



Astronomía fundamental

Vicent J. Martínez, Joan Antoni Miralles,
Enric Marco, David Galadí-Enríquez

PUV

ASTRONOMÍA FUNDAMENTAL

Educació. Materials 81

Vicent J. Martínez
Joan Antoni Miralles
Enric Marco
David Galadí-Enríquez

ASTRONOMÍA FUNDAMENTAL

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA
2007

Colección: Educació. Materials
Director de la colección: Guillermo Quintás Alonso



Esta publicación no puede ser reproducida, ni total ni parcialmente, ni registrada en, o transmitida por, un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, ya sea fotomecánico, fotoquímico, electrónico, por fotocopia o por cualquier otro, sin el permiso previo de la editorial.

1ª edición en catalán, 2001

1ª edición en castellano, marzo de 2005

2ª impresión, febrero de 2007

© Los autores, 2005

© De esta edición: Universitat de València, 2005

© De la traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro y David Galadí-Enríquez

Producción: Maite Simón

Fotocomposición y maquetación: los autores y Publicacions de la Universitat de València

Cubierta:

Diseño: Pere Fuster (Borràs i Talens Assessors SL)

Tratamiento gráfico: Celso Hernández de la Figuera

Fotografías de la cubierta:

La imagen de fondo es el entorno de la galaxia elíptica NGC1600 situada a 215 millones de años luz de distancia. Las imágenes digitalizadas originales han sido procesadas por Vicent Peris haciendo uso del software PixInsight - © 2004-2005 Pleiades Astrophoto. El uso de estas imágenes es cortesía del UK Schmidt Telescope (los derechos son propiedad del Particle Physics and Astronomy Research Council del Reino Unido y del Anglo-Australian Telescope Board) y del Digitized Sky Survey creado por el Space Telescope Science Institute, operado por AURA, Inc, para NASA, y se reproducen aquí con permiso del Royal Observatory Edinburgh. Sobre ese fondo, se ha superpuesto un mosaico del planeta Marte, realizado a partir de unas 100 imágenes tomadas en 1980 por las dos naves Viking Orbiter (cortesía de NASA/USGS Astrogeology Research Program), y una fotografía, realizada por Fernando Ballesteros, del telescopio Grubb adquirido por el Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia en 1909, y que se encuentra en la sede del Rectorado de esta Universidad.

ISBN: 978-84-370-: 865-;

Índice

PRESENTACIÓN	13
PRÓLOGO	15
PREFACIO	19
Capítulo 1. Astronomía: objetivos e historia	21
1.1 ¿Qué es la astronomía?	21
1.2 Introducción histórica	22
1.3 La astronomía antigua	22
1.3.1 Los observatorios neolíticos y de la edad del bronce	22
1.3.2 La astronomía en las grandes civilizaciones antiguas	24
1.3.3 La astronomía griega	25
1.4 La astronomía en la Edad Media	33
1.5 El nacimiento de la astronomía moderna	33
1.5.1 Nicolás Copérnico (1473-1543)	33
1.5.2 Tycho Brahe (1546-1601)	35
1.5.3 Johannes Kepler (1571-1629)	37
1.5.4 Galileo Galilei (1564-1642)	38
1.5.5 Isaac Newton (1643-1727)	39
1.6 El desarrollo de la astronomía observacional	40
1.7 El nacimiento de la astrofísica	43
Capítulo 2. Astronomía esférica	47
2.1 Introducción	47
2.1.1 Constelaciones	48
2.1.2 Los nombres de las estrellas y los catálogos	48
2.2 La Tierra	50

2.3	La esfera celeste	52
2.3.1	El sistema de coordenadas horizontales	52
2.3.2	El sistema de coordenadas ecuatoriales	55
2.3.3	El sistema de coordenadas eclípticas	59
2.4	Correcciones de las coordenadas	65
2.4.1	Precesión	65
2.4.2	Nutación	68
2.5	Paralajes diurna y anua	69
2.6	La medida del tiempo	72
2.6.1	El día sidéreo y la rotación de la Tierra	72
2.6.2	El tiempo solar o sinódico. El día solar verdadero	72
2.6.3	La ecuación de tiempo	75
2.7	El calendario	77
2.8	Transformación de coordenadas	79
2.8.1	Transformación general	79
2.8.2	Cambio de coordenadas horizontales y horarias	81
2.8.3	Cambio de coordenadas ecuatoriales a eclípticas	83
Capítulo 3.	El movimiento de los astros	85
3.1	Ecuaciones de movimiento	85
3.2	Propiedades generales del movimiento	87
3.2.1	Momento angular	87
3.2.2	Vector de Runge-Lenz	88
3.2.3	Energía	89
3.2.4	Relación entre las cantidades conservadas	89
3.3	Ecuaciones de las órbitas	90
3.4	Leyes de Kepler	91
3.5	El problema de dos cuerpos	94
Capítulo 4.	El Sistema Solar	99
4.1	Características generales	99
4.2	Formación del Sistema Solar o cosmogonía	101
4.3	Geometría de las posiciones planetarias	103
4.3.1	Movimiento retrógrado de los planetas	103
4.3.2	Configuraciones geométricas y condiciones de visibilidad de los planetas	104
4.4	El Sol, nuestra estrella	107
4.4.1	Interior	107
4.4.2	La atmósfera	108
4.4.3	Actividad solar	110
4.5	El nuevo Sol	114
4.5.1	El interior solar	114
4.5.2	La atmósfera solar	115
4.6	Mercurio, al calor del Sol	116

4.7	Venus, el planeta hermano	117
4.8	La Tierra, nuestra nave	118
	4.8.1 Atmósfera	118
	4.8.2 Edad de la Tierra	120
	4.8.3 Estructura interna	121
4.9	La Luna	125
	4.9.1 Movimientos de la Luna	126
	4.9.2 Rotación y libraciones de la Luna	127
	4.9.3 Fases lunares	128
	4.9.4 Eclipses	131
4.10	Mareas	133
4.11	Marte, el planeta rojo	136
4.12	Los asteroides, pequeños planetas	138
4.13	Júpiter, el grande	139
	4.13.1 El interior de Júpiter	141
	4.13.2 Estructura de las nubes	141
4.14	Saturno, la belleza del frío	142
4.15	Urano, la larga noche	143
4.16	Neptuno, la precisión cósmica	143
4.17	Plutón, el fondo profundo	143
4.18	Cometas, visitantes de las fronteras	144
	4.18.1 El cometa Shoemaker-Levy 9	145
	4.18.2 La nube de Oort y el cinturón de Kuiper	146
	4.18.3 El cometa Halley	147
4.19	Origen de las atmósferas planetarias	147
4.20	Otros sistemas planetarios	149
	4.20.1 Técnicas de detección	149
	4.20.2 Exoplanetas	150
	4.20.3 Enanas marrones y planetas gigantes	152
Capítulo 5. La radiación y su estudio		153
5.1	Naturaleza de la luz	153
5.2	Materia y radiación	156
5.3	Magnitudes	159
5.4	Líneas espectrales	161
5.5	Efecto Doppler	163
5.6	Los telescopios	166
	5.6.1 Telescopios para uso visual: aumentos y luminosidad ...	166
	5.6.2 Refractores y reflectores	168
	5.6.3 Parámetros fundamentales de un telescopio	168
	5.6.4 Monturas	171
5.7	Técnicas de observación	173
	5.7.1 Astrometría	173
	5.7.2 Fotometría	174
	5.7.3 Espectroscopia	174

5.8 Instrumentos y detectores	175
5.8.1 Fotografía	175
5.8.2 Fotómetros fotoeléctricos	175
5.8.3 Dispositivos de carga acoplada	176
5.8.4 Espectrógrafos	176
Capítulo 6. Las estrellas	179
6.1 Introducción	179
6.2 Parámetros estelares	179
6.2.1 Masas	179
6.2.2 Luminosidades	180
6.2.3 Temperatura efectiva	181
6.2.4 Radios	181
6.3 Clasificación espectral	182
6.4 Diagrama de Hertzsprung-Russell	183
6.4.1 Diagrama H-R de cúmulos estelares	185
6.5 Relación masa-luminosidad	185
6.6 Estructura estelar	186
6.6.1 Ecuación de estado	187
6.6.2 Equilibrio hidrostático	188
6.6.3 Balance energético	190
6.6.4 Gradiente de temperatura	191
6.7 Ecuaciones de estructura estelar	192
6.7.1 Modelos estelares	192
6.8 Fuentes de energía estelar	194
6.9 Evolución estelar	198
6.9.1 Tiempos característicos	198
6.9.2 Formación estelar	199
6.9.3 Etapa en secuencia principal	201
6.9.4 Evolución a gigante roja	202
6.9.5 Últimas etapas evolutivas	202
Capítulo 7. Astronomía galáctica	205
7.1 Introducción	205
7.2 Estructura y características generales de la Galaxia	205
7.2.1 Disco, bulbo y halo	205
7.2.2 La estructura espiral	207
7.2.3 El Sol en la Galaxia: masa del sistema	207
7.3 La fase difusa de la Galaxia	209
7.3.1 Polvo interestelar	209
7.3.2 Gas interestelar	210
7.4 Agrupaciones estelares	211
7.4.1 Asociaciones estelares	211
7.4.2 Cúmulos estelares	212

7.5	Indicadores de distancia	213
7.5.1	Movimiento coherente de las estrellas en agrupaciones	213
7.5.2	Secuencia principal y diagrama H-R	216
7.5.3	Estrellas cefeidas y otros patrones de luminosidad	217
7.6	Coordenadas galácticas	219
Capítulo 8.	Astronomía extragaláctica	221
8.1	El descubrimiento de otras galaxias	221
8.2	Clasificación de las galaxias	222
8.2.1	Galaxias elípticas	222
8.2.2	Galaxias espirales	223
8.2.3	Galaxias irregulares	224
8.3	La distribución de la materia en las galaxias	225
8.3.1	Poblaciones estelares	225
8.3.2	La materia oscura en las galaxias espirales	225
8.4	Galaxias activas	228
8.4.1	Cuásares	228
8.4.2	Galaxias Seyfert	230
8.4.3	Radiogalaxias	230
8.4.4	Agujeros negros supermasivos	230
Capítulo 9.	Cosmología	233
9.1	Introducción histórica	233
9.2	Estructura cósmica	234
9.3	La expansión del universo	236
9.3.1	La ley de Hubble	236
9.3.2	Modelo de expansión	239
9.3.3	La edad del universo	240
9.3.4	La densidad crítica	242
9.3.5	Ecuaciones cosmológicas	245
9.4	La radiación de fondo	247
9.5	Densidad de materia y densidad de radiación	251
9.6	El universo primitivo	252
9.6.1	La era de los hadrones y la era de los leptones	253
9.6.2	La abundancia de los materiales ligeros	254
9.7	La paradoja de Olbers	256
Tablas	259
Ilustraciones	271
Bibliografía	297
Índice analítico	303

PRESENTACIÓN

La astronomía, una ciencia de origen antiguo y practicada por varias civilizaciones, forma parte del acervo cultural de muchas sociedades, y en multitud de países se ofrecen cursos de astronomía tanto en las escuelas como en las universidades, como parte de la formación de estudiantes de ciencia o ingeniería.

Al comenzar este tercer milenio nos enfrentamos a una paradoja social. En un mundo que cada vez depende más del conocimiento científico y de su producto, la tecnología, observamos un crecimiento vigoroso de una variedad abrumadora de ideas pseudocientíficas. La comprensión de las ciencias por parte de un gran sector del público deja mucho que desear. La astronomía brinda un refugio especial dentro de este panorama contradictorio.

Una de las diferencias que distinguen la astronomía de otras ciencias radica en el interés que despierta en sectores amplios de la población y en contextos diversos, tal y como lo atestigua el elevado número de asociaciones de aficionados y revistas de divulgación. Ello se debe en parte a que la astronomía se dedica a un objeto de estudio tangible: para hacer astronomía basta presenciar el espectáculo de un eclipse solar, maravillarse con una lluvia de meteoros o contemplar los anillos de Saturno con unos binoculares. Los instrumentos necesarios son fáciles de usar y poco costosos.

En el ámbito profesional, un número creciente de instrumentos instalados en el suelo y en el espacio prosigue el estudio del cosmos que comenzó con Galileo Galilei, la primera persona que apuntó un pequeño telescopio al cielo y descubrió maravillas, «al llevar nuestra vista», según el decir de Descartes, «mucho más lejos de lo que estaba acostumbrada a alcanzar la imaginación de nuestros antepasados» (Dióptrica I). Instrumentos cada vez más eficaces revelan sin cesar nuevas facetas del universo que habitamos, y una red internacional de investigadores produce un caudal constante de información, cuyos resultados pasan a formar parte del patrimonio de la humanidad.

La astronomía proporciona un canal ideal para la divulgación de la ciencia, y no opino de este modo porque esta sea mi profesión. Al discutir asuntos de gran interés astronómico (a menudo relacionados con algún evento cósmico contemporáneo) suelen surgir de manera natural los elementos que ilustran los procesos científicos; es decir, resulta sencillo aprovechar el tema para analizar cómo se desarrolla la ciencia, razonando sobre los conocimientos y sobre las pruebas que llevaron a ellos. La astronomía representa también un vehículo ideal para hacer frente a algunas de las creencias pseudocientíficas más extendidas, como la astrología y la ufología. Además, al incluir aportaciones de todas las ciencias (física, química y, cada vez más, biología), una introducción a la astronomía sirve como instrumento para interesar al estudiantado en estas otras áreas.

Cada año se publica un gran número de textos de astronomía adaptados a todos los niveles. Muchos de ellos son descriptivos, están repletos de fotografías vistosas y pretenden abarcar todos los aspectos de esta ciencia, de forma que se vuelven cada vez más voluminosos. Esta tendencia puede tornarse contraproducente, porque entre la masa de información se pierde lo básico, lo fundamental.

El presente texto se distingue porque aspira a sentar una base astrofísica, la cual, como indica el título, busca transmitir lo fundamental, aquello que es necesario para comprender el resto: un gran mérito ante la tendencia natural a querer abarcarlo todo. Los conceptos básicos se exponen con claridad y ofrecen al lector lo necesario para profundizar en cursos más avanzados. Esta cualidad confiere a la obra una gran utilidad en los cursos universitarios, dado que su contenido se puede cubrir fácilmente en un curso académico.

A diferencia de la mayoría de los textos de carácter introductorio, este expone las ecuaciones más importantes relacionadas con los diversos temas presentados, sin que ello lo convierta en inaccesible para estudiantes con un bagaje matemático más limitado. El texto se complementa con una serie de diagramas explicativos escogidos con destreza para facilitar la comprensión de lo expuesto. Gracias a su carácter fundamental, la obra tendrá validez por muchos años.

DANIEL R. ALTSCHULER
Director de la Oficina para la Divulgación de la Ciencia
Observatorio de Arecibo
Catedrático de Física de la Universidad de Puerto Rico

PRÓLOGO

La astronomía, es sin lugar a dudas, la ciencia más antigua. El ser humano sintió desde siempre una fascinación por el mundo de los astros y por el orden manifiesto que impera en el cielo, y lo indujo a creer que los dioses habitan en ese reino superior, que es allí arriba donde debe buscarse la razón de todas las cosas. Este convencimiento llevó a estudiar los astros y sus movimientos con gran interés y dedicación y a la creación paulatina de las herramientas adecuadas para lograrlo de manera plena, o sea, al desarrollo de las matemáticas y la física. El éxito de esta empresa fue sobrecogedor. La humanidad ha ido desvelando, uno tras otro, todos los secretos del mundo celeste y, en consecuencia, también del mundo que nos rodea en la Tierra. Y lo ha logrado con una eficacia y rapidez tales que, como Ícaro, ha terminado por perder el respeto a los dioses. El ser humano se ha vuelto cada vez más racional y pragmático. Ha comprendido, en definitiva, que él mismo es como un dios capaz de abarcar el misterio de la naturaleza, desde la esencia de las estrellas hasta el motivo último de nuestra existencia.

No es casual que la astronomía cuente con una gran tradición en los países más desarrollados. Su utilidad no se limitó tan solo al descubrimiento de nuevos territorios y al impulso del comercio marítimo, sino que ha representado, de hecho, el motor del progreso científico y tecnológico. La astronomía se cultivó en nuestro entorno durante la Edad Media. Por desgracia, este interés se desvaneció con el descubrimiento de América, tras el cual se pensó, erróneamente, que la riqueza que llegaba de aquel continente no se agotaría jamás, que ya no había que esforzarse por fomentar la ciencia que posibilitó aquel estado de cosas. Así se acabó con la gallina de los huevos de oro, y nunca mejor dicho.

Desde que la democracia llegó a España nos encontramos ante un proceso claro de recuperación del tiempo perdido durante los últimos siglos en lo que respecta al desarrollo de la cultura en general y de la ciencia en particular. Y, como si la sociedad española fuera consciente de la deuda histórica contraída con la astronomía, esta ciencia ha sido sin

duda alguna la disciplina científica que ha recibido más apoyo institucional y que ha experimentado el crecimiento más espectacular en los últimos años. A pesar de ello, se echan en falta libros de texto sobre astronomía que permitan al alumnado, sobre todo en los primeros cursos, seguir con comodidad el estudio de esta materia.

Esta carencia se ha vuelto aún más patente desde la entrada en vigor de los nuevos planes de estudio que, al reducir la duración de las licenciaturas de cinco a cuatro años, ha supuesto un cambio profundo en la estructura de las distintas carreras. Con el plan antiguo, la astronomía se impartía tradicionalmente como una especialidad de segundo ciclo, lo cual permitía profundizar bastante en la materia. Solía recomendarse una bibliografía bastante especializada que incluía, salvo honrosas excepciones, libros de autores extranjeros escritos en lengua inglesa. Con la implementación de los nuevos planes de estudios se ha producido un recorte significativo en todas las materias especializadas, una circunstancia que ha afectado de manera particular a la astronomía y la astrofísica. Con el fin de que este hecho repercutiera lo menos posible en la formación de los futuros profesionales, todas las universidades del Estado español donde se impartía astronomía han recurrido a su autonomía a la hora de definir los programas concretos de sus carreras y han coincidido en ofrecer una asignatura optativa de primer ciclo en la que se explican los fundamentos básicos de esta ciencia. Al mismo tiempo, se han concentrado en unas cuantas asignaturas de segundo ciclo los contenidos más elaborados, que requieren conocimientos previos más profundos de física o matemáticas.

Este libro rellena ese hueco. Se trata de una obra diseñada a la medida de las necesidades que acabamos de mencionar. Hay que decir que este volumen cubre los objetivos de manera casi perfecta. Los temas que no volverán a verse a lo largo de toda la carrera se tratan con el rigor y el detalle necesarios. Este es el caso, por ejemplo, de la evolución histórica de la astronomía, un aspecto al que se dedica una gran atención, como merece. Ocurre lo mismo con la astronomía de posición y del Sistema Solar, asuntos que en otras circunstancias podrían ser objeto de asignaturas especializadas de segundo ciclo pero que, en la situación actual, no queda más remedio que abordar en esta asignatura introductoria. Por otra parte, se ofrece una introducción simple y a la vez muy constructiva (por ejemplo, en el tratamiento newtoniano de la cosmología) de todos los grandes temas de astrofísica que se tratarán con más detalle en segundo ciclo, a

saber, los procesos radiativos, la astrofísica estelar, la astronomía galáctica, la astrofísica extragaláctica y la cosmología.

Pero no querría terminar este prólogo sin mencionar la característica que más me ha impresionado de este libro. Me refiero a la claridad con que se exponen los conceptos, a la facilidad aparente con que se explica todo, y la gran ligereza e incluso amenidad del discurso empleado. Estos rasgos resultan sin duda alguna esenciales para conseguir el efecto al que aspira todo libro de texto: incitar a quien lo lea a que profundice aún más en el estudio de la materia. En este sentido querría destacar el esfuerzo realizado por los autores en lo que atañe a recursos gráficos. Suele tenerse la idea equivocada de que las ilustraciones son accesorias en los libros de texto, de que su utilidad fundamental consiste en proporcionar descansos en el curso de la lectura para luego reemprenderla con fuerzas renovadas. Pues bien, como ya decían los chinos y como resulta bien patente de manera (me atrevería a decir) ejemplar en este libro, las imágenes también pueden sustituir explicaciones largas. Probablemente el texto se haya vuelto tan ligero y ameno gracias al provecho que los autores sacan de estas figuras, bien se trate de imágenes elaboradas por ellos mismos o seleccionadas con gran cuidado y acierto.

En definitiva, estoy convencido de que, si no lo impide ninguna nueva reforma espectacular de los planes de estudio universitarios, este libro gozará de una vida larga y que serán numerosas las generaciones de estudiantes que disfrutarán de él como lo he hecho yo. Por lo tanto, le deseo a esta obra lo mejor que puede desearse a un libro de introducción a la astronomía: que despierte multitud de nuevas vocaciones para la astronomía y la astrofísica, esta ciencia tan antigua y, a la vez, siempre de actualidad.

EDUARD SALVADOR
Catedrático de Astronomía y Astrofísica
de la Universidad de Barcelona

PREFACIO

Este curso de astronomía y astrofísica está dirigido a estudiantes del primer ciclo de titulaciones de ciencias básicas (matemáticas, física, química, geología) y técnicas (ingenierías, geodesia, topografía). Puede considerarse adecuado también para estudiantes de periodismo científico, así como de asignaturas de libre opción de introducción a la astronomía, que figuran ya en muchos planes de estudio. Al mismo tiempo, los autores no hemos olvidado que la astronomía es una ciencia extraordinariamente popular y que muchas personas se acercan a ella por el placer de descubrir qué hay tras las maravillas que nos brinda el cielo estrellado. Esperamos que este libro contribuya a que estos posibles lectores puedan profundizar en el conocimiento del cosmos. La primera edición, en catalán, salió de la imprenta en marzo de 2001. La presente edición, en castellano, ha sido revisada y actualizada. Incorpora, asimismo, nuevas secciones que tratan de complementar la obra como un texto de referencia básico en astronomía.

No cabe duda de que la astronomía es la ciencia observacional más antigua. Resulta fascinante comprender la evolución del conocimiento acerca del cosmos a lo largo de la historia del pensamiento. Por eso en el capítulo 1, después de dar las definiciones modernas sobre esta disciplina y explicar las ramas en las que se divide, presentamos una introducción histórica breve que abarca desde las observaciones neolíticas hasta nuestros días.

En el capítulo 2 estudiamos en detalle las herramientas matemáticas básicas necesarias para entender la esfera celeste y sus movimientos. Estos movimientos aparentes no son sino una consecuencia de los movimientos de la Tierra.

En el capítulo 3 estudiamos los movimientos de los astros, sobre todo dentro del Sistema Solar, mediante las ecuaciones de Newton y las leyes de Kepler. El resto de la obra sigue el recorrido tradicional que lleva desde los objetos astronómicos más cercanos hasta los más lejanos.

La descripción del Sistema Solar y su origen constituye el objetivo del capítulo 4, donde se describen en detalle el Sol, los planetas, sus satélites y los cometas.

En astronomía es esencial conocer las propiedades de la luz, puesto que casi todo lo que sabemos de los astros se deduce a través del análisis de la radiación que nos llega de ellos y que, en muchos casos, se emitió hace mucho tiempo. El capítulo 5 se dedica al estudio de la luz en el contexto astronómico y se introducen conceptos básicos sobre telescopios y técnicas observacionales, aspecto este último que no estaba cubierto en la primera edición en catalán.

El capítulo 6 se dedica a las estrellas. Contiene una descripción de los parámetros que las caracterizan, así como un estudio de su estructura y evolución. La astronomía contemporánea incluye la astrofísica como una rama de enorme importancia y con la cual, en virtud de los métodos de la física moderna, podemos explicar los fenómenos que se observan en el cosmos y conocer su origen y evolución en el tiempo.

En el capítulo 7 estudiamos nuestra Galaxia, su estructura y composición, con un énfasis especial en el medio interestelar y las agrupaciones de estrellas. Este último apartado se ha ampliado considerablemente respecto a la primera edición en catalán. Explicamos cómo se miden las distancias de los objetos más lejanos.

El capítulo 8 se dedica al estudio de las otras galaxias que pueblan el universo. Presentamos varios campos en los que se investiga hoy día con gran intensidad, como por ejemplo la existencia y naturaleza de la materia oscura, las galaxias activas y los agujeros negros supermasivos.

Finalmente, el capítulo 9 se dedica a la cosmología, la ciencia que estudia el origen y la evolución del universo en su globalidad. A la descripción del tejido cósmico a gran escala sigue una explicación clara de los aspectos básicos de la teoría de la Gran Explosión.

Queremos agradecer a nuestros estudiantes de astronomía y astrofísica sus comentarios y preguntas, que han influido notablemente en la redacción del manuscrito definitivo. Las figuras con los diferentes tipos de monturas de telescopios han sido realizadas por Fernando J. Ballesteros, a quien los autores quieren manifestar su agradecimiento. Nuestros compañeros del Departament d'Astronomia i Astrofísica y del Observatori Astronòmic de la Universitat de València y los colegas del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona han contribuido con sugerencias y comentarios. Los autores de la primera edición en catalán quieren agradecer a los traductores, Dulcinea Otero-Piñeiro y David Galadí-Enríquez, la profesionalidad y el esmero con que se ha realizado la traducción, de cuyo resultado estamos francamente satisfechos. Queremos agradecer los textos de presentación redactados por los profesores Daniel R. Altschuler y Eduard Salvador. Sus acertados comentarios sitúan adecuadamente este libro en el contexto histórico actual y avalan su necesidad. Un libro de las características de éste nunca habría visto la luz sin la paciencia y la inestimable colaboración del Servicio de Publicaciones de la Universitat de València. Las sugerencias del director de la colección, Guillermo Quintás, han incrementado notablemente la coherencia de la obra. Agradeceremos, así mismo, a los lectores que encuentren errores o que deseen hacernos llegar sus ideas que nos escriban o nos envíen por correo electrónico sus opiniones.

Valencia, 20 de marzo de 2005, equinoccio de primavera

VICENT J. MARTÍNEZ

Observatori Astronòmic de la Universitat de València

JOAN ANTONI MIRALLES

Departament de Física Aplicada de la Universitat d'Alacant

ENRIC MARCO

Departament d'Astronomia i Astrofísica de la Universitat de València

DAVID GALADÍ-ENRÍQUEZ

Centro de Astrobiología, CSIC-INTA

1. Astronomía: objetivos e historia

1.1 ¿Qué es la astronomía?

La astronomía es la ciencia que trata del origen, la evolución, la composición, la distancia y el movimiento de todos los cuerpos celestes y de la materia dispersa en el universo. Incluye la astrofísica, que estudia las propiedades físicas y la estructura de la materia cósmica.¹

La astronomía puede dividirse en diversas ramas según sus objetivos científicos, o en función de sus métodos de estudio.

Clasificación

- *Astronomía esférica o de posición*: estudia los sistemas de coordenadas en la esfera celeste, sus cambios y las posiciones de los astros en el cielo.
- *Mecánica celeste*: estudia los movimientos de los cuerpos celestes en el Sistema Solar, en los sistemas estelares y los movimientos de las galaxias.
- *Astrofísica*: utiliza los métodos de la física moderna para analizar la estructura, la composición y la evolución de los astros.
- *Cosmología*: estudia el universo en su conjunto, es decir, la estructura, el origen y la evolución del cosmos.

La astronomía, al igual que las demás ciencias, constituye una disciplina en la que se aplica el método científico. Este método consta de tres fases:

1. *Observación*: los objetos celestes emiten radiación que se capta por medio de telescopios o de otros instrumentos. La luz es el principal agente que aporta información acerca de los astros.
2. *Análisis de los datos*: a partir del estudio de la información anterior, es necesario identificar los procesos físicos responsables de la emisión de la radiación.

¹Traducción de la definición que aparece en la *Encyclopaedia Britannica* (edición de 1989).

3. *Elaboración de modelos teóricos*: para explicar las observaciones hay que formular modelos teóricos. Al mismo tiempo, estos modelos plantean la necesidad de nuevas observaciones para su verificación.

1.2 Introducción histórica

La astronomía, junto a la aritmética, es la más antigua de todas las ciencias. Hace aproximadamente 20 000 años, hacia el final del paleolítico, ya se hacían grabados en piedra que representan algunos asterismos: la Osa Mayor, la Osa Menor o las Pléyades. El neolítico es la época en que se erigieron los menhires y las avenidas dolménicas. Entre los monumentos megalíticos destacan por su singularidad los de *Stonehenge* y las *taules* menorquinas. Las grandes civilizaciones antiguas, tanto euroasiáticas como precolombinas, poseían conocimientos astronómicos importantes que utilizaban sobre todo para establecer el calendario. La astronomía griega resulta especialmente importante, y puede decirse que la astronomía nace como ciencia en la antigua Grecia. Describiremos con cierto detalle este periodo, que va desde Tales de Mileto hasta Tolomeo. Tras la muerte de Tolomeo en el siglo II, cabe afirmar que durante muchos siglos se produjo bien poco destacable, a excepción quizá de la astronomía árabe. En el siglo XVI sucede un cambio revolucionario en las concepciones astronómicas, con Copérnico. En este capítulo mencionaremos las aportaciones de este astrónomo, junto con las de Tycho Brahe, Kepler, Galileo y Newton. Durante los siglos XVIII y XIX, el uso sistemático del telescopio desde los observatorios que se fundaron por todo el mundo permitió desarrollar grandes programas observacionales que culminan en el siglo XX con el nacimiento de la astrofísica.

1.3 La astronomía antigua

La observación del cielo en las culturas antiguas está asociada a fines religiosos o ideológicos, o bien a aplicaciones prácticas como la determinación de las estaciones o el establecimiento de los ciclos para las labores agrícolas, la orientación de los navegantes en el mar, etc.

1.3.1 *Los observatorios neolíticos y de la edad del bronce*

Es muy probable que los monumentos megalíticos que se encuentran en Europa estuvieran relacionados con observaciones astronómicas. Como ejemplos relevantes trataremos el yacimiento de *Stonehenge* y de las *taules* menorquinas.

Stonehenge

El monumento megalítico de *Stonehenge* se halla al sur de Inglaterra y se construyó alrededor del año 2000 antes de Cristo (a.C.). Durante los siglos siguientes se le añadieron otras estructuras adicionales.

Consta de una serie de orificios, piedras y arcos megalíticos distribuidos en círculos. El anillo de agujeros exterior posee 56 posiciones marcadas, mientras que los dos anillos interiores cuentan con 30 y 29 agujeros, respectivamente. Los círculos interiores están relacionados con los meses solar y lunar. Es posible que los sistemas de círculos se emplearan para predecir eclipses. Varias rocas señalan direcciones de interés astronómico, como la denominada *Heel Stone* (piedra talón) al nordeste. Se trata de una roca con forma de cuña sobre la que sale el Sol el día del solsticio de verano. Las observaciones se efectuaban mediante alineaciones de dos rocas, esperando la aparición del astro en el punto del horizonte señalado por la línea que une ambas piedras. Las posiciones extremas del Sol en el horizonte en los solsticios de verano y de invierno están marcadas de manera destacada. En la figura 1.1 se representa el conjunto megalítico de Stonehenge.



Figura 1.1: Stonehenge. Cortesía de Clive Ruggles, Universidad de Leicester. Fotografía procedente de <http://www.le.ac.uk/archaeology/rug/>.

Las *taules* menorquinas

En la isla de Menorca se encuentran unas construcciones megalíticas muy características llamadas *taules* (literalmente, “mesas”), que se enmarcan dentro de la cultura talayótica mediterránea. Estas *taules*, construidas alrededor del año 1000 a.C., constan de dos piedras planas: una en posición vertical, la roca de soporte, con dos o tres metros de altura, y otro bloque horizontal colocado encima, la piedra capitel. En casi todos los casos se comprueba que la parte frontal de la roca de soporte se halla orientada hacia el sur y permite la observación del horizonte, generalmente el horizonte marino. Investigaciones recientes indican que esta orientación puede estar relacionada con el hecho de que la parte del

cielo observable desde Menorca sobre el horizonte meridional en aquella época estaba repleta de astros brillantes. En particular, llegaban a divisarse la Cruz del Sur y las estrellas α y β del Centauro. Esta configuración de estrellas no llega a verse en la actualidad desde este lugar como consecuencia de la precesión de los equinoccios, un fenómeno que se tratará en el capítulo 2. La lámina I muestra un ejemplo de estas *taules*.

1.3.2 *La astronomía de las grandes civilizaciones antiguas*

No cabe duda de la importancia que alcanzó el conocimiento astronómico en muchas civilizaciones antiguas. Por desgracia, en muchos casos se carece de registros escritos y no disponemos de información sobre el alcance exacto de este conocimiento. Aunque en esta introducción histórica nos centraremos en el desarrollo de la astronomía como ciencia sobre todo en Europa, no podemos pasar por alto las observaciones y los cálculos astronómicos realizados durante siglos en algunas de las civilizaciones antiguas más esplendorosas. Sin afán de exhaustividad, explicaremos a grandes rasgos algunos de los conocimientos astronómicos que poseían tres culturas muy separadas geográficamente.

La astronomía en el antiguo Egipto

El conocimiento del calendario constituye uno de los aspectos más importantes para cualquier civilización agrícola. El ciclo de labores agrarias en Egipto estaba condicionado por las crecidas periódicas del río Nilo, y bien pronto los habitantes de la región aprendieron a relacionar la época del año en que sucedían las inundaciones con la observación de fenómenos astronómicos. El llamado *orto heliaco* de Sirio, la estrella más brillante del firmamento, se producía poco antes de que comenzaran las beneficiosas crecidas del Nilo. En efecto, durante una parte del año Sirio deja de ser visible debido a su proximidad angular al Sol. La primera reaparición de la estrella antes de la salida del Sol recibe el nombre de *orto heliaco*. Esa fecha se convirtió en el inicio del año en el calendario egipcio.

Las construcciones del antiguo Egipto presentan orientaciones muy precisas relacionadas con hechos astronómicos. Las grandes pirámides de Gizeh se edificaron en el tercer milenio a.C. alineadas con los puntos cardinales con una precisión extraordinaria. Además, en la gran pirámide de Keops hay unos conductos abiertos en las paredes norte y sur que comunican la cámara del faraón con el exterior, orientados hacia las culminaciones superiores de la estrella polar de la época, Thuban (α Dra), y del cinturón de Orión, relacionado con la divinidad de Osiris.

Finalmente hay que destacar las numerosas representaciones de las constelaciones con figuras de animales y antropomórficas que se han hallado dibujadas en los techos de muchas tumbas (Seti I de Tebas, Ramsés IV, etc.).

La astronomía babilónica

El estudio sistemático del cielo realizado a partir del año 2000 a.C. por los habitantes de la antigua Babilonia pasó a formar parte del saber griego tras la conquista de Babilonia por Alejandro Magno en el año 231 a.C. Los babilonios escribían en tablillas de arcilla, multitud de las cuales se han conservado hasta nuestros días. En ellas quedan patentes sus conocimientos de matemáticas y, en menor medida, de astronomía. El sistema de numeración babilónico dio origen a la costumbre actual de dividir las horas en 60 minutos y los minutos en 60 segundos. El sistema de medida de ángulos basado en grados, minutos y segundos también se debe a los babilonios. Los astrónomos caldeos establecieron la división de la banda zodiacal en doce signos aproximadamente coincidentes con las constelaciones del zodiaco, cuyo nombre aún perdura. La astronomía babilónica tenía un fundamento astrológico, si bien entendido con un cierto sentido práctico. Los babilonios consideraban posible la prevención de ciertos desastres mediante la interpretación correcta de los astros. Ello los movió a registrar todos los fenómenos astronómicos observables en las tablillas *Enuma* durante algunos siglos, unos datos que les permitieron advertir ciclos en el comportamiento del Sol, la Luna y los planetas. Las tablillas babilónicas reflejan con claridad hechos tales como la aparición del cometa Halley en el año 164 a.C.

La astronomía maya

Las civilizaciones precolombinas poseían conocimientos astronómicos notables. Por desgracia, muchos de los vestigios de estas culturas fueron eliminados por los conquistadores. La civilización maya, asentada en Guatemala y el sur del Méjico actual, desarrolló un sistema de numeración extraordinario, de base 20 y de importancia capital para elaborar los calendarios que regían los actos religiosos y los acontecimientos de la vida civil. El calendario civil maya tenía 365 días, repartidos en 18 meses de 20 días, más 5 días sueltos. Los mayas poseían un conocimiento muy exacto de la duración del año trópico y del mes sinódico,² con un error de 17 segundos en el primer caso, y de 24 en el segundo.

Los mayas estaban obsesionados con el planeta Venus, al cual consideraban una divinidad cruel. Las observaciones sistemáticas de este planeta condujeron a estimar su periodo sinódico de revolución alrededor del Sol en 584 días, cuando el valor aceptado en la actualidad es de 583.92 días.

1.3.3 *La astronomía griega*

La astronomía nace como ciencia propiamente dicha con Tales de Mileto (624-548 a.C.) y, sobre todo, con su discípulo Anaximandro (610-545 a.C.). Estos personajes introdujeron la racionalidad y la geometría en su esfuerzo sistemático por entender el universo, es decir, por construir una cosmología que poco a poco se apartara de planteamientos puramente mitológicos. Para Tales,

²La definición de estos intervalos temporales se presenta en el capítulo 2.

el constituyente básico del universo es el agua, y la Tierra descansa sobre un océano acuoso. Anaximandro, en cambio, habla de un concepto más abstracto, el *apeiron*,³ que podría entenderse como *lo ilimitado* o *lo indeterminado*. Se atribuye a Tales la predicción de un eclipse de Sol, aunque este episodio podría no ser sino parte de la leyenda que rodea a estos filósofos.



Figura 1.2: El sistema del mundo de Aristóteles en un grabado de Pedro Apiano (Peter Apian), tomado de su obra *Cosmographia* (1524).

Para Pitágoras (580-500 a.C.), es posible entender el mundo basándose en principios racionales. Todo está constituido por cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Considera, por estética geométrica, que la Tierra es una esfera, y sabe que la Luna debe su brillo a la reflexión de la luz solar. Platón (428-348 a.C.) propone un universo geocéntrico con una Tierra esférica e inmóvil. Los cuerpos celestes poseen carácter divino y se desplazan con movimientos circulares y uniformes, según lo dispone el *demiurgo*.⁴ Al parecer, Platón estaba convencido de que los movimientos erráticos de los planetas eran el resultado de

³El *apeiron* correspondería al estado anterior a la determinación de las cualidades particulares, y representa la unificación primordial de los fenómenos físicos observados. Se trata, sin duda, de una anticipación de la base que yace bajo las modernas teorías de unificación en física.

⁴El demiurgo es, para Platón, la causa inteligente que subyace tras el orden y la armonía del mundo.

combinar movimientos elementales circulares y uniformes, pero fue Eudoxo de Cnido (408-355 a.C.) el primero en proponer un modelo matemático, basado en esferas homocéntricas,⁵ para explicar este tipo de movimiento. Para Aristóteles (384-322 a.C.) existen dos mundos: el *supralunar*, el cielo, regido por círculos perfectos con movimientos circulares y uniformes, y el *sublunar*, la Tierra, donde las cosas se desplazan con movimientos imperfectos y cambian, donde la materia se transforma. En su modelo cosmológico, o *sistema del mundo*, heredado de Eudoxo, la Tierra yace inmóvil en el centro de un conjunto de esferas concéntricas y transparentes que giran a su alrededor. Hay 8 esferas, correspondientes a la Luna, el Sol, los cinco planetas conocidos (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) y finalmente las estrellas fijas (véase la figura 1.2).

Aristarco de Samos (310-230 a.C.)

Fue el primero en situar el Sol en el centro del universo. La Tierra y los planetas giran a su alrededor, a excepción de la Luna, que se mueve en torno a la Tierra. Este modelo no prosperará y habrá que esperar hasta Copérnico para que el heliocentrismo se asiente de manera definitiva. Aristarco atribuye a la Tierra movimientos tanto de rotación como de traslación y efectuó las primeras mediciones de las distancias Tierra-Luna y Tierra-Sol.

Distancia Tierra-Luna

Durante un eclipse de Luna, Aristarco observó que, a la distancia a que se halla la Luna, el cono de sombra proyectado por la Tierra tiene una anchura equivalente al doble del diámetro aparente de la Luna. Esta observación, junto con el hecho de que la Luna y el Sol muestran discos casi con el mismo diámetro angular aparente, le permitió a Aristarco trazar el diagrama que se muestra en la figura 1.3. Mediante este esquema, Aristarco pudo determinar que el diámetro de la Tierra, D_T , era tres veces mayor que el diámetro de la Luna, D_L :

$$D_L = \frac{D_T}{3}. \quad (1.1)$$

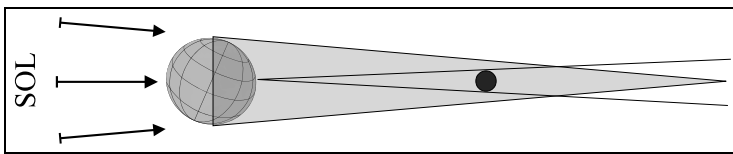


Figura 1.3: Cono de sombra proyectado por la Tierra durante un eclipse de Luna.

En realidad, la relación correcta es $D_L = D_T/3.67$. Para Aristarco, el diámetro angular aparente de la Luna es de 2° (el valor correcto es 0.52°). Si se

⁵Un sistema de esferas concéntricas unidas mediante ejes de rotación orientados en direcciones diferentes. Las esferas giran con velocidades distintas.

acepta que la órbita lunar es circular, su longitud corresponde a $L_{orb} = 2\pi d_{TL}$, donde d_{TL} representa la distancia Tierra-Luna. Entonces, si 2° corresponde a $D_T/3$, los 360° de la órbita completa equivaldrán a $60D_T$. Por tanto,

$$d_{TL} = \frac{60D_T}{2\pi} \simeq 9.5D_T. \quad (1.2)$$

Si se emplean los valores correctos para el diámetro de la Luna y para su tamaño angular aparente, se obtiene $d_{TL} \simeq 30D_T$. Si consideramos el diámetro de la Tierra, $D_T = 12\,756$ km, obtendremos para la distancia Tierra-Luna el valor $d_{TL} \simeq 382\,680$ km. Hoy día sabemos que la distancia media es de $384\,400$ km. Habría que esperar hasta Kepler para saber que la órbita lunar no es circular, sino elíptica y que, por lo tanto, la distancia entre la Tierra y la Luna oscila entre un valor máximo ($406\,697$ km) y otro mínimo ($356\,410$ km). En cualquier caso, el método empleado por Aristarco resulta extraordinariamente inteligente para la época.

Distancia Tierra-Sol

Cuando la Luna muestra fase de cuarto, sea creciente o menguante, el Sol, la Luna y la Tierra ocupan los vértices de un triángulo rectángulo, tal y como se muestra en la figura 1.4. En esta configuración, Aristarco midió el ángulo α formado por las líneas que unen la Tierra con la Luna y la Tierra con el Sol, y obtuvo el valor $\alpha = 87^\circ$ (el valor correcto habría sido $\alpha = 89.85267^\circ$).

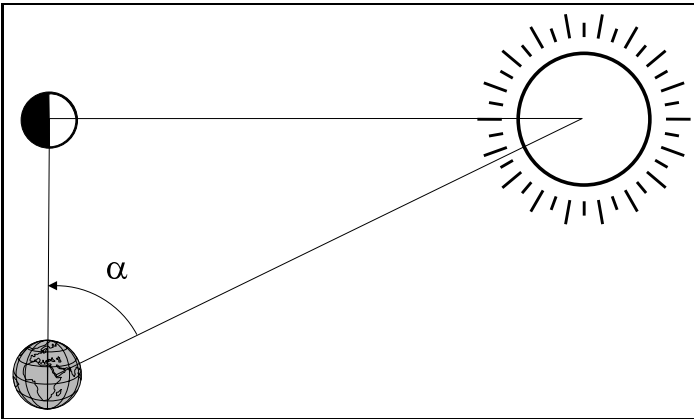


Figura 1.4: El ángulo α medido por Aristarco en la fase de cuarto lunar.

Entonces, aplicando una relación que en términos trigonométricos modernos representaríamos como

$$\cos \alpha = \frac{d_{TL}}{d_{TS}}, \quad (1.3)$$

Aristarco calculó que $d_{TS} = 19d_{TL}$ (cuando realmente $d_{TS} = 389d_{TL}$). Uniendo este resultado al anterior, Aristarco llegó a la expresión:

$$d_{TS} = 9.5 \times 19 \times D_T = 180.5D_T. \quad (1.4)$$

Un contemporáneo de Aristarco, Eratóstenes, midió el diámetro de la Tierra, como veremos más tarde.

Aunque el valor obtenido por Aristarco para la distancia Tierra-Sol no fuera el correcto, porque infravaloró el ángulo α , si se aplica el mismo método introduciendo los valores verdaderos para este ángulo y para la distancia Tierra-Luna, $d_{TL} = 384\,400$ km, se deduce, obviamente, el valor correcto para la distancia Tierra-Sol, $d_{TS} = 389 \times 384\,400 = 149\,531\,000$ km.

Eratóstenes de Cirene (276-195 a.C.)

Eratóstenes determinó las dimensiones de la Tierra a partir de la medida de un arco del meridiano terrestre que va de Alejandría a Siena (la actual Asuán). Para efectuar la medida recurrió al gnomon, un instrumento sencillo que permite estudiar la longitud de la sombra arrojada sobre la superficie de la Tierra por un estilete vertical. Eratóstenes era el encargado de la biblioteca de Alejandría y supo que en el solsticio de verano en la ciudad de Siena (situada sobre el trópico de Cáncer) el Sol, a mediodía, pasa por el cenit, es decir, por el punto situado justo en la vertical del lugar. En esta situación y en el mismo momento, un gnomon colocado en Siena no arrojaría sombra (véase la figura 1.5). Sin embargo, en ese instante sí que proyectaría una sombra, de longitud s , un estilete de longitud l colocado en Alejandría. Por lo tanto, el ángulo α que corresponde a la separación angular entre la posición del Sol y el cenit será $\alpha = \arctan(s/l)$, como se deduce de la figura 1.5. Este ángulo vale 7.2° .

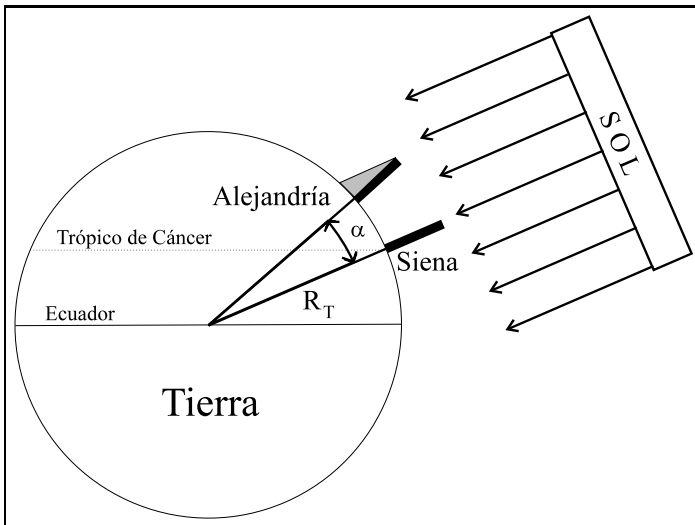


Figura 1.5: El gnomon en Siena y en Alejandría en el solsticio de verano. El ángulo medido por Eratóstenes corresponde al arco de meridiano que separa ambas ciudades.

Como la distancia entre Siena y Alejandría⁶ es de 787.5 km, el método de Eratóstenes permite calcular que la circunferencia completa de la Tierra (360°) equivale a 39 942 km (una determinación extraordinariamente correcta).

Hiparco de Nicea (194-120 a.C.)

Hiparco de Nicea fue el gran astrónomo observacional de la época helenística. La aparición de una supernova en el año 134 a.C. lo movió a confeccionar el primer catálogo estelar, en el que recogió las posiciones y magnitudes de 850 estrellas. Hiparco registró las posiciones con una precisión que no fue superada hasta el siglo XVI por Tycho Brahe. Hiparco estableció la escala de magnitudes estelares que estudiaremos en el capítulo 5. Clasificó las estrellas de mayor brillo aparente como de primera magnitud, atribuyó la segunda magnitud a las que eran aproximadamente la mitad de brillantes, y así sucesivamente hasta la sexta magnitud, que se asigna a las estrellas más débiles que pueden percibirse a simple vista. Hiparco descubrió además el fenómeno conocido como *precesión de los equinoccios*, que hace variar las coordenadas celestes de las estrellas a lo largo de grandes periodos de tiempo. Esta alteración, que estudiaremos con detalle en el capítulo 2, se debe al desplazamiento de los puntos de intersección entre el plano de la órbita terrestre y el plano del ecuador de la Tierra. Hiparco calculó que la precesión de los equinoccios sucede a un ritmo de 45"/año. El valor aceptado en la actualidad es muy parecido, 50.27"/año.

Tolomeo de Alejandría (85-165 d.C.)

Tolomeo de Alejandría escribió una obra enciclopédica de astronomía en 13 volúmenes que fue introducida en Europa por los árabes con el nombre de *Almagesto*. En ella, el autor ampliaba el catálogo estelar de Hiparco hasta 1 100 estrellas, e introducía una descripción del universo conocida como *sistema tolemaico*.

El sistema aristotélico descrito con anterioridad no podría explicar satisfactoriamente los movimientos retrógrados de los planetas. La configuración del Sistema Solar hace que la trayectoria aparente de cualquier planeta, observada desde la Tierra, presente movimientos retrógrados (en el capítulo 4 se explica este hecho con detalle). Desde la Tierra observamos que en su camino por el cielo, en determinados momentos, el planeta se detiene y cambia el sentido de su movimiento respecto del fondo de estrellas fijas. Pasadas algunas semanas, el astro reemprende el movimiento en el sentido inicial, llamado directo (véase la figura 1.7). Con el fin de explicar estas observaciones, Tolomeo adoptó el sistema de *epiciclos*, introducido siglos antes por Apolonio de Pérgamo (240-170 a.C.). Este sistema constituye un modelo puramente geométrico según el cual el planeta se desplaza con velocidad constante sobre una circunferencia denominada *epiciclo*. Al mismo tiempo, el centro del epiciclo gira alrededor de la

⁶La medida original de Eratóstenes habla de 5 000 estadios, pero por desgracia no conocemos el valor exacto de los estadios usados por Eratóstenes.