol.

MUCHAS ESTRELLAS TIENEN PAREJA

En ocasiones, la estrella central de una nebulosa planetaria no es un objeto aislado, sino que en realidad se trata de una pareja de estrellas; es decir, la estrella central puede ser doble. Este caso no es tan difícil de imaginar, ya que un gran porcentaje de las estrellas de nuestra galaxia son binarias; por ejemplo, 60% de las estrellas como el Sol son sistemas dobles. Ahora bien, hay una gran variedad de casos de interés para la evolución.

Sus órbitas pueden ser muy extendidas, por lo que cada una de las estrellas realizará su propia evolución sin alterar mayormente a la otra. Puede tratarse de un par de estrellas donde cada una se convierte en gigante roja en épocas distintas, de tal suerte que cuando la segunda se convierte en planetaria, la envoltura de la primera ya se dispersó en el medio interestelar.

Sin embargo, si están muy próximas entre sí, una de las estrellas durante la evolución puede afectar a la otra, principalmente mediante el intercambio de masa. En el caso de nebulosas planetarias, son de interés las estrellas dobles que se encuentran relativamente cercanas entre sí. Esto implicaría distancias de separación menores que las dimensiones del sistema solar, lo que reduce la proporción de objetos de interés posiblemente a 15% de la muestra en total.

¿Por qué decimos que la presencia de una estrella puede afectar a la otra? Porque si una de ellas se convierte en supergigante roja, las partes externas de la que se hincha pueden escaparse de ésta e irse a depositar sobre la compañera. Esto se debe a que los gases de la superficie de la estrella supergigante también sienten la atracción de la estrella compañera, y hay al-

gunos sitios de la superficie donde se favorece la transferencia de material de una a la otra. Esta transferencia afecta la evolución de ambas estrellas. A la que pierde el material, porque se le facilita este proceso en mayor medida que si estuviera aislada, y la que recibe el material porque aumenta su masa, lo que le cambia toda su historia de vida.

En el caso de estrellas próximas, la estrella de mayor masa evoluciona primero arrojando su material al espacio, y la otra puede recibir parte de ese material. Este proceso altera la estructura de la que la recibe modificando su forma de evolución, por ejemplo, provocando una evolución más rápida y cambiando las características del material de su superficie. Adicionalmente se encontrará rodeada por un disco de gases y polvo.

Estrellas binarias cercanas

Regresando a las nebulosas planetarias, se pueden presentar varios casos; por ejemplo, que la estrella que ahora es una nebulosa planetaria haya tenido mayor masa que la compañera, por lo que evolucionó más rápidamente. En este caso posiblemente la compañera, de menor masa, es una estrella similar al Sol; es decir, su color será amarillo, naranja o rojo y posiblemente se alcance a detectar en luz visible. De ocurrir esto, la compañera no participa en la ionización de la envoltura por no estar suficientemente caliente, puesto que se ha demorado más en completar su evolución que la compañera de mayor masa. Sin embargo, la presencia de la compañera suele ser muy importante para nosotros, porque, en algunos casos, gracias a ella podemos medir la masa de la enana blanca usando la técnica mencionada en la primera parte de este libro.

Intercambio de masa

El proceso de intercambio de masa entre dos estrellas cercanas ocurre preferentemente en el plano de giro. La estrella de mayor masa se desprende primero de sus capas exteriores y la estrella de menor masa recibe este material, que se acomoda en forma de disco muy aplanado. De tal suerte que el viento de la estrella de menor masa (la que evoluciona después) produce un viento que tiene forma bipolar; es decir, gases que se extienden a mayor distancia en la dirección de los polos de la dona.

Asimismo, pueden ser dos estrellas de masas similares que estén muy cerca una de otra, con lo cual la nebulosa las envuelve a ambas y posee material eyectado por el par en distintas etapas de evolución (figura v.18).

FUTURO DE LA TIERRA Y DEL RESTO DE LOS PLANETAS

Como hemos descrito, el Sol se va a convertir en nebulosa planetaria dentro de 7400 millones de años. El tamaño de la estrella supergigante roja es mayor que la órbita de Mercurio y Venus, por lo que éstos pueden quedar en su interior. Debido a la fricción con la atmósfera de la estrella central, estos planetas se irán acercando cada vez más en forma de espiral hacia el centro. Aunque ambos mundos son casi totalmente de rocas, se van a fundir y en menos de 1000 años su materia se gasificará e incorporará a la atmósfera solar. Más tarde se evaporarán la Tierra y Marte, así que cuando el Sol se convierta en nebulosa planetaria toda la materia que forma nuestro mundo saldrá expulsada al medio interestelar a una velocidad de 72 000 kilómetros por hora (20 kilómetros por segundo).

Los planetas más lejanos se calentarán intensamente y parte de su sustancia se evaporará. El viento de la estrella arrastra-

rá estos gases y los planetas tendrán colas, como si fueran cometas. Cuando el Sol se desprenda de su atmósfera éstos se alejarán, pues sentirán menor fuerza de atracción gravitacional; podrán seguir trasladándose en torno de nuestro Sol transformado en enana blanca.

Si llevamos la predicción más lejos, los gases terrestres formarán polvo que arrastrará la envolvente de la nebulosa planetaria por el medio interestelar. En un futuro lejanísimo, la materia que nos formó contribuirá al nacimiento de otro sistema planetario.

El detalle de las predicciones sobre el futuro del sistema solar depende en gran medida de nuestra comprensión de la evolución del astro. En realidad, aunque se conocen a grandes rasgos los pasos que habrá de seguir, son muchos los elementos que se ignoran. En particular se desconocen con precisión las características de las etapas de vientos de las estrellas, antes de llegar hasta la fase de supergigante roja, en la que ya se desprenden de sus capas externas. Se calcula, sin embargo, que en la fase de supergigante roja, el Sol podría perder hasta 28% de su masa a través de su viento; esto significaría que disminuiría su atracción gravitacional sobre los planetas, por lo que sus órbitas se alejarían del Sol. En ese caso, nuestro planeta, y posiblemente Venus, sobrevivirían a la expansión extrema del Sol. Mercurio parece no tener oportunidad de evitar ser englobado por el Sol.

BUSCANDO NEBULOSAS PLANETARIAS

Así como hace 50 años se descubrieron nuevas nebulosas planetarias en la galaxia empleando filtros de colores, actualmente se encuentran nuevos objetos utilizando una técnica similar. Se trata de aprovechar que el gas ionizado emite toda la radiación que absorbe de la estrella caliente en luz de unos cuantos colores. Por contraste, todas las estrellas emiten en todos los co-

lores. De lo que se trata es de contrastar el brillo de las nebulosas planetarias con el del resto de las estrellas.

Se toma una imagen de la zona donde se desea hacer la búsqueda. Después se toma una fotografía del mismo campo, pero esta vez con ayuda de un filtro; es decir, una imagen donde solamente se vea lo que emite cada astro en esa pequeña sección de su arco iris. Por ejemplo, en el caso de una estrella no sólo se observará la emisión verde de 501 nanómetros, sino los tonos aledaños; en cambio, de la nebulosa planetaria se verá sólo la luz de ese color. Posteriormente se intercomparan estas imágenes y ahí aparecen resaltadas las regiones de gas ionizado. Pero las planetarias no son los únicos astros que emiten en 501 nanómetros de manera brillante, sino que también lo hacen las regiones de formación estelar (es decir, los gases que rodean las estrellas calientes jóvenes). Así que para eliminarlas de la búsqueda, habrá que observar los posibles candidatos adicionalmente en la línea 656 nanómetros del hidrógeno y compararla con la 501 nanómetros del oxígeno. En las regiones de formación estelar, la línea del hidrógeno de 656 nanómetros es más intensa que la de 501 nanómetros, mientras que en las nebulosas planetarias ocurre lo contrario.

De esta manera se siguen buscando, y encontrando, nuevas nebulosas planetarias en nuestra galaxia y en galaxias cercanas. Para el caso de las galaxias es necesario usar filtros especiales que tomen en cuenta las velocidades de acercamiento o alejamiento de las mismas hacia nosotros. Esto se debe a que por la naturaleza de la búsqueda, los filtros que se emplean sólo dejan pasar la luz de colores muy precisos, y en algunos casos el cambio de color debido a los movimientos de las galaxias (efecto Doppler) puede ser mayor que la ventana disponible; es decir, una línea del color que buscamos está más roja o más azul que lo que permite pasar nuestro filtro, por lo que no la observamos.

Determinar la distancia de un astro es uno de los problemas a los que se enfrenta el astrónomo continuamente. Éste es un parámetro fundamental, pues con ese dato logramos medir el brillo intrínseco del mismo, su tamaño y muchas otras cantidades de gran interés. En general es muy difícil estimar la distancia de los diversos astros. Las nebulosas planetarias no son la excepción. De la amplia muestra de las nebulosas planetarias catalogadas son poquitas a las que se les ha medido la distancia. Solamente se ha logrado medir directamente, por triangulación o paralaje, las distancias de unas cuantas de ellas, las más cercanas.

A partir de la determinación precisa de la distancia de una nebulosa planetaria cercana, y si éstos fueran objetos idénticos entre sí, podríamos comparar su brillo con las distantes. Sin embargo, éste no es el caso de las nebulosas planetarias, ya que no tienen el mismo tamaño ni el mismo brillo, por lo que la determinación de la distancia de cada una de las nebulosas planetarias es muy incierta.

Se pueden medir distancias comparando la expansión lateral de su envoltura con la velocidad de acercamiento o alejamiento de la misma. En general, esta última se puede medir en todas las nebulosas planetarias. Por lo contrario, es mucho más difícil medir la expansión lateral. Esto se logra a partir de la comparación de fotografías con varios años de diferencia. Si se dispone de ambas mediciones, entonces se hace la suposición de que la expansión lateral corresponde a la misma velocidad que la de acercamiento o alejamiento, y de ahí se estima la distancia. Evidentemente, no en todos los casos es válida esta aproximación; sin embargo, a falta de mejores alternativas, se usa este método en los pocos casos en que se logra determinar la expansión lateral. También en este caso el número de nebulosas a las que se les puede medir la distancia resulta muy limitado.

Del resto de los objetos solamente se puede derivar la distancia mediante modelos matemáticos que reproduzcan un conjunto de otras observaciones, o por consideraciones indirectas.

Uno de los métodos para estimar sus distancias es emplear a las estrellas vecinas. Como se ha explicado, el espacio interestelar contiene átomos y moléculas de los elementos más abundantes del cosmos: hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno y oxígeno, y además contiene polvo. El polvo está constituido, además de los elementos ya mencionados, de silicio, aluminio, magnesio y hierro. Sabemos que existe polvo interestelar porque la luz de las estrellas lejanas aparece cada vez más tenue y roja debido a la absorción que produce el polvo, que lo hace más eficientemente en el color azul. Es decir, durante el trayecto de la luz de las estrellas hasta nuestros telescopios, las partículas de polvo dispersas por el medio interestelar atenúan la luz de todos colores, pero preferentemente la luz azul. La luz que recibimos de las nebulosas planetarias también ha sido afectada por el medio interestelar.

Se puede medir la cantidad de absorción interestelar que presenta una nebulosa planetaria y compararla con la de las estrellas vecinas. Las estrellas más cercanas presentan menor absorción, y las más distantes, mayor; pero si tenemos la suerte de encontrar en la misma fotografía de una nebulosa planetaria varias estrellas cuya distancia conozcamos y que presenten la misma cantidad de absorción por polvo, podemos suponer que están más o menos a la misma distancia que la planetaria. Hacemos notar que este método es muy incierto porque sabemos que la absorción interestelar no es homogénea. Sin embargo, ciertamente es mejor tener una distancia aproximada que ninguna. Así como es mejor decir que la India está como a 18000 kilómetros, que únicamente decir que está muy lejos.

El número de nebulosas planetarias en nuestra galaxia no se conoce bien. Se estima que son entre 20000 y 30000. Es importante comparar esta cifra con el número total de estrellas en la galaxia, que es de aproximadamente 2000 millones. Esto significa que los objetos de los que nos ocupamos en realidad son poquitos en la galaxia. Sin embargo, a pesar de sus números limitados se conocen suficientes objetos que nos permiten estudiar las características generales de la galaxia.

En realidad, posiblemente el número total de nebulosas planetarias sea mucho mayor que las observadas, pero el polvo que existe en algunas direcciones nos impide ver tanto las estrellas como las nebulosas planetarias.

Si alguien tiene interés en los catálogos de nebulosas planetarias puede consultarlos en internet. Basta con ingresar en un buscador como Google y solicitar "catálogos de nebulosas planetarias" o su equivalente en inglés: "planetary nebulae catalogues".

Nuestra galaxia está formada por varios sistemas de estrellas: el plano, el bulbo y el halo. El plano de la galaxia tiene forma de disco, donde giran alrededor del centro gran cantidad de estrellas; ahí también se localizan el gas y el polvo, y es ahí donde se forma la estructura espiral. El bulbo es una concentración de estrellas hacia el centro; a su vez, el halo corresponde a las estrellas distribuidas a gran distancia del centro y del plano mismo. Como el resto de las estrellas, la gran mayoría de las planetarias se encuentran en el disco galáctico. Ahí se pueden estudiar su distribución y velocidades en el espacio. Éstas nos indican que sus progenitoras se formaron hace varios miles de millones de años, pues sus órbitas se asemejan a las de las estrellas de mayor edad que están localizadas a distancias moderadas del plano de la galaxia.

Solamente se han encontrado unas cuantas nebulosas pla-

netarias en el halo de nuestra galaxia. Se conoce apenas una docena. Estas nebulosas provienen necesariamente de estrellas de muy poca masa que se crearon en los primeros miles de años después de que se formó la galaxia. El estudio de estas poquitas nebulosas nos da pistas de la formación de las estrellas de baja masa en las primeras épocas de la galaxia. Se les identifica por su posición en la galaxia (están alejadas del plano de la misma), por sus velocidades en el espacio, que corresponden a estrellas de gran edad, y por su composición química, que también delata su antigüedad.

NEBULOSAS PLANETARIAS EN OTRAS GALAXIAS

Como hemos dicho, se conocen apenas cerca de 2 500 nebulosas planetarias en nuestra galaxia y se estima que existen en total 10 veces más, por lo que se piensa que debe haber al menos otro tanto en las espirales semejantes a la nuestra. Puesto que los progenitores de estos objetos provienen de estrellas de masa intermedia que son muy comunes, se piensa que deben existir nebulosas planetarias en todas las galaxias.

La búsqueda de nebulosas planetarias en nuestra galaxia ha resultado relativamente difícil y ardua. Por comparación, la búsqueda de nebulosas planetarias en otras galaxias ha sido muy eficaz. En unos cuantos años se ha logrado conocer cerca de 7 000 diferentes nebulosas planetarias en más de 55 galaxias. Estas investigaciones no solamente nos permiten saber más sobre las propiedades de las nebulosas mismas, sino que se emplean para determinar algunas características de las galaxias, como la distancia a la que se encuentran, sus velocidades de rotación y su tamaño.

Si conocemos la composición química de algunas nebulosas planetarias podemos estimar la de la galaxia a la que pertenecen. Esto es particularmente importante para galaxias distintas

de la nuestra, en la que se puedan observar nebulosas planetarias por su brillo espectacular. Las galaxias más pequeñas suelen tener una composición química diferente de la de nuestra galaxia, pues tienen menor cantidad de elementos diferentes al hidrógeno y el helio, como carbono, oxígeno, nitrógeno y neón. El motivo de esta diferencia es que han tenido un menor número de generaciones estelares que aportan este tipo de elementos al medio interestelar.

Como se explicó en secciones anteriores, para descubrir nuevas nebulosas planetarias en otras galaxias se sigue el mismo procedimiento que para hacerlo en nuestra galaxia. Pero en este caso es necesario usar filtros especiales que solamente dejan pasar el tono verde particular del oxígeno y que tomen en cuenta la modificación de la longitud de onda correspondiente a la velocidad particular de la galaxia en cuestión.

NOMBRES

Las nebulosas planetarias tienen nombres de varios tipos. Unos dependen de su aspecto: por ejemplo, la nebulosa del Esquimal, de la Hélice o la del Búho.

Otros nombres dependen de la constelación donde se encuentran; así, la nebulosa de la Lira está sumergida en el grupo de estrellas que juntas parecen un instrumento musical y que forman la constelación de la Lira.

Algunas nebulosas planetarias llevan los nombres de sus descubridores; así, hay nebulosas Haro, Peimbert, Bätz, Costero y Peña, que son astrónomos de México.

Otras nebulosas llevan nombres con números, como NGC 4563 o IC 418. Las letras son abreviaturas de los catálogos donde aparecen, y los números, el orden en que se consignan en ellos. Finalmente, todas las nebulosas planetarias tienen nombres que se refieren a su posición en el cielo. Así como

existe un sistema de coordenadas para ubicar sitios en la Tierra, se ideó uno equivalente para el cielo. Es como si se hubiesen expandido las coordenadas terrestres hasta quedar pegadas en la bóveda celeste. De esta suerte, hay un ecuador y polos celestes. También hay un meridiano cero, como en la Tierra existe el de Greenwich.

Muchas de las nebulosas brillantes tienen varios nombres, que corresponden a los diferentes catálogos en los que están listadas, mientras que las menos notables tienen un solo nombre, que corresponde a sus coordenadas celestes.

La Unión Astronómica Internacional asigna nombres definitivos. Prevalecen las formas que sean más útiles para la ciencia, tomando en cuenta que se han descubierto billones de astros, más de 1 000 por cada habitante terrestre.

VI. Las aportaciones mexicanas

En nuestro país son muchos los astrónomos que han investigado o investigan sobre nebulosas planetarias. Cuando menos una tercera parte de los astrónomos profesionales han investigado alguna vez estos objetos, por lo que podemos asegurar que México ha contribuido en forma notable al conocimiento de estos astros. A continuación describiremos algunos de sus logros.

Esto no significa que en otros países de habla hispana no haya ocurrido algo semejante; sin embargo, dado que las autoras somos mexicanas, consideramos importante destacar los logros locales, a fin de entusiasmar a los jóvenes de nuestro país para que aprecien o se dediquen a la ciencia.

DESCUBRIMIENTOS

Guillermo Haró es el padre de la astronomía mexicana moderna. Él intuyó que se debía hacer astrofísica empleando los instrumentos que tuviera a su disposición. Contaba con un telescopio llamado Cámara Schmidt, que servía para tomar fotografías de regiones extendidas del cielo. Ese telescopio también dispone de un prisma que se coloca frente a la primera lente, por lo que se obtienen fotografías de los espectros de cientos de objetos celestes en una sola imagen. En esta modalidad, en vez de

fotografiar un punto por cada estrella, se fotografía un pequeño arco iris, o espectro, de cada una. En estos pequeños rastros se distingue muy claramente la diferencia entre una estrella y una nebulosa planetaria. Cada una de estas fotografías con miles de espectros fue revisada muy cuidadosamente con microscopio para encontrar estrellas que tuvieran características particulares. Guillermo Haro obtuvo imágenes de los espectros del plano de la galaxia para buscar nebulosas planetarias y estrellas jóvenes. En 1952 descubrió un número considerable de nebulosas planetarias que llevan el nombre de Haro (figura VI.1).

Hace más de 40 años, un grupo de tres jóvenes mexicanos que iniciaban sus estudios de licenciatura en física se ilusionaron con ser astrónomos. Decidieron ir a Puebla, al observatorio de Tonantzintla, y ofrecerle su ayuda en cualquier actividad al director, Guillermo Haro. Este investigador sugirió a los jóvenes estudiantes revisar una vez más el material fotográfico del plano de la galaxia que ya había sido analizado, en búsqueda de nebulosas planetarias que por alguna razón hubieran escapado a esa primera inspección. Los entonces jóvenes mexicanos Manuel, Rafael y Gerardo analizaron miles de astros: estrellas, planetas, asteroides, nebulosas y galaxias. Cuando descubrían un espectro que podía deberse a una nebulosa planetaria registraban su posición. Más tarde comparaban esta posición con fotografías directas del mismo campo para verificar si en realidad se trataba de una nebulosa planetaria. Por supuesto, encontraron varias nebulosas planetarias brillantes que ya habían sido reportadas anteriormente; pero su tenacidad tuvo éxito, pues entre los tres identificaron más de 20 nebulosas planetarias hasta entonces desconocidas y que pasaron a formar parte de los catálogos de estos objetos.

Vale la pena señalar que el trabajo del astrónomo comienza con una gran idea. Después utiliza los instrumentos que tiene a su alcance para corroborar lo que intuye. Por último, publica sus resultados para que la comunidad internacional pueda opinar sobre ellos, corroborarlos o rectificarlos.

Las formas de observar el cielo han variado en el tiempo. Durante su vida profesional, una de las autoras ha tenido el privilegio de observar de muchas formas. Al principio de su carrera las observaciones requerían más esfuerzo, pues se trataba de permanecer toda la noche a la intemperie, y por supuesto, en la oscuridad. Esto sucedía mientras el telescopio seguía la trayectoria en el cielo del objeto astronómico que se deseaba estudiar. Además había que adaptarse a las diversas posiciones del telescopio, para lo que era necesario contorsionar el cuerpo con el fin de apuntar los objetos en cualquiera de los ángulos. Es decir, se hacía un esfuerzo físico considerable, además de que se requería una gran concentración para guiar el telescopio.

En general, para poder usar los telescopios profesionales es necesario presentar una solicitud en la que se describe en detalle el tipo de observación que se solicita, el resultado que se espera, la justificación científica del mismo y demostrar que se dispone de los medios para la interpretación de los datos. Los responsables de cada telescopio, ya sea terrestre o a bordo de un satélite, asignan el tiempo de uso a los proyectos astronómicos que consideran más importantes. Las observaciones actuales se hacen mediante computadoras que controlan los telescopios, desde un cuarto cómodo, iluminado, con disponibilidad de muchos apoyos para lograr un mejor uso del tiempo con el telescopio. En algunos casos estas observaciones pueden ser remotas y se hacen desde las propias oficinas, a miles de kilómetros de distancia. En todo caso se requieren gran esfuerzo y

concentración, pues se desea aprovechar lo mejor posible el uso de los instrumentos.

En la actualidad es mayor el número de astrónomos que desean usar los telescopios que los instrumentos disponibles, por lo que el proceso anterior resulta muy competido. La posibilidad de hacer observaciones ha aumentado en forma explosiva. Esto es tanto por el número de telescopios como por los nuevos detectores electrónicos más sensibles, así como por las computadoras, que permiten hacer la reducción de los datos, y por el aumento de los científicos que se dedican a ello. Lo anterior ha hecho que nuestro conocimiento se multiplique año con año. Más importante aún es que se dispone de datos en todas las regiones del espectro electromagnético que nos permiten conocer diversos aspectos de los objetos que se estudian.

Muchos de los grandes observatorios, y en particular las agencias que administran los satélites, han organizado sus datos de manera que, pasado un tiempo razonable, en el que los astrónomos que los propusieron los han interpretado, los datos están accesibles a toda la comunidad. Esto ha permitido aprovechar de manera muy favorable la acumulación de observaciones y tener una mejor perspectiva de éstas; así, los mismos datos se revisan por diversos astrónomos y dan lugar a interpretaciones distintas. Esta manera de compartir la información ha enriquecido esta disciplina.

En el caso de las nebulosas planetarias, el interés por obtener más información y conocer más detalles de las mismas sigue vigente, por lo que se continúan observando con técnicas e instrumentos cada vez más refinados.

Gran parte de lo que conocemos de las nebulosas planetarias ha sido resultado de las observaciones con telescopios ópticos. Y de ahí sabemos mucho de lo que se ha descrito en este libro. Adicionalmente hemos explicado que los astros emiten radiación en otras longitudes de onda y las nebulosas planeta-

rias también lo hacen. En general, las observaciones en otras longitudes de onda son relativamente recientes y en ellas también participan observadores nacionales.

NEBULOSAS PLANETARIAS EN LUZ ULTRAVIOLETA Y EN RAYOS X

Desde la década de 1970 se iniciaron las observaciones de los astros en luz ultravioleta; para esto fue necesario colocar los telescopios a bordo de cohetes o satélites, pues la atmósfera impide que llegue esta luz hasta nosotros. Uno de los primeros satélites a los que tuvo acceso la comunidad internacional fue el Explorador Internacional Ultravioleta (IUE, por sus siglas en inglés: *International Ultraviolet Explorer*), que permitía obtener espectros de los objetos celestes en luz ultravioleta. Estas observaciones requerían la presencia de los investigadores en las estaciones de observación del IUE en el estado de Maryland en los Estados Unidos, o en sus homólogas en Madrid, España. Así, se viajaba a la estación en varias ocasiones, con el fin de dirigir las observaciones mientras el telescopio apuntaba a los núcleos de las planetarias brillantes en luz ultravioleta. Estas observaciones permitieron determinar las temperaturas de las estrellas que iluminan las nebulosas, la composición del gas de la nebulosa, que como hemos dicho fue arrojado por las estrellas, y cuánta materia continúa arrojando la estrella actualmente, entre otros datos. Una de las autoras —Silvia Torres— fue de las primeras astrónomas en observar las nebulosas planetarias en luz ultravioleta. Posteriormente se incorporó al proyecto su colega Miriam Peña.

Las investigadoras mexicanas observaron el espectro ultravioleta de varias nebulosas planetarias. Con esta información construyeron modelos para explicar la forma en que brillan las envolventes.

Más tarde, Miriam Peña ha seguido con el Telescopio Espacial Hubble el desarrollo de una nebulosa planetaria, N66, en la galaxia vecina, la Nube Mayor de Magallanes, que tiene la característica de ser muy brillante y muy caliente, y que presentó un gran aumento en el brillo de su estrella central. Este comportamiento no es común entre este tipo de objetos, por lo que resultó de gran interés observar los cambios por los que está pasando la estrella.

Recientemente, Peña y Torres han obtenido observaciones con otro satélite ultravioleta, FUSE, tratando de encontrar las propiedades de la estrella central de una nebulosa planetaria.

Naturalmente, son muchos los astrónomos nacionales que han hecho uso de las bases de datos ultravioleta para entender mejor estos astros.

En cuanto a las observaciones en rayos X, éstas son muy recientes, y son pocas las nebulosas planetarias que han sido observadas en estas energías. Entre las contribuciones de los colegas en nuestro país se encuentran las de Leonid Georgiev, Michel Richer y Anabel Arrieta, quienes han combinado observaciones en luz visible con datos en rayos X del gas para tratar de determinar la abundancia de hierro en este sistema.

NEBULOSAS PLANETARIAS EN LUZ INFRARROJA

Ahora sabemos que entre la materia que han arrojado las estrellas gigantes rojas y que formará parte de las nebulosas planetarias, en muy poco tiempo se forma el polvo. Este polvo está tibio, por hallarse iluminado por la estrella, lo que hace que emita radiación infrarroja, que permite su detección.

Otros astrónomos, como Mauricio Tapia, han estudiado la emisión infrarroja de las nebulosas planetarias. Para detectar esta radiación, Tapia diseñó un instrumento para el mayor te-

lescopio mexicano que está en la sierra de San Pedro Mártir, en Baja California. Años más tarde, Irene Cruz-González y Luis Salas han construido otro instrumento infrarrojo mucho más poderoso para observar nebulosas planetarias, entre otros objetos.

NEBULOSAS PLANETARIAS EN RADIOFRECUENCIAS

Luis Felipe Rodríguez ha estudiado las nebulosas planetarias usando las ondas de radio, lo que ha permitido determinar las características del disco que rodea las estrellas centrales. Yolanda Gómez estudia algunas moléculas que se encuentran en discos alrededor de nebulosas planetarias muy jóvenes o en formación. En ciertos discos se encuentran regiones densas de gas en las que ocurre el "efecto máser", que es el equivalente al "efecto láser" pero en microondas. En estas regiones la radiación se amplifica y permite estudios muy detallados de la posición de las mismas, lo cual favorece el conocimiento de los discos de gas y polvo alrededor de nebulosas planetarias recién formadas. Recientemente se encontró la presencia de campo magnético en el disco de gas y polvo alrededor de la nebulosa planetaria K3-35.

También Rodríguez y Gómez han determinado la expansión de las "asas" de la nebulosa planetaria NGC 7009 empleando la observación de radio mediante el arreglo interferométrico llamado Very Large Array (VLA) (figura VI.2).

MODELOS MATEMÁTICOS

La ciencia no pretende descubrir la verdad absoluta, incluso ha demostrado que esto es imposible. Con frecuencia se elaboran modelos que nos ayudan a entender mejor algunos aspectos de la naturaleza. Para mejor interpretar las observaciones se ha-

cen modelos numéricos en los que se proponen ecuaciones matemáticas simples y se calculan las predicciones de las mismas. Estas predicciones se comparan con las observaciones y nos ayudan a interpretar las condiciones del gas y el polvo, los movimientos, su estructura, etcétera.

En este aspecto también son muchos los colegas que se han dedicado a este tipo de trabajo. Por ejemplo, Guillermo García Segura calcula modelos de los movimientos del gas que emana de las estrellas en rotación, en presencia de campos magnéticos, para duplicar las formas observadas de las nebulosas.

Cuando se logra generar un modelo que sirve para explicar la historia de la evolución de una nebulosa planetaria, el autor del modelo se siente como un arqueólogo de los cielos. Mediante modelos se puede explicar con detalle cómo fue que una estrella se desprendió de parte de su materia, y cómo gracias a la luz que proviene de su enfriamiento confirmamos la existencia de procesos en el interior de la estrella que lograron modificar ligeramente los gases que hoy vemos en los elegantes halos.

MÁS DE LO HECHO EN MÉXICO

Una de las personas que se han dedicado toda su vida a las nebulosas planetarias y que han impulsado a los demás a hacerlo es Manuel Peimbert. Él propuso una clasificación para las nebulosas planetarias que se usa en todo el mundo. Esta clasificación depende de la composición química del gas de la nebulosa, lo que da pistas sobre la masa que tuvo al principio de su evolución la estrella que las forma. Peimbert también notó que el estudio de las nebulosas planetarias lejanas puede comprenderse mejor si se toma en cuenta que la distribución de la materia en la envoltura no es homogénea, con lo cual la temperatura tampoco será igual en regiones equidistantes de la estrella central.

Por su parte, Alberto López está interesado en medir las formas y movimientos del gas de las nebulosas planetarias, para una muestra grande de éstas. Gracias a esos estudios ha logrado explicar la estructura compleja de las nebulosas planetarias de varias envolturas.

A su vez, Margarita Rosado ha desarrollado otro instrumento para medir los movimientos de los gases de objetos como las nebulosas planetarias.

Además de los ya mencionados, podemos señalar que Joaquín Bohigas, Wolfgang Steffen, Peter Phillips y otros han dedicado mucho esfuerzo a conocer mejor las nebulosas planetarias.

PARA TERMINAR

Como hemos visto, la astronomía es una ciencia que emplea el ingenio del hombre para comprender los astros. El estudio de las nebulosas planetarias es importante para conocer cuál será el futuro del Sol.

En México se ha realizado investigación de primera línea, no sólo en el campo de las nebulosas planetarias, sino del conocimiento en general.

La ciencia es inacabable. Cuando se descubre alguna particularidad de la naturaleza de inmediato surgen varias incógnitas. Es decir, que entre más sabemos sobre cada uno de los temas, tomamos conciencia de que ignoramos más de lo que suponíamos.

Los estudios de astronomía requieren una fuerte preparación en física. Por tanto, en general se requiere estudiar la licenciatura en esta disciplina y posteriormente realizar estudios de posgrado en astronomía. Actualmente, en México se pueden cursar posgrados en astrofísica en el Distrito Federal, Baja California, Michoacán, Puebla, Guanajuato y Jalisco.

En la mayor parte de los estados de la República existen

sociedades astronómicas, sitios donde las personas se reúnen por el gusto de conocer los astros. En algunas sociedades se ofrecen conferencias, talleres de construcción de telescopios y, por supuesto, observaciones sin otro afán que el de conocer lo que está más allá. Las nebulosas planetarias son particularmente hermosas cuando se observan con un telescopio pequeño, pues se destaca su singular coloración.

- absorción:* Proceso mediante el cual la materia impide que la luz la atraviese. Los astrónomos se refieren a la absorción del medio interestelar cuando el gas o el polvo absorben luz de los objetos luminosos.
- año luz:* Una unidad de distancia que equivale al trayecto que recorre la luz en un año. Corresponde a 9.46 billones de kilómetros. Es útil para medir la distancia de las estrellas.
- asteroide:* Cuerpo sólido de unos cuantos kilómetros de diámetro que está en órbita en torno del Sol o de otras estrellas.
- astro:* Objeto celeste, como por ejemplo los planetas, satélites, estrellas, galaxias y las nebulosas planetarias.
- astrofísica:* Así se denomina a la astronomía moderna. En esta ciencia se aplican las leyes de la física para comprender la naturaleza y propiedades de los astros.
- astrología:* Seudociencia que pretende adivinar el temperamento y futuro de las personas a partir del análisis de la posición de los planetas el día de su nacimiento. No tiene ningún fundamento científico.
- astronomía:* Ciencia que estudia los astros y el universo en su conjunto. En su origen se ocupó de nombrar y clasificar los astros y predecir las posiciones de los planetas. Ahora es equivalente a la astrofísica.
- átomo:* La menor unidad de un elemento químico. Cuando se subdivide pierde sus propiedades químicas. Un átomo está formado

por un núcleo de protones y neutrones rodeado de una nube de electrones cuyo número es igual al de los protones.

campo magnético: Es un conjunto de fuerzas que afecta a los imanes. Las estrellas suelen tener campos magnéticos. En el Sol el campo magnético es el responsable de las manchas; en las nebulosas planetarias, de algunas estructuras de las envolturas.

carbono: Elemento químico con seis protones en el núcleo. Es el constituyente fundamental de las moléculas de los seres vivos.

clasificación estelar: Las estrellas se pueden clasificar de acuerdo con su temperatura. Una forma equivalente es respecto a su color.

cometa: Cuerpo congelado de varios kilómetros de diámetro que se rodea de gas incandescente cuando se acerca al Sol. El viento solar arrastra el gas y produce la cola del cometa.

constelación: Grupo arbitrario de estrellas que sirve para reconocerlas en el cielo. Se ha dividido la bóveda celeste en 88 constelaciones.

densidad: Es la masa de un objeto dividida entre el volumen. Un litro de agua tiene una densidad de un kilogramo por decímetro cúbico. La densidad de la Tierra es cinco veces mayor, lo cual significa que está compuesta principalmente de rocas, que son más densas que el agua.

diagrama Hertzsprung-Russell (diagrama H-R): Gráfica en la que se representa el brillo de las estrellas respecto de su color. O lo que es lo mismo, de sus magnitudes respecto de las temperaturas.

disco: Varios objetos tienen discos de partículas y gas que giran en torno de ellos. Hay discos alrededor de algunos planetas, estrellas, hoyos negros y galaxias.

energía: En física, y por lo tanto en astrofísica, la energía es la capacidad para llevar a cabo un trabajo. Por ejemplo, se necesita energía para acelerar un auto, calentar un alimento o hacer girar una turbina para producir electricidad.

envolvente: Este nombre se emplea para referirse a la parte externa gaseosa que rodea la estrella de una nebulosa planetaria.

espectro: Es la descomposición de la luz en todos sus colores. El arco iris es el espectro de la luz solar.

espejo: Un espejo astronómico es una superficie pulida de vidrio recubierta de aluminio que sirve para concentrar la luz de los astros.

estrella: Objeto celeste formado de gas incandescente en cuyo centro ocurren reacciones termonucleares.

estrella azul: Se refiere a las estrellas de mayor temperatura. Si están en la secuencia principal son muy brillantes, por lo que sólo viven unos cuantos millones de años.

estrella de neutrones: Objeto celeste muy compacto compuesto de neutrones. Se forman cuando una estrella de ocho veces más masa que el Sol concluye su evolución. Los átomos se convierten en neutrones debido a la enorme presión.

estrella enana blanca: Objeto muy compacto en el que concluyen su evolución las estrellas de poca masa. El Sol terminará su evolución como enana blanca.

estrella enana roja: Una estrella pequeña, de poco brillo, que consume su combustible nuclear lentamente y cuando lo agota se enfría.

estrella variable: Son muchas las estrellas que varían en su brillo. El periodo de su variación depende de su densidad. Las menos densas varían más despacio.

evolución estelar: Cambio que experimentan las estrellas a lo largo del tiempo. Comienza con su formación dentro de nubes de gas y polvo; continúa con la etapa en la cual obtienen su energía por medio de reacciones termonucleares, y termina con su extinción, la cual depende de su masa. Las estrellas de masa menor que la del Sol se apagan lentamente y terminan su evolución como enanas negras. Las de baja masa, aquellas con masas iniciales menores de ocho masas solares, terminan como enanas blancas. Las estrellas de masa elevada terminan como estrellas de neutrones u hoyos negros.

explosión de supernova: Fenómeno que ocurre cuando una estrella masiva alcanza el fin de su evolución. Durante la explosión se producen y se arrojan al espacio elementos químicos más pesa-

- dos que el hidrógeno y el helio. Algunas veces el núcleo de la estrella original se contrae bruscamente, produciendo una estrella de neutrones o un hoyo negro.
- filtro*: Elemento óptico de vidrio o plástico que sólo deja pasar luz de cierto color. En astronomía se emplea para resaltar algunas características de los astros.
- flujo bipolar*: Material arrojado por una estrella central en dos direcciones opuestas. Cuando una fuente de luz y viento está rodeada por una dona de partículas, forma un flujo de partículas perpendicular a la dona.
- formación estelar*: Descripción de la manera en que nacen las estrellas. Este proceso se lleva a cabo dentro de nubes de gas y polvo que se aglutinan para constituir las. El proceso de formación estelar dura miles de años.
- fotografía*: En este texto se emplea la palabra "fotografía" para referirse a la imagen de un objeto. Antes se empleaban emulsiones fotográficas sobre vidrio; ahora se utilizan elementos electrónicos para obtener las imágenes de un telescopio.
- fotón*: Es una partícula de luz. Su energía depende del color; ésta es inversamente proporcional a la longitud de onda. Viaja a 300 000 kilómetros por segundo.
- fuentes de rayos X*: Los astros emiten rayos X, los cuales se producen cuando cae materia hacia un hoyo negro.
- fusión*: Proceso en que se amalgaman núcleos atómicos para formar núcleos más pesados, con un mayor número de protones y neutrones. La fuente de energía de las estrellas se basa en la fusión de elementos como el hidrógeno y el helio para formar carbono, nitrógeno, oxígeno y otros elementos más pesados.
- galaxia*: Conglomerado de unos 100 000 millones de estrellas, gas, polvo y materia oscura. La parte visible de nuestra galaxia es la Vía Láctea.
- helio*: Elemento químico. Después del hidrógeno, es el más abundante del universo. Es un gas noble, lo que significa que no reacciona químicamente con otros elementos.

- hoyo negro*: Objeto celeste donde la gravedad es tan elevada que impide que la luz abandone su superficie.
- infrarrojo*: También llamada radiación infrarroja, es la radiación electromagnética con longitudes de onda de micras; es decir, mayores que las de la luz visible. Nosotros somos emisores de radiación infrarroja.
- ionizado*: Se refiere a un átomo que ha perdido uno o varios de sus electrones. En las nebulosas planetarias el hidrógeno está ionizado, perdió un electrón, y el helio puede estar una o dos veces ionizado, su núcleo perdió uno o dos electrones.
- lente*: Vidrio pulido que permite cambiar de dirección los rayos de luz. En los telescopios, sirve para interceptar los rayos de luz de los astros y concentrarlos para verlos más brillantes.
- línea de absorción*: Falta de luz en una longitud de onda (o frecuencia) específica con relación a la emisión en regiones cercanas del espectro. Cada línea es producida por la absorción de la luz por un átomo o una molécula. Los espectros de las estrellas presentan líneas de absorción que se producen en su superficie.
- línea de emisión*: Exceso de emisión de luz en una longitud de onda (o frecuencia) específica con relación a la emisión en regiones cercanas del espectro. Los espectros de las nubes de gas ionizado tienen líneas de emisión intensas producto de la recombinación de los electrones en átomos con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.
- línea espectral*: Se refiere a un color muy específico de un espectro, de una longitud de onda muy precisa. Por ejemplo, la línea del oxígeno es 501 nanómetros. Mediante la observación de las líneas espectrales se mide la velocidad radial, rotación, composición química, densidad y temperatura de los cuerpos observados.
- longitud de onda*: Distancia que corresponde en un movimiento de vaivén a una oscilación completa. Es la distancia entre dos crestas o valles de una onda.
- luminosidad*: En el caso de una estrella, se refiere a la energía por unidad de tiempo que emite en forma de luz. Se mide en watts. Depende de su temperatura y de su tamaño.

luz: En este texto se usa el término "luz" para referirse a la luz visible con su gama de colores, y a la radiación en otras longitudes de onda, como el ultravioleta o el infrarrojo.

luz ultravioleta: Radiación electromagnética con longitud de onda menor que la luz visible, y por lo tanto de mayor energía. Las estrellas muy calientes y los núcleos de las nebulosas planetarias emiten radiación ultravioleta.

magnitud: Medida del brillo de una estrella. Las estrellas que podemos ver a simple vista tienen magnitudes que van de 0 a 6. Con binoculares se puede ver hasta magnitud 10 y con grandes telescopios se alcanza hasta 24.

masa: Medida de la cantidad de materia que tiene un cuerpo. Es la masa de los cuerpos la que ejerce fuerza gravitacional sobre los demás.

materia oscura: Materia que no interactúa con la radiación electromagnética, no la emite ni la absorbe. Se detecta por la fuerza gravitacional que ejerce sobre los objetos visibles, por ejemplo, haciéndolos girar en torno a ella.

medio interestelar: Espacio que está entre las estrellas. Allí la densidad de gases es muy baja. A la materia que ahí se encuentra se le llama materia interestelar.

microondas: Ondas de radio de alta frecuencia y por consiguiente de longitudes de onda más cortas en comparación con éstas. Tienen la propiedad de excitar la molécula del agua, por lo que se utilizan en los hornos de microondas para calentar alimentos que contengan ese líquido.

molécula: Conglomerado de átomos que están unidos químicamente. En las nebulosas planetarias se observan moléculas de agua, monóxido de carbono y amoníaco.

nanómetro (nm): Unidad de medida adecuada para la longitud de onda de la luz. Es la millonésima parte de un milímetro. Por ejemplo, el ojo humano percibe de 350 a 700 nanómetros, y las líneas brillantes verde y roja de las nebulosas planetarias tienen longitudes de onda de 501 y 654 nanómetros.

nebulosa planetaria: Astro formado por una estrella central muy caliente y una envoltura gaseosa cercana a ésta. Se trata de las etapas finales de la evolución de las estrellas similares al Sol.

neutrón: Partícula elemental neutra y de masa similar a la del protón. Es un componente fundamental de los núcleos atómicos. Los isótopos difieren entre sí por el número de neutrones que tienen en el núcleo. Los neutrones tienen una vida media de tan sólo 10 minutos cuando están fuera del núcleo, a diferencia de los protones, cuya vida media es de un trillón de trillones de años.

nube molecular: Conglomerado de gas y polvo relativamente denso y frío, a partir del cual se forman las estrellas. En la galaxia se encuentran distribuidas en el plano. Están compuestas principalmente de hidrógeno molecular y otras moléculas, como el CO.

nucleosíntesis: Proceso mediante el cual se forman nuevos elementos químicos a partir de reacciones atómicas. La nucleosíntesis se lleva a cabo en el interior de las estrellas y durante las explosiones de supernovas. El Sol obtiene su energía de transformar hidrógeno en helio; es decir, transforma el primer elemento en el segundo por medio de la nucleosíntesis.

objetos celestes: Cuerpos que existen en el universo. Hay objetos brillantes como las estrellas y nubes de gas caliente; también hay cuerpos celestes opacos, que pueden reflejar la luz de las estrellas, como los planetas, satélites y partículas de polvo. Además existe materia oscura que no emite luz.

observaciones astronómicas: La obtención de datos relativos a los cuerpos celestes. Para lograrlas se utilizan telescopios y satélites, según la longitud de onda de la radiación que se quiera analizar. Se pueden tomar imágenes de los cuerpos; también descomponer la luz y tomar espectros.

observatorio astronómico: Sitio donde se encuentran los telescopios y demás instrumentos auxiliares. En general se localizan en lugares aislados y elevados. Se buscan cielos despejados en áreas alejadas de la luz de las ciudades.

Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir: Se localiza

- en la sierra de San Pedro Mártir, Baja California, a 2800 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con un telescopio de 2.1 metros de diámetro, uno de 1.5 metros y otro de 84 centímetros. Es parte del Instituto de Astronomía de la UNAM. Se ha utilizado para estudios en luz visible e infrarroja de estrellas, nebulosas planetarias y galaxias. Los estudios incluyen imágenes directas y espectroscopia con detectores modernos.
- ondas de radio:** Radiación electromagnética con longitud de onda mayor que un milímetro. Varios átomos y moléculas del medio interestelar emiten ondas de radio. Éstas pueden atravesar grandes distancias sin ser absorbidas por el polvo, y por eso son muy útiles en astronomía.
- oxígeno:** El elemento más abundante en la Tierra. Se produce en el interior de las estrellas de gran masa y se lanza al espacio durante las explosiones de supernovas.
- paralaje:** La diferencia del ángulo de posición de un astro cuando se observa desde dos puntos diferentes de la órbita terrestre.
- pársec:** Unidad de distancia que utilizan los astrónomos. Es igual a 3.26 años luz. Se trata de la distancia a la que se encuentra un objeto cuya paralaje sea de un segundo de arco. Un pársec es igual a 3.09 trillones de centímetros ($1 \text{ pársec} = 3.09 \times 10^{18} \text{ cm}$) o 30.9 billones de kilómetros.
- plano de la galaxia:** Región de la Vía Láctea en forma de disco donde se encuentran las estrellas jóvenes, los brazos espirales y las nubes de gas y polvo. Mide 100 000 años luz de diámetro y 1 000 años luz de espesor.
- polvo interestelar:** Pequeñísimas partículas sólidas en el medio interestelar. Algunas están formadas de silicio, carbono o metales y están recubiertas de hielos de sustancias como el agua, el dióxido de carbono o el metano.
- protón:** Partícula elemental que se encuentra en los núcleos atómicos. Tiene carga positiva. Es un constituyente fundamental del átomo. El átomo de hidrógeno tiene un protón en el núcleo, y el de carbono, seis.

- radiación electromagnética:** Combinación de un campo eléctrico y uno magnético que transporta energía. Comprende todas las longitudes y energías posibles. Se trata de la luz. El fotón es la partícula asociada a la radiación electromagnética.
- radiotelescopio:** Antena, o conjunto de ellas, que se utiliza para detectar emisión de radio proveniente del espacio. Gracias a los radiotelescopios se han detectado innumerables radiofuentes, así como la presencia de moléculas interestelares, como la del agua.
- rayos gamma:** Parte de la radiación electromagnética de longitud de onda extremadamente corta, y por consiguiente de enorme energía. Se producen durante las explosiones de supernova y cuando colisionan entre sí estrellas compactas, como hoyos negros y estrellas de neutrones.
- rayos X:** Parte de la radiación electromagnética de gran energía; corresponde a una longitud de onda de milésimas de micra. Los discos de acreción que rodean objetos compactos, como los agujeros negros, emiten rayos X. Es necesario emplear satélites para observar rayos X provenientes del cosmos.
- reacciones termonucleares:** Procesos por los cuales se combinan o se fragmentan los núcleos de los átomos con la liberación o absorción de energía y de partículas, y la subsecuente formación de nuevos elementos. La fusión es cuando se unen y la fisión es cuando se fragmentan.
- satélite:** Objeto que se traslada en torno de un planeta o asteroide sin necesidad de propulsión. Los satélites naturales son lunas. Los humanos construyen satélites artificiales que ponen en órbita con un cohete.
- secuencia principal:** Franja de estrellas en el diagrama H-R. Corresponde a la configuración de la mayoría de las estrellas y por lo tanto a la región en el diagrama donde pasan más tiempo estos astros.
- señal:** En astronomía así se denomina a la radiación que emite un objeto.
- sistema binario:** Un objeto binario está formado por dos estrellas,

cada una girando en torno de la otra. Existen nebulosas planetarias con estrellas binarias en la región central.

sistema solar: Está compuesto de los distintos objetos que se trasladan en torno al Sol. Planetas, planetas enanos, satélites, asteroides, cometas y partículas de los anillos.

Sol: Estrella más cercana a la Tierra. Es la responsable de la mayor cantidad de luz y energía que recibimos en nuestro planeta.

superficie estelar: Zona más externa de las estrellas, donde se emite la luz que llega a la Tierra. La luz de las zonas más profundas no se alcanza a ver porque los gases externos lo impiden. Solamente recibimos la luz de las zonas más externas.

supernova: Explosión de una estrella de gran masa. Durante esta explosión se forman los elementos más pesados y se arrojan al espacio.

telescopio: Instrumento que se emplea para captar luz de los astros. Su principal propósito no es ver los objetos celestes más grandes, sino más brillantes.

ultravioleta: Radiación electromagnética de longitud de onda menor que la visible. Es la que nos produce quemaduras solares. Las estrellas muy calientes emiten luz ultravioleta.

unidad astronómica: Distancia promedio que hay entre la Tierra y el Sol; corresponde a 150 millones de kilómetros. Plutón se encuentra a 39 unidades astronómicas del Sol.

Unión Astronómica Internacional: Sociedad que reúne a los astrónomos profesionales de todo el mundo. Decide cuestiones como el valor de las constantes, los sistemas de referencia y los nombres de los astros.

velocidad de la luz: Velocidad a la que viaja la radiación electromagnética, y por lo tanto los fotones. Es igual a 300 000 kilómetros por segundo. Es la velocidad más alta de la naturaleza.

velocidad radial: Velocidad de un objeto a lo largo de la línea visual del observador; es decir, la velocidad a la que se acerca o se aleja un objeto.

Vía Láctea: Banda de luz tenue que atraviesa el cielo y que proviene

del conjunto de las estrellas del plano de la galaxia. Su nombre deriva de su aspecto lechoso. Por extensión, es el nombre de la galaxia en la que está situado el sistema solar.

viento estelar: Flujo de partículas provenientes de la mayor parte de las estrellas. Es un mecanismo eficiente mediante el cual las estrellas pierden masa.

Mientras
los astrónomos
estudian las nebulosas
e indagan cuál será el futuro
del Sol, Guillermo Carmona Vargas, del
Departamento de Integración Digital del ICA,
formó esta obra — *Nebulosas planetarias: la
hermosa muerte de las estrellas* —, que escribieron
Silvia Torres y Julieta Fierro—, en la que usó tipos
Minion de 12:14, 11:14, 10:14 y 9:10 puntos. Teresa
Guzmán Roncero creó la portada y Rubén Hurtado
López se encargó del cuidado de la obra, de la cual
se hicieron 5000 ejemplares, que se imprimieron
y encuadernaron en mayo de 2009
en Impresora y Encuadernadora Progreso,
S. A. de C. V. (IEPESA), Calzada
San Lorenzo, 244-09830
México, D. F.

En siete mil millones de años nuestro Sol se convertirá en una nebulosa planetaria y luego morirá. Las nebulosas planetarias son estrellas en su proceso final de evolución, al estudiarlas conocemos el futuro del Sol y de gran parte del universo. Si tomamos un telescopio pequeño y apuntamos al cielo, el objeto celeste más hermoso con el que nos toparemos seguramente será una nebulosa planetaria.

Silvia Torres y Julieta Fierro nos relatan la manera en que los astrónomos han logrado desentrañar las cualidades de estos cuerpos celestes, desde William Herschel, y su hermana Caroline (los primeros descubridores) hasta los astrónomos mexicanos que han hecho importantes contribuciones a su estudio. La descripción cronológica de los descubrimientos se complementa con otro relato: el de la vida de las estrellas. A lo largo de estos párrafos se ejemplifica además la importancia de los instrumentos de observación que, como el telescopio, se han convertido en la herramienta fundamental de la astronomía moderna.

Silvia Torres es investigadora en el Instituto de Astronomía de la UNAM y cuenta con una maestría en astronomía por la Universidad de Berkeley, California. Entre otras distinciones ha recibido la Medalla de Honor de la Sociedad Mexicana de Física, el Premio Universidad Nacional en el área de Ciencias Exactas y el Premio Nacional de Ciencias 2007.

Julieta Fierro labora en el Instituto de Astronomía de la UNAM. Se dedica a la divulgación de la ciencia a través de medios escritos, de la radio, de la televisión y dictando conferencias. Ocupa la silla xxv de la Academia Mexicana de la Lengua y ha recibido numerosos reconocimientos tanto en México como en el extranjero.

LA
CIENCIA
PARA
TODOS

220