

# opa2

## **OLIMPIADA PARAGUAYA DE ASTRONOMIA Y ASTRONAUTICA**

- Material de apoyo -

Preparado por  
Club de Astrofísica del Paraguay  
Centro Paraguayo de Informaciones Astronómicas

con el apoyo de  
OMAPA

Club de Astrofísica del Paraguay (CAP)  
Juan Escalada 480 c/ 14 de mayo  
B° Obrero – Asunción, Paraguay

Centro Paraguayo de Informaciones Astronómicas (CPIA)  
Sofía Mendoza 145 c/ Ave. Fernando de la Mora  
B° Ysaty – Asunción, Paraguay  
<http://www.cpia.org/>

Organización Multidisciplinaria de Apoyo a Profesores y Alumnos  
(Olimpiadas Matemáticas Paraguayas – OMaPa)

Título:

Material de Apoyo / Olimpiadas Paraguayas de Astronomía y Astronáutica.

Autores – Colaboradores – Revisores:

Norberto Martínez (CAP); Félix Piriú (CeDIA); Eduardo Poissoneau (CAP);  
Waldemar Villamayor-Venialbo (CPIA), editor; Miguel Ángel Volpe (CAP),  
editor.

Copyright © 2011 — CPIA. Todos los derechos reservados.

La reproducción de todo o parte de este material por cualquier medio o procedimiento más allá de lo permitido por las leyes internacionales de derechos de autor sin permiso expreso del propietario de los derechos intelectuales es ilegal. Las solicitudes de permiso o de información debe ser dirigida al CPIA.

Este material está disponible en una versión digital que se distribuye gratuitamente de manera electrónica, en formato PDF, para su uso con propósitos educativos; contacte al CPIA para obtener una copia.

Coordinación general  $\sigma\pi\alpha^2$ : Miguel Ángel Volpe <[mvolpe@cpia.org](mailto:mvolpe@cpia.org)>  
Formateado en  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  por W. Villamayor-Venialbo <[wvilla@cpia.org](mailto:wvilla@cpia.org)>  
Impreso en Paraguay.

# Índice general

<b>I El Sistema Solar</b>	<b>1</b>
<b>1. Origen del Sistema Solar</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción . . . . .	3
1.2. Teorías sobre el origen del Sistema Solar . . . . .	3
1.2.1. La Teoría de acreción . . . . .	4
1.2.2. La Teoría de los protoplanetas . . . . .	4
1.2.3. La Teoría de la captura . . . . .	4
1.2.4. La Teoría laplaciana moderna . . . . .	4
1.2.5. La Teoría moderna de la nebulosa . . . . .	5
<b>2. El Sol</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	7
2.2. El ciclo solar . . . . .	7
2.3. Las manchas solares . . . . .	8
2.4. La fotosfera, la cromosfera y la corona . . . . .	8
2.5. Las prominencias . . . . .	9
<b>3. Planetas</b>	<b>11</b>
3.1. Mercurio . . . . .	11
3.2. Venus . . . . .	12
3.3. Marte . . . . .	15
3.4. Júpiter . . . . .	16
3.5. Saturno . . . . .	18
3.6. Urano . . . . .	20
3.7. Neptuno . . . . .	22
<b>4. Planetas enanos</b>	<b>25</b>
4.1. Introducción . . . . .	25
4.2. Plutón . . . . .	25
4.3. Ceres . . . . .	27
4.4. Eris . . . . .	28
4.5. Makemake . . . . .	29
4.6. Haumea . . . . .	29

<b>5. Planetoides y meteoroides</b>	<b>33</b>
5.1. Los asteroides	33
5.1.1. El grupo Aten–Apollo–Amor	34
5.2. Los cometas	36
5.3. Cinturón de Kuiper	38
5.3.1. Referencias históricas	39
5.3.2. Objetos del cinturón de Kuiper	39
5.3.3. Características orbitales	39
5.3.4. Origen del cinturón de Kuiper	40
5.3.5. Exploración del cinturón de Kuiper	40
5.3.6. Acantilado de Kuiper	41
5.4. La nube de Oort	41
5.5. Los meteoros	42
5.5.1. Lluvias de meteoros	42
5.5.2. Meteoros esporádicos	43
5.6. Los meteoritos	44
<b>6. La Luna</b>	<b>45</b>
6.1. Introducción	45
<b>7. Satélites y anillos planetarios</b>	<b>49</b>
7.1. Introducción	49
<b>II Astrofísica</b>	<b>51</b>
<b>8. Las estrellas</b>	<b>53</b>
8.1. Introducción	53
8.2. Clasificación	55
<b>9. La evolución de las estrellas</b>	<b>57</b>
9.1. Introducción	57
9.2. La vida de una estrella	58
9.3. De estrella a agujero negro	59
9.4. Estrellas dobles	59
9.5. Estrellas variables	60
9.5.1. Variables cefeidas	60
9.6. Novas y supernovas	61
9.6.1. Novas, ¿estrellas nuevas?	61
9.6.2. Supernovas	62
9.7. Púlsares	62
9.8. Agujeros negros	64
9.9. Conos luminosos	65

<b>10.Las galaxias</b>	<b>67</b>
10.1. Introducción . . . . .	67
10.2. Clasificación . . . . .	68
10.2.1. Galaxias elípticas . . . . .	68
10.2.2. Galaxias espirales . . . . .	69
10.2.3. Galaxias lenticulares . . . . .	70
10.2.4. Galaxias irregulares . . . . .	70
10.3. Cúmulos galácticos . . . . .	70
10.3.1. Supercúmulos de galaxias . . . . .	71
<b>11.La Vía Láctea</b>	<b>73</b>
11.1. Un camino en el cielo . . . . .	73
11.2. La Vía Láctea, nuestra galaxia . . . . .	73
<b>12.Cúmulos de estrellas</b>	<b>75</b>
12.1. Introducción . . . . .	75
12.2. Cúmulos abiertos . . . . .	75
12.3. Cúmulos globulares . . . . .	76
<b>13.Las nebulosas</b>	<b>79</b>
13.1. Introducción . . . . .	79
13.2. Tipos de nebulosas . . . . .	81
13.2.1. Nebulosas planetarias . . . . .	81
13.2.2. Objetos Herbig-Haro . . . . .	82
<b>14.Cuásares</b>	<b>83</b>
14.1. Introducción . . . . .	83
<b>15.Cosmología</b>	<b>85</b>
15.1. El origen y la evolución del Universo . . . . .	85
15.2. Explicaciones que debe dar una teoría . . . . .	86
15.2.1. La expansión del Universo . . . . .	86
15.2.2. La Ley de Hubble . . . . .	87
15.2.3. La radiación cósmica de fondo . . . . .	87
15.2.4. Las fuerzas fundamentales del Universo . . . . .	87
15.2.5. El Universo en movimiento . . . . .	88
15.3. La Teoría del Big-Bang . . . . .	88
15.4. La Teoría inflacionaria . . . . .	89
15.5. Otros modelos . . . . .	89
15.5.1. La Teoría del universo pulsante . . . . .	89
15.5.2. La Teoría del estado estacionario . . . . .	90
15.5.3. Más hipótesis . . . . .	90

<b>III Fenómenos astronómicos</b>	<b>93</b>
<b>16.Movimiento orbital</b>	<b>95</b>
16.1. Introducción . . . . .	95
16.2. Las leyes de Képler . . . . .	97
16.3. Las leyes de Newton . . . . .	101
16.3.1. Las leyes del movimiento . . . . .	101
16.3.2. La ley de la gravitación universal . . . . .	103
<b>IV Tecnología Aeroespacial</b>	<b>105</b>
<b>17.Cohetes hidroneumáticos</b>	<b>107</b>
17.1. Introducción . . . . .	107
17.2. Fases de vuelo . . . . .	108
17.3. Funcionamiento . . . . .	109
17.3.1. Leyes de Newton . . . . .	110
17.3.2. Principio de Bernouilli . . . . .	110
17.4. Criterios de diseño . . . . .	112
17.4.1. La estabilidad del cohete. . . . .	112
<b>V Apéndice</b>	<b>117</b>

**Parte I**

**El Sistema Solar**





# Capítulo 1

## Origen del Sistema Solar

### 1.1. Introducción

Las primeras explicaciones sobre cómo se formaron el Sol, la Tierra, y el resto del Sistema Solar se encuentran en los mitos primitivos, leyendas y textos religiosos. Ninguno de ellas puede considerarse como una explicación científica seria.

Los primeros intentos científicos para explicar el origen del Sistema Solar invocaban colisiones o condensaciones de una nube de gas. El descubrimiento de los 'Universos-Islas', que ahora sabemos que son galaxias, se pensó que confirmaba esta última teoría.

En este siglo, Jeans propuso la idea de que el paso de una estrella había arrasado material fuera del Sol, y que este material se había entonces condensado para formar los planetas.

Hay serios problemas en esta explicación, pero se han hecho recientes desarrollos sugiriendo que se sacó un filamento de una proto-estrella de paso, en momentos en los que el Sol era miembro de un holgado cúmulo de estrellas, pero las teorías más favorecidas, todavía involucran el colapso gravitacional de una nube de gas y polvo.

### 1.2. Teorías sobre el origen del Sistema Solar

Cualquier teoría tiene que explicar algunos hechos bastante problemáticos sobre el Sistema Solar. Esto, adicionalmente al hecho obvio de que el Sol está en el centro con los planetas orbitando a su alrededor.

Hay 4 de estas áreas de problemas:

1. El Sol gira lentamente y sólo tiene 1 por ciento del momento angular del Sistema Solar, pero tiene el 99,9 por ciento de su masa. Los planetas tienen el resto del momento angular.
2. La formación de los planetas terrestres con núcleos sólidos.

3. La formación de los planetas gaseosos gigantes.
4. La formación de los satélites planetarios.

Hay cinco teorías que son todavía consideradas razonables, puesto que explican muchos, pero no todos, de los fenómenos que exhibe el Sistema Solar.

### 1.2.1. La Teoría de acreción

Esta asume que el Sol pasó a través de una densa nube interestelar, y emergió rodeado de un envoltorio de polvo y gas. Separa entonces la formación del Sol, de la de los planetas, obviando el problema 1. El problema que permanece, es el de lograr que la nube forme los planetas. Los planetas terrestres pueden formarse en un tiempo razonable, pero los planetas gaseosos tardan demasiado en formarse.

La teoría no explica los satélites, y debe considerarse como la más débil de las aquí descritas.

### 1.2.2. La Teoría de los protoplanetas

Esta asume, que inicialmente hay una densa nube interestelar, que eventualmente producirá un cúmulo estelar. Densas regiones en la nube se forman y coalescen; como las pequeñas gotas tienen velocidades de giro aleatorias, las estrellas resultantes tienen bajas tasas de rotación.

Los planetas son gotas más pequeñas capturadas por la estrella. Las pequeñas gotas tendrían velocidades de rotación mayores que las observadas en los planetas, pero la teoría explica esto, haciendo que las 'gotas planetarias' se dividan, produciendo un planeta y sus satélites.

De esta forma se cubren muchas de las áreas problemáticas, pero no queda claro cómo los planetas fueron confinados a un plano, o por qué sus rotaciones tienen el mismo sentido.

### 1.2.3. La Teoría de la captura

En esta teoría el Sol interactúa con una proto-estrella cercana, sacando un filamento de materia de la proto-estrella. La baja velocidad de rotación del Sol, se explica como debida a su formación anterior a la de los planetas.

Los planetas terrestres se explican por medio de colisiones entre los protoplanetas cercanos al Sol, los planetas gigantes y sus satélites, se explican como condensaciones en el filamento extraído.

### 1.2.4. La Teoría laplaciana moderna

Laplace en 1796 sugirió primero, que el Sol y los planetas se formaron en una nebulosa en rotación que se enfrió y colapsó. Se condensó en anillos que eventualmente formaron los planetas, y una masa central que se convirtió en el Sol. La baja velocidad de rotación del Sol no podía explicarse.

La versión moderna asume que la condensación central contiene granos de polvo sólido que crean roce en el gas al condensarse el centro. Eventualmente, luego de que el núcleo ha sido frenado, su temperatura aumenta, y el polvo es evaporado. El centro que rota lentamente se convierte en el Sol. Los planetas se forman a partir de la nube, que rota más rápidamente.

### 1.2.5. La Teoría moderna de la nebulosa

Las observaciones de estrellas muy jóvenes, indican que están rodeadas de densos discos de polvo. Aunque todavía hay dificultades para explicar algunas de las áreas problemáticas esbozadas arriba, en particular la forma de disminuir la rotación del Sol, se piensa que los planetas se originaron a partir de un denso disco, formado a partir del material de la nube de polvo y gas, que colapsó para formar el Sol. La densidad de este disco debe ser suficientemente alta como para permitir la formación de los planetas, y suficientemente baja, como para que la materia residual sea soplada hacia afuera por el Sol, al incrementarse su producción de energía.

Han habido muchos intentos de desarrollar teorías sobre el origen del Sistema Solar. Ninguna de ellas puede describirse como totalmente satisfactoria, y es posible que haya desarrollos ulteriores que expliquen mejor los hechos conocidos.

Pensamos sin embargo, que entendemos el mecanismo general, que consiste en que el Sol y los planetas se formaron a partir de la contracción de parte de una nube de gas y polvo, bajo su propia atracción gravitacional, y que la pequeña rotación neta de la nube, fue responsable de la formación de un disco alrededor de la condensación central. La condensación central eventualmente formó al Sol, mientras que las condensaciones menores en el disco formaron los planetas y sus satélites. La energía del joven Sol sopló el remanente de gas y polvo, dejando al Sistema Solar como lo vemos actualmente.



# Capítulo 2

## El Sol

### 2.1. Introducción

El diámetro del Sol es de 1.400.000 Km., que es más de 100 veces mayor que el diámetro de la Tierra. Su masa es más de 300.000 la de la Tierra. El Sol es un cuerpo gaseoso muy caliente compuesto de cerca de 75 % hidrógeno, 25 % helio, menos de 1 % de oxígeno, todos los otros elementos constituyen menos del 1 %. La temperatura de su superficie es de cerca de 6.000° C.

La fuente de energía en el Sol, es la fusión de núcleos de hidrógeno (protones) en núcleos de helio. En este proceso, se pierde una pequeña cantidad de masa que es transformada en energía. Esta reacción nuclear, sólo puede ocurrir en el muy caliente (15.000.000° C) y denso centro del Sol.

El Sol pierde medio millón de toneladas cada segundo en esta destrucción de masa para producir energía, pero mantendrá su actual producción de energía durante cerca de 5.000 millones de años. Durante este largo período de tiempo, el Sol es una estrella de la secuencia principal, pero eventualmente todo el hidrógeno en el centro se habrá convertido en helio. El balance entre la fuerza de gravedad, que atrae toda la masa del Sol hacia su centro, y la fuerza debida a la energía del Sol, que empuja la materia hacia afuera, se perderá entonces. El centro se contraerá y se hará aún más caliente, mientras que la parte exterior se expandirá y se enfriará. El Sol será entonces más brillante, más frío, y mayor – una estrella roja gigante.

Al final todas las fuentes de producción de energía llegarán a su fin, y el Sol colapsará para convertirse en un objeto muy pequeño y caliente, llamado una enana blanca.

### 2.2. El ciclo solar

El Sol, visto desde la Tierra, rota sobre su eje en algo más de 27 días, y su actividad aumenta y disminuye en un ciclo de aproximadamente 11 años, produciendo variaciones en el campo magnético de la Tierra, y cambios en nuestra

atmósfera superior (la ionosfera), que mundiales. Este ciclo de actividad fue descubierto por el astrónomo amateur Alemán Heinrich Schwabe como resultado de observaciones hechas entre 1826 y 1843; en los siguientes diez años, se estableció una relación. Al principio de cada ciclo, las Manchas Solares ocurren en las altas latitudes del Sol (a cerca de  $40^\circ$  de su ecuador), y en el curso de cerca de 11 años, ocurren en latitudes cada vez menores, e incluso sobre el ecuador mismo.

Si graficamos contra el tiempo, las latitudes y duraciones de las Manchas, esto produce un 'Diagrama de Mariposa'.

El aumento y subsecuente disminución de las Manchas, también se muestran en este tipo de diagrama. La forma del gráfico es muy similar a la de los gráficos correspondientes de las variaciones del campo magnético de la Tierra, mostrando la íntima relación entre la actividad del Sol y sus efectos en la Tierra.

El período de aumento desde la fase del mínimo (durante él que las Manchas pueden estar ausentes por varias semanas) hasta la fase del máximo (cuando 20 o más grupos pueden estar presentes a la vez), dura cuatro años en promedio, y la caída hasta el próximo mínimo dura siete años. En los últimos 100 años el período de aumento ha estado entre 3,3 y 5,0 años, y el período de disminución entre 5,7 y 8,3 años, de modo que es difícil hacer predicciones sobre un período de tiempo.

### 2.3. Las manchas solares

Estas regiones se ven como marcas oscuras en la superficie del Sol. Tienen una temperatura de cerca de  $4.800^\circ\text{C}$ , parecen oscuras por contraste con la superficie más brillante que las rodea, cuya temperatura es de cerca de  $6.000^\circ\text{C}$ .

La vida de una mancha solar puede ser tan corta como unas pocas horas, o tan larga como varios meses. Algunas son observadas durante varias revoluciones del Sol sobre su eje, y en ese caso pueden sólo ser observadas durante cerca de la mitad de su duración, debido a que durante 13 o 14 días de la revolución de 27 días, están en el hemisferio que no resulta visible desde la Tierra.

Las manchas solares pueden ocurrir individualmente o en grupos, y pueden ser de muy diversos tamaños. Las manchas solares grandes pueden a veces ser visibles a simple vista, cuando se las ve a través de niebla, o cuando el Sol está apagado y rojo durante el amanecer o atardecer. En otros momentos el disco es demasiado brillante para observarlo directamente. Las manchas solares con áreas de sólo una millonésima representan el otro extremo de la escala.

### 2.4. La fotosfera, la cromosfera y la corona

El disco aparente del Sol es llamado la fotosfera. Puede observarse que el disco se hace menos brillante hacia el borde. Esto se llama oscurecimiento del borde. A veces, cerca del máximo de las Manchas Solares, pueden observarse áreas brillantes cercanas al borde, con frecuencia cerca de los grupos de Manchas

Solares. Éstas son llamadas fáculas. Puede observarse que la superficie del Sol, a través de un telescopio, tiene un aspecto granular. Estos gránulos son las celdas de convección que traen la energía desde abajo de la superficie aparente. Afuera de la fotosfera están la cromosfera y la corona solar, que sólo pueden observarse con equipos especiales o durante un eclipse total de Sol. La cromosfera es algo más fría que la fotosfera, pero es más activa porque las prominencias solares pasan a través de ella. Éstas toman dos formas; durmientes, grandes estructuras arqueadas asociadas con los campos magnéticos alrededor de los grupos de Manchas Solares; y activas, que son eventos más violentos asociados con las prominencias solares.

La corona es una muy caliente, un millón de grados, extensión del Sol. Es la Corona lo que da al Sol totalmente eclipsado su bella apariencia.

## 2.5. Las prominencias

Usualmente asociadas con las manchas solares, se las observa como un aumento del brillo en las áreas de hidrógeno, conocidas como flóculos, y pueden dar lugar a estallidos de intensa radiación en la región ultravioleta del espectro solar, que causan repentinas alteraciones ionosféricas y desvanecimientos de radio, causando la interrupción de las comunicaciones en el hemisferio iluminado de la Tierra. Las prominencias también arrojan chorros de partículas eléctricamente cargadas que afectan al campo magnético de la Tierra, y causan 'tormentas' geomagnéticas, alteraciones que afectan las brújulas. Estas tormentas son a veces acompañadas en las altas latitudes por las auroras boreales, o luces del Norte.

Las prominencias solares varían en tamaño e intensidad, las más pequeñas duran sólo unos minutos antes de que el brillo comience a desvanecerse. Estas pequeñas prominencias no producen efectos apreciables, pero una gran prominencia puede durar varias horas y producir desvanecimientos de radio totales o parciales durante un período correspondiente.





## Capítulo 3

# Planetas

### 3.1. Mercurio

Mercurio es el planeta más cercano al Sol. Con un diámetro de 4880 km, es el segundo más pequeño. Su órbita alrededor del Sol es marcadamente elíptica en 88 días. Su distancia al Sol varía entre 0,31UA y 0,47UA. Mercurio tiene un período de rotación de 58,6 días, que es dos tercios de su período orbital.

La mayoría de nuestros conocimientos sobre la superficie de Mercurio fueron obtenidos durante los acercamientos del Mariner 10 en mayo de 1974. La superficie es muy semejante a la de la Luna, con muchos cráteres de diversos tamaños y planicies de lava llamadas mares. También hay estructuras semejantes a acantilados poco profundos, que no se observan en la Luna, se piensa que son el resultado del arrugamiento de la superficie a medida que el planeta se enfriaba y encogía. Los cráteres más grandes en Mercurio están bien preservados y, ya que tienen unos 3 o 4 millones de años de antigüedad, indican que no ha habido migración de placas—como la observada en la Tierra—desde entonces.

Mercurio casi no tiene atmósfera, y como está muy cerca del Sol tiene muy altas temperaturas de mediodía, cercanas a 450°C, y bajas temperaturas nocturnas, -180°C. No tiene estaciones, como tienen la Tierra y Marte; en su lugar tiene una variación estacional con la longitud en la superficie del planeta. Esto es debido al acoplamiento entre los períodos de rotación y traslación.

Posee un pequeño campo magnético, y probablemente tiene un gran núcleo de níquel-hierro. Las longitudes cerca de 0° y de 180° reciben en promedio dos veces y media más radiación que aquellas cerca de 90° y de 270°.

Debido a que la órbita de Mercurio está muy adentro de la de la Tierra, nunca se lo encuentra lejos del Sol, en el cielo. Sólo puede observarse con el ojo desnudo, cuando está cerca de sus llamadas grandes elongaciones, cuando está más lejos del Sol en el cielo. Aún así es difícil de verlo desde las latitudes elevadas y se requiere un horizonte despejado. Lo mejor que se lo puede ver, es como un objeto semejante a una estrella, muy bajo sobre el horizonte, después del atardecer o antes del amanecer. En un pequeño telescopio puede observarse

que tiene un pequeño disco de entre  $5''$  y  $15''$  de diámetro. El disco muestra fases, como las de la Luna, lleno en conjunción superior, cuando Mercurio está más lejos de la Tierra y detrás del Sol, y nuevo cuando está entre la Tierra y Sol. Mercurio no tiene lunas.

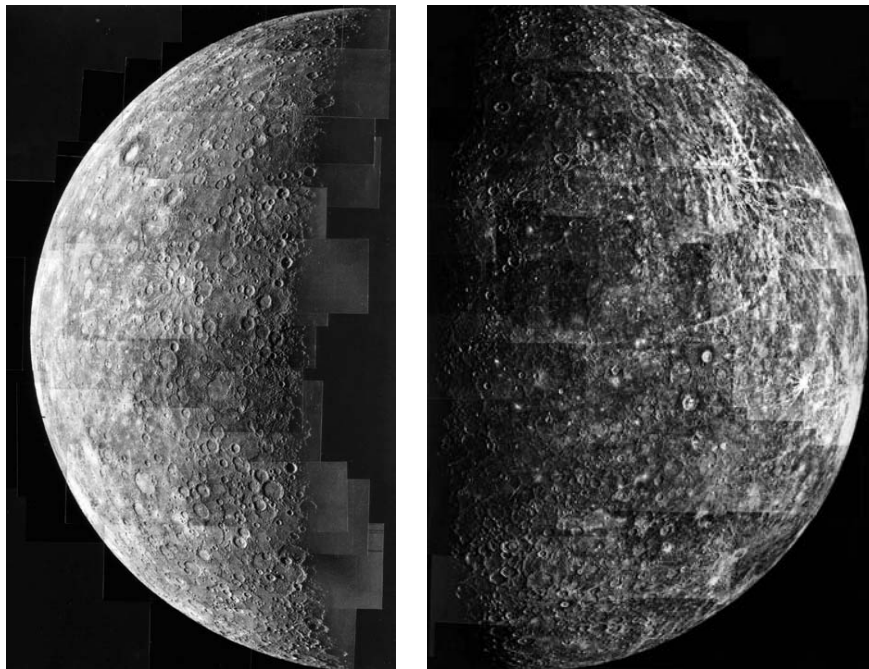


Figura 3.1: Mosaicos de Mercurio por la Mariner 10.

### 3.2. Venus

Venus es el segundo planeta más cercano al Sol. No tiene satélites. Con un diámetro de 12 104 km es, en tamaño, el más parecido a la Tierra. Su órbita alrededor del Sol toma 224,7 días, su distancia promedio al Sol es de casi tres cuartos la de la Tierra. El planeta rota en forma retrógrada en 243 días con respecto a las estrellas, y 117 días con respecto al Sol, el día venusino.

Desde la Tierra, la superficie del planeta no es visible, pues está siempre cubierta por muy densas capas de nubes. Las nubes más altas rotan con un período de cuatro días, a velocidades de 350 km/hr.

Debido a que el tamaño y masa de Venus son cercanos a los de la Tierra, muchos suponían que Venus podría ser parecido a la Tierra, y podría hasta tener formas de vida en su superficie. La verdad es que Venus es muy diferente de la Tierra, y es extremadamente poco probable que haya alguna posibilidad de que se haya formado vida en Venus.

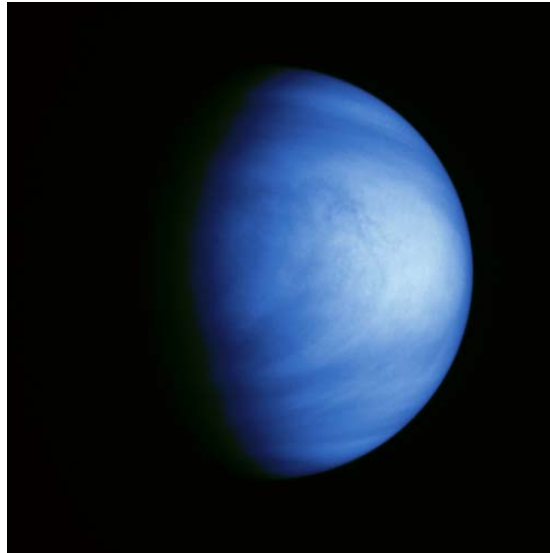


Figura 3.2: Las nubes de Venus.

Venus tiene una atmósfera que, en la superficie, tiene una presión 90 veces la de la Tierra. A diferencia de la atmósfera de la Tierra, que está mayormente compuesta de nitrógeno y oxígeno, la atmósfera de Venus está compuesta de 97% dióxido de carbono, con la mayoría del resto siendo nitrógeno y argón. Una consecuencia de la preponderancia del dióxido de carbono en la atmósfera, es que Venus sufre de los severos efectos del “efecto invernadero”. Esto significa, que el dióxido de carbono en la atmósfera es transparente al calor y a la luz provenientes del Sol, pero es opaco a la radiación infrarroja de gran longitud de onda proveniente del caliente planeta. Así, la superficie de Venus se calienta a una temperatura de 470°C.

Las nubes en la atmósfera de Venus, que impiden nuestra visión de la superficie, no están compuestas de pequeñas gotas de agua, como en la Tierra, sino que se piensa que están compuestas de pequeñas gotas de ácido sulfúrico y partículas de azufre.

Así que Venus es un lugar muy poco placentero para que el hombre lo visite. La superficie de Venus sólo pudo ser vista por sondas espaciales que descendieron a través de su atmósfera hasta la superficie. Estas no pudieron sobrevivir al ambiente hostil por mucho tiempo, pero nos han dado una visión de un terreno pedregoso sin mucha erosión y un moderado rango de alturas.

La más moderna información sobre la superficie proviene del orbitador Magallanes. Este utilizó un radar para hacer un mapa de la superficie. Reveló montañas, valles, acantilados, cráteres e inmensos volcanes, uno de los cuales se piensa que está activo.

El interior de Venus se piensa que sea similar al de la Tierra, con un núcleo

metálico y una corteza de silicatos. A diferencia de la Tierra, Venus tiene un muy pequeño campo magnético, aparte del inducido por el efecto del viento solar. Venus puede fácilmente ser visto desde la Tierra. Con frecuencia se lo llama la *Lucero del alba* o *Lucero vespertino*, y frecuentemente es el objeto más brillante visible en el cielo, con excepción del Sol y la Luna.

Debido a que su órbita está dentro de la de la Tierra, Venus parece alejarse del Sol como sumo hasta una distancia llamada la máxima elongación, y entonces ir de vuelta hacia el Sol. Luego de pasar por detrás, o por frente, del Sol, se aleja nuevamente de él en el otro lado. Los momentos en que Venus está detrás, o al frente, del Sol se llaman conjunciones superior y inferior respectivamente. Si las órbitas de la Tierra y Venus estuvieran en el mismo plano, entonces en cada conjunción Venus pasaría directamente detrás o en frente del Sol. Las órbitas están sin embargo inclinadas una con respecto a la otra, de modo que sólo raras veces vemos a Venus pasar delante del disco del Sol, lo que se llama un tránsito. El próximo tránsito ocurrirá en 2012. Si sabe a donde mirar, Venus puede verse incluso durante el día, siempre que esté suficientemente lejos del Sol.

A través de un pequeño telescopio, puede verse con facilidad que Venus tiene fases, como las de la Luna. Es muy inusual que algún detalle sea visible en la estructura de las nubes, excepto para los más experimentados observadores. Venus se ve mejor al atardecer cuando está al Este del Sol, y en la mañana cuando está al Oeste del Sol.

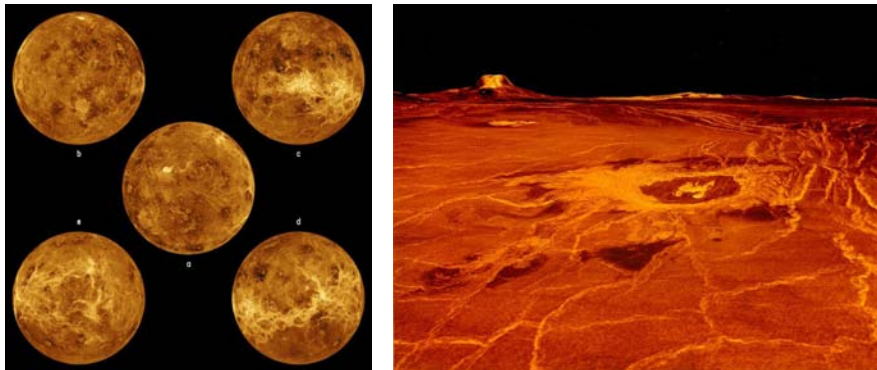


Figura 3.3: Venus por el orbitador Magallanes.

Es difícil confundirlo con cualquier otro objeto, puesto que es muy brillante. Cuando está cerca del horizonte, los efectos de 'centelleo' pueden causar impresionantes efectos de color destellantes, que son con frecuencia reportados como objetos peculiares, algunas veces como OVNI.

Un volcán activo, Maat Mons, fue descubierto en Venus por la nave Magallanes. Se sabe que existen volcanes activos en sólo dos planetas del Sistema Solar; Venus y la Tierra. Se han visto volcanes extintos en Marte.

Se sabe que dos satélites tienen volcanes activos, pero estos son muy diferentes de los de la Tierra y Venus. En Io, luna de Júpiter, hay volcanes de azufre

activos, y en Tritón, una luna de Neptuno, hay volcanes activos cuyas temperaturas están muy por debajo de cero grados Celsius. Las opiniones difieren sobre si hay evidencia de volcanes extintos en la Luna.

### 3.3. Marte

Marte es el cuarto planeta a partir del Sol, y ha habido mucha especulación a lo largo de los años, acerca de la posibilidad de que allí existan otras formas de vida.

Desde la Tierra, Marte es fácilmente visible en el cielo nocturno como un objeto rojizo parecido a una estrella, que se mueve a través del cielo con un período de algo más de dos años. Como la órbita de Marte es una elipse excéntrica, su distancia desde la Tierra en oposición (máximo acercamiento a la Tierra) varía entre 1,38UA y 1,67UA.

Visto a través de un telescopio, Marte aparece como un pequeño disco rojizo en cuya superficie pueden verse marcas oscuras. También es visible uno u otro de sus casquetes polares. Aún en su máximo acercamiento a la Tierra, Marte se ve como un disco con un diámetro de sólo 25", y por lo tanto, con un pequeño telescopio puede verse muy poco.

Aún con telescopios grandes, es muy difícil ver detalles, y muchos observadores experimentados se engañaron al pensar que habían distinguido características, como los infames canales, que de hecho no estaban allí.

Casi todo lo que sabemos de la superficie de Marte y de su atmósfera fue descubierto por las varias sondas espaciales que han orbitado el planeta y descendido a su superficie.

Sabemos que la atmósfera de Marte tiene una presión menor que un centésimo de la de la Tierra, y que está mayoritariamente compuesta de dióxido de carbono, con algo de nitrógeno y argón; casi no hay oxígeno. Hay una pequeña cantidad de vapor de agua, que se condensa en algunos lugares para producir tenues nubes y nieblas.

Hay un casquete en cada polo, que crece durante los inviernos Marcianos, con la adición de depósitos de dióxido de carbono sólido, y decrece durante los veranos Marcianos para dejar lo que se piensa es un pequeño residuo de hielo ordinario de agua.

La superficie de Marte muestra cráteres de impacto, como los de la Luna, montañas, valles de fallas, crestas, colinas, planicies y volcanes extintos.

Hay signos de que existió agua en la superficie en alguna etapa anterior del planeta. Los vientos pueden ser muy severos y son responsables de extensa erosión en las rocas de la superficie.

Algunas veces los vientos levantan enormes tormentas de arena que ocultan la superficie del planeta. Las temperaturas superficiales en Marte pueden subir hasta cerca de 0°C en el verano, pero descienden hasta cerca de -100°C antes del amanecer.

Marte rota sobre su eje, inclinado a 24° con respecto a su plano orbital, en 24 horas y 37 minutos. Aunque sólo tiene 6794 km. de diámetro, es probablemente

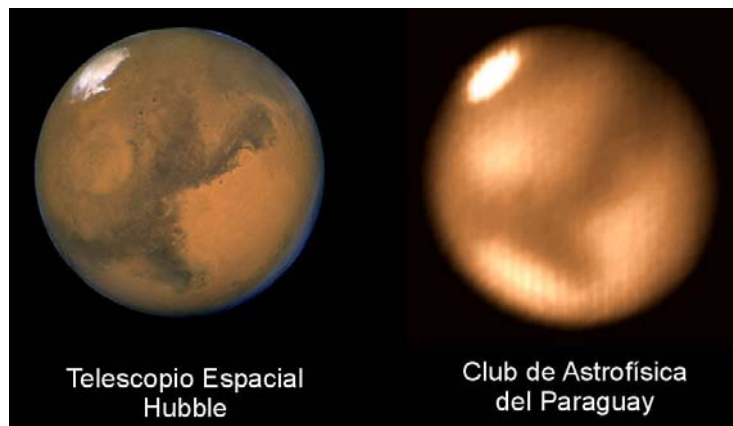


Figura 3.4: Dos visiones de Marte.

el más parecido a la Tierra de todos los planetas.

Hay algunas sugerencias de que podría ser posible alterar la atmósfera del planeta lo suficiente como para permitir colocar allí una base permanente. Hasta que esto se haga, Marte representa un ambiente muy hostil para cualquier visitante humano.

Marte tiene dos lunas, Phobos y Deimos. Ambas son muy pequeñas, ambas de menos de 30 km. de diámetro. Es probable que ambas fuesen asteroides que fueron capturados por Marte. Phobos está muy cercana a Marte, y su período orbital es menor que el período rotacional de Marte. Por lo tanto se la vería salir por el Oeste y ocultarse por el Este. Deimos está más lejos de Marte y se lo vería comportarse más convencionalmente.

### 3.4. Júpiter

Júpiter es el mayor planeta del Sistema Solar. Tiene un diámetro 11 veces mayor que el de la Tierra y una masa (más de 300 veces mayor que la de la Tierra) que es mayor que dos veces la suma de la de todos los otros planetas; sin embargo, su masa es menor que un milésimo de la masa del Sol. Orbita el Sol a una distancia de cerca de 780 millones de km en algo menos de 12 años.

La estructura interna de Júpiter es muy distinta de la de la Tierra. La 'superficie' visible de Júpiter es, de hecho, la capa superior de nubes de metano y amoníaco. El interior de Júpiter consiste de un núcleo sólido de material similar al de la Tierra, con un diámetro de cerca de 24 000 km. Rodeando a éste, con un diámetro de cerca de 100 000 km, está una mezcla metálica de hidrógeno y helio. En la Tierra conocemos a estos dos, como gases que a muy bajas temperaturas pueden licuarse; en el interior de Júpiter la presión es tan alta que el hidrógeno toma un estado en el que se comporta como un metal.

Afuera de esta zona de hidrógeno metálico está una capa de moléculas líquidas, principalmente hidrógeno y helio, con la atmósfera nubosa, de cerca de unos 1.000 Km. de profundidad, por arriba. Las temperaturas en la atmósfera de Júpiter son muy frías, variando desde unos  $-130^{\circ}\text{C}$  en el tope de las nubes hasta  $30^{\circ}\text{C}$ , cerca de 70 km más abajo.

Desde la Tierra puede verse a Júpiter, incluso con un pequeño telescopio, como un disco con achatamiento polar. Este es debido a su rápida rotación; a las características en las nubes se las ve circular el planeta en cerca de 10 horas. Cruzando el disco pueden verse varias bandas de nubes oscuras y claras, con una característica gigante llamada 'La Gran Mancha Roja' que se ve durante cada rotación.



Figura 3.5: Júpiter por la Voyager I.

Las imágenes enviadas por las sondas Voyager han mostrado la complejidad de las estructuras dentro de las bandas. La Mancha Roja ha demostrado ser un enorme sistema anticiclónico que ha durado más de 100 años. Las nubes están compuestas de metano y amoníaco, con sus colores debidos a diferentes compuestos de azufre, nitrógeno, y posiblemente fósforo.

Júpiter es uno de los más brillantes objetos en el cielo nocturno. La combinación de su período orbital, 11,9 años, con el de la Tierra, hace que veamos a Júpiter en oposición (punto más cercano a la Tierra) cada 13 meses.

En ese momento está muy brillante; los únicos objetos parecidos a estrellas que pueden aparecer más brillantes son Venus, Marte, y las infrecuentes novas y supernovas cercanas.

Con un par de binóculos, o un pequeño telescopio, es posible ver que Júpiter es un pequeño disco. También es posible ver las cuatro lunas descubiertas por Galileo. Estos son los cuatro mayores de la familia de 16 satélites de Júpiter. Los diámetros de los mayores, Io, Europa, Ganímedes y Calisto, van de 3000 km a 5000 km, mientras que el más pequeño, Leda, tiene un diámetro de sólo 10 km,

y el quinto más grande, Amalthea, tiene menos de 300 km de diámetro.

Los nombres de todos los satélites de Júpiter vienen de las amantes mitológicas de Júpiter, excepto Amalthea que fue su nodriza.

Io, la más cercana a Júpiter de las cuatro grandes lunas, es la más fantástica. Debido a las fuerzas de marea de Júpiter y las otras lunas, su superficie sube y baja unos 100 metros. Esto genera una gran cantidad de calor, lo que causa una peculiar forma de vulcanismo, en la que los volcanes arrojan fuentes de compuestos de azufre del magma sub-superficial de líquido sulfuroso. Varios de estos volcanes fueron vistos en erupción por las sondas Voyager.

Europa, Ganímedes y Calixto están todos cubiertos de hielo de agua, pero cada uno muestra distintas estructuras, indicando que cada uno ha sido afectado en forma diferente por su historia. Calisto muestra la mayor cantidad de cráteres, y probablemente la más antigua superficie. Ganímedes muestra grandes sistemas de fallas, que se parecen a características de la Tierra, como la Falla de San Andrés en California. Europa se ve como si pudiera tener una capa líquida bajo su superficie, pues hay pocos cráteres visibles, pero hay grandes sistemas de fracturas, reminiscentes de estructuras similares cerca del polo Norte de la Tierra.

Júpiter también tiene un tenue anillo, que fue descubierto por la Voyager I. Las partículas en este anillo pueden haberse originado en Io, o de restos de meteoritos o cometas. Este anillo no es visible desde la Tierra.

Júpiter tiene un campo magnético que, a la altura de la capa de nubes, es más de 10 veces el de la Tierra. La interacción de este campo con el viento Solar, causa un enorme sistema toroidal, parecido a los cinturones de van Allen alrededor de la Tierra. Io está dentro de esta estructura de campo, y es responsable de los estallidos de ondas de radio que observan venir desde Júpiter. Júpiter tiene enormes tormentas de rayos en su atmósfera, y también auroras.

### 3.5. Saturno

Saturno es probablemente el más conocido, y el más bello planeta en el Sistema Solar. Aunque no es el único en poseer anillos, tiene un juego de anillos mucho más extenso y mucho más fácilmente visible que el de cualquier otro planeta. Es este sistema de anillos lo que hace a Saturno tan bello.

Saturno es el segundo mayor planeta en el Sistema Solar, con un diámetro de 120 000 km.

Orbita el Sol cada 30 años, a una distancia de cerca de diez veces la de la Tierra. La forma del planeta es la de un esferoide marcadamente achatado, con un diámetro polar cerca de diez por ciento menor que el del ecuador. Saturno es el menos denso de los planetas, su densidad promedio es sólo 0,7 veces la del agua. Las visitas de las naves Voyager actualizaron casi todo lo que sabemos de Saturno, sus anillos y sus satélites.

Como Júpiter, Saturno está compuesto principalmente de los elementos livianos hidrógeno y helio. En su centro se piensa que hay un núcleo de material rocoso de un tamaño cercano a la Tierra, pero más denso. Alrededor de éste hay





Figura 3.6: Júpiter por el HST.

una región compuesta de hidrógeno y helio líquidos, con una atmósfera gaseosa de unos 1000 km. De espesor, en la que están las estructuras de nubes que se ven como la superficie del planeta.

Saturno está compuesto de cerca de 94 por ciento de hidrógeno y 6 por ciento de helio. Las nubes están compuestas de muy pequeñas cantidades de otros elementos químicos combinados con hidrógeno, resultando en compuestos tales como amoníaco, metano y fosfamina. Debido a que Saturno es más frío que Júpiter, los compuestos más coloreados ocurren más abajo en la atmósfera y no son visibles; esto resulta en marcas mucho menos dramáticas, pero que son similares a las que se ven en Júpiter, tomando la forma de bandas con algunos puntos más pequeños.

Los anillos de Saturno fueron vistos primero por Galileo, pero fueron identificados como un sistema de anillos por Huygens en 1656. Por muchos años se pensó que Saturno era el único en tener un sistema de anillos, pero ahora sabemos que todos los planetas gaseosos mayores tienen sistemas de anillos, aún que ninguno es tan prominente como el de Saturno. Los anillos están divididos en varios anillos distintos, con brechas entre ellos. La brecha mayor fue descubierta por Cassini en 1675, pero ahora sabemos que el sistema de anillos tiene una

estructura muy compleja.

Los anillos están compuestos de muchas, muchas pequeñas partículas de cerca de 10 metros de diámetro. Se piensa que estas se originaron en un satélite, que chocó contra un planeta menor, o que se originaron de materia que estaba presente cuando los planetas se formaron.

Los anillos de Saturno son muy reflectivos, y podrían estar compuestos por hielos como los que forman los cometas.

Saturno tiene 8 satélites con diámetros mayores de 200 km. De ellos, Titán es, con mucho, el mayor; con un diámetro de 5150 km es el segundo mayor satélite del Sistema Solar. Es probablemente el único satélite que tiene una atmósfera; esta atmósfera es más densa que la de la Tierra, pero está compuesta casi completamente de metano.

Mimas tiene un diámetro de 390 km Su superficie tiene muchos cráteres, y las imágenes del Voyager muestran un cráter gigante, con un diámetro de casi un tercio del diámetro del satélite. Enceladus tiene un diámetro de 500 km. Muestra cráteres y estructuras geológicas complejas, que indican grandes movimientos en su corteza. Tethys tiene un diámetro de 1050 km. Parece estar hecho de hielo y tiene muchos cráteres. Hay una enorme estructura como una zanja, de 100 km de ancho y 4 km a 5 km de profundidad, que se extiende una cuarta parte alrededor del satélite. Dione tiene un diámetro de 1.120 Km. Muestra muchos cráteres y grandes planicies. Rhea tiene un diámetro de 1.530 Km. Tiene muchos cráteres.

Hay varios pequeños satélites, algunos de los cuales se cree que son responsables del ‘pastoreo’ de algunas de las características vistas en la estructura de los anillos.

Saturno puede verse fácilmente a ojo desnudo. Con buenos binoculares puede verse que tiene una forma no-circular, y los anillos pueden verse con un telescopio pequeño, que también mostrará al mayor satélite, Titán. Cada 8 años la Tierra pasa a través del plano de los anillos, que entonces se ven de lado, aún que su sombra sobre el disco de Saturno podría aún ser visible.

Saturno y dos de sus lunas, Tethys y Dione, fueron fotografiados por el Voyager I el 3 de noviembre de 1980, desde una distancia de 13 millones de km. Las sombras de tres de los anillos brillantes de Saturno y de Tethys, se proyectan sobre los topos de las nubes. El borde del planeta puede verse fácilmente a través de la División de Cassini, de 3500 km de ancho, que separa al anillo A del B.

### 3.6. Urano

Urano es el séptimo planeta del Sistema Solar. Tiene un diámetro de cerca de 52 400 km, una masa 14,6 veces la de la Tierra, y orbita el Sol cada 84 años. Su distancia del Sol varía entre 18,3UA y 20,1UA. Desde la Tierra, Urano puede verse con un telescopio pequeño. Aun con grandes telescopios sólo puede verse como un pequeño disco verdoso sin detalles visibles en su superficie.

Urano fue el primer planeta descubierto que no era conocido por los antiguos. William Herschel anunció su descubrimiento en 1781, aun que inicialmente pensó que era un cometa. Luego de entender que era un planeta quiso llamarlo

Georgium Sidus, por su patrón, el rey George III. El nombre Urano fue originalmente sugerido por Bode, pero no fue sino hasta 1850, cuando John Couch Adams sugirió el cambio de nombre, que fue universalmente adoptado.

Herschel no fue el primer astrónomo que registró a Urano, pero fue el primero en reconocer que no era una estrella. Los más antiguos registros de Urano son de Flamsteed en 1690, lo llamó como una estrella, 34 Tauri, en 1712, y cuatro veces en 1715.

Hay al menos 15 otras observaciones conocidas, por otros tres astrónomos, antes del descubrimiento de Herschel.

Nuestro conocimiento de los planetas exteriores del Sistema Solar ha sido revolucionado por los sorprendentes resultados de los encuentros cercanos con cada uno por la Voyager II, que estuvo en su máxima cercanía de Urano en enero 24 de 1986.

La más impactante observación fue que el planeta Urano no muestra casi ninguna característica! Parece una gran bola verde azulada, desde la Tierra y en las imágenes de la Voyager.

Los astrónomos ya sabían que Urano rotaba sobre un eje que está inclinado a  $98^\circ$  con respecto a su plano orbital. Esto significa que Urano está 'acostado de lado' y que está rotando en sentido opuesto al de los otros planetas. El efecto en la superficie es que las estaciones en Urano están relacionadas con su período orbital alrededor del Sol, de modo que cerca de los polos el invierno dura 42 años Terrestres!

Los datos de la Voyager sugieren un modelo para la estructura interna del planeta, con un núcleo rocoso bastante pequeño, rodeado por una profunda y muy densa atmósfera de gases y hielos de agua, amoníaco y metano. Sobre éste hay una atmósfera de hidrógeno, y helio, con nubes de metano, amoníaco, y hielo de agua. La temperatura de la 'superficie' es de  $-214^\circ\text{C}$ .

Urano tiene un campo magnético a partir del cual la tasa de rotación del invisible 'cuerpo' del planeta puede ser deducido como algo más de 17 horas. Esto es menor que la tasa determinada a partir de las pocas estructuras visibles en las nubes, indicando que hay fuertes corrientes de chorro en Urano, parecidas a las de la Tierra.

Antes del encuentro cercano del Voyager II, se conocían 5 satélites. Dos de ellos, Titania y Oberon, fueron descubiertos por Herschel 1787. Ariel y Umbriel fueron descubiertos en 1851, y Miranda en 1948. El Voyager añadió otros 10 objetos, de los cuales dos son 'pastores' de los anillos.

Todos los satélites tienen cráteres de impacto sobre ellos. Ariel y Umbriel son ambos unos 1200 – –km de diámetro, pero tienen superficies muy diferentes. Ariel muestra signos de actividad geológica en gran escala, con evidencia de flujos líquidos. La temperatura es muy baja como para que el líquido pudiese ser agua, y se ha sugerido una mezcla de amoníaco líquido y hielo de agua.

Umbriel está cubierto de cráteres y casi no muestra signos de actividad geológica. Su superficie es probablemente similar a como era poco después de la formación del Sistema Solar.

Titania y Oberon son cada uno de cerca de 1600 – –km Kilómetros de diámetro y ambos tienen muchos cráteres. Ambos muestran signos de actividad

geológica.

Miranda es de sólo 500 – –km de diámetro pero sin embargo muestra complejas y entrecruzadas estructuras geológicas, con fallas que parecen ser globales en extensión, con características de superficie con profundidades de kilómetros. Estas deben haberse formado durante una etapa violenta en la vida de Miranda, ya sea por calentamiento gravitatorio en el pasado, o por una violenta colisión.

El sistema de anillos alrededor de Urano fue descubierto, casi por accidente, cuando se estaba estudiando la ocultación de una estrella muy brillante por Urano. Se observaron pequeñas disminuciones en el brillo de la estrella cuando esta se encontraba a todavía alguna distancia del disco del planeta, y se dedujo que esto era debido al material en un anillo alrededor de Urano que oscurecía la luz de la estrella. La presencia de los anillos fue confirmada por las naves Voyager, que añadieron un décimo anillo a los nueve descubiertos desde la Tierra.

Los tamaños de las partículas que componen los anillos pueden ser estimados a partir de cómo ellos dispersan la luz del Sol, y cómo afectan las señales de radio de las naves espaciales. Hay mucho menos partículas pequeñas (con tamaño de micras) que en los anillos de Saturno, y muchas de las partículas deben medir varios centímetros de diámetro. Los anillos son grises y reflejan pobremente la luz, y son por tanto probablemente hechos de polvo.

Deben ser más jóvenes que 100 millones de años, y es probable que se hallan formado a partir de la desintegración de una pequeña luna debido a la colisión con un meteorioide o un cometa.

### 3.7. Neptuno

Neptuno es el octavo planeta desde el Sol. Orbita al Sol cada 165 años a una distancia promedio de 30,1 veces la de la Tierra (Unidades Astronómicas). Tiene un diámetro de 48.000 Kilómetros y una masa 17 veces la de la Tierra.

Es el más lejano de los gigantes gaseosos, y tiene un período de rotación de cerca de 19 horas. La estructura del planeta es un núcleo rocoso rodeado por una funda de hielo que está, a su vez, rodeada de una atmósfera de 8.000 Kilómetros de espesor. Esta atmósfera está compuesta principalmente de hidrógeno molecular, con nubes de metano. La temperatura de lo que se ve como el disco es de  $-220^{\circ}\text{C}$ .

El descubrimiento de Neptuno: La historia del descubrimiento de Neptuno es intrigante, y es tanto una historia sobre personas y sus caracteres, como una de ciencia. Durante el siglo 19, las observaciones de las posiciones de Urano se notaban en discrepancia con las efemérides predichas.

Dos matemáticos, Urbain Leverrier, francés, y John Couch Adams, inglés, analizaron estas pequeñas desviaciones de las posiciones predichas asumiendo que eran debidas a la atracción gravitacional de otro, desconocido, planeta. Adams y Leverrier trabajaron independientemente, y ambos predijeron la presencia de un nuevo planeta, en substancialmente el mismo lugar en el cielo. Leverrier tuvo la buena fortuna de comunicar sus predicciones a Galle en Berlín, quién buscó y encontró a Neptuno en 1846. Adams había intentado interesar

al Astrónomo Real, Airy, en sus cálculos, pero, debido a un choque de personalidades, Airy no consideró importante el trabajo de Adams. El sugirió que Adams debería pedir a Challis, en Cambridge, emprender una búsqueda. Challis utilizó el telescopio Northumberland, que está todavía en Cambridge, para buscar el nuevo planeta. De hecho, Challis observó a Neptuno, pero, como estaba comprometido en una búsqueda sistemática en una gran área del cielo, y buscaba cambios en la posición de alguno de los objetos que había registrado, no notó el hecho de que uno de los objetos más brillantes en el campo de búsqueda mostraba un pequeño disco, y era de hecho Neptuno. Inicialmente a Leverrier se le dio el crédito por la predicción, y sólo fue algunos años más tarde cuando Adams recibió el crédito conjunto por el primer descubrimiento predicho de un nuevo planeta en el Sistema Solar.

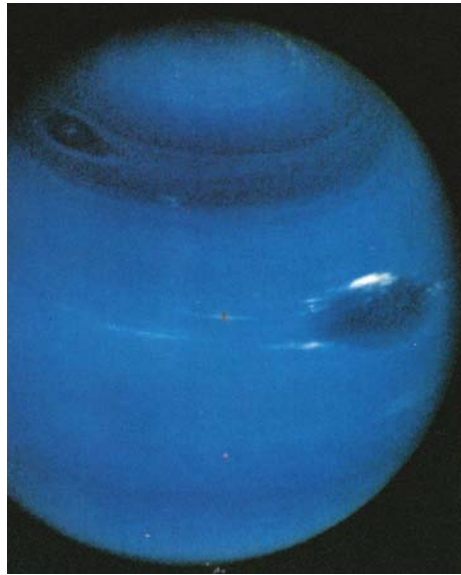


Figura 3.7: Neptuno por la Voyager II.

Desde la Tierra, Neptuno puede verse sólo como un pequeño disco verdoso. Casi todo nuestro conocimiento detallado sobre Neptuno viene del encuentro cercano con la nave Voyager 2, en 1989. El Voyager 2 había visitado a Júpiter, Saturno y Urano; Neptuno era su última escala. Le había tomado 12 años llegar allá, pero pasó a 4.800 Kilómetros de la superficie del planeta.

Se vio que la atmósfera de Neptuno tenía una estructura de bandas similar a la encontrada en los otros gigantes gaseosos. Vimos un huracán gigante, con un diámetro igual al de la Tierra, y otras formaciones de nubes, incluyendo algunos extensos, y muy bellos cirros, arriba (50 Km) de las nubes principales. Se mostró que Neptuno tenía un sistema de nubes muy activo, posiblemente más activo que él de Júpiter.

Observaciones desde la Tierra habían mostrado que Neptuno poseía algunos anillos; las imágenes del Voyager mostraron que había al menos 4 anillos, y se detectaron muchas partículas de polvo en el plano de los anillos.

Neptuno tiene un campo magnético que no está alineado con su eje de rotación. Se piensa que este campo es generado por una capa esférica cerca de la superficie del planeta. Se vieron auroras asociadas con este campo magnético.

Antes del encuentro con el Voyager se sabía que Neptuno tenía dos satélites, Tritón y Nereida, con diámetros de 3.800 y 300 Km. El Voyager encontró seis más, con diámetros desde 50 hasta 200 Kilómetros. Todos estos pequeños cuerpos orbitan a Neptuno cerca de su plano ecuatorial y en la misma dirección de la rotación del planeta. Nereida y Tritón, sin embargo, ambos tienen órbitas que están inclinadas con respecto al plano ecuatorial por 30 y 20 grados.

Tritón también tiene la propiedad única de que su dirección es retrógrada (es el único satélite grande en el Sistema Solar que viaja alrededor de su planeta en dirección inversa a la rotación del planeta). Esto sugiere que estos dos satélites no se condensaron al mismo tiempo que Neptuno, sino que fueron capturados en algún momento ulterior.

Las imágenes de Tritón enviadas por el Voyager fueron probablemente las más excitantes de todo el viaje de 12 años. Muestran vastos cañones, cráteres y picos, con estanques congelados de hielo y amoníaco, y largas fisuras que parecen autopistas transcontinentales. El descubrimiento más sorprendente fueron los volcanes. Son muy diferentes de los volcanes de la Tierra. En lugar de arrojar magma al rojo vivo; es nitrógeno gaseoso, evaporado de su estado líquido, que está siendo ventilado, y está llevando consigo más oscuros compuestos de carbono desde abajo de la superficie del satélite.

## Capítulo 4

# Planetas enanos

### 4.1. Introducción

El 24 de agosto de año 2006 la Unión Astronómica Internacional (UAI) creó una nueva categoría de objetos celestes, la denominada *planeta enano*, según la UAI un planeta enano es un cuerpo celeste que orbita alrededor del Sol, tiene suficiente masa para alcanzar un equilibrio hidrostático, no es satélite de otro planeta u otro cuerpo estelar y finalmente no ha podido limpiar su órbita de otros objetos.

Los objetos transneptunianos (TNO, por sus siglas en inglés) engloban a cualquier objeto del Sistema Solar cuya órbita se ubica parcial o totalmente más allá de la órbita del planeta Neptuno. Por una resolución de la UAI del día 11 de junio de 2008 los planetas enanos transneptunianos pasan a denominarse plutoides.

En muchos casos también se los llama objetos del cinturón de Kuiper (KBO, por sus siglas en inglés). Los TNO comprenden, entre otros, a los cuerpos de la Nube de Oort.

El prototipo de los planetas enanos es Plutón, quien perdió su categoría de “planeta” para ser el primer miembro de la nueva familia, lo siguieron Ceres, Eris, Makemake y Haumea.

### 4.2. Plutón

En promedio, suele estar más alejado del Sol que Neptuno. Durante los próximos años, sin embargo, estará más cerca del Sol que su más cercano rival. La razón de esto, es que la órbita de Plutón alrededor del Sol, es una elipse con una excentricidad bastante grande. Esto significa que es más elíptica que circular. En este momento, Plutón está cerca de su perihelio, su mínima distancia al Sol, y está a cerca de 4440 millones de kilómetros de él. A su máxima distancia, su afelio, que la alcanzará dentro de 124 años, la mitad de su período orbital, estará a 7395 millones de kilómetros de distancia del Sol.

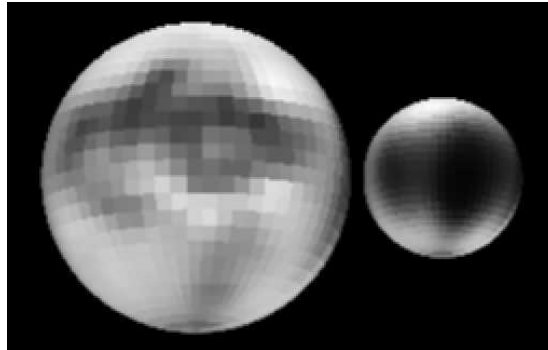


Figura 4.1: Plutón y Caronte.

Plutón fue descubierto en 1930 por Clyde Tombaugh en el Observatorio Lowell. En esos años los astrónomos habían observado perturbaciones en las orbitas de Urano y Neptuno. Atribuyeron erróneamente dichas perturbaciones a un supuesto noveno planeta. Mediante comparaciones de fotografías tomadas en diferentes días, Tombaugh descubrió un objeto que se movía contra el fondo de las estrellas fijas.

En 1978 se descubrió que Plutón tiene un satélite muy cercano, ahora llamado Caronte. Caronte orbita a Plutón a una distancia de 20 000 kilómetros, en 6,4 días. A partir de estos hechos podemos determinar que Plutón tiene una masa de sólo 0,2% la de la Tierra. Su diámetro es de cerca de 2500 kilómetros, así que la densidad de Plutón es mucho menor que la de la Tierra.

También es muy oscuro, y algunos astrónomos suponen que es más como el núcleo de un cometa gigante, que como un planeta. Su temperatura de superficie es de cerca de  $-230^{\circ}\text{C}$ ; demasiado fría como para que haya mucha atmósfera.

A partir de recientes observaciones en el infrarrojo, se sabe que Plutón tiene en su superficie hielos de nitrógeno, metano, y monóxido de carbono.

Esto implica que habrá una tenue atmósfera de estos gases alrededor del planeta. La única información sobre los detalles de su superficie, proviene de un análisis de la variación en su brillo observado durante 5 años, durante los cuales su satélite Caronte ocultó diferentes partes de la superficie del planeta. A partir de estas mediciones, se ha deducido que el polo Sur de Plutón ha recibido recientemente una nueva capa de hielo de metano, dándole una alta reflectividad de cerca de 90%, mientras que otras partes de la superficie sólo reflejan menos del 30% de la luz que recibe del Sol.

Plutón sólo es visible con telescopios, en los que aparece como un objeto parecido a una estrella de magnitud 14. Debido a su gran distancia del Sol, Plutón se mueve muy lentamente a través del cielo.

La órbita de Plutón tiene la mayor excentricidad, y la mayor inclinación con respecto a la eclíptica, de todos los planetas. Debido a su gran lejanía, muy poco, aparte los hechos dados arriba, se sabe sobre Plutón.



---

**Nota:** El sistema Plutón/Caronte cuenta con un par de satélites llamados Nix e Hidra. Las observaciones del Hubble muestran que Caronte es más azulado que Plutón. Esto significa que ambos mundos tienen diferente estructura y composición de superficie. Una fuerte zona brillante en Plutón, sugiere que tiene una homogénea capa superficial reflectante. Plutón típicamente es llamado el planeta doble, porque Caronte es de la mitad del diámetro del planeta; nuestra Luna es de una cuarta parte del diámetro de la Tierra.

---

### 4.3. Ceres

Es entre los planetas enanos el más pequeño. Previamente a la reunión del 24 de agosto de 2006, en que la UAI lo clasificara en la nueva categoría, Ceres era considerado el mayor asteroide descubierto.

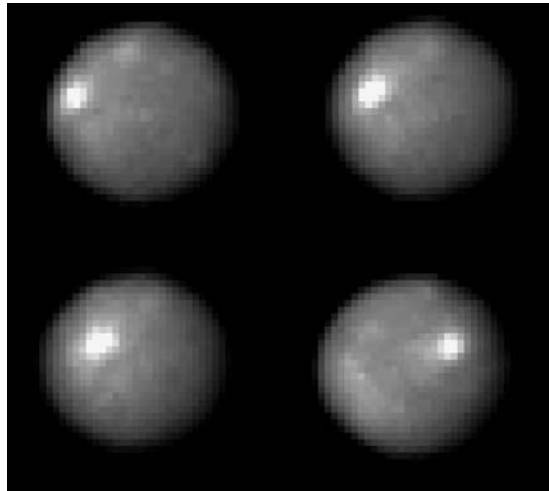


Figura 4.2: Ceres, entre los planetas enanos el más pequeño.

Este planeta enano fue descubierto por Giuseppe Piazzi el 1 de enero de 1801, desde un observatorio en Palermo, Italia. Su nombre le fue dado en honor a la diosa romana de la agricultura, las cosechas y la fecundidad.

Ceres se halla en el cinturón de asteroides, entre Marte y Júpiter y tiene 930 kilómetros de diámetro.

Los astrónomos han tomado 267 imágenes de Ceres con el Telescopio Espacial Hubble. Como resultado del estudio de estas imágenes y subsecuentes simulaciones por ordenador, se supone que Ceres puede tener un núcleo interior rocoso y una corteza exterior de polvo.

Un equipo de científicos encabezado por Peter Thomas de la Universidad Cornell concluyó que Ceres es casi totalmente esférica.

Los modelos de los estudios por ordenador sugieren que Ceres tiene un interior diferenciado, con material más denso en el núcleo y otro distinto cerca de la superficie, esto incluye un manto de agua helada alrededor de un núcleo rocoso. Si este manto se encuentra formado por al menos un 25 % de agua, Ceres tendría más agua que la Tierra.

#### 4.4. Eris

Eris es un planeta enano descubierto en el año 2005, se le dio la designación temporal de 2003 UB313. Es un objeto transneptuniano, que orbita el Sol en los bordes de nuestro Sistema Solar, más allá del Cinturón de Kuiper.

Eris tiene un diámetro aproximado entre 2400 y 3000 kilómetros, es levemente más grande que Plutón. El descubrimiento de Eris generó una discusión entre los astrónomos acerca de si Plutón, debería ser considerado un verdadero planeta. El planeta enano fue fotografiado en octubre del 2003, pero debido a su lento movimiento, no fue reconocido como un TNO hasta enero del 2005. El descubrimiento del objeto fue anunciado oficialmente el 29 de julio del 2005, por Michael Brown, Chad Trujillo y David Rabinowitz.

Eris tiene una órbita inusual, está inclinada en un ángulo de  $44^\circ$  respecto a la eclíptica. Su órbita es muy excéntrica ( $e = 0,44$ ), y tarda 557 años para completar una órbita alrededor del Sol, a una distancia media de 68 UA.

Eris tiene una luna de tamaño moderado, vista por primera vez en septiembre del 2005. Se le dio el nombre de Dysnomia.



Figura 4.3: Eris, fotografiado en octubre del 2003.

## 4.5. Makemake

Makemake fue descubierto en el marzo del 2005 por un equipo de astrónomos liderados por Michael Brown. En Julio 2008 entra a formar parte de la familia de los planetas enanos.

Makemake está 16 % más lejos del Sol que Plutón y tarda 310 años en orbitar alrededor de nuestra estrella. En la mitología Rapa Nui de la Isla de Pascua, Makemake es el dios de la fertilidad y el creador de los seres humanos. El planeta enano es más pequeño que Plutón y que Eris. Su diámetro está entre 1300 y 1900 kilómetros.

Makemake es muy frío, la temperatura está alrededor de los  $-240^{\circ}\text{C}$ , podría estar cubierto de hielo, probablemente hielo de metano y etano. Su superficie es muy brillante, pero se han detectado en ella pequeñas manchas rojas.

Se especula que Makemake podría tener una atmósfera. Cuando el planeta enano está más cerca del Sol, es probable que se caliente un poco, liberando metano y etano para formar una tenue atmósfera. Cuando Makemake aleja del Sol, los gases se congelarían de nuevo y caerían en forma de nieve.

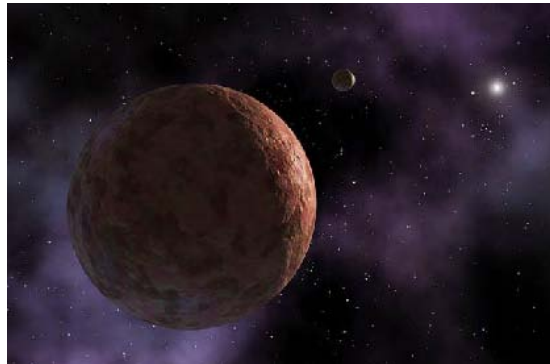


Figura 4.4: Imagen conceptual de Makemake.

## 4.6. Haumea

Haumea es el quinto objeto oficialmente clasificado como planeta enano, originalmente estaba designado como 2003 EL61. Entró en la categoría de planeta enano en septiembre del 2008.

Haumea tarda 285 años en orbitar alrededor del Sol, gira tan rápidamente sobre su eje que se ha estirado en forma de un elipsoide. Haumea tiene 1960 kilómetros a lo largo de su eje mayor, pero solamente 996 kilómetros en su eje menor.

En Haumea los días son realmente cortos, este objeto gira en menos de cuatro horas, también es relativamente denso. Los científicos creen que está básicamente

hecho de roca. La mayoría de los transneptunianos tienen más hielo que Haumea. Este planeta enano tiene dos lunas conocidas, ambas descubiertas en el 2005. Se llaman Hi'iaka y Namaka.

Se especula que hace mucho tiempo, Haumea chocó con otro gran objeto. Una colisión como esta podría explicar la extraña forma que tiene, así como por qué gira tan rápidamente. La gran colisión pudo haber fracturado la mayor parte del hielo de Haumea, dejando las rocas más pesadas. Las lunas de Haumea pueden ser material sobrante de la colisión.

En la mitología Hawaiana, Haumea es la diosa de la fertilidad y del parto. Sus niños incluyen a Hi'iaka y a Namaka.

Hay dos diferentes grupos que podrían obtener crédito por descubrir a Haumea. Un grupo dirigido por Michael Brown del Instituto de Tecnología de California. Otro grupo encabezado por José Luis Ortiz Moreno, del Observatorio de Sierra Nevada en España. Haumea fue descubierto entre marzo del 2003 y julio del 2005.

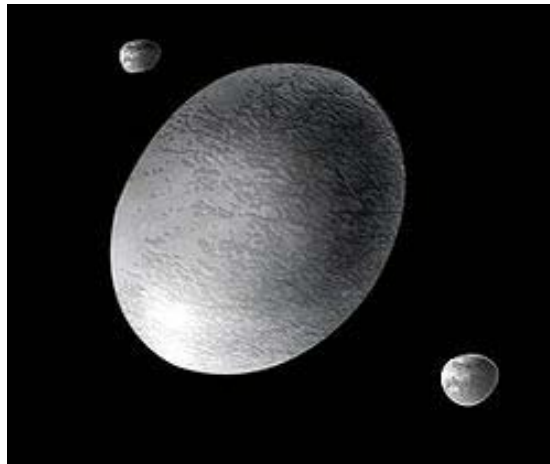


Figura 4.5: Haumea, planeta enano desde el 2008.

### Comparación de los tamaños de los planetas enanos

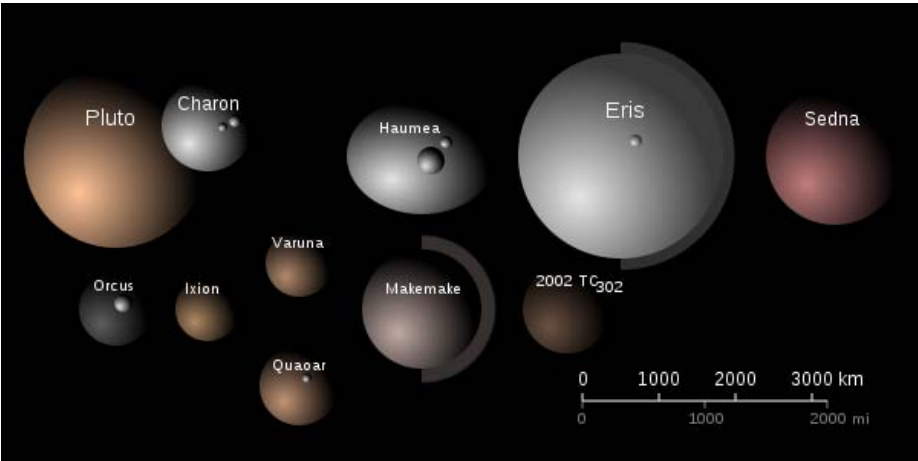


Figura 4.6: Tamaños de los planetas enanos.



## Capítulo 5

# Planetoides y meteoroides

### 5.1. Los asteroides

Los asteroides son objetos rocosos y metálicos con órbitas planetarias, pero que son demasiado pequeños para ser considerados planetas. Su aspecto telescópico es puntual, como las estrellas, de ahí su nombre. En ocasiones son denominados minor planets o también se suelen llamar planetoides. Sus tamaños van desde casi 1000 km en el caso de Ceres, hasta unos pocos centímetros o menos. Poseen unas características físicas que los diferencian de los cometas y en su inmensa mayoría se hallan situados entre las órbitas de Marte y Júpiter, en el denominado cinturón de asteroides o cinturón principal.

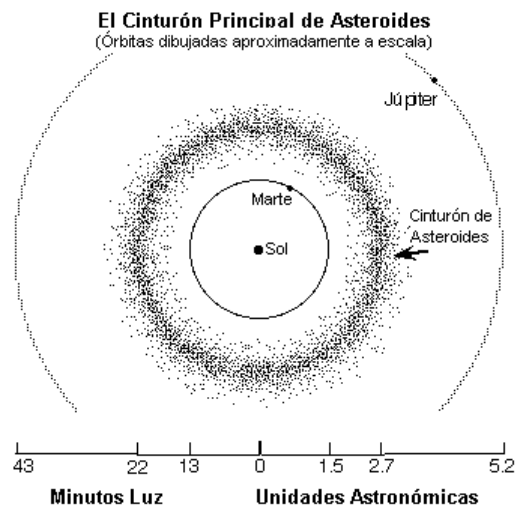


Figura 5.1: El cinturón principal de asteroides.

En 1918 el japonés Hirayama hizo notar que si además del semieje mayor se tienen en cuenta la excentricidad y la inclinación, analizando la distribución de los asteroides en un espacio tridimensional, se encuentran zonas especialmente densas a las que denominó familias, sugiriendo que los miembros de una misma familia es probable que tengan un origen común.

La Figura 5.2 muestra la distribución de los semiejes mayores de la mayor parte de los asteroides catalogados. Llama la atención una serie de zonas vacías, así como otras muy sobrecargadas.

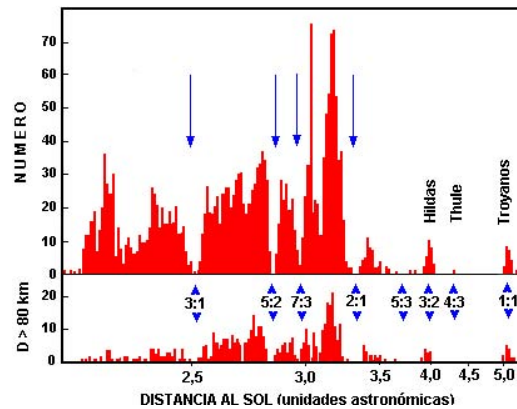


Figura 5.2: Distribución de asteroides según su semieje mayor.

### 5.1.1. El grupo Aten–Apollo–Amor

Existe un grupo heterogéneo de pequeños asteroides conocidos como objetos Aten–Apollo–Amor (AAA), aunque también son denominados Earth-Grazers (EGA) y Earth-Crossers (ECA), es decir, rozadores y cruzadores de la Tierra. En los últimos tiempos a estos objetos se les denomina también Near Earth Objects (NEO), aunque esta denominación es más amplia y engloba a cualquier objeto celeste que se aproxime a nuestro planeta. Como estos nombres indican, pueden acercarse mucho a la Tierra y se supone que, junto con los cometas, son los responsables de los impactos meteoríticos acontecidos en la Tierra y en la Luna en los últimos miles de millones de años

**El grupo Amor.** Asteroides que normalmente pueden estar a menos de 1,3 UA del Sol, pero que no llegan a pasar por el interior de la órbita de la Tierra, la cuál está entre 0,983 UA y 1,017 UA del Sol.

**El grupo Apollo.** Asteroides como los anteriores pero que pueden interseccionar la órbita de la Tierra (1 UA). Son los potencialmente más peligrosos.



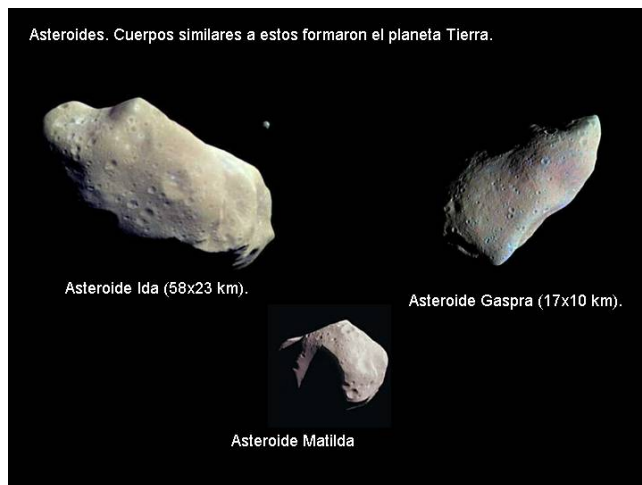


Figura 5.3: Tres asteroides rocosos.

**El grupo Aten.** Asteroides con semieje mayor inferior a 1 UA, es decir, que ocasionalmente pueden cruzar la órbita de la Tierra pero generalmente están más cerca del Sol que ésta.

#### Asteroides paraguayos: “(4269) Bogado” y “(3708) Suárez”

En 2003, a sugerencia del astrónomo aficionado holandés William A. Fröger, una comisión de la Unión Astronómica Internacional resolvió bautizar al asteroide con la denominación temporal 1974 FN con el nombre (4269) Bogado.

El listado oficial de los nuevos asteroides nombrados fue publicado el 6 de noviembre de 2003. En el momento de la publicación de esa lista la cuenta de asteroides con nombre propio ascendía a 11 008, y la cuenta de los asteroides numerados a 73 636; contenía 129 nombres nuevos para asteroides, entre los que se encontraban: (11365) NASA, (4523) MIT, (69230) Hermes; este último era un asteroide descubierto originalmente en 1937 pero que fuera extraviado y recientemente redescubierto.

Puede parecer jocoso, pero es algo muy común que un cuerpo celeste se extravíe, recordarán que algo similar había pasado con (1) Ceres, el primer asteroide descubierto. (69230) Hermes está clasificado como un NEO, y (4269) Bogado pertenece al cinturón principal de asteroides.

Igualmente en 2007, a sugerencia de Waldemar Villamayor-Venialbo—miembro del Club de Astrofísica del Paraguay y coordinador del Centro Paraguayo de Informaciones Astronómicas—la Unión Astronómica Internacional bautizó al asteroide con la denominación temporal 1988 BS3 con el nombre (3708) Suárez, en honor al Padre Buenaventura Suárez, SJ, el primer astrónomo de nuestro país en la época de las misiones jesuíticas.

**(4269) Bogado.** Descubierto el 22 de marzo de 1974 por Carmen Torres desde el Observatorio “Cerro El Roble”, en Chile. Lleva el nombre del Presidente Honorario del Club de Astrofísica del Paraguay: Don Manuel Dejesús Bogado. C. Torres también descubrió el asteroide (3361) Orfeo en 1982.

Su órbita tiene un semieje mayor 2,231 UA, una excentricidad de 0,165, una inclinación de  $3,449^\circ$ , y un periodo de 3,332 años. El clásico perfil de los asteroides del cinturón principal. Su último perihelio ocurrió en la primera mitad de 2008. Se presume que tiene un diámetro en el rango de los 20– a 25–km.



Figura 5.4: (4269) Bogado por el DSS y el NEAT.

**(3708) Suárez.** Denominación temporal 1988 BS3. Descubierto el 18 de enero de 1988 por H. Debehogne desde el Observatorio Europeo del Sur (ESO). Lleva el nombre del primer astrónomo paraguayo y primero del Río de la Plata, el padre y misionero jesuita Buenaventura Suárez. Su órbita tiene un semieje mayor 2,229 UA, y es un asteroide del cinturón principal. Con una inclinación de  $5,21^\circ$  y un periodo de 3,330 años.

## 5.2. Los cometas

Son pequeños cuerpos planetarios que provienen principalmente de dos lugares, la Nube de Oort, situada entre 50000 y 100000 UA del Sol, y el Cinturón de Kuiper, localizado más allá de la órbita de Neptuno.

Se cree que los cometas de largo periodo tienen su origen en la Nube de Oort. Cuando dicha nube se ven perturbada gravitatoriamente, algunos de los cuerpos cometarios salen despedidos fuera del Sistema Solar, otros en cambio ingresan a nuestro sistema. Para explicar el origen de los cometas de corto periodo, como el Halley, Gerard Kuiper propuso la existencia de un cinturón de objetos helados situados más allá de Neptuno, el Cinturón de Kuiper.

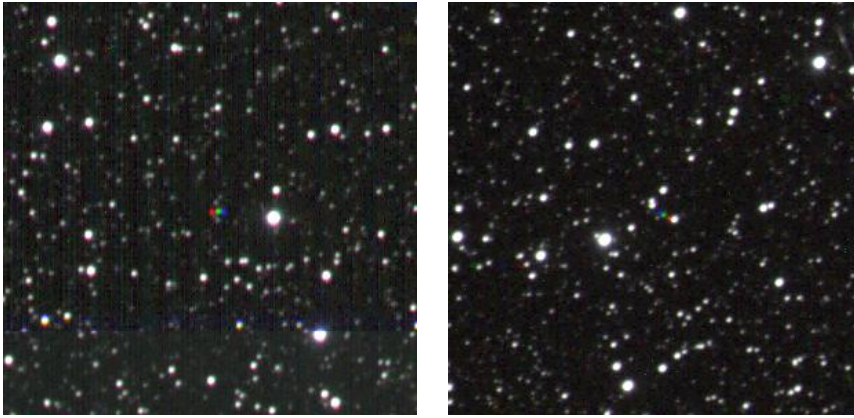


Figura 5.5: (3708) Suárez por el NEAT.

Si el cometa atraviesa el cinturón de asteroides y entra en el Sistema Solar interior, se produce un espectáculo impresionante.

El agua congelada del cometa, se calienta y empieza a convertirse en vapor rápidamente. El cometa, empieza a desarrollar a su alrededor una tenue nube de gas y polvo que se hace visible y muy brillante en los cielos de la Tierra.

Un cometa se divide en distintas partes:

1. El cuerpo sólido se llama núcleo y es muy difícil de ver, incluso con telescopios. Pero la nube de gas que rodea al núcleo, llamada coma o cabellera se hace más grande que cualquier planeta y cubre miles de kilómetros.
2. La radiación y el gas que el Sol arroja, empujan la cabellera del cometa en dirección opuesta a la del Sol, formando una cola que puede extenderse por millones de kilómetros.
3. Las colas tienen dos componentes: cola tipo I, brillante, está compuesta de gas ionizado y forma filamentos que se alejan del sol. La cola tipo II, más oscura está compuesta de partículas de polvo que forman una curva suave.

Los cometas se dividen en dos grupos. Los cometas de período largo que son los que pasan cerca del sol solo una vez para luego perderse en el espacio interestelar y no volver jamás. Luego están los cometas de periodo corto que tiene una órbita estable que lo acerca al sol cada 10, 20 u ochenta años. El cometa de Halley, con un periodo de 75 años, es el más famoso de este tipo de cometas.

Los cometas de periodo corto, sufren un fenómeno interesante. Cada vez que pasa cerca del Sol, el cometa pierde, por evaporación, una cantidad considerable de hielo, así como polvo superficial. Lo único que no pierde son los bloques de roca en su superficie y en su interior. De modo que después de un millar de



Figura 5.6: El cometa West.

viajes, el cometa se convierte en un núcleo rocoso libre de hielo y polvo así como desprovisto de la capacidad de maravillarnos.

### 5.3. Cinturón de Kuiper

El cinturón de Kuiper es un conjunto de cuerpos de tipo cometa que orbitan el Sol a una distancia entre 30 y 50 ua. El cinturón de Kuiper recibe su nombre en honor a Gerard Kuiper, que predijo su existencia en los años 1960, 30 años antes de las primeras observaciones de estos cuerpos. Pertenecen al grupo de los llamados objetos transneptunianos (TNO). Los objetos descubiertos hasta ahora poseen tamaños de entre 100 y 1000 kilómetros de diámetro. Se cree que este cinturón es la fuente de los cometas de corto periodo. El primero de estos objetos fue descubierto en 1992 por un equipo de la Universidad de Hawai.



Figura 5.7: Comparación de tamaños entre los objetos del Cinturón de Kuiper Sedna y Quaoar con la Tierra, la Luna y Plutón.

### 5.3.1. Referencias históricas

El cinturón de Kuiper es llamado en ocasiones como cinturón de Edgeworth o el cinturón de Edgeworth-Kuiper. Hay astrónomos que utilizan nombres más largos todavía como el cinturón de Leonard-Edgeworth-Kuiper. El término objetos transneptunianos es recomendado por varios grupos de astrónomos ya que evita las controversias entre los nombres más personales. Objeto transneptuniano no es un sinónimo sin embargo de objetos del cinturón de Kuiper ya que los primeros engloban también a otros objetos en el exterior del Sistema Solar.

### 5.3.2. Objetos del cinturón de Kuiper

Más de 800 objetos del cinturón de Kuiper (KBOs de las siglas anglosajonas) han sido observados hasta el momento. Durante mucho tiempo los astrónomos han considerado a Plutón y Caronte como los objetos mayores de este grupo.

Sin embargo el 4 de junio de 2002 se descubrió 50000 Quaoar, un objeto de tamaño inusual. Este cuerpo resultó ser la mitad de grande que Plutón. Al ser también mayor que la luna Caronte pasó a convertirse durante un tiempo en el segundo objeto más grande del cinturón de Kuiper. Otros objetos menores del cinturón de Kuiper se fueron descubriendo desde entonces.

Pero el 13 de noviembre de 2003 se anunció el descubrimiento de un cuerpo de grandes dimensiones mucho más alejado que Plutón al que denominaron Sedna. El objeto 90337 Sedna destronó a Quaoar del puesto de segundo objeto transneptuniano más grande. Su pertenencia al cinturón de Kuiper está cuestionada por algunos astrónomos que lo consideran un cuerpo demasiado lejano, representante quizás del límite inferior de la nube de Oort. En tal caso, 2000 CR105 pertenecería también a esta clase.

La sorpresa llegó el 29 de julio de 2005 cuando se anuncia el descubrimiento de tres nuevos objetos: (136199) Eris, 2005 FY9 y 2003 EL61, ordenados de mayor a menor. Eris revela ser incluso mayor que el propio Plutón por lo que se le ha apodado como el décimo planeta llegándose a considerarlo como el legendario Planeta X. Estrictamente hablando, Eris no pertenece al cinturón de Kuiper. Es miembro del disco disperso pues su distancia media al Sol es de 67 ua.

La clasificación exacta de todos estos objetos no es clara dado que las observaciones ofrecen muy pocos datos sobre su composición o superficies. Incluso las estimaciones sobre su tamaño son dudosas dado que en muchos casos se basan, tan solo, en datos indirectos sobre su albedo comparada con la de otros cuerpos semejantes como Plutón.

### 5.3.3. Características orbitales

Los KBOs (Kuiper Belt Objects) son objetos con órbitas situadas entre unas 30 y 50 ua del Sol. Orbitan sobre el plano de la eclíptica, aunque sus inclinaciones pueden ser bastante elevadas.

Algunos KBOs están en resonancia orbital con Neptuno: sus periodos orbitales son fracciones enteras del periodo orbital de Neptuno. Los objetos en resonancia 1:2 y 2:3 se denominan plutinos. Otros objetos se encuentran en resonancias 2:5, 3:4, 3:5, 4:5, y 4:7.

Los objetos denominados Cubewanos son aquellos que no se encuentran en resonancias con los planetas exteriores ya que no les hace falta debido a su mayor lejanía con respecto a Neptuno. Los objetos del límite exterior del cinturón son objetos de tipo SDO (Scattered disk objects).

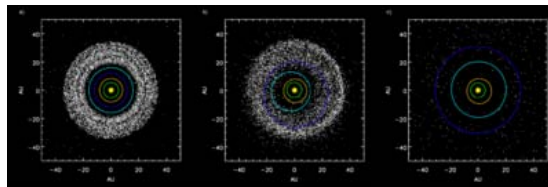


Figura 5.8: Simulación que muestra los planetas exteriores y el cinturón de Kuiper. a) Antes de la resonancia Júpiter/Saturno 2:1; b) Dispersión de los objetos del cinturón de Kuiper en el Sistema Solar después de la alteración de la órbita de Neptuno; c) Tras la expulsión de los objetos del cinturón de Kuiper por Júpiter.

#### 5.3.4. Origen del cinturón de Kuiper

Los orígenes y estructura actual del cinturón de Kuiper todavía no han sido aclarados, mientras los astrónomos esperan al telescopio Pan-STARRS, con el que se deberían localizar muchos más KBOs, para alumbrar nuevas teorías. Diferentes simulaciones por ordenador de las interacciones gravitatorias del periodo de formación del Sistema Solar indican que los objetos del cinturón de Kuiper pudieron crearse más hacia el interior del Sistema Solar y haber sido desplazados hasta sus posiciones actuales entre 30 y 50 UA por las interacciones con Neptuno al desplazarse lentamente este planeta desde su posición de formación hacia el exterior hasta su actual órbita. Estas simulaciones indican que podría haber algunos objetos de masa significativa en el cinturón, quizás del tamaño de Marte.

#### 5.3.5. Exploración del cinturón de Kuiper

En la actualidad se desarrollan numerosos programas de búsqueda de KBOs. La sonda espacial Nuevos Horizontes, la primera misión dedicada a la exploración del cinturón de Kuiper, fue lanzada el 16 de enero de 2006. Está prevista su llegada a Plutón el 14 de julio de 2015. Una vez pasado Plutón está previsto que explore uno o varios KBOs. Todavía no se ha determinado cuales serán los KBOs concretos a explorar, pero deberán tener entre 40 y 90 km. de diámetro e, idealmente, ser blancos o grises para contrastar con el color rojizo de Plutón.

### 5.3.6. Acantilado de Kuiper

El acantilado de Kuiper es el nombre que le dan los científicos a la parte más alejada del Cinturón de Kuiper. Es una incógnita que ha dado quebraderos de cabeza durante años. La densidad de objetos en el Cinturón de Kuiper decrece drásticamente, de ahí su nombre de acantilado.

La explicación más lógica sería la existencia de un planeta con una masa suficientemente grande como para atraer con su gravedad a todos los objetos de su órbita. Ese supuesto planeta recibe el nombre de Planeta X. Hasta la fecha, nadie ha aportado ninguna prueba de la existencia de tal planeta o de alguna explicación para este fenómeno.

## 5.4. La nube de Oort

La nube de Oort es un hipotético conjunto de pequeños cuerpos astronómicos, sobre todo asteroides y cometas, situados más allá de Plutón en el extremo del sistema Solar.

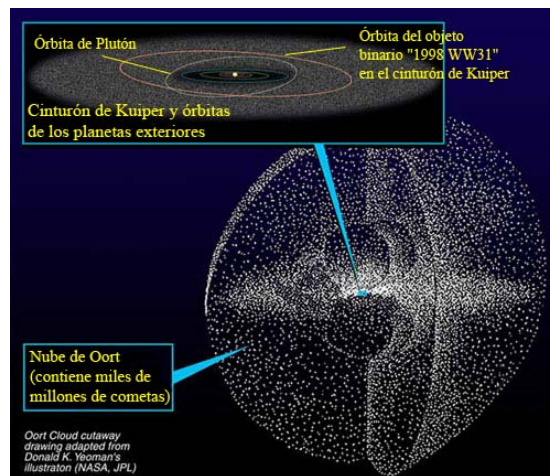


Figura 5.9: Simulación del Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort.

En 1950 el astrónomo holandés Jan Oort, basado en cuidadosos estudios orbitales y análisis estadísticos de las trayectorias de los cometas, formuló una hipótesis, hoy comúnmente aceptada, según la cual, los núcleos de los cometas de largo periodo proceden de una nube esférica que rodea el Sistema solar mas allá de la órbita de Plutón, desde unas 30.000 Unidades astronómicas has unos 3 años luz.

Estos objetos se habrían formado en las primeras fases de acreción del Sistema Solar en las proximidades del Sol, pero habrían sido expelidos hacia

sus confines por el efecto de las fuerzas de la gravedad. Los que no escaparon totalmente a éstas habrían formado la nube de Oort.

Algunos de los objetos de esta nube, a causa de la iteración con alguna estrella próxima, serían impulsados de cuando en cuando en dirección al Sol, hacia el cual se desplazarían en un viaje de cientos de miles de años hasta que se comenzase a alterar su órbita por el efecto de la gravedad de los grandes planetas Júpiter y Saturno, de manera que algunos se transforman en cometas de largo periodo, aunque otros después de su paso por el Sistema Solar cercano pueden perderse para siempre en el espacio exterior.

Se estima, sin que se tengan datos que corroboren estas hipótesis, que existen en la nube de Oort más de un billón de objetos de diámetro pequeño, cuya masa total puede ser equivalente a la del planeta Júpiter.

## 5.5. Los meteoros

Todos nosotros estamos familiarizados con la visión de un súbito destello de luz pasando a través de parte del cielo, posiblemente seguido de una duradera traza de luz. Aún cuando hay muchos aviones y satélites artificiales que pueden verse, ninguno de ellos se ve igual que una “estrella fugaz”.

Muy ocasionalmente la estrella fugaz es muy brillante, más brillante que las estrellas, y a veces parece emitir chispas o incluso romperse en pedazos. En muy raras ocasiones su pasaje puede oírse como un rugido o una serie de remotas explosiones. Estos objetos muy brillantes con frecuencia son llamados bólidos. La traza dejada por una brillante estrella fugaz puede durar por menos de un segundo, o, para un bólido, puede durar minutos.

Lo que presenciamos al ver una estrella fugaz, es una pequeña pieza de materia interplanetario, llamada un meteorito, entrando a la atmósfera de la Tierra y quemándose a una altura de unos 100 Km.

Estas pequeñas partículas se mueven muy rápido en relación con la Tierra y cuando entran en la atmósfera de la Tierra son frenadas rápidamente. Esto significa que pierden una gran cantidad de energía, que aparece como calor. Tanto la partícula, como el aire que está forzando a su paso se calientan mucho. La partícula, a menos de que sea grande, es evaporada completamente y el aire en el camino del meteorito es ionizado. Vemos la luz de la emisión de radiación del gas ionizado y de la partícula al blanco vivo, que se evapora. La traza es el gas caliente, que gradualmente se enfría.

### 5.5.1. Lluvias de meteoros

Muchos meteoros se originan del material arrancado a los cometas por la radiación Solar. El material continua siguiendo la órbita del cometa, pero es dispersado a lo largo de la órbita. Si el camino de la Tierra pasa a través de esta corriente de partículas, veremos muchos meteoros cuyas trayectorias en el cielo parecen irradiar de un punto en el cielo, el radiante, que está en la dirección



de la que viene la corriente. Muchas de tales lluvias de meteoros se ven durante el año. Algunas están asociadas con cometas conocidos, mientras que otras son los restos de cometas desconocidos. Muchas lluvias producen cerca de 20 meteoros por hora, pero hay lluvias que pueden producir miles de meteoros en períodos menores de una hora. Estos espectáculos son, desafortunadamente, muy infrecuentes. Las lluvias de meteoros se llaman según la constelación de la que parecen irradiar. Una lista de lluvias de meteoros prominentes aparece abajo.



Figura 5.10: Un meteoro de la familia de las Leónidas.

### 5.5.2. Meteoros esporádicos

Pueden verse meteoros en cualquier noche del año cuando la Luna no está brillante. Si no está activa alguna lluvia prominente, la mayoría de los meteoros que se observen vendrán de direcciones aleatorias en el espacio y no mostrarán tendencia a irradiar de ninguna parte del cielo. Estos meteoros son llamados meteoros esporádicos, y cerca de 7 por hora es su rata normal de observación. La mayoría de los bólidos y meteoritos son meteoros esporádicos. El material de estos meteoros está asociado con el material de los asteroides, y es probable que ellos representen material provenientes de asteroides fragmentados.

Algunos tipos más raros de materiales meteóricos, se piensa que se originaron en la Luna y en Marte, posiblemente como resultado de materiales arrojados de

la superficie por la explosión causada por el impacto de un gran meteorito.

## 5.6. Los meteoritos

Cuando grandes trozos de materia interplanetaria entran en la atmósfera, es poco probable que todo el trozo sea evaporado. Las capas externas desaparecerán, pero el centro es probable que sobreviva y golpee el suelo. El objeto que golpea el suelo es llamado un meteorito. La velocidad con que los meteoritos pequeños golpean el suelo puede estar alrededor de 500 Km/hr.

Los meteoritos son rocas de dimensiones no mayores que diez metros. Estos cuerpos están clasificados en tres grandes clases: meteoritos rocosos los cuales se componen simplemente de roca carbonacea, es la clase más abundante. Luego le siguen los meteoritos de roca ferrosa que se componen de iguales cantidades de roca y de hierro. Solo el 1% de los meteoritos son de roca ferrosa. Finalmente tenemos a los meteoritos metálicos los que están hechos de solo de metales como el hierro, níquel, etc. Constituyen solo el 4% de los meteoritos.

Más de 2000 meteoritos se han recuperado. Son de diferentes tipos, meteoritos rocosos, meteoritos ferrosos, y las raras condritas carbonáceas. El mayor meteorito que se ha encontrado es el Hoba, un meteorito de hierro de 60 toneladas; el mayor meteorito rocoso pesa cerca de una tonelada y la condrita carbonácea Allende era una serie de trozos que totalizaban cerca de 5 toneladas.

Se conocen cráteres de impacto en la Tierra que corresponden a cuerpos mucho mayores que esos. Uno de los más conocidos, es el cráter de Arizona en los Estados Unidos de América, que tiene 1280 metros de diámetro y 180 metros de profundidad. Fue formado hace varios miles de años por un meteorito de unas 250000 toneladas con un diámetro de unos 70 metros, que golpeó a la Tierra a una velocidad de casi 60000 Km/hr.

# Capítulo 6

## La Luna

### 6.1. Introducción

La Luna es el objeto astronómico más cercano a la Tierra. Junto con la Tierra, forman lo que es casi un planeta doble, pues ningún otro planeta tiene un satélite que sea tan grande en comparación con el tamaño del planeta. La Luna tiene un diámetro de 3.476 km. y orbita la Tierra a una distancia promedio de 384.000 km. Esta órbita toma 27,322 días, y la Luna siempre mantiene la misma cara apuntando hacia la Tierra.

La Luna brilla reflejando la luz del Sol y muestra sus características fases durante cada órbita alrededor de la Tierra. Cerca de Luna Nueva, cuando la porción de la Luna iluminada por el Sol es pequeña, el fenómeno de 'La vieja Luna en brazos de la joven' se ve con frecuencia. Esto es causado por la luz del Sol reflejada hacia la Luna desde la Tierra, que es de nuevo reflejada de vuelta hacia la Tierra. Estamos viendo el brillo de la Tierra iluminando la zona oscura de la Luna.

El plano orbital de la Luna alrededor de la Tierra, está inclinado con respecto al de la Tierra alrededor del Sol. Por esto, los eclipses de Sol y de Luna sólo pueden verse cuando la Luna Nueva o Llena ocurren cuando la Luna está cerca de la línea de intersección de estos dos planos.

La atracción gravitacional de la Luna y la del Sol son causantes de las mareas.

La Luna no tiene atmósfera. Cualquier atmósfera primitiva que la Luna pudiera haber tenido, ha escapado de la débil atracción gravitacional de la Luna. Esta es sólo un sexto de la de la Tierra.

Debido a la falta de atmósfera, la temperatura en la superficie de la Luna varía entre 110°C C y -180°C, dependiendo de si la zona se encuentra o no iluminada. La Luna ofrece poca protección contra el viento Solar, rayos cósmicos, o micrometeoritos, y por tanto no es sorprendente que no haya formas de vida en la Luna.

La superficie de la Luna se caracteriza por regiones montañosas claras, separadas por los oscuros 'mares'. El 'Hombre de la Luna' está formado por zonas



Figura 6.1: Nuestra huella en la Luna.

de estos dos tipos de terreno. Los mares son vastas hoyas de impacto que fueron rellenadas por rocas basálticas hace unos 3.000 millones de años.

Mucho de la superficie de la Luna está cubierta de cráteres. Estos son el resultado de los impactos de meteoros. Los más grandes tienen cerca de 200 Km. de diámetro, los más pequeños sólo cerca de un metro de diámetro. La mayoría de estos cráteres fueron formados hace 3.000 a 4.000 millones de años.

La mayor parte de nuestros conocimientos sobre la estructura de la superficie Lunar y geología de la Luna proviene de los aterrizajes de la serie Apollo y de las muestras de material Lunar que fueron traídas de vuelta a la Tierra. A pesar de esto, no estamos todavía seguros de cómo se formó la Luna. La teoría más probable es que la Tierra y la Luna se formaron al mismo tiempo, como un 'planta doble'.

La Luna es probablemente el objeto más satisfactorio de observar a través de un telescopio. Los cráteres y montañas pueden verse incluso con un telescopio pequeño.

El mejor lugar para mirar es cerca del terminador, en donde el Sol está poniéndose o saliendo en la Luna. Allí las sombras de las montañas y de las paredes de los cráteres son más largas y pueden producir vistas muy dramáticas. Luego de un tiempo tan corto como una hora, se pueden ver cambios en las sombras, a medida que la luz del Sol alcanza o abandona los picos cercanos al terminador.

Muchos astrónomos aficionados buscan 'fenómenos Lunares transitorios'. Estos son alteraciones de alguna forma, que dan lugar a cambios de corta duración en el color o brillo de pequeñas áreas. No está claro cuantos de ellos son reales o qué los causa.



Figura 6.2: La Luna.



## Capítulo 7

# Satélites y anillos planetarios

### 7.1. Introducción

Aparte de los siguientes, los planos orbitales de todos los satélites están dentro de 5 grados de los planos orbitales de sus planetas primarios:

- La Luna está entre  $18^\circ$  y  $28^\circ$ .
- Júpiter XIII, VI, X, y VII, están en cerca de  $28^\circ$ .
- Júpiter XII, XI, VIII, y IX, están en cerca de  $150^\circ$ .
- Saturno VIII está en  $15^\circ$  grados, y Saturno IX en  $175^\circ$ .
- Urano I está en  $159^\circ$  grados, y Urano II está en  $28^\circ$ .
- Plutón I está en  $99^\circ$ .
- Plutón I está en  $99^\circ$ .

Los anillos de Saturno tienen diámetros de 134.000 km. a 48.0000 km.

Los anillos alrededor de otros planetas no son visibles desde la Tierra. Donde se dan varios valores para el diámetro, esto indica que el satélite es marcadamente no esférico.

Los números representan diámetros a lo largo de ejes perpendiculares.

Los períodos dados, son períodos sidéreos de rotación alrededor del planeta.

Las distancias promedio, están dadas en miles de kilómetros.

Los satélites clásicos fueron descubiertos por medio de observaciones visuales desde la Tierra, todos antes del siglo 20. En 1892 Edward Barnard encontró Amaltea, el último satélite descubierto visualmente.

Planeta	Satélite	Magnitud	Periodo (días)	Distancia ( $10^6$ km)	Descubrimiento
Tierra	Luna	-12,74	27,32	0,384	—
Marte	Fobos	11,30	0,32	0,009	1877, Hall
	Deimos	12,40	1,26	0,023	1877, Hall
Júpiter	Amaltea	14,10	0,50	0,181	1892, Barnard
	Ío	5,02	1,77	0,42	1610, Galileo
	Europa	5,29	3,55	0,67	1610, Galileo
	Ganímedes	4,61	7,15	1,07	1610, Galileo
	Calisto	5,65	16,69	1,88	1610, Galileo
Saturno	Mimas	12,90	9,42	0,186	1789, Herschel
	Encélado	11,70	1,37	0,238	1789, Herschel
	Tetis	10,20	1,89	0,295	1684, Cassini
	Dione	10,40	2,74	0,377	1684, Cassini
	Rea	10,00	4,52	0,527	1672, Cassini
	Titán	8,28	15,94	1,22	1655, Huygens
	Hiperión	14,19	21,28	1,481	1848, Bond
	Japeto	11,05	79,33	3,561	1671, Cassini
	Febe	16,45	-550,48	12,952	1898, Pickering
Urano	Miranda	16,30	1,41	0,130	1948, Kuiper
	Ariel	14,16	2,52	0,191	1851, Lassell
	Umbriel	14,81	4,14	0,266	1851, Lassell
	Titania	13,73	8,71	0,436	1787, Herschel
	Oberón	13,94	13,46	0,583	1787, Herschel
Neptuno	Tritón	13,47	-5,88	0,355	1846, Lassell
	Nereida	18,70	360,14	5,513	1949, Kuiper
Plutón	Caronte	16,80	6,39	0,02	1978, Christy

Cuadro 7.1: Los satélites clásicos



Parte II

**Astrofísica**



## Capítulo 8

# Las estrellas

### 8.1. Introducción



Aunque la mayor parte del espacio que podemos observar está vacío, es inevitable que nos fijemos en esos puntitos que brillan. No es que el espacio vacío carezca de interés. Simplemente, las estrellas llaman la atención.

A causa de la atracción gravitatoria, la materia de las estrellas tiende a concentrarse en su centro. Pero eso hace que aumente su temperatura y presión. A partir de ciertos límites, este aumento provoca reacciones nucleares que liberan energía y equilibran la fuerza de la gravedad, con lo que el tamaño de la estrella se

mantiene más o menos estable durante un tiempo, emitiendo al espacio grandes cantidades de radiación, entre ellas, por supuesto, la luminosa.

Sin embargo, dependiendo de la cantidad de materia reunida en un astro y del momento del ciclo en el que se encuentra, se pueden dar fenómenos y comportamientos muy diversos. Enanas, gigantes, dobles, variables, cuásares, púlsares, agujeros negros, ... En este capítulo vamos a dar una visión general sobre las estrellas, sus tipos, sus comportamientos y su evolución.

Las estrellas son masas de gases, principalmente hidrógeno y helio, que emiten luz. Se encuentran a temperaturas muy elevadas. En su interior hay reacciones nucleares.

El Sol es una estrella. Vemos las estrellas, excepto el Sol, como puntos luminosos muy pequeños, y sólo de noche, porque están a enormes distancias de nosotros. Parecen estar fijas, manteniendo la misma posición relativa en los cielos año tras año. En realidad, las estrellas están en rápido movimiento, pero a distancias tan grandes que sus cambios de posición se perciben sólo a través de los siglos.

El número de estrellas observables a simple vista desde la Tierra se ha calculado en unas 8.000, la mitad en cada hemisferio. Durante la noche no se pueden ver más de 2.000 al mismo tiempo, el resto quedan ocultas por la neblina atmosférica, sobre todo cerca del horizonte, y la pálida luz del cielo.

Los astrónomos han calculado que el número de estrellas de la Vía Láctea, la galaxia a la que pertenece el Sol, asciende a cientos de miles de millones.

Como nuestro Sol, una estrella típica tiene una superficie visible llamada fotosfera, una atmósfera llena de gases calientes y, por encima de ellas, una corona más difusa y una corriente de partículas denominada viento estelar. Las áreas más frías de la fotosfera, que en el Sol se llaman manchas solares, probablemente se encuentren en otras estrellas comunes. Esto se ha podido comprobar en algunas grandes estrellas próximas mediante interferometría.

La estructura interna de las estrellas no se puede observar de forma directa, pero hay estudios que indican corrientes de convección y una densidad y una temperatura que aumentan hasta alcanzar el núcleo, donde tienen lugar reacciones termonucleares.

Las estrellas se componen sobre todo de hidrógeno y helio, con cantidad variable de elementos más pesados.

Las estrellas individuales visibles en el cielo son las que están más cerca del Sistema Solar en la Vía Láctea. La más cercana es Próxima Centauri, uno de los componentes de la estrella triple Alpha Centauri, que está a unos 40 billones de kilómetros de la Tierra.

Se trata de un sistema de tres estrellas situado a 4,3 años luz de La Tierra, que sólo es visible desde el hemisferio sur. La más cercana (Alpha Centauro A) tiene un brillo real igual al de nuestro Sol.

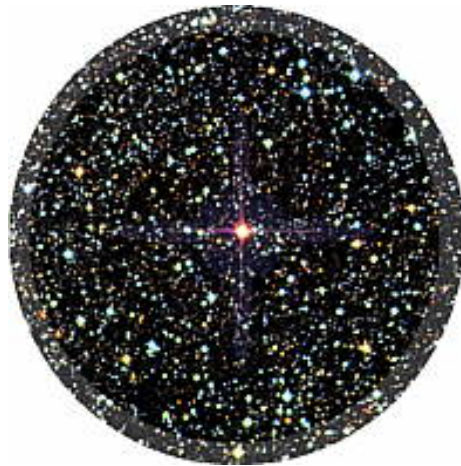


Figura 8.1:  $\alpha$  Centauri, la estrella más cercana al Sistema Solar.

$\alpha$  Centauri, también llamada Rigil Kentaurus, está en la constelación de Centauro. A simple vista,  $\alpha$  Centauri aparece como una única estrella con una

magnitud aparente de  $-0,3$ , que la convierte en la tercera estrella más brillante del cielo sur.

Cuando se observa a través de un telescopio se advierte que las dos estrellas más brillantes,  $\alpha$  Centauri A y B, tienen magnitudes aparentes de  $-0,01$  y  $1,33$  y giran una alrededor de la otra en un periodo de 80 años.

La estrella más débil,  $\alpha$  Centauri C, tiene una magnitud aparente de  $11,05$  y gira alrededor de sus compañeras durante un periodo aproximado de un millón de años.  $\alpha$  Centauri C también recibe el nombre de Próxima Centauri, ya que es la estrella más cercana al Sistema Solar.

Aunque la mayor parte del espacio que podemos observar está vacío, es inevitable que nos fijemos en esos puntitos que brillan. No es que el espacio vacío carezca de interés. Simplemente, las estrellas llaman la atención.

## 8.2. Clasificación

El estudio fotográfico de los espectros estelares lo inició en 1885 el astrónomo Edward Pickering en el observatorio del Harvard College y lo concluyó su colega Annie J. Cannon. Esta investigación condujo al descubrimiento de que los espectros de las estrellas están dispuestos en una secuencia continua según la intensidad de ciertas líneas de absorción. Las observaciones proporcionan datos de las edades de las diferentes estrellas y de sus grados de desarrollo.

Las diversas etapas en la secuencia de los espectros, designadas con las letras O, B, A, F, G, K y M, permiten una clasificación completa de todos los tipos de estrellas. Los subíndices del 0 al 9 se utilizan para indicar las sucesiones en el modelo dentro de cada clase.

- O** Líneas del helio, el oxígeno y el nitrógeno, además de las del hidrógeno. Comprende estrellas muy calientes, e incluye tanto las que muestran espectros de línea brillante del hidrógeno y el helio como las que muestran líneas oscuras de los mismos elementos.
- B** Líneas del helio alcanzan la máxima intensidad en la subdivisión B2 y palidecen progresivamente en subdivisiones más altas. La intensidad de las líneas del hidrógeno aumenta de forma constante en todas las subdivisiones. Este grupo está representado por la estrella  $\epsilon$  Orionis.
- A** Comprende las llamadas estrellas de hidrógeno con espectros dominados por las líneas de absorción del hidrógeno. Una estrella típica de este grupo es Sirio.
- F** En este grupo destacan las llamadas líneas H y K del calcio y las líneas características del hidrógeno. Una estrella notable en esta categoría es  $\delta$  Aquilae.
- G** Comprende estrellas con fuertes líneas H y K del calcio y líneas del hidrógeno menos fuertes. También están presentes los espectros de muchos

metales, en especial el del hierro. El Sol pertenece a este grupo y por ello a las estrellas G se les denomina *estrellas de tipo solar*.

- K** Estrellas que tienen fuertes líneas del calcio y otras que indican la presencia de otros metales. Este grupo está tipificado por Arturo.
- M** Espectros dominados por bandas que indican la presencia de óxidos metálicos, sobre todo las del óxido de titanio. El final violeta del espectro es menos intenso que el de las estrellas K. La estrella Betelgeuse es típica de este grupo.

Las estrellas más grandes que se conocen son las súper gigantes, con diámetros unas 400 veces mayores que el del Sol, en tanto que las estrellas conocidas como "enanas blancas" pueden tener diámetros de sólo una centésima del Sol. Sin embargo, las estrellas gigantes suelen ser difusas y pueden tener una masa apenas unas 40 veces mayor que la del Sol, mientras que las enanas blancas son muy densas a pesar de su pequeño tamaño.

Puede haber estrellas con una masa 1.000 veces mayor que la del Sol y, a escala menor, bolas de gas caliente demasiado pequeñas para desencadenar reacciones nucleares. Un objeto que puede ser de este tipo (una enana marrón) fue observado por primera vez en 1987, y desde entonces se han detectado otros.

El brillo de las estrellas se describe en términos de magnitud. Las estrellas más brillantes pueden ser hasta 1.000.000 de veces más brillantes que el Sol; las enanas blancas son unas 1.000 veces menos brillantes.

Las clases establecidas por Annie Jump Cannon se identifican con colores:

- Azul, como la estrella I Cephei.
- Blanco-azul, como la estrella Spica.
- Blanco, como la estrella Vega.
- Blanco-amarillo, como la estrella Proción.
- Amarillo, como el Sol.
- Naranja, como Arcturus.
- Rojo, como la estrella Betelgeuse.

A menudo las estrellas se nombran usando la referencia a su tamaño y a su color: enanas blancas, gigantes rojas, . . .

## Capítulo 9

# La evolución de las estrellas

### 9.1. Introducción

Las estrellas evolucionan durante millones de años. Nacen cuando se acumula una gran cantidad de materia en un lugar del espacio. Se comprime y se calienta hasta que empieza una reacción nuclear, que consume la materia, convirtiéndola en energía. Las estrellas pequeñas la gastan lentamente y duran más que las grandes.



Figura 9.1: Nebulosa de formación estelar.

Las teorías sobre la evolución de las estrellas se basan en pruebas obtenidas de estudios de los espectros relacionados con la luminosidad. Las observaciones demuestran que muchas estrellas se pueden clasificar en una secuencia regular en la que las más brillantes son las más calientes y las más pequeñas, las más

frías.

Esta serie de estrellas forma una banda conocida como la secuencia principal en el diagrama temperatura-luminosidad conocido como diagrama Hertzsprung-Russell. Otros grupos de estrellas que aparecen en el diagrama incluyen a las estrellas gigantes y enanas antes mencionadas.

## 9.2. La vida de una estrella

El ciclo de vida de una estrella empieza como una gran masa de gas relativamente fría. La contracción del gas eleva la temperatura hasta que el interior de la estrella alcanza  $1000000^{\circ}\text{C}$ . En este punto tienen lugar reacciones nucleares, cuyo resultado es que los núcleos de los átomos de hidrógeno se combinan con los de deuterio para formar núcleos de helio. Esta reacción libera grandes cantidades de energía, y se detiene la contracción de la estrella.

Cuando finaliza la liberación de energía, la contracción comienza de nuevo y la temperatura de la estrella vuelve a aumentar. En un momento dado empieza una reacción entre el hidrógeno, el litio y otros metales ligeros presentes en el cuerpo de la estrella. De nuevo se libera energía y la contracción se detiene.

Cuando el litio y otros materiales ligeros se consumen, la contracción se reanuda y la estrella entra en la etapa final del desarrollo en la cual el hidrógeno se transforma en helio a temperaturas muy altas gracias a la acción catalítica del carbono y el nitrógeno. Esta reacción termonuclear es característica de la secuencia principal de estrellas y continúa hasta que se consume todo el hidrógeno que hay.

La estrella se convierte en una gigante roja y alcanza su mayor tamaño cuando todo su hidrógeno central se ha convertido en helio. Si sigue brillando, la temperatura del núcleo debe subir lo suficiente como para producir la fusión de los núcleos de helio. Durante este proceso es probable que la estrella se haga mucho más pequeña y más densa.

Cuando ha gastado todas las posibles fuentes de energía nuclear, se contrae de nuevo y se convierte en una enana blanca. Esta etapa final puede estar marcada por explosiones conocidas como *novas*. Cuando una estrella se libera de su cubierta exterior explotando como nova o supernova, devuelve al medio interestelar elementos más pesados que el hidrógeno que ha sintetizado en su interior.

Las generaciones futuras de estrellas formadas a partir de este material comenzarán su vida con un surtido más rico de elementos pesados que las anteriores generaciones. Las estrellas que se despojan de sus capas exteriores de una forma no explosiva se convierten en nebulosas planetarias, estrellas viejas rodeadas por esferas de gas que irradian en una gama múltiple de longitudes de onda.



### 9.3. De estrella a agujero negro

Las estrellas con una masa mucho mayor que la del Sol sufren una evolución más rápida, de unos pocos millones de años desde su nacimiento hasta la explosión de una supernova. Los restos de la estrella pueden ser una estrella de neutrones.

Sin embargo, existe un límite para el tamaño de las estrellas de neutrones, más allá del cual estos cuerpos se ven obligados a contraerse hasta que se convierten en un agujero negro, del que no puede escapar ninguna radiación.

Estrellas típicas como el Sol pueden persistir durante muchos miles de millones de años. El destino final de las enanas de masa baja es desconocido, excepto que cesan de irradiar de forma apreciable. Lo más probable es que se conviertan en cenizas o enanas negras.

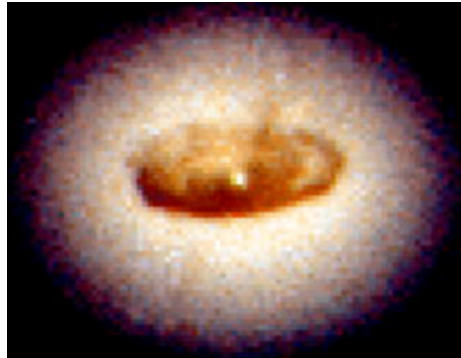


Figura 9.2: ¿Agujero negro?.

### 9.4. Estrellas dobles

Las estrellas dobles (o binarias) son muy frecuentes. Una estrella doble es una pareja de estrellas que se mantienen unidas por la fuerza de la gravitación y giran en torno a su centro común.

Los periodos orbitales, que van desde minutos en el caso de parejas muy cercanas hasta miles de años en el caso de parejas distantes, dependen de la separación entre las estrellas y de sus respectivas masas.

También hay estrellas múltiples, sistemas en que tres o cuatro estrellas giran en trayectorias complejas. Lira parece una estrella doble, pero a través de un telescopio se ve como cada uno de los dos componentes es un sistema binario.

La observación de las órbitas de estrellas dobles es el único método directo que tienen los astrónomos para pesar las estrellas.

En el caso de parejas muy próximas, su atracción gravitatoria puede distorsionar la forma de las estrellas, y es posible que fluya gas de una estrella a otra en un proceso llamado transferencia de masas.

A través del telescopio se detectan muchas estrellas dobles que parecían simples. Sin embargo, cuando están muy próximas, sólo se detectan si se estudia su luz mediante espectroscopia. Entonces se ven los espectros de dos estrellas, y su movimiento se puede deducir por el efecto Doppler en ambos espectros. Estas parejas se denominan binarias espectroscópicas.

La mayoría de las estrellas que vemos en el cielo son dobles o incluso múltiples. Ocasionalmente, una de las estrellas de un sistema doble puede ocultar a la otra al ser observadas desde la Tierra, lo que da lugar a una binaria eclipsante.

En la mayoría de los casos, se cree que las componentes de un sistema doble se han originado simultáneamente, aunque otras veces, una estrella puede ser capturada por el campo gravitatorio de otra en zonas de gran densidad estelar, como los cúmulos de estrellas, dando lugar al sistema doble.

## 9.5. Estrellas variables

Este concepto engloba cualquier estrella cuyo brillo, visto desde la Tierra, no es constante. Pueden ser estrellas cuya emisión de luz fluctúa realmente, intrínsecas, o estrellas cuya luz se ve interrumpida en su trayectoria hacia la Tierra, por otra estrella o una nube de polvo interestelar, llamadas variables extrínsecas.

Los cambios en la intensidad luminosa en las variables intrínsecas se deben a pulsaciones en el tamaño de la estrella (variables pulsantes) o a interacciones entre las componentes de una estrella doble.

Algunas otras variables intrínsecas no encajan en ninguna de estas dos categorías.

El único tipo frecuente de variable extrínseca es la llamada “binaria eclipsante”. Se trata de una estrella doble formada por dos estrellas próximas que pasan periódicamente una por delante de la otra. Algol es el ejemplo más conocido. Las binarias eclipsantes constituyen casi el 20% de las estrellas variables conocidas.

### 9.5.1. Variables cefeidas

Las cefeidas son parejas orientadas de manera que, periódicamente, se eclipsan una a otra. Probablemente, los ejemplos más conocidos sean las variables cefeidas, cuyas pulsaciones periódicas indicaban su brillo, por lo que constituyen una importante referencia para la medición de distancias en el espacio.

Sus periodos de pulsación varían entre un día y unos cuatro meses, y sus variaciones de luminosidad pueden ser de entre un 50 y un 600

La relación entre su luminosidad media y el periodo de pulsación fue descubierta en 1912 por Henrietta S. Leavitt, y se conoce como relación periodo-luminosidad. Leavitt encontró que la luminosidad de una cefeida aumenta de manera proporcional a su periodo de pulsación.

Así, los astrónomos pueden determinar la luminosidad intrínseca de una cefeida simplemente midiendo el periodo de pulsación. La luminosidad aparente de una estrella en el cielo depende de su distancia a la Tierra; comparando esta

luminosidad con su luminosidad intrínseca se puede determinar la distancia a la que se encuentra. De este modo, las cefeidas pueden utilizarse como indicadores de distancias tanto dentro como fuera de la Vía Láctea.

Existen dos tipos de cefeidas. Las más comunes se llaman cefeidas clásicas y las otras, más viejas y débiles, se conocen como estrellas W Virginis. Los dos tipos poseen distintas relaciones periodo-luminosidad.

## 9.6. Novas y supernovas

Son estrellas que explotan liberando en el espacio parte de su material. Durante un tiempo variable, su brillo aumenta de forma espectacular. Parece que ha nacido una estrella nueva.

Una nova es una estrella que aumenta enormemente su brillo de forma súbita y después palidece lentamente, pero puede continuar existiendo durante cierto tiempo. Una supernova también, pero la explosión destruye o altera a la estrella. Las supernovas son mucho más raras que las novas, que se observan con bastante frecuencia en las fotos.

Las novas y las supernovas aportan materiales al Universo que servirán para formar nuevas estrellas.

### 9.6.1. Novas, ¿estrellas nuevas?

Antiguamente, a una estrella que aparecía de golpe donde no había nada, se le llamaba nova, o 'estrella nueva'. Pero este nombre no es correcto, ya que estas estrellas existían mucho antes de que se pudieran ver a simple vista.

Quizá aparezcan 10 o 12 novas por año en la Vía Láctea, pero algunas están demasiado lejos para poder verlas o las oscurece la materia interestelar.

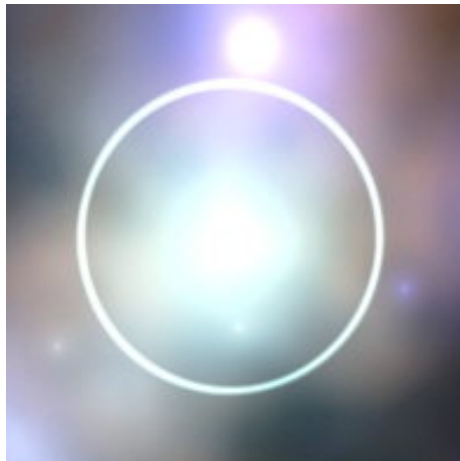


Figura 9.3: Stella Nova.

A las novae se las observa con más facilidad en otras galaxias cercanas que en la nuestra. Una nova incrementa en varios miles de veces su brillo original en cuestión de días o de horas. Después entra en un periodo de transición, durante el cual palidece, y cobra brillo de nuevo; a partir de ahí palidece poco a poco hasta llegar a su nivel original de brillo.

Las novae son estrellas en un periodo tardío de evolución. Explotan porque sus capas exteriores han formado un exceso de helio mediante reacciones nucleares y se expande con demasiada velocidad como para ser contenida. La estrella despidе de forma explosiva una pequeña fracción de su masa como una capa de gas, aumenta su brillo y, después se normaliza.

La estrella que queda es una enana blanca, el miembro más pequeño de un sistema binario, sujeto a una continua disminución de materia en favor de la estrella más grande. Este fenómeno sucede con las novae enanas, que surgen una y otra vez a intervalos regulares.

### 9.6.2. Supernovas

La explosión de una supernova es más destructiva y espectacular que la de una nova, y mucho más rara. Esto es poco frecuente en nuestra galaxia, y a pesar de su increíble aumento de brillo, pocas se pueden observar a simple vista.

Hasta 1987 sólo se habían identificado tres a lo largo de la historia. La más conocida es la que surgió en 1054 y cuyos restos se conocen como la nebulosa del Cangrejo.

Las supernovas, al igual que las novae, se ven con más frecuencia en otras galaxias. Así pues, la supernova más reciente, que apareció en el hemisferio sur el 24 de febrero de 1987, surgió en una galaxia satélite, la Gran Nube de Magallanes. Esta supernova, que tiene rasgos insólitos, es objeto de un intenso estudio astronómico.

Las estrellas muy grandes explotan en las últimas etapas de su rápida evolución, como resultado de un colapso gravitacional. Cuando la presión creada por los procesos nucleares, ya no puede soportar el peso de las capas exteriores y la estrella explota. Se le denomina supernova de Tipo II.

Una supernova de Tipo I se origina de modo similar a una nova. Es un miembro de un sistema binario que recibe el flujo de combustible al capturar material de su compañero.

De la explosión de una supernova quedan pocos restos, salvo la capa de gases que se expande. Un ejemplo famoso es la nebulosa del Cangrejo; en su centro hay un púlsar, o estrella de neutrones que gira a gran velocidad.

## 9.7. Púlsares

La palabra Púlsar es un acrónimo de “pulsating radio source”, fuente de radio pulsante. Se requieren relojes de extraordinaria precisión para detectar cambios de ritmo, y sólo en algunos casos.



Figura 9.4: Supernova.

Los Púlsares son fuentes de ondas de radio que vibran con periodos regulares. Se detectan mediante radiotelescopios.

Los estudios indican que un púlsar es una estrella de neutrones pequeña que gira a gran velocidad. El más conocido está en la nebulosa de Cangrejo.

Su densidad es tan grande que, en ellos, la materia de la medida de una bola de bolígrafo tiene una masa de cerca de 100.000 toneladas. Emiten una gran cantidad de energía.

El campo magnético, muy intenso, se concentra en un espacio reducido. Esto lo acelera y lo hace emitir un haz de radiaciones que aquí recibimos como ondas de radio.

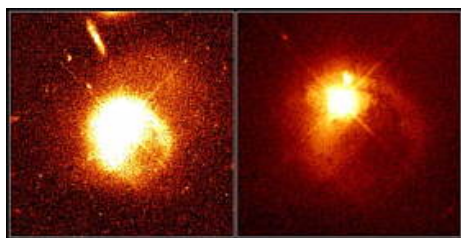


Figura 9.5: Pulsar.

Las pulsares fueron descubiertas en 1967 por Anthony Hewish y Jocelyn Bell en el observatorio de radio astronomía en Cambridge. Se conocen más

de 300, pero sólo dos, la Pulsar del Cangrejo, y la Pulsar de la Vela, emiten pulsos visibles detectables. Se sabe que estas dos también emiten pulsos de rayos gamma, y una, la del Cangrejo, también emite pulsos de rayos-X.

La regularidad de los pulsos es fenomenal: los observadores pueden ahora predecir los tiempos de llegada de los pulsos con antelación de un año, con una precisión mejor que un milisegundo.

Las pulsares son estrellas de neutrones fuertemente magnetizadas. La rápida rotación, por tanto, las hace poderosos generadores eléctricos, capaces de acelerar las partículas cargadas hasta energías de mil millones de millones de Voltios.

Estas partículas cargadas son responsables del haz de radiación en radio, luz, rayos-X, y rayos gamma. Su energía proviene de la rotación de la estrella, que tiene por tanto que estar bajando de velocidad. Esta disminución de velocidad puede ser detectada como un alargamiento del período de los pulsos.

Los pulsares se han encontrado principalmente en la Vía Láctea. Un escrutinio completo es imposible, ya que los pulsares débiles solo pueden ser detectados si están cercanos.

Los sondeos de radio ya han cubierto casi todo el cielo. Sus distancias pueden medirse a partir de un retardo en los tiempos de llegada de los pulsos observados en las radio frecuencias bajas; el retardo depende de la densidad de los electrones en el gas interestelar, y de la distancia recorrida.

Extrapolando a partir de esta pequeña muestra de pulsares detectables, se estima que hay al menos 200.000 pulsares en toda nuestra Galaxia. Considerando aquellos pulsares cuyos haces de faro no barren en nuestra dirección, la población total debería alcanzar un millón.

Cada pulsar emite durante cerca de cuatro millones de años; después de este tiempo ha perdido tanta energía rotacional que no puede producir pulsos de radio detectables. Si conocemos la población total (1.000.000), y el tiempo de vida (4.000.000 de años), podemos deducir que un nuevo pulsar debe nacer cada cuatro años, asumiendo que la población permanece estable.

Recientemente se han encontrado pulsares en cúmulos globulares. Se piensa que han sido formados allí por la acreción de materia en estrellas enanas blancas en sistemas binarios.

Otros pulsares nacen en explosiones de supernovas. Si todos los pulsares fuesen nacidos en explosiones de supernovas, podríamos predecir que debería haber una supernova en nuestra Galaxia cada cuatro años, pero esto no está todavía claro.

## 9.8. Agujeros negros

Son cuerpos con un campo gravitatorio extraordinariamente grande.

No puede escapar ninguna radiación electromagnética ni luminosa, por eso son negros. Están rodeados de una frontera esférica que permite que la luz entre pero no salga.

Hay dos tipos de agujeros negros: cuerpos de alta densidad y poca masa concentrada en un espacio muy pequeño, y cuerpos de densidad baja pero masa muy grande, como pasa en los centros de las galaxias.

Si la masa de una estrella es más de dos veces la del Sol, llega un momento en su ciclo en que ni tan solo los neutrones pueden soportar la gravedad. La estrella se colapsa y se convierte en agujero negro.

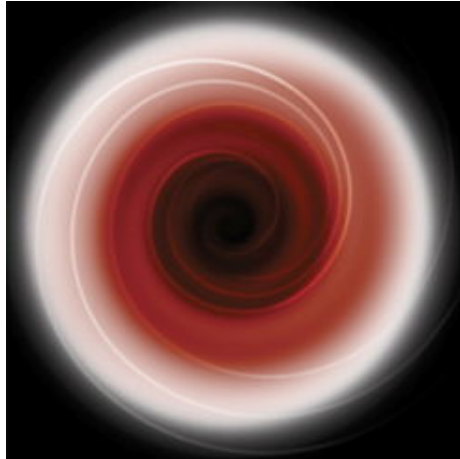


Figura 9.6: Agujero negro.

## 9.9. Conos luminosos

El científico británico Stephen W. Hawking ha dedicado buena parte de su trabajo al estudio de los agujeros negros.

En su libro “Historia del Tiempo” explica cómo, en una estrella que se está colapsando, los conos luminosos que emite empiezan a curvarse en la superficie de la estrella.

Al hacerse pequeña, el campo gravitatorio crece y los conos de luz se inclinan cada vez más, hasta que ya no pueden escapar. La luz se apaga y se vuelve negro.

Si un componente de una estrella binaria se convierte en agujero negro, toma material de su compañera. Cuando el remolino se acerca al agujero, se mueve tan deprisa que emite rayos X. Así, aunque no se puede ver, se puede detectar por sus efectos sobre la materia cercana.

Los agujeros negros no son eternos. Aunque no se escape ninguna radiación, parece que pueden hacerlo algunas partículas atómicas y subatómicas.

Alguien que observase la formación de un agujero negro desde el exterior, vería una estrella cada vez más pequeña y roja hasta que, finalmente, desaparecería. Su influencia gravitatoria, sin embargo, seguiría intacta.

Como en el Big-Bang, en los agujeros negros se da una singularidad, es decir, las leyes físicas y la capacidad de predicción fallan. En consecuencia, ningún observador externo puede ver qué pasa dentro.

Las ecuaciones que intentan explicar una singularidad de los agujeros negros han de tener en cuenta el espacio y el tiempo. Las singularidades se situarán siempre en el pasado del observador (como el Big-Bang) o en su futuro (como los colapsos gravitatorios). Esta hipótesis se conoce con el nombre de “censura cósmica”.



# Capítulo 10

## Las galaxias

### 10.1. Introducción

Las galaxias son acumulaciones enormes de estrellas, gases y polvo.

En el Universo hay centenares de miles de millones. Cada galaxia puede estar formada por centenares de miles de millones de estrellas y otros astros. En el centro de las galaxias es donde se concentran más estrellas. Cada cuerpo de una galaxia se mueve a causa de la atracción de los otros. En general hay, además, un movimiento más amplio que hace que todo junto gire alrededor del centro.

El movimiento irregular de los objetos que se encuentran en los bordes de la galaxia se ha tomado como evidencia de la existencia de la llamada materia oscura, la presencia de dicha materia provocaría un aumento en la velocidad de giro en el extremo de la galaxia.



Figura 10.1: La galaxia de Andrómeda.

La galaxia grande más cercana es la de Andrómeda. Se puede observar a

simple vista y parece una mancha luminosa de aspecto brumoso. Los astrónomos árabes ya la habían observado. Actualmente se la conoce con la denominación M31. Está a unos 2.200.000 años luz de nosotros. Es el doble de grande que la Vía Láctea.

Las galaxias tienen un origen y una evolución. Las primeras galaxias se empezaron a formar 1.000 millones de años después del Big-Bang. Las estrellas que las forman tienen un nacimiento, una vida y una muerte. El Sol, por ejemplo, es una estrella formada por elementos de estrellas anteriores muertas.

Muchos núcleos de galaxias emiten una fuerte radiación, cosa que indica la probable presencia de un agujero negro.

Los movimientos de las galaxias provocan, a veces, choques violentos. Pero, en general, las galaxias se alejan las unas de las otras, como puntos dibujados sobre la superficie de un globo que se infla.

## 10.2. Clasificación

Según el aspecto que nos presentan a la observación pueden clasificarse las galaxias de diferentes modos. Nosotros mencionaremos aquí la llamada clasificación de Hubble, que, aún con el paso de los años, continúa siendo la más usada.

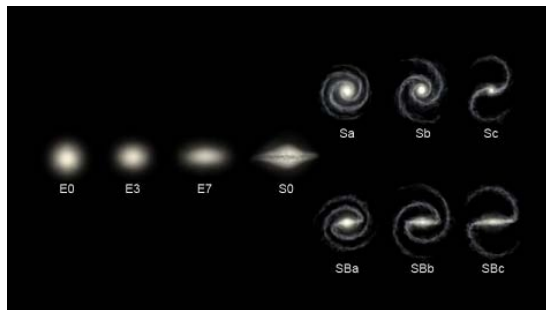


Figura 10.2: La clasificación de Hubble.

Según la clasificación de Hubble, se pueden considerar los cuatro siguientes tipos: Elípticas, espirales, lenticulares e irregulares. Los tres primeros se conocen como galaxias regulares.

### 10.2.1. Galaxias elípticas

Presentan la misma apariencia que un núcleo sin disco, con una luminosidad aparentemente uniforme. Carecen de gas y polvo; formadas por estrellas viejas, amarillas y de baja metalicidad. Esto es, estrellas de la población tipo II. Se distinguen desde las que son esféricas (tipo E0), hasta las muy achatadas (E7), pasando por los tipos intermedios E1, E2, ..., etc. En general se las sitúa en zonas

de alta densidad galáctica, en las zonas centrales de los cúmulos densamente poblados de galaxias.

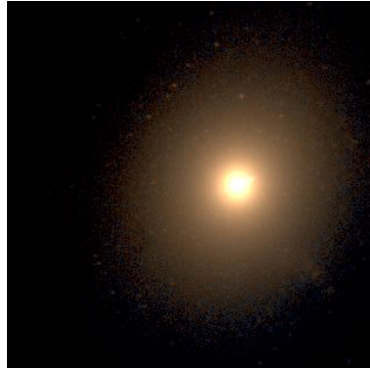


Figura 10.3: Galaxia elíptica.

### 10.2.2. Galaxias espirales

Presentan un núcleo o bulbo formado por estrellas de población II (viejas, amarillentas-anaranjadas, y de bajo contenido metálico), y un disco con gran cantidad de gas y polvo interestelar, lo que indica formación de estrellas jóvenes, azuladas y muy metálicas (estrellas de la población de tipo I), poblando los llamados brazos espirales, que se forman como ondas de densidad de choque, debido al movimiento de rotación de todo el disco galáctico de forma diferencial.

Básicamente, las galaxias espirales se clasifican en dos grandes grupos: Espirales normales y espirales barradas (con una barra de estrellas cruzando el núcleo).



Figura 10.4: Galaxia espiral.

Las galaxias espirales normales se clasifican según el grado de apertura de los brazos en Sa, Sb, Sc, ... (desde menos a más abiertas). Las galaxias espirales barradas se clasifican también, según el tamaño de la región nuclear y el grado de apertura de los brazos, en Sba, Sbb, Sbc, ...

Hubble distinguió también un tipo de galaxia a la que llamó S0, casi sin estructura espiral, pero que (aunque nunca llegó a observarla) pensó que habría de ser la galaxia de transición entre las lenticulares achatadas del tipo E7 y las espirales Sa o espirales barradas Sba.

### 10.2.3. Galaxias lenticulares

Presentan la apariencia de un núcleo con un disco, pero sin brazos espirales. Están formadas por estrellas viejas, poco metálicas, y si gas o polvo interestelar. Se diferencian de las galaxias elípticas en que sí tienen disco, al contrario que aquellas que solo presentaban un núcleo más o menos achatado. Y se diferencian de las galaxias espirales en que el disco es uniforme, esto es, sin brazos estelares debido a las ondas de densidad propias del movimiento diferencial de las estrellas alrededor del núcleo de la galaxia.



Figura 10.5: Galaxia lenticular.

### 10.2.4. Galaxias irregulares

Son galaxias que no presentan simetría de ningún tipo, no aparece definido un núcleo ni un disco. Los ejemplos más notables son las dos galaxias satélites de nuestra Vía Láctea: las Nubes de Magallanes.

## 10.3. Cúmulos galácticos

Las galaxias se agrupan formando cúmulos o grupos de galaxias, con influencia gravitatoria en general, de los que son ejemplos el pequeño Grupo Local, al que

pertenece nuestra galaxia, o el Cúmulo de Virgo, de gran número de galaxias.

Los cúmulos de galaxias pueden ser regulares o irregulares, a saber:

**Cúmulos regulares.** Poseen un núcleo central de galaxias y una estructura casi perfectamente esférica. Se acostumbra a clasificarlos por el número de galaxias que se encuentran dentro de un determinado radio (en general se utiliza un radio de 1'5 Megaparsecs) del centro. Es el llamado radio de Abell.

Típicamente tienen tamaños del orden 1 a 10 Megaparsecs y masas del orden de  $10^{14}$  a  $10^{16}$  masas solares. El cúmulo de Coma, es un cúmulo muy rico con miles de galaxias elípticas dentro del radio de Abell.

**Cúmulos irregulares.** Se diferencian de los regulares por no tener el centro del mismo bien definido, es decir no presentan una estructura esférica en general. El ejemplo más típico es el Cúmulo de Virgo.

### 10.3.1. Supercúmulos de galaxias

Consisten en cadenas de unos pocos, del orden de una veintena, de cúmulos galácticos. Nuestro propio Cúmulo, el Grupo Local, se encuentra inmerso dentro del supercúmulo de Virgo.



# Capítulo 11

## La Vía Láctea

### 11.1. Un camino en el cielo

En noches serenas podemos ver una franja blanca que atraviesa el cielo de lado a lado, con muchas estrellas.

Son sólo una pequeña parte de nuestros vecinos. Entre todos formamos la Vía Láctea. Los romanos la llamaron “Camino de Leche”, que es lo que significa Vía Láctea en latín.



Figura 11.1: La Vía Láctea vista desde la Tierra.

### 11.2. La Vía Láctea, nuestra galaxia

El Sistema Solar está en uno de los brazos de la espiral, a unos 30.000 años luz del centro y unos 20.000 del extremo.

La Vía Láctea es una galaxia grande, espiral y puede tener unos 100.000 millones de estrellas, entre ellas, el Sol. En total mide unos 100.000 años luz de diámetro y tiene una masa de más de dos billones de veces la del Sol.

Cada 225 millones de años el Sistema Solar completa un giro alrededor del centro de la galaxia. Se mueve a unos 270 km. por segundo.

No podemos ver el brillante centro porque se interponen materiales opacos, polvo cósmico y gases fríos, que no dejan pasar la luz. Se cree que contiene un poderoso agujero negro.



Figura 11.2: Ubicación del Sistema Solar en Vía Láctea.

La Vía Láctea tiene forma de lente convexa. El núcleo tiene una zona central de forma elíptica y unos 8.000 años luz de diámetro. Las estrellas del núcleo están más agrupadas que las de los brazos. A su alrededor hay una nube de hidrógeno, algunas estrellas y cúmulos estelares.

La Vía Láctea forma parte del Grupo Local. Junto con las galaxias de Andrómeda (M31) y del Triángulo (M33), las Nubes de Magallanes (satélites de la Vía Láctea), las galaxias M32 y M110 (satélites de Andrómeda), galaxias y nebulosas más pequeñas y otros sistemas menores, forman un grupo vinculado por la gravedad.

En total hay unas 30 galaxias que ocupan un área de unos 4 millones de años luz de diámetro.

Todo el grupo orbita alrededor del gran cúmulo de galaxias de Virgo, a unos 50 millones de años luz.



# Capítulo 12

## Cúmulos de estrellas

### 12.1. Introducción

Las estrellas no aparecen de forma aislada, sino formando grupos que llamamos cúmulos. Un cúmulo de estrellas, es un grupo de estrellas relacionadas que se mantienen juntas por efecto de la gravitación.

Los cúmulos de estrellas se clasifican en dos grupos: cúmulos abiertos, que no poseen forma definida; y cúmulos globulares, que son esféricos o casi esféricos. Los abiertos están formados por unos cientos estrellas jóvenes, mientras que los cúmulos globulares contienen más de mil veces esa cantidad, y generalmente son estrellas muy viejas.

Los cúmulos globulares forman un halo alrededor de nuestra galaxia, la Vía Láctea, mientras que los abiertos se sitúan en los brazos de la espiral.

Los cúmulos abiertos son mucho más numerosos que los globulares: se conocen unos 1.000 en nuestra galaxia mientras que sólo hay 140 globulares.

### 12.2. Cúmulos abiertos

Los dos cúmulos abiertos más conocidos son las Pléyades y las Hiadas, ambos observables a simple vista, en la constelación Tauro. El cúmulo de las Hiadas se encuentra a unos 150 años luz de la Tierra y posee un diámetro de unos 15 años luz. El cúmulo de las Pléyades tiene un diámetro similar, pero está a unos 400 años luz, por lo que se ve más pequeño.

Los cúmulos abiertos se forman a partir de nubes de gas y polvo en los brazos de una galaxia espiral. Las regiones más densas se contraen bajo su propia gravedad, dando lugar a estrellas individuales.

La nebulosa de Orión es un ejemplo de una región en la que todavía se están formando estrellas. En el centro de la nebulosa se encuentra un grupo de estrellas viejas, el “Trapecio de Orión”. La nebulosa contiene suficiente gas como para formar otros cientos de estrellas del mismo tipo.



Figura 12.1: El cúmulo abierto Pléyades.

Se conoce como *asociación estelar* a una agrupación de estrellas parecida a un cúmulo, pero distribuidas sobre un área mayor. A menudo se encuentran cúmulos abiertos en el interior de una asociación, en zonas donde la densidad del gas a partir del cual se formó la asociación es mayor.

Los miembros de un cúmulo nacen juntos y continúan moviéndose juntos por el espacio. Esto sirve para hallar sus distancias. Midiendo el movimiento de las estrellas a lo largo de la línea de visión y a través de la línea de visión, se pueden calcular las distancias que las separan del Sistema Solar. Esta técnica se conoce como el método del cúmulo móvil.

### 12.3. Cúmulos globulares

Los dos cúmulos globulares más brillantes son Omega Centauri y 47 Tucanae, ambos observables a simple vista desde el hemisferio austral. El cúmulo globular más destacable del hemisferio boreal es M13, en la constelación Hércules, también observable a simple vista.

En los cúmulos globulares, la concentración de estrellas en la parte central puede ser 100.000 veces mayor que en la región del espacio ocupada por nosotros, y desde la perspectiva terrestre puede parecer que las estrellas se fusionan entre sí.

Los cúmulos globulares contienen algunas de las estrellas más viejas de la Vía Láctea, con edades de 10.000 millones de años, el doble que el Sol.

La edad de un cúmulo se calcula poniendo sus estrellas en un diagrama de Hertzsprung-Russell. Como la velocidad de evolución de una estrella depende de su masa, el punto en el que la estrella comienza a salirse de la secuencia principal para convertirse en una gigante, muestra la edad del cúmulo.



Figura 12.2: El cúmulo globular  $\omega$  Centauri.

Los cúmulos globulares se formaron cuando la inmensa nube de polvo y gas que dio lugar a nuestra galaxia se estaba colapsando. Como el Sol está en la zona exterior de la galaxia, la mayoría de los cúmulos se encuentra en una mitad del cielo hacia el centro de la galaxia.



## Capítulo 13

# Las nebulosas

### 13.1. Introducción

Las nebulosas son estructuras de gas y polvo interestelar. Según sean más o menos densas, son visibles, o no, desde la Tierra.

Las nebulosas se pueden encontrar en cualquier lugar del espacio interestelar. Antes de la invención del telescopio, el término nebulosa se aplicaba a todos los objetos celestes de apariencia difusa. Como consecuencia de esto, a muchos objetos que ahora sabemos que son cúmulos de estrellas o galaxias se les llamaba nebulosas.



Figura 13.1: Nebulosa de emisión en Orión.

Se han detectado nebulosas en casi todas las galaxias, incluida la nuestra, la Vía Láctea. Dependiendo de la edad de las estrellas asociadas, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1. Asociadas a estrellas evolucionadas, como las nebulosas planetarias y los remanentes de supernovas.
2. Asociadas a estrellas muy jóvenes, algunas incluso todavía en proceso de formación, como los objetos Herbig-Haro y las nubes moleculares.

Si se atiende al proceso que origina la luz que emiten, las nebulosas se pueden clasificar en:

1. Las nebulosas de emisión, cuya radiación proviene del polvo y los gases ionizados como consecuencia del calentamiento a que se ven sometidas por estrellas cercanas muy calientes. Algunos de los objetos más sorprendentes del cielo, como la nebulosa de Orión, son nebulosas de este tipo.
2. Las nebulosas de reflexión reflejan y dispersan la luz de estrellas poco calientes de sus cercanías. Las Pléyades de Tauro son un ejemplo de estrellas brillantes en una nebulosa de reflexión.

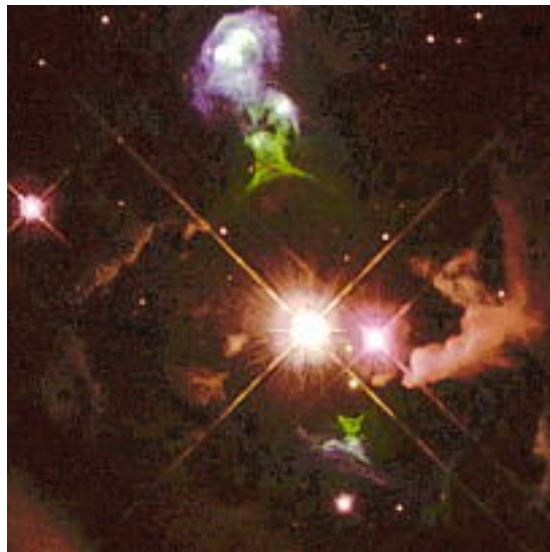


Figura 13.2: Nebulosa de reflexión.

Las nebulosas oscuras son nubes poco o nada luminosas, y se ven como una mancha oscura, a veces rodeada por un halo de luz. La razón por la que no emiten luz por sí mismas es que las estrellas se encuentran a demasiada distancia para calentar la nube. Una de las más famosas es la nebulosa de la Cabeza de Caballo,

en Orión. Toda la franja oscura que se observa en el cielo cuando miramos el disco de nuestra galaxia es una sucesión de nebulosas oscuras.



Figura 13.3: Nebulosa oscura Cabeza de Caballo.

## 13.2. Tipos de nebulosas

Uno de los aspectos más notables de las nebulosas es su variedad de formas y estructuras. Gracias a los modernos telescopios y al uso de ordenadores, se han podido elaborar fotos digitales detalladas que, mediante los programas informáticos adecuados, se pueden colorear para obtener imágenes espectaculares.

### 13.2.1. Nebulosas planetarias

Las nebulosas planetarias se parecen a los planetas cuando son observadas a través de un telescopio. En realidad son capas de material desprendidas de una estrella evolucionada de masa media, al pasar de gigante roja a enana blanca.

La nebulosa del Anillo, en la constelación de Lira, es una planetaria típica que tiene un periodo de rotación de 132.900 años y una masa de unas 14 veces la masa del Sol. En la Vía Láctea se han descubierto varios miles de planetarias.

Más espectaculares, pero menores en número, son los remanentes de supernovas, cuya representante más significativa es la nebulosa del Cangrejo, en Tauro, que se desvanece a razón de un 0,4% anual. Las nebulosas de este tipo son radiofuentes intensas, a causa de las explosiones que las formaron y los restos de púlsares en que se convirtieron las estrellas.



Figura 13.4: Nebulosa Planetaria.

### 13.2.2. Objetos Herbig-Haro

Los objetos Herbig-Haro, que deben su nombre al astrónomo mexicano Guillermo Haro y al estadounidense G. Herbig, son pequeñas nebulosas muy brillantes que se encuentran dentro de nubes interestelares muy densas.

Son, probablemente, el producto de chorros de gas expelidos por estrellas en proceso de formación. Las nubes moleculares son, por su parte, extremadamente grandes, de un ancho de muchos años luz, con un perfil indefinido y una apariencia tenue y neblinosa.

Los objetos Herbig-Haro se pueden estudiar en el infrarrojo. Estos objetos varían de tamaño y brillo en pocos años. Se encuentran en regiones de formación estelar activa. Se cree que estas nebulosas corresponden a flujos de gas de alta velocidad expulsado por estrellas jóvenes al chocar contra nubes interestelares. El estudio de los objetos Herbig-Haro ayuda a comprender los detalles de cómo se forman las estrellas.



# Capítulo 14

## Cuásares

### 14.1. Introducción

Los Cuásares son objetos lejanos que emiten grandes cantidades de energía, con radiaciones similares a las de las estrellas. Los cuásares son centenares de miles de millones de veces más brillantes que las estrellas. Posiblemente, son agujeros negros que emiten intensa radiación cuando capturan estrellas o gas interestelar.

La luz que percibimos ocupa un rango muy estrecho en el espectro electromagnético y no todos los cuerpos cósmicos emiten la mayor parte de su radiación en forma de luz visible. Con el estudio de las ondas de radio, los radioastrónomos empezaron a localizar fuentes muy potentes de radio que no siempre correspondían a objeto visibles.

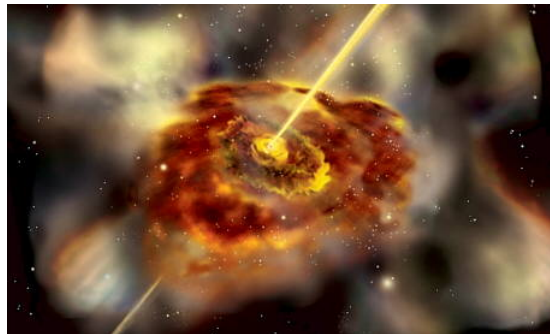


Figura 14.1: Concepto artístico de un cuásar.

La palabra Cuásar es un acrónimo de quasi stellar radio source (fuentes de radio casi estelares).

Se identificaron en la década de 1950. Más tarde se vió que mostraban un desplazamiento al rojo más grande que cualquier otro objeto conocido. La causa

era el efecto Doppler, que mueve el espectro hacia el rojo cuando los objetos se alejan.

El primer Cuáasar estudiado, 3C 273 está a 1.500 millones de años luz de la Tierra. A partir de 1980 se han identificado miles de cuásares. Algunos se alejan de nosotros a velocidades del 90 % de la de la luz.

Se han descubierto cuásares a 12.000 millones de años luz de la Tierra. Ésta es, aproximadamente, la edad del Universo. A pesar de las enormes distancias, la energía que llega en algunos casos es muy grande. Como ejemplo, el s50014+81 es unas 60.000 veces más brillante que toda la Vía Láctea.

Lo más espectacular de los cuásares no es su lejanía, sino que puedan ser visibles. Un cuasar deber ser tan brillante como 1.000 galaxias juntas para que pueda aparecer como una débil estrella, si se encuentra a varios miles de millones de años luz. Pero aún más sorprendente es el hecho de que esa enorme energía proviene de una región cuyo tamaño no excede un año luz (menos de una cienmilésima parte del tamaño de una galaxia normal). El brillo de los cuásares oscila con periodos de unos meses, por tanto, su tamaño debe ser menor que la distancia que recorre la luz en ese tiempo.

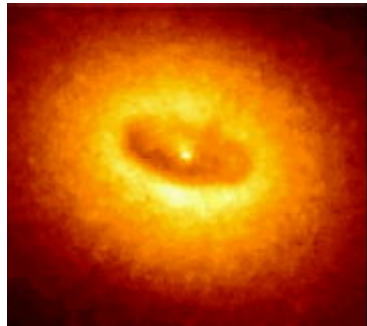


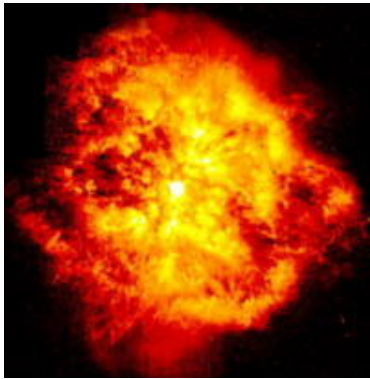
Figura 14.2: Fotografía de un cuáasar.

Al principio, los astrónomos no veían ninguna relación entre los cuásares y las galaxias, pero la brecha entre estos dos tipos de objetos cósmicos se ha ido llenando poco a poco al descubrirse galaxias cuyos núcleos presentan semejanzas con los cuásares. Hoy en día, se piensa que los cuásares son los núcleos de galaxias muy jóvenes, y que la actividad en el núcleo de una galaxia disminuye con el tiempo, aunque no desaparece del todo.

# Capítulo 15

## Cosmología

### 15.1. El origen y la evolución del Universo



Los científicos intentan explicar el origen del Universo con diversas teorías. Entre las más aceptadas están la del Big-Bang y la Inflacionaria, que se complementan y nos hacen entender que el espacio es el lugar donde está la materia y la energía; que el complemento espacio-tiempo existe porque allí se encuentra la dualidad masa-energía.

Los astrónomos están cada vez más convencidos que el Universo (energía, masa, interacciones, espacio y tiempo) surgió a partir de una gran explosión (Big-Bang), hace entre

13 500 y 13 700 millones de años.

Los primeros indicios de este hecho fueron descubiertos por el astrónomo estadounidense Edwin Hubble, en la década de 1920, cuando expuso que el Universo se está expandiendo y los cúmulos de galaxias se alejan entre sí, como la teoría de la relatividad general propuesta por Albert Einstein lo predice.

Si hacemos una “foto del Universo” en un momento dado, no vemos su estado actual, sino su historia, pues la luz viaja a 300 000 km/s. Cuando miramos la Luna (el objeto celeste más cercano), la vemos como era hace algo más de un segundo; al Sol lo vemos como era hace 8 min; a la estrella Alfa Centauro (la más próxima al Sistema Solar), la vemos como era hace unos 4 años.

Como las galaxias se alejan las unas de las otras, si pasamos la película al revés. ¿Dónde llegaremos?

## 15.2. Explicaciones que debe dar una teoría

Toda teoría cosmológica debe explicar cómo se originó el Universo, cómo evolucionó para llegar al estado actual y cuál será su futuro, atendiendo que si hay varias explicaciones para un mismo fenómeno se le dará mayor credibilidad al proceso más simple.

- **La expansión del Universo**, como consecuencia de la Teoría de la Relatividad y detectada por el corrimiento al rojo de las líneas de emisión de la luz de las galaxias.
- **La radiación de fondo en microondas**, predicha en 1946 y detectada en 1965.
- **La formación de estrellas, sistemas planetarios y galaxias**, actualmente observables.
- **El origen y la evolución de la materia y la energía.**
- **Las cuatro fuerzas del Universo.**
- **El futuro del Universo.**
- **El origen y evolución de la Vida.**

Relatemos brevemente algunos de estos fenómenos.

### 15.2.1. La expansión del Universo



El descubrimiento de la expansión del Universo empieza en 1912, con los trabajos del astrónomo norteamericano Vesto M. Slipher. Mientras estudiaba los espectros de las galaxias observó que, excepto en las más próximas, las líneas del espectro se desplazaban hacia el rojo.

Esto significa que la mayoría de las galaxias se alejan de la Vía Láctea ya que, corrigiendo este efecto en los espectros de las galaxias, se demuestra que las estrellas que las integran están compuestas de elementos químicos conocidos. Este desplazamiento al rojo se debe al

efecto Doppler.

Si medimos el corrimiento del espectro de una estrella, podemos saber si se acerca o se aleja de nosotros. En la mayoría este desplazamiento es hacia el rojo, lo que indica que el foco de la radiación se aleja. Esto es interpretado como una confirmación de la expansión del Universo.

En principio parece que las galaxias se alejan de la Vía Láctea en todas direcciones, dando la sensación de que nuestra galaxia es el centro del Universo.

Este efecto es consecuencia de la forma en que se expande el Universo. Es como si la Vía Láctea y el resto de galaxias fuesen punto situados sobre la superficie de un globo. Al inflar el globo todos los puntos se alejan de nosotros. Si cambiásemos nuestra posición a cualquiera de los otros puntos y realizásemos la misma operación, observaríamos exactamente lo mismo.

### 15.2.2. La Ley de Hubble



El astrónomo estadounidense Edwin Powell Hubble relacionó, en 1929, el desplazamiento hacia el rojo observado en los espectros de las galaxias con la expansión del Universo. Sugirió que este desplazamiento hacia el rojo, llamado desplazamiento hacia el rojo cosmológico, es provocado por el efecto Doppler y, como consecuencia, indica la velocidad de retroceso de las galaxias.

Hubble también observó que la velocidad de recesión de las galaxias era mayor cuanto más lejos se encontraban.

Este descubrimiento le llevó a enunciar su ley de la velocidad de recesión de las galaxias, conocida como la “ley de Hubble”, la cual establece que la velocidad de una galaxia es proporcional a su distancia.

La constante de Hubble o de proporcionalidad es el cociente entre la distancia de una galaxia a la Tierra y la velocidad con que se aleja de ella. Se calcula que esa constante está entre los 50 y 100 km/s por megaparsec.

### 15.2.3. La radiación cósmica de fondo



En 1965 se encontró la prueba tangible del Big-Bang. Calibrando un detector muy sensible, los científicos radioastrónomos Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron un ruido extraño en la región de las microondas que provenía por igual de todas las direcciones del espacio.

George Gamow y dos colegas suyos Robert C. Herman y Ralph A. Alpher en 1946, ya habían predicho que se habría de observar, procediendo de todo el universo, un resplandor “testimonio del Big-Bang, y que esta radiación, debido a la expansión del Universo, se presentaría en forma de microondas.

### 15.2.4. Las fuerzas fundamentales del Universo

Hay cuatro fuerzas fundamentales, que determinan todas las formas de interacción de la materia:

- Interacciones nucleares fuertes,
- interacciones nucleares débiles,
- electromagnetismo y
- gravitación.

La gravedad es la más débil de las cuatro y la única que sólo actúa en un sentido. Los científicos especulan sobre si existe la complementaria.

### 15.2.5. El Universo en movimiento



Como consecuencia de las fuerzas gravitacionales las estrellas, las galaxias y todo el Universo se mueven. Como el movimiento que percibimos de los cuerpos más lejanos es muy pequeño, parecen estar fijos.

Se ha medido el movimiento de muchos objetos del Universo. Así sabemos que, para desplazarse una distancia aparente igual al diámetro de la luna, la estrella más cercana Alpha Centauro, necesita 506 años. Arturo necesita 815; Sirio, 1410; Altair, 2830; Capella, 4270 y Fomalhaut, más de 5000 años.

## 15.3. La Teoría del Big-Bang

La teoría del Big-Bang o gran explosión, supone que, hace entre unos 13,5 millones de años todo el Universo estaba concentrado sin existir espacio, sin existir el tiempo y con una elevadísima temperatura. No había ni "fuera" ni "antes".

Por alguna desconocida razón "explotó". Se expandió lo existente en él, originando el espacio que se fue ensanchando, el tiempo empezó a transcurrir, la temperatura fue descendiendo con el aumento de su volumen a través del tiempo y empezaron a formarse las partículas elementales que después originarían la materia-energía.

Visto así el Big-Bang no es una explosión de partes que se alejan para llenar un universo vacío; es el espacio-tiempo el que se extiende a medida que sus partes se separan. Es su expansión la que causa el incremento de la distancia física entre dos puntos fijos del universo.

Conviene desde ya aclarar que cuando los objetos están ligados entre ellos (las partes del núcleo atómico, el átomo, las moléculas, un objeto, una galaxia, etc), no se alejan con la expansión del espacio-tiempo.



Con la disminución progresiva de la temperatura se pudieron ir formando los neutrones y los protones a partir de la reunión de partículas elementales. Cuando los protones capturaron electrones (el electrón es una partícula elemental) se fueron formando los átomos de hidrógeno (prótidos). Con la posterior unión de protones y neutrones se formaron hasta los núcleos de átomos de helio, que cuando capturaron electrones formaron los átomos de deuterio y de helio.

El hidrógeno (unos 78 %) y el helio (unos 22 %) fueron los únicos átomos originados de ese modo. Luego se formaron las moléculas de hidrógeno, con una partícula (sólo un protón: prótido) o dos partículas (un protón y un neutrón: deuterio) en sus núcleos.

Los choques y un cierto desorden hicieron que por efectos atractivos de las fuerzas gravitacionales las moléculas de hidrógeno y los átomos de helio se agruparan progresivamente concentrándose más en algunos lugares del espacio que en otros, formando nebulosas gaseosas que al ir aumentando de masa por la captura de más átomos y moléculas formarían las primeras estrellas y las primeras galaxias. Desde entonces, el Universo continúa en constante movimiento y evolución.

Se llama órbita la trayectoria de un objeto que gira alrededor de otro. El periodo orbital es el tiempo que el objeto tarda en completar una órbita. Parece que todos los objetos, en el espacio, orbitan alrededor de otros con más masa.

## 15.4. La Teoría inflacionaria

La teoría inflacionaria de Alan Guth intenta explicar el origen y los primeros instantes del Universo. Se basa en estudios sobre campos gravitatorios fortísimos

Supone que una fuerza única se dividió en las cuatro fuerzas fundamentales que ahora conocemos, Sección 15.2.4 (pág. 87), originando el Universo.

El empuje inicial duró un tiempo prácticamente inapreciable, pero fue tan violento que, a pesar de la atracción de la gravedad que frena a las galaxias, el Universo todavía crece.

## 15.5. Otros modelos

### 15.5.1. La Teoría del universo pulsante

Nuestro universo sería el último de muchos surgidos en el pasado, luego de sucesivas explosiones, desde el Big-Bang, y contracciones, hasta el Big-Crunch, pulsando entre expansiones, estado actual, y encogimientos.

El momento en que el universo se desploma sobre sí mismo, atraído por su propia gravedad, es conocido, en el ambiente científico, como “Big-Crunch”. El próximo Big-Crunch marcaría el fin de nuestro universo y el nacimiento del otro nuevo, tras el subsiguiente Big-Bang que lo origine.

Si esta teoría llegase a tener pleno respaldo, el Big-Crunch ocurriría dentro de unos 150 mil millones de años; es decir, dentro de 10 veces más que la edad actual del universo.

### 15.5.2. La Teoría del estado estacionario

Esta teoría, también conocida como de la *creación continua*, se opone a la tesis de un Universo Evolucionario.

El impulsor de esta idea, a principios del siglo XX, fue el astrónomo inglés Edward Milne y según ella, los datos recabados en la observación del firmamento, estando en una galaxia ubicada a millones de años luz, deben ser idénticos a los que obtenemos al observar el firmamento desde la Vía Láctea. Milne llamó a su tesis “Principio Cosmológico”.

En 1948 los astrónomos Herman Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle retomaron este pensamiento y le añadieron nuevos conceptos. Nace así el “Principio Cosmológico Perfecto”: el universo es idéntico en todas las direcciones que lo analicemos.

Dicho principio establece, en primer lugar, que el universo no tiene un génesis ni un final, ya que la materia interestelar siempre ha existido. En segundo término, sostiene que el aspecto general del universo, no sólo es idéntico en el espacio, sino también es idéntico en el tiempo y para ello, a medida que se expande se va creando materia para que su densidad media sea constante (lo que al calcular lo hace inestable y debe contraerse por efectos gravitacionales, oponiéndose a su propia hipótesis).

### 15.5.3. Más hipótesis

En general, todas las religiones tienen sus propias cosmogonías (narración mítica que pretende dar respuesta al origen del Universo y de la propia humanidad, pasando del caos al orden) basadas en la creación del universo por la acción de un ser todopoderoso.



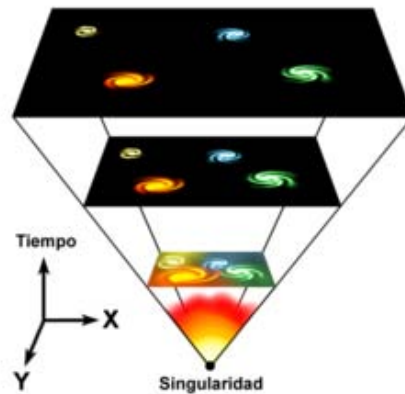


Figura 15.1: Posible panorama.

<b>Instante</b>	<b>Evento</b>
Big Bang	Densidad infinita, volumen cero.
$10^{-43}$ seg.	Fuerzas no diferenciadas
$10^{-34}$ seg.	Sopa de partículas elementales.
$10^{-10}$ seg.	Se forman protones y neutrones.
1 seg.	10 000 000 000K Universo tamaño Sol.
3 min.	1 000 000 000K Núcleos de átomos.
30 min.	300 000 000K Plasma.
300 000 años	300 000 000K Átomos, universo transparente.
1 000 000 años	Gérmenes de galaxias.
$100 \times 10^6$ años	Primeras galaxias.
$1000 \times 10^6$ años	Primeras galaxias.
$2000 \times 10^6$ años	Estrellas, el resto se enfría.
$10\,000 \times 10^6$ años	Sistema Solar y Tierra.

Cuadro 15.1: Este cuadro y la Fig. 15.1 nos indican un posible panorama.



## Parte III

# Fenómenos astronómicos



## Capítulo 16

# Movimiento orbital

### 16.1. Introducción

**Nicolás Copérnico.** En 1543, un clérigo polaco llamado Nicolás Copérnico publicó una hipótesis totalmente diferente para explicar el movimiento aparente de los planetas. Su rasgo más audaz fue proponer que el Sol, y no la Tierra, estaba en el centro del universo. La Tierra quedó degradada a la categoría de un planeta más, el tercero desde el Sol, que se movía en una perfecta órbita circular. (Tolomeo había tomado en consideración un modelo heliocéntrico de este tipo, pero lo desechó inmediatamente; partiendo de la física de Aristóteles, la rotación violenta de la Tierra que este modelo implicaba parecía contraria a la observación.)

El modelo permitía explicar el movimiento aparente de los planetas por lo menos tan bien como las esferas de Tolomeo. Pero molestó a mucha gente. En 1616 la Iglesia católica colocó el libro de Copérnico en su lista de libros prohibidos hasta su corrección por censores eclesiásticos locales, donde permaneció hasta 1835.

**Johannes Képler.** Johannes Képler nació en Alemania en 1571 y fue enviado de niño a la escuela del seminario protestante de la ciudad provincial de Maulbronn para que siguiese la carrera eclesiástica. Képler, tenaz, inteligente y ferozmente independiente soportó dos inhóspitos años en la desolación de Maulbronn, convirtiéndose en una persona solitaria e introvertida.

Pero el Dios de Képler fue el poder creativo del Cosmos. La curiosidad del niño conquistó su propio temor; se atrevió a contemplar la mente de Dios. Estas visiones peligrosas, al principio tan insustanciales como un recuerdo, llegaron a ser la obsesión de toda una vida. Las apetencias cargadas de hbris de un niño seminarista iban a sacar a Europa del enclaustramiento propio del pensamiento medieval. ¿No era el conjunto de la creación una expresión de las armonías presentes en la mente de Dios? El libro de la Naturaleza había esperado más de un milenio para encontrar un lector.

En 1589, Képler dejó Maulbronn para seguir los estudios de sacerdote en la gran Universidad de Tübingen, y este paso fue para él una liberación. Confrontado a las corrientes intelectuales más vitales de su tiempo, su genio fue inmediatamente reconocido por sus profesores, uno de los cuales introdujo al joven estudiante en los peligrosos misterios de la hipótesis de Copérnico.

Antes de ser ordenado se le hizo una atractiva oferta para un empleo secular que acabó aceptando, le destinaron a Graz, en Austria, para enseñar matemáticas en la escuela secundaria, y poco después empezó a preparar almanaques astronómicos y meteorológicos.

Képler fue un brillante pensador y un lúcido escritor, pero fue un desastre como profesor. Lo distraía de aquel trabajo un incesante clamor interior de asociaciones y de especulaciones que rivalizaban por captar su atención. Y una tarde de verano, sumido en los intersticios de una de sus interminables clases, le visitó una revelación que iba a alterar radicalmente el futuro de la astronomía.

En la época de Képler sólo se conocían seis planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Képler se preguntaba por qué eran sólo seis. ¿Por qué no eran veinte o cien? ¿Por qué sus órbitas presentaban el espaciamiento que Copérnico había deducido? Nunca hasta entonces se había preguntado nadie cuestiones de este tipo.

**Tycho Brahe.** Había entonces un solo hombre en el mundo que tenía acceso a observaciones más exactas de las posiciones planetarias aparentes, un noble danés que se había exiliado y había aceptado el empleo de matemático imperial de la corte del sacro emperador romano, Rodolfo II. Ese hombre era Tycho Brahe. Casualmente y por sugerencia de Rodolfo, acababa de invitar a Képler, cuya fama matemática estaba creciendo, a que se reuniera con él en Praga.

Al dejar Graz, Képler emprendió el duro camino a Praga. Pero Képler seguía preocupado con su trabajo.

Se imaginó que los dominios de Tycho serían un refugio, el lugar donde se confirmaría sus conjeturas. Aspiraba a convertirse en un colega del gran Tycho Brahe, quien durante treinta y cinco años se había dedicado, antes de la invención del telescopio, a la medición de un universo de relojería, ordenado y preciso. Las expectativas de Képler nunca se cumplieron. El propio Tycho era un personaje extravagante, adornado con una nariz de oro, pues perdió la original en un duelo de estudiantes disputando con otro la preeminencia matemática.

Képler estaba impaciente por conocer los datos astronómicos de Tycho, pero Tycho se limitaba a arrojarle de vez en cuando algún fragmento. Tycho era el mayor genio observador de la época y Képler el mayor teórico. Cada uno sabía que por sí solo sería incapaz de conseguir la síntesis de un sistema del mundo coherente y preciso, sistema que ambos consideraban inminente. Pero Tycho no estaba dispuesto a regalar toda la labor de su vida a un rival en potencia, mucho más joven. Se negaba también, por algún motivo, a compartir la autoría de los resultados conseguidos con su colaboración, si los hubiera. El nacimiento de la ciencia moderna hija de la teoría y de la observación se balanceaba al borde de este precipicio de desconfianza mutua. Durante los dieciocho meses que Tycho

iba a vivir aún, los dos se pelearon y se reconciliaron repetidamente. En su lecho de muerte legó sus observaciones a Képler.

**Galileo Galilei.** Képler, convertido después de la muerte de Tycho en el nuevo matemático imperial, consiguió las observaciones Tycho. Pero los datos de Tycho no apoyaban más que los de Copérnico su conjetura sobre las órbitas de los planetas, y quedó totalmente refutada por los descubrimientos muy posteriores de los planetas Urano, Neptuno y Plutón; y el descubrimiento por Galileo de las cuatro lunas de Júpiter era también desconcertante. Pero en lugar de desanimarse, Képler quiso encontrar más satélites y se preguntaba cuántos satélites tenía que tener cada planeta. Escribió a Galileo:

*Desconfío tan poco de la existencia de los cuatro planetas circumjovianos, que suspiro por tener un telescopio, para anticiparme a vos, si es posible, y descubrir dos más alrededor de Marte... seis u ocho alrededor de Saturno y quizás uno alrededor de Mercurio y también de Venus.*

Marte tiene dos pequeñas lunas y el mayor accidente geológico de la mayor de ellas se llama hoy en día Sierra de Képler, en honor de su descubridor. Pero se equivocó totalmente con respecto a Saturno, Mercurio y Venus; y Júpiter tiene muchas más lunas de las que Galileo descubrió. Todavía ignoramos por qué hay sólo los planetas que hay, y por qué sus distancias relativas al Sol son como son.

## 16.2. Las leyes de Képler

Tycho realizó sus observaciones de movimiento aparente entre las constelaciones de Marte y de otros planetas a lo largo de muchos años. Estos datos, de las últimas décadas anteriores a la invención del telescopio, fueron los más exactos obtenidos hasta entonces. Képler trabajó con una intensidad apasionada para comprenderlos: ¿Qué movimiento real descrito por la Tierra y por Marte alrededor del Sol podía explicar, dentro de la precisión de las medidas, el movimiento aparente de Marte en el cielo, incluyendo los rizados retrógrados que describe sobre el fondo de las constelaciones? Tycho había recomendado a Képler que estudiara Marte porque su movimiento aparente parecía el más anómalo, el más difícil de conciliar con una órbita formada por círculos.

Pitágoras, en el siglo sexto a. de C., Platón, Tolomeo y todos los astrónomos anteriores a Képler, daban por sentado que los planetas se movían siguiendo caminos circulares. Galileo, Tycho y Copérnico creían igualmente en un movimiento circular y uniforme de los planetas. Así pues, Képler intentó al principio explicar las observaciones suponiendo que la Tierra y Marte se movían en órbitas circulares alrededor del Sol. Képler escribió posteriormente por si el lector se aburría con sus múltiples cálculos:

*Si te cansa este procedimiento tedioso, compadécete de mí que hice por lo menos setenta intentos.*

Después de tres años de cálculos creyó haber encontrado los valores correctos de una órbita circular marciana, que coincidía con diez de las observaciones de Tycho con un error de dos minutos de arco. Ahora bien, hay 60 minutos de arco en un grado angular, y 90 grados en un ángulo recto desde el horizonte al cenit. Por lo tanto, unos cuantos minutos de arco constituyen una cantidad muy pequeña para medir, sobre todo sin un telescopio. Es una quinceava parte del diámetro angular de la luna llena vista desde la Tierra. Pero el éxtasis inminente de Képler pronto se convirtió en tristeza, porque dos de las observaciones adicionales de Tycho eran incompatibles con la órbita de Képler con una diferencia de ocho minutos de arco:

*La Divina Providencia nos ha concedido un observador tan diligente en la persona de Tycho Brahe que sus observaciones condenan este... cálculo a un error de ocho minutos; es cosa buena que aceptemos el regalo de Dios con ánimo agradecido... Si yo hubiera creído que podíamos ignorar esos ocho minutos hubiera apañado mi hipótesis de modo correspondiente. Pero esos ocho minutos, al no estar permitido ignorarlos, señalaron el camino hacia una completa reforma de la astronomía.*

La diferencia entre una órbita circular y la órbita real solamente podía distinguirse con mediciones precisas y con una valerosa aceptación de los hechos. Képler quedó muy afectado al verse en la necesidad de abandonar una órbita circular. Una vez expulsados del establo de la astronomía los círculos y las espirales, sólo le quedó, un círculo alargado, algo así como un óvalo.

Képler comprendió al final que su fascinación por el círculo había sido un engaño. La Tierra era un planeta, como Copérnico había dicho, y para Képler era del todo evidente que la perfección de una Tierra arrasada por las guerras, las pestes, el hambre y la infelicidad, dejaba mucho que desear. Képler fue una de las primeras personas desde la antigüedad en proponer que los planetas son objetos materiales compuestos, como la Tierra, de sustancia imperfecta. Y si los planetas eran imperfectos, ¿por qué no habían de serio también sus órbitas? Probó con varias curvas ovaladas, las calculó y las desechó, cometió algunos errores aritméticos—que al principio le llevaron a rechazar la solución correcta—, pero meses después y ya un tanto desesperado probó la fórmula de una elipse, codificada por primera vez en la Biblioteca de Alejandría por Apolonio de Pérgamo. Descubrió que encajaba maravillosamente con las observaciones de Tycho:

*la verdad de la naturaleza, que yo había rechazado y echado de casa, volvió sigilosamente por la puerta trasera, y se presentó disfrazada para que yo la aceptara... Ah, ¡qué pajarón más necio he sido!*

Képler había descubierto que Marte giraba alrededor del Sol siguiendo no un círculo sino una elipse. Los otros planetas tienen órbitas mucho menos elípticas que Marte, y si Tycho le hubiera aconsejado estudiar el movimiento, por ejemplo de Venus, Képler nunca hubiera descubierto las órbitas verdaderas de los planetas. En este tipo de órbitas el Sol no está en el centro, sino desplazado, en un



foco de la elipse. Cuando un planeta cualquiera está en su punto más próximo al Sol, se acelera. Cuando está en el punto más lejano, va más lento. Es éste el movimiento que nos permite decir que los planetas están siempre cayendo hacia el Sol sin alcanzarlo nunca. La primera ley del movimiento planetario de Képler es simplemente ésta:

Un planeta se mueve en una elipse con el Sol en uno de sus focos.

Ley I – De los focos

En un movimiento circular uniforme, un cuerpo recorre en tiempos iguales un ángulo igual o una fracción igual del arco de un círculo. Así, por ejemplo, se precisa el doble de tiempo para recorrer dos tercios de una circunferencia que para recorrer sólo un tercio de ella. Képler descubrió que en una órbita elíptica las cosas son distintas. El planeta, al moverse a lo largo de su órbita, barre dentro de la elipse una pequeña área en forma de cuña. Cuando está cerca del Sol, en un período dado de tiempo traza un arco grande en su órbita, pero el área representada por ese arco no es muy grande, porque el planeta está entonces cerca del Sol. Cuando el planeta está alejado del Sol cubre un arco mucho más pequeño en el mismo período de tiempo, pero ese arco corresponde a una área mayor, pues el Sol está ahora más distante. Képler descubrió que estas dos áreas eran exactamente iguales, por elíptica que fuese la órbita: el área alargada y delgada correspondiente al planeta cuando está alejado del Sol, y el área más corta y rechoncha cuando está cerca del Sol, son exactamente iguales. Ésta es la segunda ley del movimiento planetario de Képler:

Los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales.

Ley II – De las áreas

Las primeras dos leyes de Képler pueden parecer algo remotas y abstractas: los planetas se mueven formando elipses y barren áreas iguales en tiempos iguales. Bueno, ¿y qué? El movimiento circular es más fácil de comprender. Quizá tendamos a dejar de lado estas leyes como meros pasatiempos matemáticos que no tienen mucho que ver con la vida diaria. Sin embargo, éstas son las leyes que obedece nuestro planeta mientras nosotros, pegados a la superficie de la Tierra, volteamos a través del espacio interplanetario. Nosotros nos movemos de acuerdo con leyes de la naturaleza que Képler descubrió por primera vez. Cuando enviarnos naves espaciales a los planetas, cuando observamos estrellas dobles, cuando estudiamos el movimiento de las galaxias lejanas, comprobamos que las leyes de Képler son obedecidas en todo el universo.

Años después, Képler descubrió su tercera y última ley del movimiento planetario, una ley que relaciona entre sí el movimiento de varios planetas, que da el engranaje correcto del aparato de relojería del sistema solar. La describió en un libro llamado “Las armonías del Mundo”. La palabra armonía tenía para Képler muchos significados: el orden y la belleza del movimiento planetario, la existencia de leyes matemáticas explicativas de ese movimiento una idea que proviene de Pitágoras.

Aparte de las órbitas de Mercurio y de Marte, las órbitas de los otros planetas se desvían tan poco de la circularidad que no podemos distinguir sus formas reales aunque utilicemos un diagrama muy preciso. La Tierra es nuestra plata-

forma móvil desde la cual observamos el movimiento de los otros planetas sobre el telón de fondo de las constelaciones lejanas.

La tercera ley de Képler, o ley armónica, afirma que:

Ley III – De los períodos

Los cuadrados de los períodos de los planetas (los tiempos necesarios para completar una órbita) son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol: cuanto más distante está el planeta, más lento es su movimiento,

pero de acuerdo con una ley matemática precisa:

$$P^2 = a^3, \quad (16.1)$$

donde  $P$  representa el período de rotación alrededor del Sol medido en años, y  $a$  la distancia del planeta al Sol, medida en unidades astronómicas. Una unidad astronómica es la distancia de la Tierra al Sol. Júpiter, por ejemplo, está a cinco unidades astronómicas del Sol, y  $a^3 = 5 \times 5 \times 5 = 125$ . ¿Cuál es el número que multiplicado por sí mismo da 125? El 11, desde luego, con bastante aproximación. Y 11 años es el período de tiempo que Júpiter necesita para dar una vuelta alrededor del Sol. Un argumento similar es válido para cada planeta, asteroide y cometa.

Képler, no satisfecho con haber extraído de la naturaleza las leyes del movimiento planetario, se empeñó en encontrar alguna causa subyacente aún más fundamental, alguna influencia del Sol sobre la cinemática de los mundos. Los planetas se aceleraban al acercarse al Sol y reducían su velocidad al alejarse de él. Los planetas lejanos sentían de algún modo la presencia del Sol. El magnetismo era también una influencia percibida a distancia, y Képler, en una sorprendente anticipación de la idea de la gravitación universal, sugirió que la causa subyacente estaba relacionada con el magnetismo:

*Mi intención en esto es demostrar que la máquina celestial puede compararse no a un organismo divino sino más bien a un engranaje de relojería... Puesto que casi todos los múltiples movimientos son ejecutados por medio de una única fuerza magnética muy simple, como en el caso de un reloj en el cual todos los movimientos son producidos por un simple peso.*

El magnetismo no es, por supuesto, lo mismo que la gravedad, pero la innovación fundamental de Képler es en este caso realmente impresionante: Képler proponía que las leyes físicas cuantitativas válidas en la Tierra sostienen también las leyes físicas cuantitativas que gobiernan los cielos. Fue la primera explicación no mística del movimiento de los cielos; explicación que convertía a la Tierra en una provincia del Cosmos.

*La astronomía, dijo, forma parte de la física.*

Képler se yergue en una cúspide de la historia; el último astrólogo científico fue el primer astrofísico.

## 16.3. Las leyes de Newton

El esfuerzo de Johannes Képler, proseguido durante toda una vida, para comprender los movimientos de los planetas, por buscar una armonía en los cielos, culminó treinta y seis años después de su muerte, en la obra de Isaac Newton. Newton nació el día de Navidad de 1642 (4 de enero de 1643 en el calendario gregoriano), tan pequeño que, como su madre le dijo después, hubiera cabido en una jarra de cuarto. Incluso de joven, Newton se preocupaba por cuestiones de tan poca monta como saber por ejemplo si la luz era una sustancia o un accidente, o conocer el mecanismo que permitía a la gravedad actuar, a pesar de un vacío intermedio.

En 1666, Newton estaba estudiando en la Universidad de Cambridge, cuando un brote epidémico le obligó a pasarse un año en cama en el pueblito aislado de Woolsthorpe, en donde había nacido. Allí se dedicó a inventar el cálculo diferencial e integral, a realizar descubrimientos fundamentales sobre la naturaleza de la luz y a establecer las bases para la teoría de la gravitación universal. El único año parecido a éste en la historia de la física fue el año milagroso de Einstein en 1905. Fue nombrado profesor de la cátedra de matemáticas en Cambridge, sucediendo en el cargo a su maestro Isaac Barrow. Ni los estudiantes de Képler ni los de Newton supieron nunca lo que se estaban perdiendo.

Newton descubrió la ley de la inercia, la tendencia de un objeto en movimiento a continuar moviéndose en una línea recta, a menos que sufra la influencia de algo que le desvíe de su camino.

Newton supuso que si la Luna no salía disparada en línea recta, según una línea tangencial a su órbita, se debía a la presencia de otra fuerza que la empujaba en dirección a la Tierra, y que desviaba constantemente su camino convirtiéndolo en un círculo. Newton llamó a esta fuerza gravedad y creyó que actuaba a distancia. No hay nada que conecte físicamente la Tierra y la Luna y, sin embargo, la Tierra está constantemente tirando de la Luna hacia nosotros. Newton se sirvió de la tercera ley de Képler y dedujo matemáticamente la naturaleza de la fuerza de la gravedad. Demostró que la misma fuerza que hacía caer una manzana sobre la Tierra mantenía a la Luna en su órbita y explicaba las revoluciones de las lunas de Júpiter, recientemente descubiertas en aquel entonces, en sus órbitas alrededor de aquel lejano planeta.

Las cosas han estado cayendo desde el principio de los tiempos. Que la Luna gira alrededor de la Tierra es un hecho que la humanidad ha creído a lo largo de toda su historia. Newton fue el primero en pensar que esos dos fenómenos se debían a la misma fuerza. Este es el significado de la palabra universal aplicada a la gravitación newtoniana. La misma ley de la gravedad es válida para cualquier punto del universo.

### 16.3.1. Las leyes del movimiento

Newton dio una formulación explícita a tres leyes del movimiento—difícilmente podría sobreestimarse la importancia que tuvieron esos principios para el desarrollo de la mecánica celeste—las mismas se establecen como sigue, según las

enunció el propio Newton:

Principio de inercia	<b>Ley I:</b> Todo cuerpo continuará en su estado de reposo o movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas ejercidas sobre él.
Principio del momentum	<b>Ley II:</b> El cambio en el movimiento es siempre proporcional a la fuerza motriz que se ejerce, y sobre la misma línea recta en la que actúa esta fuerza.
Principio de acción y reacción	<b>Ley III:</b> A cada acción se le opone siempre una reacción igual y contraria: las acciones mutuas de dos cuerpos uno sobre el otro son siempre iguales y dirigidas hacia la parte contraria.

Lo que Newton llamaba movimiento, lo conocemos hoy día como momentum, cuando se refiere a cambio, se está refiriendo a lo que hoy conocemos como derivada, y cuando habla de fuerza aplicada o ejercida se refiere a la fuerza resultante.

### El Principio de inercia

La primera ley de Newton, es conocida como el *Principio de inercia*, ya que expresa la pereza—o mejor la oposición—que exhiben los cuerpos siempre que se intenta moverlos o cambiarles un movimiento que ya poseen.

Se trata de un enunciado críptico, pues introduce dos conceptos importantes, los de reposo y movimiento rectilíneo uniforme, y evidencia la necesidad de una entidad: un marco de referencia, cuya existencia es necesaria y fundamental para su teoría y la válida aplicación de las leyes del movimiento. Esto impuso sus limitaciones a la mecánica clásica.

Los conceptos de reposo y de movimiento rectilíneo, no son absolutos, pues dependen del marco de referencia inercial que se esté considerando.

### El Principio del momentum

La segunda ley del movimiento se expresamos con la siguiente relación, en la que  $F$  representa a la fuerza total que está actuando sobre un cuerpo de masa  $m$ , en un instante dado:

$$a \propto \frac{F}{m} = k \frac{F}{m}, \quad (16.2)$$

que da la aceleración adquirida por el cuerpo. Si asumimos que las unidades físicas de longitud, masa, y tiempo están definidas de modo que la constante de proporcionalidad sea igual a uno,  $k = 1$ , podemos reemplazar la expresión anterior por la ecuación exacta.

$$a = \frac{F}{m}. \quad (16.3)$$

Si dos fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  de igual magnitud actúan sobre dos cuerpos con masas  $m_1$  y  $m_2$ , siendo la masa  $m_1$   $n$  veces mayor que la masa  $m_2$ ,  $n = m_1/m_2$ , el

cuerpo con masa  $m_2$  adquiere una aceleración con una magnitud  $n$  veces mayor que la del cuerpo de masa  $m_1$ .

Es decir, para dos fuerza de la misma magnitud actuando sobre dos cuerpos con masas distintas, al cuerpo de masa menor le corresponde una aceleración con una magnitud mayor, en una cantidad de veces igual a la mayor razón entre las masas.

### El Principio de la acción y la reacción

La tercera ley de Newton conocida como el *Principio de acción y reacción*, nos dice que, si un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, ambos experimentan fuerzas de interacción mutua, de igual magnitud y sentidos opuestos.

Atendiendo, de acuerdo con la segunda ley, que si los cuerpos tienen masas distintas, las aceleraciones adquiridas serán diferentes. El Principio de acción y reacción implica que, en una sistema orbital de dos cuerpos, el cuerpo central también es acelerado, aún cuando su masa sea muy grande comparado con la de su satélite.

#### 16.3.2. La ley de la gravitación universal

Newton aplicó sus tres leyes del movimiento junto con las leyes de Képler, especialmente la tercera, y dedujo matemáticamente la ley de la gravitación universal, que es el cuarto principio fundamental de la mecánica clásica del movimiento orbital. Puede ser formulada como sigue:

**Ley IV:** Cada partícula en el universo atrae a toda otra partícula con una fuerza cuya magnitud es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

La resumimos en la siguiente expresión:

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} = k^2 \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (16.4)$$

donde  $k^2$  es una constante de proporcionalidad—adoptada como igual al cuadrado de la que llamamos constante gravitacional— $m_1$  y  $m_2$  son las masas, y  $r$  es la separación entre las partículas. Si bien la ley está establecida para partículas, (16.4) puede ser aplicada a grandes acumulaciones de partículas si asumimos que la distribución de masa (densidad) de cada cuerpo es simétrica respecto a un punto, línea o punto, y que todos los cuerpos están separados por distancias que son muy grandes en comparación con sus tamaños.

La ley de la gravitación universal fue una de las primeras consecuencias de las tres leyes del movimiento, veamos ahora algunas otras.



**Parte IV**

**Tecnología Aeroespacial**





## Capítulo 17

# Cohetes hidroneumáticos

### 17.1. Introducción



La idea de fabricar cohetes impulsados por aire a presión surgió en el año 1983 como proyecto de fin de carrera en una universidad de EEUU. Desde entonces, el prototipo de cohete propulsado con agua ha ido ganando popularidad hasta ser usado por la NASA en busca de nuevos talentos en colegios de EEUU.

Se pueden construir cohetes propulsados por agua a presión usando una botella de plástico de litro y medio o de dos litros, para gaseosas, a la que se le carga con agua un tercio de su capacidad; y una vez tapada con un tapón de goma, atravesado por un tubo, se invierte y se introduce aire a presión por el tubo, hasta que la misma hace saltar el tapón y deja escapar el agua con gran velocidad hacia abajo, impulsando la botella hacia arriba como si se tratase de un cohete convencional.

El empuje que impulsa al cohete hacia arriba depende de la masa del agua que sale por segundo por el cuello de la botella y de la velocidad que alcanza.

La velocidad de salida del agua está determinada por la presión interior, a mayor presión, mayor velocidad.

Mientras más grande sea la sección del cuello más cantidad de agua saldrá por segundo. De la misma manera también aumentará la cantidad de agua que sale con el aumento de presión interior.

Resulta evidente que conviene elevar la presión interior de la botella todo lo que se pueda dentro de los límites marcados por la resistencia del material.

Mientras tenga agua, a medida que el cohete avanza su masa disminuye, por lo que para un mismo empuje, su velocidad aumenta, dicho de otra manera, el cohete cada vez va más rápido.

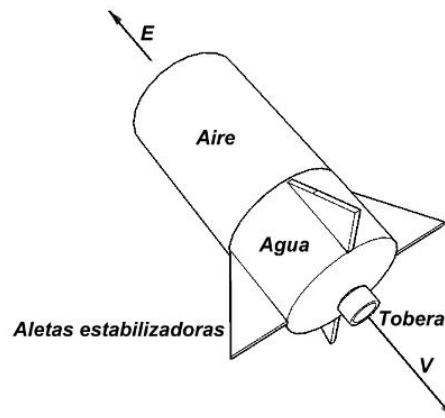


Figura 17.1: Esquema de los componentes de un cohete.

En la práctica, para conseguir una trayectoria equilibrada se pueden añadir al cuerpo del cohete aletas en su parte posterior y un cono de ataque en la parte delantera. Por otra parte es conveniente utilizar un equipo de lanzamiento que guíe el cohete durante el despegue. Algunos aficionados incluso dotan a sus modelos de paracaídas que permiten recuperar los cohetes sin que sufran desperfectos al llegar al suelo. Más aun, se han construido cohetes de dos y tres etapas sucesivas, alcanzando grandes alturas.

En todo caso se ha de intentar construir con elementos muy ligeros y resistentes, pues la masa de todos ellos es un factor crítico en el desarrollo de un proyecto de cohete. Se recomienda utilizar botellas de dos litros de capacidad, cuyos cuellos son de un diámetro interior de 20 a 25 milímetros, que conviene reducirlo, mediante un tubo de plástico, a 14 milímetros. El aire comprimido normalmente se carga a unas 4 atmósferas de presión para que salte el tapón y salga el agua.

## 17.2. Fases de vuelo

El cohete, desde que es lanzado hasta que vuelve a tierra, pasa por tres fases diferentes.

La primera fase es la de propulsión por agua. En esta fase el cohete tiene agua, y la va expulsando por la tobera a gran velocidad, durante no más de unos 0,1 segundos para un tanque de 2 litros. En esta fase el cohete alcanza su velocidad máxima, superando con facilidad los 100 km/h.

La segunda fase es la de propulsión por aire. Si el cohete está bien diseñado y se ha llenado con la cantidad adecuada de agua, cuando toda el agua ha salido el aire que queda en el cohete que todavía está a una presión mayor que la atmosférica lo impulsará por un muy breve tiempo más.

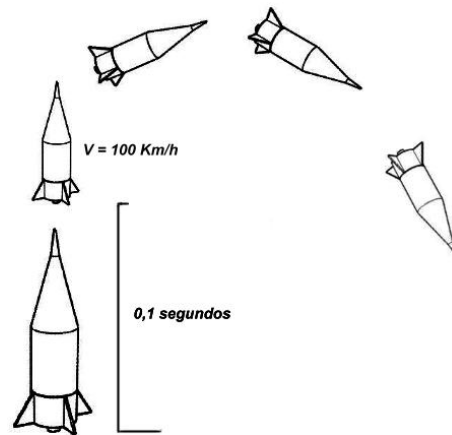


Figura 17.2: Fases de vuelo.

Para calcular la presión final del aire, una vez expulsada toda el agua de la botella—suponiendo que se ha realizado un proceso isotérmico, realmente adiabático—se puede aplicar la Ec. (17.1):

$$p_i V_i = p_f V_f. \quad (17.1)$$

En donde  $p_i$  es la presión inicial del aire,  $V_i$  es el volumen inicial del aire dentro de la botella,  $p_f$  es la presión final del aire una vez expulsado todo el agua y  $V_f$  es el volumen final del aire, el del interior de la botella.

La tercera y última fase es la de movimiento inercial. Ya no hay nada en el cohete que le siga empujando, y lo único que hace que siga subiendo es su propia inercia. El cohete va perdiendo velocidad debido al rozamiento con el aire y a la gravedad, hasta que alcanza su máxima altura, *apogeo*. Después, el cohete empieza a caer, siguiendo las mismas reglas de movimiento inercial: la gravedad lo atrae hacia tierra y el rozamiento con el aire lo frena en algo.

### 17.3. Funcionamiento

El cohete, cuando está a punto de ser lanzado, tiene una energía almacenada en su interior en forma de aire a presión. La presión del aire empuja a todas las superficies con las que está en contacto, incluida la del agua, con una fuerza que es igual al valor de la presión multiplicado por la superficie.

Cuando la tobera se abre, la presión del aire en su interior empuja al agua hacia abajo y al cohete hacia arriba. Cuanto mayor sea el valor de la velocidad de salida del agua mayor será la velocidad del cohete. La forma de la tobera permite que la presión provoque una velocidad muy grande en la salida del agua.

### 17.3.1. Leyes de Newton

#### Ley de la inercia

La primera ley de Newton, conocida también como la *Ley de la inercia*, nos dice: “Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza, este permanecerá indefinidamente en su estado original de reposo o de movimiento en línea recta con velocidad constante”.

#### Principio de conservación de la cantidad de movimiento

La segunda ley de Newton nos dice: “La fuerza aplicada sobre un cuerpo es directamente proporcional a la aceleración que adquiere tal cuerpo”. Siendo la constante de proporcionalidad igual a la masa del cuerpo,

$$F = ma, \quad (17.2)$$

donde  $F$  es la fuerza ejercida sobre el cuerpo,  $m$  es la masa del cuerpo y  $a$  es la aceleración provocada por la fuerza  $F$ . En el caso de un cohete, la fuerza que actúa sobre él es lo que se conoce como *empuje*.

La Ec. (17.2) es válida para cuerpos cuya masa es constante. Si la masa varía—como en el caso de un cohete que va expulsando el agua—la expresión anterior conviene expresarla de otra manera: “El valor de la fuerza que actúa sobre un cuerpo es proporcional a la variación de su cantidad de movimiento respecto del tiempo”.

La cantidad de movimiento, o momento lineal,  $L$  se define como el producto de la masa de un cuerpo  $m$  por su velocidad  $v$ :

$$L = mv. \quad (17.3)$$

#### Principio de acción y reacción

La tercera ley de Newton, también conocida como *Principio de acción y reacción*, nos dice: “Si un cuerpo  $A$  ejerce una acción sobre otro cuerpo  $B$ , éste realiza sobre  $A$  otra acción igual y de sentido contrario”.

Cuando el cohete expulsa el agua con gran velocidad hacia abajo (acción), el agua saliente impulsa la botella hacia arriba (reacción).

### 17.3.2. Principio de Bernoulli

En la ecuación (17.4) simplificada de Bernoulli:

$$p = p_{\text{at}} + \frac{1}{2}\rho v_{\text{agua}}^2, \quad (17.4)$$

$p$  es la presión del aire en el interior del cohete,  $p_{\text{at}}$  es la presión atmosférica,  $\rho$  es la densidad del agua y  $v_{\text{agua}}$  es la velocidad de salida del agua por la tobera del cohete.

La masa del agua  $m_{\text{agua}}$  que sale por la tobera por unidad de tiempo viene dada por la Ec (17.5),

$$m_{\text{agua}} = v_{\text{agua}} S_t \rho, \quad (17.5)$$

donde  $v_{\text{agua}}$  es la velocidad de salida del agua,  $S_t$  es la superficie de la sección de la tobera del cohete.

### Empuje

El empuje  $B$  está determinado por las siguientes expresiones:

$$B = (p - p_{\text{at}}) S_t \quad (17.6)$$

$$= S_t \rho v_{\text{agua}}^2 \quad (17.7)$$

$$= m_{\text{agua}} v_{\text{agua}}, \quad (17.8)$$

donde  $p$  es la presión del aire en el interior del cohete,  $p_{\text{at}}$  es la presión atmosférica,  $S_t$  es la superficie de la sección de la tobera del cohete,  $\rho$  es la densidad del agua,  $v_{\text{agua}}$  es la velocidad de salida del agua por la tobera del cohete, y  $m_{\text{agua}}$  es la masa del agua que sale por la tobera por la unidad de tiempo.

El empuje  $B$  ha de contrarrestar las fuerzas correspondientes al peso  $P$  del cohete y a la resistencia  $R$  del aire, y si es suficientemente grande impulsar al cohete hacia arriba, según la siguiente expresión,

$$B = P + R + ma, \quad (17.9)$$

donde  $m$  es la masa del cohete, es decir, la suma de las masas del fuselaje, la carga útil y el agua contenida dentro y  $a$  es la aceleración que el empuje  $B$  le comunica al cohete.

La resistencia  $R$  que el aire ofrece al movimiento del cohete depende de la densidad del aire, de la forma del cohete, de la rugosidad de su superficie y de su velocidad.

El peso  $P$  del cohete es una fuerza y se calcula multiplicando su masa  $m$  por la aceleración de la gravedad  $g$ , que se toma igual a  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

$$P = mg. \quad (17.10)$$

Suponiendo constante el empuje del motor, la aceleración producida sobre el cohete ira aumentando en la medida que disminuye su masa total, debido a la salida del agua por la tobera.

Una fórmula final muy aproximada de la velocidad máxima del cohete, suponiendo constante la velocidad de salida del agua, es,

$$v_{\text{máx}} = v_{\text{agua}} \ln \frac{m_i}{m}, \quad (17.11)$$

siendo  $v_{\text{máx}}$  la velocidad del cohete al final de la impulsión,  $v_{\text{agua}}$  la velocidad del agua, supuesta constante,  $m_i$  masa inicial, la del cohete más la del agua, y  $m$  la masa del cohete sin agua.

## 17.4. Criterios de diseño

Para construir un cohete se deben de tener en cuenta una serie de factores, entre los que destacan los siguientes.

**La cantidad de agua inicial.** El cohete debe su propulsión a la energía almacenada en el aire a presión. Esta energía, una vez liberada, se transmite al agua, provocando su salida en forma de chorro a alta velocidad. Según esto, cuanta más agua tenga el cohete, mejor. Sin embargo, más agua supone menos aire, y es el aire el que provee la energía. Por ello hay una cantidad de agua que puede considerarse óptima y que está en torno a la tercera parte del volumen total del motor del cohete.

**El peso del cohete.** Si el peso de la estructura del cohete—descontando el agua—es muy grande, el empuje realizado por el agua será menos efectivo. Pero, al mismo tiempo, tampoco es bueno que el cohete sea excesivamente ligero. Un cohete de muy poco peso tendrá una enorme aceleración inicial, pero también tendrá muy poca inercia cuando haya perdido el agua, con lo que el rozamiento del aire lo frenará con gran rapidez, y alcanzará poca altura.

### 17.4.1. La estabilidad del cohete.

Un cohete es estable cuando asciende en línea recta, sin desviaciones. Cuando esto sucede, el cohete se mueve del modo más eficaz, es decir, el rozamiento debido al aire es el mínimo perdiendo menos velocidad y logrando más altura. Para que un cohete sea estable debe cumplirse una regla muy sencilla: *su centro de gravedad, lugar donde puede considerarse concentrado el peso, debe estar por delante de su centro de presión, lugar donde puede considerarse concentrado el frenado del aire.* Cuanto mayor sea la distancia entre ambos, más estable será el cohete.

Para aumentar la estabilidad se deben añadir aletas en la parte trasera del fuselaje, eso retrasa el centro de presión del cohete. Adicionando peso en el frente se consigue adelantar el centro de gravedad, aumentando en ambos casos la separación entre dichos centros.

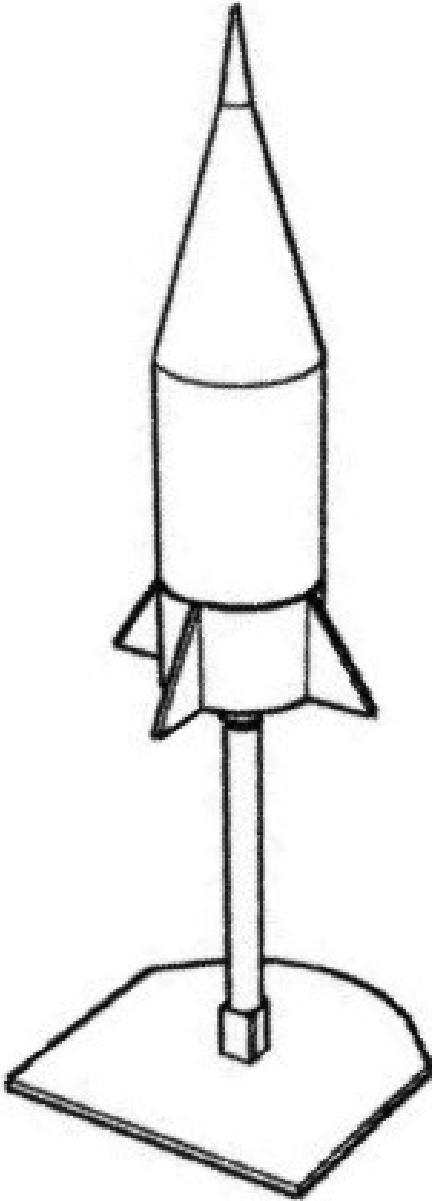


Figura 17.3: El cohete sobre su soporte de lanzamiento.

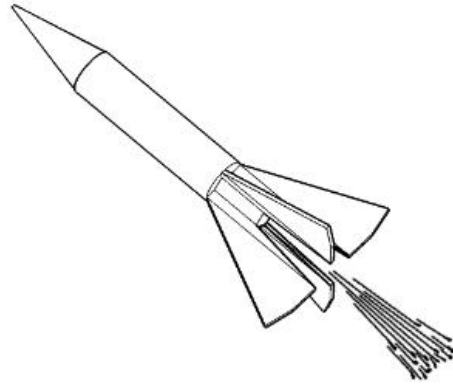


Figura 17.4: El empuje impulsa al cohete.

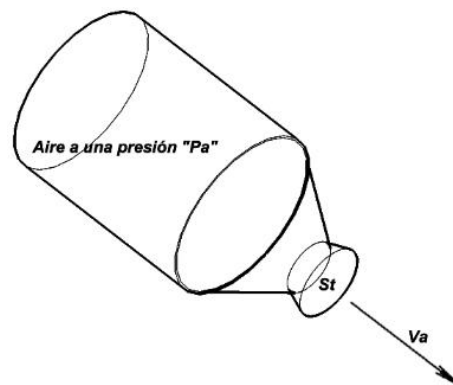


Figura 17.5: Principio de Bernoulli.



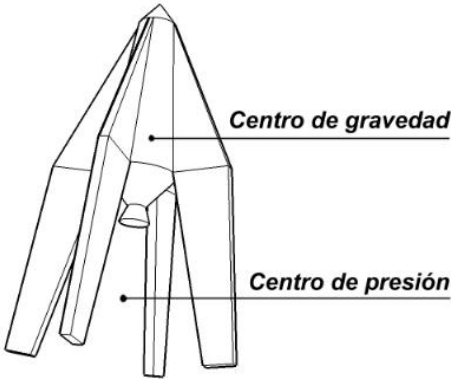


Figura 17.6: Criterios de diseño.

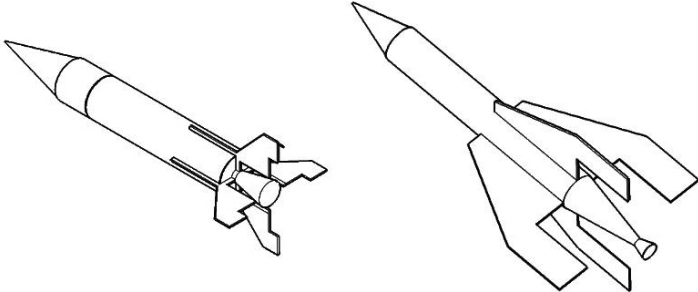
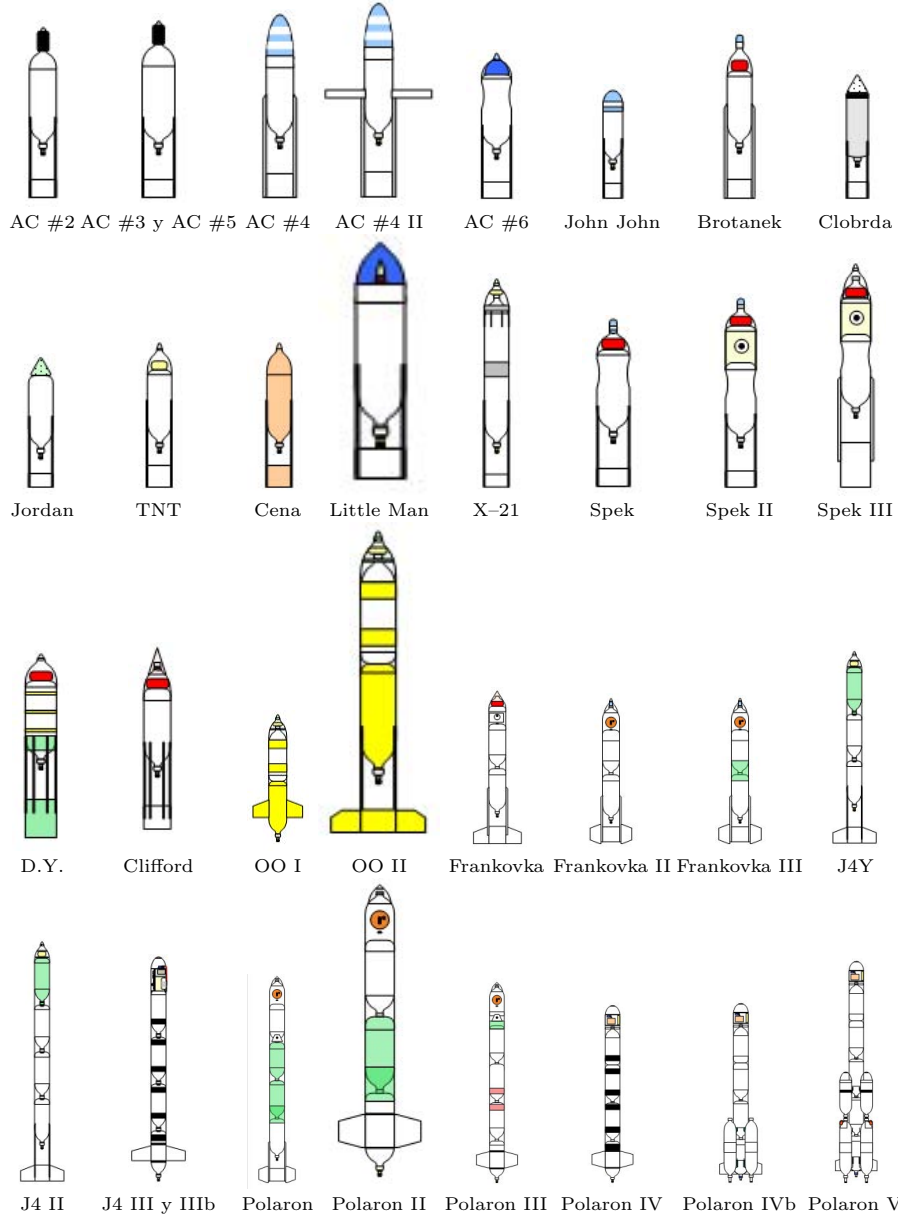


Figura 17.7: Modelos de aletas.

## Algunos modelos de Cohetes hidroneumáticos



Parte V  
Apéndice

