

Astronomia fonamental

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

2^a edició



PUV

ASTRONOMIA FONAMENTAL

Educació. Materials 47

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

ASTRONOMIA FONAMENTAL

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Col·lecció: Educació. Materials

Director de la col·lecció: Guillermo Quintás Alonso

La publicació d'aquest llibre ha rebut l'ajut d'una beca del Servei de Política Lingüística de la Universitat de València per a la redacció de manuals en català.

Aquesta publicació ha comptat amb l'ajut de la Generalitat de Catalunya.



Aquesta publicació no pot ser reproduïda, ni totalment ni parcialment, ni enregistrada en, o transmesa per, un sistema de recuperació d'informació, en cap forma ni per cap mitjà, sia fotomecànic, fotoquímic, electrònic, per fotocòpia o per qualsevol altre, sense el permís previ de l'editorial.

1a edició: març 2005

2a edició, corregida i ampliada: gener 2008

© Els autors, 2008

© D'aquesta edició: Universitat de València, 2008

Coordinació editorial: Maite Simon

Fotocomposició i maquetació: els autors i Publicacions de la Universitat de València

Assessorament lingüístic: Servei de Política Lingüística i Ofèlia Sanmartín

Coberta:

Disseny: Pere Fuster (Borràs i Talens Assessors SL)

Tractament gràfic: Celso Hernández de la Figuera

ISBN: 978-84-370-6896-1

Dipòsit legal: V-7-2008

Printed in Spain

Índex

PRESENTACIÓ, Daniel R. Altschuler	13
PRÒLEG A LA PRIMERA EDICIÓ, Eduard Salvador.....	15
PREFACI	19
Capítol 1. Astronomia: objectius i història	21
1.1 Què és l'astronomia?.....	21
1.2 Introducció històrica	22
1.3 L'astronomia antiga.....	22
1.3.1 Els observatoris neolítics i de l'edat del bronze	22
1.3.2 L'astronomia en les grans civilitzacions antigues.....	24
1.3.3 L'astronomia grega	25
1.4 L'astronomia en l'edat mitjana	32
1.5 El naixement de l'astronomia moderna	32
1.5.1 Nicolau Copèrnic (1473-1543).....	32
1.5.2 Tycho Brahe (1546-1601).....	34
1.5.3 Johannes Kepler (1571-1630).....	36
1.5.4 Galileo Galilei (1564-1642).....	37
1.5.5 Isaac Newton (1643-1727)	38
1.6 El desenvolupament de l'astronomia observacional.....	39
1.7 El naixement de l'astrofísica.....	41
Capítol 2. Astronomia esfèrica.....	45
2.1 Introducció	45
2.1.1 Constel·lacions.....	46
2.1.2 El nom dels estels i els catàlegs	46
2.2 La Terra.....	48
2.3 L'esfera celeste.....	49
2.3.1 El sistema de coordenades horitzontals	51
2.3.2 El sistema de coordenades equatorials	52
2.3.3 El sistema de coordenades eclíptiques.....	56

2.4	Correccions a les coordenades	62
2.4.1	Precessió	62
2.4.2	Nutació.....	64
2.5	Paral·laxi diürna i anual	65
2.6	La mesura del temps	68
2.6.1	Dia sideri i la rotació de la Terra.....	68
2.6.2	El temps solar o sinòdic. Dia solar vertader	69
2.6.3	L'equació de temps	71
2.7	El calendari	74
2.8	Transformació de coordenades	75
2.8.1	Transformació general	75
2.8.2	Canvi entre coordenades horitzontals i horàries.....	77
2.8.3	Canvi entre coordenades equatorials i eclíptiques.....	79
Capítol 3. Moviment dels astres.....		81
3.1	Equacions de moviment.....	81
3.2	Propietats generals del moviment.....	83
3.2.1	Moment angular.....	83
3.2.2	Vector de Runge-Lenz	83
3.2.3	Energia.....	84
3.2.4	Relació entre les quantitats conservades.....	84
3.3	Equacions de les òrbites.....	85
3.4	Lleis de Kepler.....	87
3.5	El problema de dos cossos	90
Capítol 4. El Sistema Solar.....		93
4.1	Característiques generals	93
4.2	Formació del Sistema Solar o cosmogonia.....	95
4.3	Geometria de les posicions planetàries.....	97
4.3.1	Moviment retrògrad dels planetes	97
4.3.2	Configuracions geomètriques i condicions de visibilitat dels planetes	98
4.4	El Sol, el nostre estel.....	101
4.4.1	Interior	101
4.4.2	L'atmosfera	101
4.4.3	Activitat	104
4.5	El nou Sol.....	107
4.5.1	L'interior solar	108
4.5.2	L'atmosfera solar	109
4.6	Mercuri, l'escalfor del Sol	110
4.7	Venus, el planeta germà	111
4.8	La Terra, la nostra nau.....	111
4.8.1	Atmosfera	111
4.8.2	Edat de la Terra.....	114
4.8.3	Estructura interna.....	115

4.9	La Lluna	118
4.9.1	Moviments de la Lluna.....	119
4.9.2	Rotació i libracions de la Lluna	121
4.9.3	Fases lunars	122
4.9.4	Eclipsis	124
4.10	Marees	127
4.11	Mart, el planeta roig	129
4.12	Els asteroides, els petits cossos	131
4.13	Júpiter, el gran	132
4.13.1	L'interior de Júpiter	133
4.13.2	Estructura dels núvols	135
4.14	Saturn, la bellesa del fred	135
4.15	Urà, la llarga nit.....	136
4.16	Neptú, la precisió còsmica	136
4.17	El cinturó de Kuiper	137
4.17.1	Plutó, el fons profund.....	138
4.17.2	Eris, la discòrdia.....	139
4.18	Cometes, visitants de les fronteres	140
4.18.1	El cometa Shoemaker-Levy 9	140
4.18.2	El cometa Halley	141
4.18.3	El núvol d'Oort	142
4.19	Origen de les atmosferes planetàries.....	142
4.20	Altres sistemes planetaris.....	144
4.20.1	Tècniques de detecció	144
4.20.2	Exoplanetes	145
4.20.3	Nans marrons i planetes gegants.....	147
Capítol 5. La radiació i el seu estudi		149
5.1	Natura de la llum.....	149
5.2	Matèria i radiació	152
5.3	Magnituds.....	155
5.4	Línies espectrals.....	157
5.5	Efecte Doppler	159
5.6	Els telescopis.....	161
5.6.1	Telescopis per a ús visual: augments i lluminositat.....	161
5.6.2	Refractors i reflectors	163
5.6.3	Paràmetres fonamentals d'un telescopi	165
5.6.4	Muntures.....	166
5.7	Tècniques d'observació.....	169
5.7.1	Astrometria	169
5.7.2	Fotometria.....	169
5.7.3	Espectroscòpia.....	170
5.8	Instruments i detectors	170
5.8.1	Fotografia.....	170
5.8.2	Fotòmetres fotoelèctrics	171
5.8.3	Dispositius de càrrega acoblada	171
5.8.4	Espectrògrafs	172

Capítol 6. Els estels	175
6.1 Introducció	175
6.2 Paràmetres estel·lars.....	175
6.2.1 Masses.....	175
6.2.2 Lluminositats	176
6.2.3 Temperatura efectiva.....	177
6.2.4 Radis	177
6.3 Classificació espectral	178
6.4 Diagrama de Hertzsprung-Russell	179
6.4.1 Diagrama H-R de cúmuls estel·lars	181
6.5 Relació massa-lluminositat	181
6.6 Estructura estel·lar.....	182
6.6.1 Equació d'estat.....	183
6.6.2 Equilibri hidrostàtic	183
6.6.3 Balanç energètic.....	186
6.6.4 Gradient de temperatura.....	187
6.7 Equacions d'estructura estel·lar	188
6.7.1 Models estel·lars	188
6.8 Fonts d'energia estel·lar	190
6.9 Evolució estel·lar.....	193
6.9.1 Temps característics.....	193
6.9.2 Formació estel·lar	195
6.9.3 Etapa en seqüència principal	197
6.9.4 Evolució cap a gegant roig	197
6.9.5 Últimes etapes evolutives	197
 Capítol 7. Astronomia galàctica	 201
7.1 Introducció	201
7.2 Estructura i característiques generals de la Galàxia.....	201
7.2.1 Disc, bulb i halo.....	201
7.2.2 L'estructura espiral.....	203
7.2.3 El Sol en la Galàxia: massa del sistema.....	203
7.3 La fase difusa de la Galàxia	205
7.3.1 Pols interestel·lar.....	205
7.3.2 Gas interestel·lar	206
7.4 Agrupacions estel·lars	207
7.4.1 Associacions estel·lars	207
7.4.2 Cúmuls estel·lars.....	208
7.5 Indicadors de distància.....	209
7.5.1 Moviment coherent dels estels en agrupacions	209
7.5.2 Seqüència principal i diagrama H-R.....	211
7.5.3 Estels cefeïdes i altres patrons de lluminositat	212
7.6 Coordenades galàctiques.....	215

Capítol 8. Astronomia extragalàctica	217
8.1 El descobriment d'altres galàxies	217
8.2 Classificació de les galàxies.....	218
8.2.1 Galàxies el·líptiques.....	218
8.2.2 Galàxies espirals	219
8.2.3 Galàxies irregulars	220
8.3 La distribució de la matèria a les galàxies	221
8.3.1 Poblacions estel·lars.....	221
8.3.2 La matèria fosca a les galàxies espirals	221
8.4 Galàxies actives	223
8.4.1 Quàsars	224
8.4.2 Galàxies Seyfert.....	225
8.4.3 Radiogalàxies.....	226
8.4.4 Forats negres supermassius.....	226
Capítol 9. Cosmologia	229
9.1 Introducció històrica	229
9.2 Estructura còsmica	230
9.3 L'expansió de l'univers	232
9.3.1 La llei de Hubble	232
9.3.2 Model d'expansió	235
9.3.3 L'edat de l'univers	236
9.3.4 La densitat crítica.....	237
9.3.5 Equacions cosmològiques.....	241
9.4 La radiació de fons.....	243
9.5 Densitat de matèria i densitat de radiació	247
9.6 L'univers primitiu	248
9.6.1 L'era dels hadrons i l'era dels leptons.....	249
9.6.2 L'abundància dels materials lleugers	250
9.7 La paradoxa d'Olbers.....	251
TAULES.....	255
IL·LUSTRACIONS	265
BIBLIOGRAFIA.....	289
ÍNDEX ANALÍTIC	293

PRESENTACIÓ

L'astronomia, una ciència d'origen antic i practicada per diverses civilitzacions, forma part del patrimoni cultural de moltes societats, i en molts països s'ofereixen cursos d'astronomia, tant a les escoles com a les universitats, com a part de la formació d'estudiants de ciència o enginyeria.

En l'inici d'aquest tercer mil·lenni ens enfrontem a una interessant paradoxa social. En un món que cada vegada depèn més del coneixement científic i del seu producte, la tecnologia, observem un creixement vigorós d'una varietat aclaparadora d'idees pseudocientífiques. La comprensió de les ciències per part d'un gran sector del públic és insuficient. L'astronomia brinda un refugi especial dins d'aquest panorama contradictori.

Una de les diferències que distingeixen l'astronomia d'altres ciències rau en l'interès que desperta en amplis sectors de la població i en diversos contextos, tal com ho fa palès l'elevat nombre d'associacions d'aficionats i revistes de divulgació. Això és degut, en part, al fet que l'astronomia es dedica a un objecte d'estudi tangible: per a fer astronomia podem presenciar l'espectacle d'un eclipsi solar, meravellar-nos amb una pluja de meteors o contemplar els anells de Saturn amb uns binoculars. Els instruments necessaris són fàcils d'usar i poc costosos.

En l'àmbit professional, un nombre creixent d'instruments instal·lats en terra i en l'espai prossegueix l'estudi del cosmos que va començar amb Galileo Galilei, la primera persona que va apuntar un petit telescopi al cel i va descobrir meravelles, «en portar la nostra vista –segons diria Descartes– molt més lluny del que estava acostumada a arribar la imaginació dels nostres avantpassats» (Diòptrica I). Instruments cada vegada més eficaços revelen sense parar noves facetes de l'univers que habitem, i una xarxa internacional d'investigadors produeix un cabal constant d'informació, els resultats del qual passen a formar part del patrimoni de la humanitat.

L'astronomia proporciona un canal ideal per a la divulgació de la ciència, i no opine d'aquesta manera perquè aquesta siga la meua professió. Quan es discuteixen assumptes de gran interès astronòmic (sovint relacionats amb algun esdeveniment còsmic contemporani), solen sorgir de manera natural els elements que il·lustren els processos científics; és a dir, resulta senzill aprofitar el tema per a analitzar com es desenvolupa la ciència, raonant sobre els coneixements i sobre les proves que van portar-hi. L'astronomia representa també un vehicle ideal per a fer front a algunes de les creences pseudocientífiques més esteses, com l'astrologia i la ufologia. A més, com que inclou aportacions de totes les ciències (física, química i, cada vegada més, biologia), una introducció a l'astronomia serveix com a instrument per a interessar l'alumnat en aquestes altres àrees.

Cada any es publica un gran nombre de textos d'astronomia adaptats a tots els nivells. Molts d'aquests manuals són descriptius, estan replets de fotografies vistoses i pretenen incloure tots els aspectes d'aquesta ciència, de manera que esdevenen cada vegada més voluminosos. Aquesta tendència pot tornar-se contraproductiu, perquè entre la massa d'informació es perden les qüestions més bàsiques, les més fonamentals.

Aquest text es distingeix perquè aspira a establir una base astrofísica, la qual, com indica el títol, cerca de transmetre el més important, allò que cal per a comprendre la resta: un gran mèrit davant la tendència natural a voler abastar-ho tot. Els conceptes bàsics s'exposen amb claredat i ofereixen al lector el que és necessari per a aprofundir en cursos més avançats. Aquesta qualitat confereix a l'obra una gran utilitat en els cursos universitaris, atès que el seu contingut es pot cobrir fàcilment en un curs acadèmic.

A diferència de la majoria dels textos de caràcter introductori, aquest exposa les equacions més importants relacionades amb els diversos temes presentats, sense que això el convertesca en inaccessible per a estudiants amb un bagatge matemàtic més limitat. El text es complementa amb una sèrie de diagrames explicatius escollits amb destresa per a facilitar la comprensió del que s'exposa. Gràcies al seu caràcter fonamental, l'obra tindrà validesa per molts anys.

DANIEL R. ALTSCHULER

Catedràtic de Física de la Universitat de Puerto Rico

Exdirector de l'Observatori d'Arecibo

PRÒLEG A LA PRIMERA EDICIÓ

L'astronomia és, sens dubte, la ciència més antiga. La fascinació que ha sentit l'home des de sempre pel món dels astres, per l'ordre manifest que regna al cel, l'ha dut a creure que és en aquest món superior on habiten els déus, on cal buscar la raó de totes les coses. Aquest convenciment ha fet que estudiés els astres i el seu moviment amb gran interès i dedicació i que, a poc a poc, anés creant les eines adequades per aconseguir-ho plenament, és a dir, que anés desenvolupant les matemàtiques i la física. L'èxit d'aquesta empresa ha estat aclaparador. L'home ha anat desvetllant, l'un rere l'altre, tots els secrets del món celestial i, de resultes, del món que ens envolta a la Terra. I això ho ha fet amb tanta eficàcia i rapidesa que, com Ícar, ha acabat per perdre el respecte als déus. S'ha anat tornant cada cop més racional i pragmàtic. Ha comprès, en suma, que ell mateix era com un déu, que podia copsar el misteri de la natura, des de l'essència dels estels fins al motiu últim de la nostra existència.

No és per casualitat que l'astronomia té una gran tradició als països més desenvolupats. No solament va ser molt útil a l'hora de descobrir nous territoris i desenvolupar el comerç marítim, sinó que ha estat, de fet, el motor del seu desenvolupament científic i tecnològic. A casa nostra, l'astronomia va ser també conreada amb força durant l'edat mitjana, quan la Corona d'Aragó era una potència a la Mediterrània. Malauradament, aquest interès per l'astronomia es va perdre amb el descobriment d'Amèrica en creure's, erròniament, que la riquesa que arribava d'aquell continent no s'acabaria mai, que no calia esforçar-se més a conrear la ciència que havia fet possible aquell estat de coses. D'aquesta manera es va acabar amb la gallina dels ous d'or, mai millor dit.

Des de l'arribada de la democràcia a Espanya, ens trobem en un clar procés de recuperació del temps perdut durant els darrers segles pel que fa al desenvolupament de la cultura en general i de la ciència en particular. Com si la societat espanyola fos conscient del deute històric que té envers l'astronomia, aquesta ha estat, sens dubte, la disciplina

científica que ha rebut més suport institucional i que ha experimentat un desenvolupament més espectacular els darrers anys. Això també s'ha notat, òbviament, a les nostres contrades de parla catalana, on l'astronomia i l'astrofísica ja gaudien d'unes bones condicions de partida. Efectivament, els departaments d'astronomia i astrofísica de les universitats de València i de Barcelona són encara els més grans dins el territori espanyol, seguits de prop pels de la Complutense i de La Laguna. No obstant això, hom troba a faltar llibres de text d'astronomia escrits en català que permetin, sobretot als alumnes de primers cursos, seguir còmodament l'ensenyament d'aquesta matèria. Aquesta mancança s'ha fet sentir molt especialment des de l'entrada en vigor del nou pla d'estudis que, amb la reducció de la durada de les carreres de cinc a quatre anys, ha representat un canvi profund en l'estructura dels 15 diferents ensenyaments. En el pla antic, l'astronomia s'impartia tradicionalment com una especialitat de segon cicle, la qual cosa permetia aprofundir-hi amb força detall. La bibliografia recomanada era relativament especialitzada i constava, llevat d'honroses excepcions, de llibres d'autors estrangers escrits en llengua anglesa. Amb la implementació del nou pla d'estudis s'ha produït una retallada important en totes les matèries d'especialitat, la qual cosa ha afectat molt especialment l'astronomia i l'astrofísica. Per tal que això afectés com menys millor la formació dels futurs professionals, totes les universitats d'arreu de l'estat espanyol on s'impartia l'astronomia, fent ús de la seva autonomia a l'hora d'establir els programes concrets de les carreres, han coincidit a oferir una assignatura optativa de primer cicle en la qual s'expliquen els elements bàsics de l'astronomia i l'astrofísica, i a concentrar, en unes poques assignatures optatives de segon cicle, els continguts més elaborats que necessiten més coneixements previs de física o de matemàtiques.

Aquest llibre ve a omplir aquest buit. És un llibre fet a la mesura de les necessitats adés esmentades, tant pel que fa a la manca d'un manual específicament adaptat a la nova assignatura d'Introducció a l'Astronomia que ofereixen moltes universitats espanyoles, com pel que fa a la manca de llibres de text d'astronomia en català, la qual cosa és més preocupant en el cas d'una assignatura de primer cicle com aquesta. Cal dir que el llibre cobreix, de manera gairebé perfecta, els objectius. Els temes que no es tornaran a veure en tota la carrera es tracten acuradament i amb el detall necessari. Aquest és el cas, per exemple, del desenvolupament històric de l'astronomia, aspecte al qual s'hi dedica una gran atenció, com bé s'ho mereix. També és el cas de l'astronomia de posició i del sistema

solar, temes que en altres circumstàncies es podrien veure perfectament en assignatures especialitzades de segon cicle, però que, en l'estat actual de les coses, no hi ha altre remei que tractar-los en aquesta assignatura introductòria. D'altra banda, es fa una introducció simple i alhora molt constructiva –per exemple, en el tractament newtonià de la cosmologia– de tots els grans temes d'astrofísica que es veuran amb més detall en el segon cicle, és a dir, els processos radiatius, l'astrofísica estel·lar, l'astronomia galàctica, l'astrofísica extragalàctica i la cosmologia.

Però no voldria acabar aquest pròleg sense fer esment de l'aspecte que més m'ha impressionat del llibre. Em refereixo a la claredat amb què s'hi exposen els conceptes, a l'aparent facilitat de tot el que s'hi explica, i la gran lleugeresa i, fins i tot, amenitat en el discurs emprat. Aquestes característiques són, sens dubte, essencials a l'hora d'aconseguir l'efecte que es vol en tot llibre de text: incitar l'estudiant a aprofundir encara més en l'estudi de la matèria. En aquest mateix sentit voldria destacar l'esforç fet pels autors en el suport gràfic. Sovint es té la idea equivocada que les il·lustracions són accessòries en els llibres de text, que la finalitat principal d'aquestes és permetre al lector de fer una aturada, de descansar i distreure's una mica abans de continuar la lectura amb renovades forces. Doncs bé, com ja deien els xinesos i com és palès, d'una manera –gosaria a dir– exemplar, en aquest llibre, les imatges també poden substituir llargues explicacions. Probablement, el text esdevé tan lleuger i amè, gràcies a l'aprofitament que els autors han fet d'aquestes imatges, bé elaborades, o bé recollides amb tanta cura i encert.

En definitiva, estic convençut que, si no ho impedeix cap nova reforma espectacular en els plans d'estudis universitaris, aquest llibre tindrà una llarga vida i que seran nombroses les generacions d'alumnes que el gaudiran com ho he pogut fer jo. Així, doncs, desitjo el millor que es pot desitjar a un llibre d'introducció a l'astronomia: que desperti moltes noves vocacions envers aquesta ciència tan antiga i, alhora, sempre de gran actualitat com és l'astronomia i l'astrofísica.

EDUARD SALVADOR

*Catedràtic d'Astronomia i Astrofísica
de la Universitat de Barcelona*

PREFACI

Aquest curs d'introducció a l'astronomia i l'astrofísica està dirigit a estudiants del primer cicle de titulacions de ciències bàsiques (matemàtiques, física, química, geologia) i tècniques (enginyeries, geodèsia, topografia). També pot considerar-se adequat per a estudiants de periodisme científic o d'assignatures de lliure elecció d'introducció a l'astronomia, que ja figuren en molts plans d'estudi. No oblidem, a més, que l'astronomia és una ciència extraordinàriament popular i que moltes persones s'hi acosten pel plaer de descobrir què hi ha al darrere de les meravelles que ens ofereix el cel estelat. Esperem que aquest llibre contribueixca a fer que aquests possibles lectors puguin aprofundir en el coneixement del cosmos. La primera edició en català va sortir d'impremta al març de 2001. La primera edició en castellà, revisada i actualitzada, va aparèixer al març de 2005, i incorporava noves seccions que tractaven de complementar l'obra com a text de referència bàsic en astronomia. Aquesta segona edició en català incorpora totes aquestes novetats.

L'astronomia és, sens dubte, la ciència observacional més antiga. Resulta fascinant entendre com els coneixements sobre el cosmos han evolucionat al llarg de la història del pensament. Per això, en el capítol 1, després de donar les definicions modernes de la disciplina i explicar les branques en què es divideix, en presentem una breu introducció històrica que comprèn des de les observacions neolítiques fins als nostres dies.

En el capítol 2 estudiem amb detall les eines matemàtiques bàsiques per entendre l'esfera celeste i els seus moviments. Aquests moviments aparents són conseqüència dels moviments de la Terra.

En el capítol 3 estudiem els moviments dels astres, fonamentalment al Sistema Solar, mitjançant les equacions de Newton i les lleis de Kepler. La resta del llibre segueix el tradicional procés que va dels objectes astronòmics més propers fins als més llunyans.

La descripció del Sistema Solar i el seu origen és l'objectiu del capítol 4. El Sol, els planetes, els satèl·lits i els cometes hi són descrits amb detall.

El coneixement de les propietats de la llum és fonamental en astronomia. Molt del que coneixem dels astres, ho sabem gràcies a l'estudi de la radiació que ens n'arriba, en molts casos emesa fa molt de temps. El capítol 5 és dedicat a l'estudi de la llum en el context astronòmic. Tanmateix, s'hi introdueixen conceptes bàsics sobre telescopis i tècniques observacionals, aspecte aquest últim que no es va tractar en la primera edició.

El capítol 6 es dedica als estels. Es fa una descripció dels paràmetres que els caracteritzen i se n'estudia l'estructura i l'evolució. L'astronomia contemporània incorpora l'astrofísica com a branca d'enorme importància, amb la qual, fent ús dels mètodes de la física moderna, podem explicar fenòmens observats al cosmos i conèixer-ne l'evolució.

En el capítol 7 estudiem la nostra Galàxia, la seua estructura i composició, posant un èmfasi especial en el medi interestel·lar i les agrupacions d'estels.

Aquest darrer apartat s'ha ampliat considerablement respecte de la primera edició. Expliquem també com es mesuren les distàncies en astronomia.

El capítol 8 es dedica a l'estudi de les altres galàxies que poblen l'univers. Presentem diversos aspectes que actualment són objecte d'intensa recerca, com ara la presència i la composició de la matèria fosca, les galàxies actives i els forats negres supermassius.

Finalment, el capítol 9 és dedicat a la cosmologia, la ciència que estudia l'origen i l'evolució de l'univers en la seua globalitat. A la descripció del teixit còsmic a gran escala, hi segueix una explicació dels aspectes bàsics de la teoria de la Gran Explosió. S'hi incorporen novetats destacades fruit dels resultats més recents de la cosmologia, com ara l'expansió accelerada de l'univers.

Volem agrair als nostres estudiants d'Astronomia i Astrofísica els seus comentaris i preguntes, que han influït notablement en la redacció definitiva del manuscrit. Les figures amb els diferents tipus de muntures de telescopis han estat realitzades per Fernando J. Ballesteros, al qual manifestem el nostre agraïment. Els nostres companys del Departament d'Astronomia i Astrofísica i de l'Observatori Astronòmic de la Universitat de València i els col·legues del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona hi han col·laborat amb suggeriments i comentaris. Volem agrair els textos de presentació redactats pels professors Daniel R. Altschuler i Eduard Salvador. Els seus encertats comentaris situen el llibre en el context històric actual i avalen la seua necessitat. Un llibre com aquest mai no hauria vist la llum sense la paciència i la inestimable col·laboració de Publicacions de la Universitat de València. Els suggeriments del director de la col·lecció, Guillermo Quintás, han incrementat la coherència de l'obra. Agraïrem als lectors que troben errors o ens vulguen fer arribar les seues idees sobre el text que ens escriuen o ens envien per correu electrònic les seues opinions. Per a acabar, volem agrair al Servei de Normalització Lingüística de la Universitat de València la iniciativa de l'edició de manuals en català. En particular, volem agrair la paciència i el treball ben fet de Ferran Fabregat i d'Ofèlia Sanmartín en la correcció lingüística. Aquesta versió ha estat actualitzada fins a les darreries de 2006, tot incloent-hi la nova definició de planeta aprovada al mes d'agost d'aquest any. Els lectors interessats poden trobar exercicis, qüestions i problemes relacionats amb els continguts d'aquest llibre en la pàgina web <http://www.uv.es/marco/af.html>.

València, 23 de setembre de 2007, equinocci de tardor

VICENT J. MARTÍNEZ

Observatori Astronòmic de la Universitat de València

JOAN ANTONI MIRALLES

Departament de Física Aplicada, Universitat d'Alacant

ENRIC MARCO

Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València

DAVID GALADÍ-ENRÍQUEZ

Centro Astronómico Hispano Alemán

1. Astronomia: objectius i història

1.1 Què és l'astronomia?

L'astronomia és la ciència que tracta de l'origen, l'evolució, la composició, la distància i el moviment de tots els cossos celestes i de la matèria dispersa en l'univers. Inclou l'astrofísica, que discuteix les propietats físiques i l'estructura de la matèria còsmica.¹

Les branques de l'astronomia es poden establir en funció dels objectius científics pels quals s'interessa o en funció dels mètodes que utilitza.

Classificació

- *Astronomia esfèrica o posicional*: estudia els sistemes de coordenades en l'esfera celeste, els seus canvis i les posicions dels astres al cel.
- *Mecànica celeste*: estudia els moviments dels cossos celestes en el Sistema Solar, en sistemes estel·lars i els moviments de les galàxies.
- *Astrofísica*: utilitza mètodes de la física moderna per analitzar l'estructura, la composició i l'evolució dels astres.
- *Cosmologia*: estudia l'univers en conjunt, és a dir, l'estructura, l'origen i l'evolució.

L'astronomia, com les altres ciències, és una disciplina on s'aplica la metodologia científica. Aquest mètode té tres fases:

1. *Observació*: els objectes celestes emeten radiació que és captada mitjançant telescopis o altres detectors. La llum és l'agent principal pel qual rebem la informació dels astres del cel.
2. *Anàlisi de les dades*: mitjançant l'estudi de la informació anterior, cal identificar els processos físics que són responsables de l'emissió de la radiació.

¹Traducció de la definició que apareix en l'*Enciclopaedia Britannica* (edició de 1989).

3. *Elaboració de models teòrics*: per a explicar les observacions cal formular models teòrics. Al mateix temps, aquests models plantegen, per a la seua verificació, la necessitat d'altres observacions.

1.2 Introducció històrica

L'astronomia, al costat de l'aritmètica, és la més antiga de totes les ciències. A la fi del paleolític, fa aproximadament 20 000 anys, ja es feien gravats en pedra d'algunes constel·lacions: l'Óssa Major, l'Óssa Menor o les Plèiades. El neolític és l'època en la qual s'erigiren els menhirs i les avingudes dolmèniques. Són casos singulars els d'*Stonehenge* i les *taules menorquines*. Les grans civilitzacions antigues, tant eurasiàtiques com precolombines posseïen importants coneixements astronòmics que feien servir fonamentalment per a l'establiment del calendari. L'astronomia grega resulta especialment important, ja que es pot dir que l'astronomia naix com a ciència en l'antiga Grècia. Aquest període, que va des de Tales de Milet fins a Ptolemeu, el presentarem amb cert detall. Després de la mort de Ptolemeu, al segle II, podem dir que res no sobreix gaire durant molts segles, llevat possiblement de l'astronomia àrab. És realment al segle XVI quan es produeix un canvi revolucionari en les concepcions astronòmiques amb Copèrnic. Estudiarem en aquest capítol les seues aportacions, juntament amb les de Tycho Brahe, Kepler, Galileo i Newton. Durant els segles XVIII i XIX, l'ús sistemàtic del telescopi des dels observatoris que es van establir arreu del món fa possible el desenvolupament de grans programes observacionals, que culminen al segle XX amb el naixement de l'astrofísica.

1.3 L'astronomia antiga

L'observació del cel en les cultures antigues està associada a fins religiosos o ideològics o bé a aplicacions pràctiques, com ara la determinació de les estacions per establir els cicles de les activitats agrícoles, l'orientació en la navegació, etc.

1.3.1 *Els observatoris neolítics i de l'edat del bronze*

És molt probable que els monuments megalítics que es troben a Europa estigueren relacionats amb observacions astronòmiques. Com a exemples rellevants parlarem d'*Stonehenge* i de les *taules menorquines*.

Stonehenge

El monument megalític d'*Stonehenge* es troba al sud d'Anglaterra i va ser construït al voltant de l'any 2000 abans de Crist (a.C.). Durant els segles posteriors, s'hi van afegir altres construccions.

És format per una sèrie de forats, pedres i arcs distribuïts en cercles. L'anell de forats exterior té 56 posicions marcades i els dos interiors, 30 i 29 respectivament. Els cercles interiors estan relacionats amb el mes solar i el mes lunar. És possible que utilitzaren el sistema de cercles per predir els eclipsis. Hi ha pedres que marquen direccions d'interès astronòmic, com la *Heel Stone* (pedra del taló) al nord-est. Es tracta d'una pedra en forma de falca sobre la qual ix el Sol el dia del solstici d'estiu. Les observacions es feien mitjançant alineaments de dues pedres tot esperant l'aparició de l'astre al punt de l'horitzó que es troba en la línia que les uneix. Les posicions extremes del Sol a l'horitzó en els solsticis d'estiu i d'hivern estan particularment marcades. En la figura 1.1 podem observar el conjunt d'Stonehenge.



Figura 1.1: Stonehenge. Cortesia de Clive Ruggles, Universitat de Leicester. De <http://www.le.ac.uk/archaeology/rug/>.

Les taules menorquines

A l'illa de Menorca es troben construccions megalítiques molt característiques anomenades *taules*. S'emmarquen dins la cultura talaiòtica mediterrània. Aquestes taules, construïdes al voltant de l'any 1000 a.C., les formen dues pedres planes: una en posició vertical, la pedra de suport, d'uns dos o tres metres d'alçada, i un altre bloc pla situat al damunt seu, la pedra capitell, en posició horitzontal. Gairebé en tots els casos, la part frontal de la pedra de suport és orientada cap al sud i permet l'observació de l'horitzó, generalment sobre el mar. Aquesta orientació, segons investigacions recents, estaria relacionada amb el fet que en aquell temps, la part del cel observable des de Menorca sobre l'horitzó sud era plena d'estels brillants. En particular, s'hi observava la Creu del Sud i els estels α i β de Centaure. Aquesta configuració d'estels no és visible avui des

d'aquest indret com a conseqüència de la precessió dels equinoccis, de la qual parlarem en el capítol 2. En la làmina I podem observar un exemple d'aquestes taules.

1.3.2 *L'astronomia en les grans civilitzacions antigues*

No hi ha cap dubte que el coneixement astronòmic de moltes de les civilitzacions antigues era molt important. Dissortadament, en molts casos no hi ha registres escrits i no tenim informació de l'abast d'aquests coneixements. Encara que en aquesta introducció històrica ens concentrarem en el desenvolupament de l'astronomia com a ciència fonamentalment a Europa, no podem passar per alt les observacions i els càlculs astronòmics realitzats durant segles en algunes de les més esplendoroses civilitzacions antigues. Sense ser exhaustius, explicarem a grans trets alguns dels coneixements astronòmics que posseïen tres cultures separades geogràficament.

L'astronomia en l'antic Egipte

Un dels aspectes més importants en tota civilització agrícola és el coneixement del calendari. Per als egipcis les inundacions periòdiques del riu Nil condicionaven el cicle de les activitats agrícoles i, ben aviat, relacionaren l'època de l'any en la qual es produïen les inundacions amb observacions d'esdeveniments astronòmics. L'anomenada *elevació helíaca* de Sírius, l'estel més brillant del cel, es produïa poc abans del començament de les beneficioses inundacions. Efectivament, durant una part de l'any, Sírius no és visible com a conseqüència de la seua proximitat angular al Sol. La primera reaparició de l'estel abans de l'eixida del Sol s'anomena *elevació helíaca*. Aquest dia esdevingué l'inici de l'any egipci.

Les construccions de l'antic Egipte presenten orientacions molt precises relacionades amb fets astronòmics. Les grans piràmides de Gizeh es construïren el tercer mil·lenni a.C. alineades amb els punts cardinals amb una extraordinària precisió. A més a més, a la gran piràmide de Keops, els conductes oberts a les parets nord i sud, que comunicaven la cambra del faraó amb l'exterior, estaven orientats respectivament a les culminacions superiors de l'estel Polar de l'època, Thuban (α Dra), i al cinturó d'Orió, relacionades amb la divinitat d'Osiris.

Finalment, cal destacar les nombroses representacions de constel·lacions amb figures d'animals i figures antropomòrfiques que s'han trobat dibuixades als sostres de moltes tombes (Seti I de Tebes, Ramsès IV, etc.).

L'astronomia babilònica

L'estudi sistemàtic del cel realitzat des de l'any 2000 a.C. pels habitants de l'antiga Babilònia arribà al coneixement dels grecs després que Babilònia fóra conquerida l'any 231 a.C. per Alexandre el Gran. Els babilonis escrivien sobre tauletes d'argila. Les que s'han conservat fan palesos els seus elevats

coneixements de matemàtiques i també, en menor mesura, d'astronomia. El sistema de numeració babilònic va donar origen al costum actual de dividir les hores en 60 minuts i els minuts en 60 segons. El sistema de mesura d'angles basat en graus, minuts i segons també és degut als babilonis. Els astrònoms caldeus van establir la divisió de la banda zodiacal en 12 signes, on es trobaven les constel·lacions del zodíac. El nom d'aquestes constel·lacions encara perdura avui. L'astronomia babilònica tenia un fonament astrològic, entès però amb un cert sentit pràctic. Els babilonis creien possible la prevenció de certs desastres mitjançant la interpretació correcta dels astres. Això els portà a codificar tots els esdeveniments astronòmics observables en les tauletes *Emuna* durant alguns segles, de tal manera que a la fi descobriren cicles en el comportament del Sol, la Lluna i els planetes. Fets com l'aparició del cometa Halley l'any 164 a.C. estan ben reflectits en les tauletes babilòniques.

L'astronomia maia

Les civilitzacions precolombines eren posseïdores d'importants coneixements astronòmics. Dissortadament, molts dels vestigis d'aquestes cultures van ser esborrats pels conqueridors. La civilització maia, assentada al sud de l'actual Mèxic i a Guatemala, va desenvolupar un extraordinari sistema de numeració. Aquest sistema, en base 20, tenia una missió fonamental a l'hora d'elaborar els calendaris que regien els actes religiosos i els esdeveniments de la vida civil. El calendari civil dels maies tenia 365 dies, dividits en 18 mesos de 20 dies més 5 dies afegits. Els maies tenien un coneixement molt exacte de la duració de l'any tròpic i del mes sinòdic,² amb un error de 17 segons en el primer cas, i de 24 en el segon.

Els maies estaven obsessionats pel planeta Venus, el qual consideraven una divinitat cruel. Les observacions sistemàtiques d'aquest planeta els portaren a establir que el seu període sinòdic de revolució al voltant del Sol (vist des de la Terra) és de 584 dies, quan el valor acceptat actualment és de 583.92 dies.

1.3.3 L'astronomia grega

L'astronomia naix pròpiament com a ciència amb Tales de Milet (624-548 a.C.), i sobretot amb el seu deixeble Anaximandre (610-545 a.C.). Aquests personatges introduïren la racionalitat i la geometria en els seus intents sistemàtics d'entendre l'univers, és a dir, de construir una cosmologia que s'allunyara a poc a poc de plantejaments purament mitològics. Per a Tales, el constituent bàsic de l'univers és l'aigua i la Terra recolza sobre un oceà d'aigua; Anaximandre, però, parla d'un concepte més abstracte, l'*aperion*,³ que podríem entendre com allò il·limitat o allò indeterminat. A Tales s'atribueix la predicció d'un eclipsi de

²La definició d'aquests intervals temporals es presenta en el capítol 2.

³L'*aperion* és l'estat anterior a la determinació de qualitats particulars, representa la unificació primordial dels fenòmens físics observats i és, sens dubte, una anticipació de la base que rau en les modernes teories d'unificació en física.

Sol, encara que aquest fet pot ser només part de la llegenda que envolta aquests filòsofs.

Per a Pitàgores (580-500 a.C.), el món pot ser entès basant-se en principis racionals i és constituït pels quatre elements: terra, aigua, aire i foc. Per raons d'estètica geomètrica, considera que la Terra és una esfera i coneix que la Lluna brilla per reflexió de la llum del Sol. Plató (428-348 a.C.) proposa un univers geocèntric amb una Terra esfèrica i immòbil. Els cossos celestes són de caràcter diví i es mouen amb moviments circulars i uniformes segons disposa el *demiürg*.⁴ Sembla que Plató estava convençut que els moviments errants dels planetes eren el resultat de combinacions de moviments circulars uniformes, però va ser Èudox de Cnidos (408-355 a.C.) qui va proposar el primer model matemàtic, basat en esferes homocèntriques,⁵ per explicar aquest tipus de moviment. Per a Aristòtil (384-322 a.C.), existeixen dos mons: el *supralunar*, el cel, regit per cercles perfectes amb moviments circulars i uniformes, i el *sublunar*, la Terra, on les coses es mouen amb moviments imperfectes i canvien, on la matèria es transforma. En el model cosmològic o *sistema del món* d'Aristòtil, heretat d'Èudox, la Terra es troba immòbil al centre d'un conjunt d'esferes concèntriques i transparents que giren al seu voltant. Hi ha 8 esferes corresponents a la Lluna, el Sol, els 5 planetes coneguts (Mercuri, Venus, Mart, Júpiter i Saturn) i finalment els estels fixos.

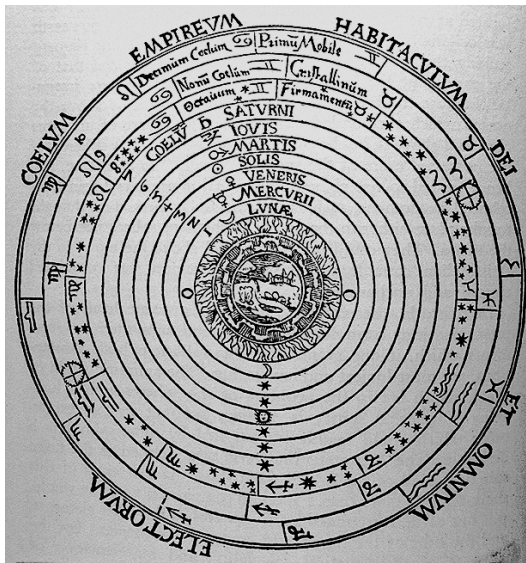


Figura 1.2: El sistema del món d'Aristòtil en un gravat de Peter Apian de la seua obra *Cosmographia* (1524).

⁴El *demiürg* és, per a Plató, la causa intel·ligent de l'ordre i l'harmonia del món.

⁵Sistemes d'esferes unides pels seus eixos de rotació situats en direccions diferents. Les esferes giren amb distintes velocitats.

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

És el primer que situa el Sol al centre de l'univers. La Terra i els planetes giren al seu voltant, excepte la Lluna que gira al voltant de la Terra. Aquest model no prosperarà i caldrà esperar Copèrnic per a l'establiment definitiu del model heliocèntric. Aristarc atribueix a la Terra moviment de rotació i de translació. Fa els primers mesuraments de les distàncies Terra-Lluna i Terra-Sol.

Distància Terra-Sol. En els quarts lunars, el Sol, la Lluna i la Terra es troben als vèrtexs d'un triangle rectangle, com es mostra en la figura 1.3. En aquesta configuració, Aristarc mesurà l'angle α format per les línies que uneixen la Terra i la Lluna, i la Terra i el Sol, i n'obtingué $\alpha = 87^\circ$ (el valor correcte és $\alpha = 89.85267^\circ$). Aleshores, utilitzant la relació que en termes de trigonometria moderna escriuríem com a

$$\cos \alpha = \frac{d_{TL}}{d_{TS}}, \quad (1.1)$$

Aristarc calculà que $d_{TS} = 19d_{TL}$ (quan realment $d_{TS} = 389d_{TL}$). Fet i fet, unint aquest resultat amb l'anterior, Aristarc arribà a l'expressió:

$$d_{TS} = 9.5 \times 19 \times D_T = 180.5D_T. \quad (1.2)$$

Un contemporani seu, Eratòstenes, va mesurar el diàmetre de la Terra, com veurem més endavant.

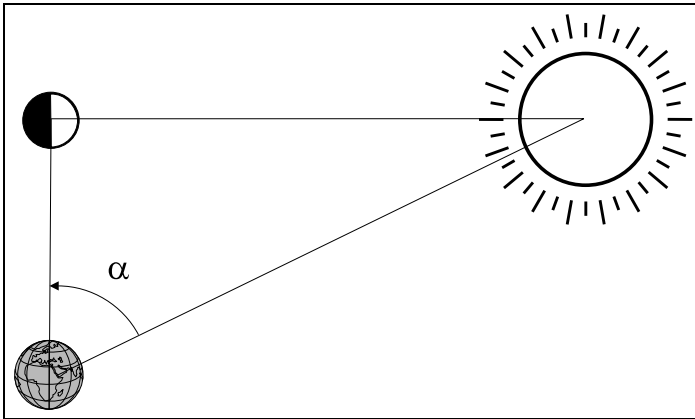


Figura 1.3: L'angle α mesurat per Aristarc en el quart lunar.

Encara que el valor obtingut per Aristarc per a la distància Terra-Sol no és correcte, perquè va infravalorar l'angle α , el mètode, amb el valor correcte de l'angle α i de la distància Terra-Lluna $d_{TL} = 384\,400$ km, dóna òbviament un resultat correcte per a la distància Terra-Sol, $d_{TS} = 389 \times 384\,400 = 149\,531\,000$ km.

Distància Terra-Lluna. Durant un eclipsi de Lluna, Aristarc observà que, a la distància que es troba la Lluna, el con d'ombra que produeix la Terra té una

amplària que és dues vegades el diàmetre de la Lluna. Aquesta observació, junt amb el fet que el disc solar i la Lluna tenen aproximadament la mateixa amplària angular, va permetre a Aristarc d'establir el diagrama de l'eclipsi il·lustrat en la figura 1.4. Amb aquest diagrama, Aristarc determinà que el diàmetre de la Terra, D_T , era tres vegades més gran que el diàmetre de la Lluna, D_L :

$$D_L = \frac{D_T}{3}. \quad (1.3)$$

En realitat, la relació correcta és $D_L = D_T/3.67$. Per a Aristarc, l'amplària angular de la Lluna era de 2° (el valor correcte és 0.52°). Si l'òrbita lunar és circular, la longitud de l'òrbita ha de ser $L_{\text{orb}} = 2\pi d_{\text{TL}}$, on d_{TL} és la distància Terra-Lluna. Per tant, si 2° correspon a $D_T/3$, els 360° de l'òrbita completa correspondran a $60D_T$. Així, doncs,

$$d_{\text{TL}} = \frac{60D_T}{2\pi} \simeq 9.5D_T. \quad (1.4)$$

Utilitzant els valors correctes per al diàmetre de la Lluna i la seua amplària angular, obtenim $d_{\text{TL}} \simeq 30D_T$. Si considerem que el diàmetre de la Terra és $D_T = 12\,756$ km, obtindrem, doncs, per a la distància Terra-Lluna, un valor de $d_{\text{TL}} \simeq 382\,680$ km. Avui sabem que la distància mitjana és de $384\,400$ km. Caldrà esperar Kepler, però, per conèixer que l'òrbita no és circular sinó el·líptica i que, per tant, la distància de la Terra a la Lluna oscil·la entre un màxim ($406\,697$ km) i un mínim ($356\,410$ km). En qualsevol cas, el mètode emprat per Aristarc resulta extraordinàriament intel·ligent per a l'època.

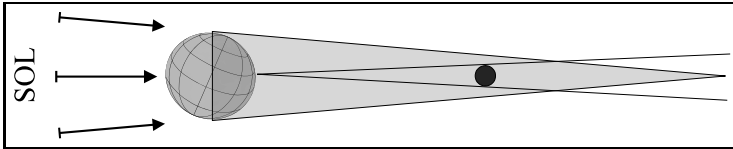


Figura 1.4: Con d'ombra durant un eclipsi de Lluna.

Eratòstenes de Cirene (276-195 a.C.)

Eratòstenes va obtenir les dimensions de la Terra a partir de la mesura del tros de meridià terrestre que va d'Alexandria a Siena (l'actual Aswan). Per fer aquesta mesura utilitzà el gnòmon, un instrument senzill que permet estudiar la longitud de l'ombra d'un pal en posició vertical sobre la superfície de la Terra. Eratòstenes estava encarregat de la biblioteca d'Alexandria i es va assabentar que al solstici d'estiu, a la ciutat de Siena (situada al tròpic de Càncer), el Sol, al migdia, està situat al zenit, és a dir, tot just dalt del cap. En aquesta situació i en aquest instant, un gnòmon col·locat a Siena no farà ombra (vegeu la figura 1.5). En el mateix instant, un gnòmon de longitud l produeix a Alexandria una ombra de longitud s ; per tant, l'angle α que dona la separació angular entre la posició

del Sol i el zenit serà $\alpha = \arctan(s/l)$, com es dedueix de la figura 1.5. Aquest angle és de 7.2° . Com que la distància entre Siena i Alexandria⁶ és de 787.5 km, pel mètode d'Eratòstenes podem calcular que la circumferència completa de la Terra (360°) fa 39 942 km (un mesurament extraordinàriament correcte).

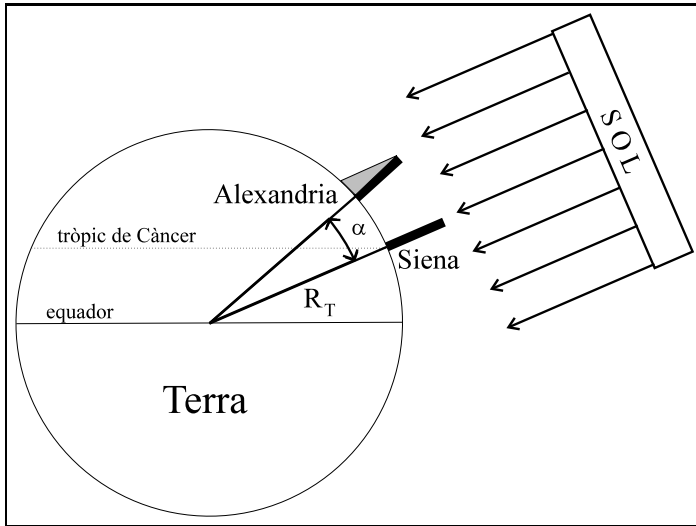


Figura 1.5: El gnòmon a Siena i a Alexandria al solstici d'estiu. L'angle mesurat per Eratòstenes correspon a l'arc de meridià que separa totes dues ciutats.

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

Hiparc de Nicea va ser el gran astrònom observacional de l'era hel·lenística. L'aparició d'una supernova l'any 134 a.C. el portà a recopilar un primer catàleg estel·lar, en què recollia les posicions i les magnituds de 850 estels. La precisió amb què Hiparc calculà les posicions angulars dels estels fixos no serà superada fins a Tycho Brahe, al segle XVI. Hiparc va establir l'escala de magnituds estel·lars que estudiarem en el capítol 5. Els estels més brillants els considera de primera magnitud, els que són aproximadament la meitat de brillants seran de segona magnitud i així successivament fins a la sisena magnitud, que són els estels més febles que podem observar a ull nu. Va descobrir el fenomen conegut com la *precessió dels equinoccis* que fa que les posicions angulars dels estels canvien en llargs períodes de temps. Aquesta alteració, que estudiarem amb detall en el capítol 2, es deu al moviment dels punts de tall entre el pla de l'òrbita terrestre amb el pla de l'equador terrestre. Hiparc va calcular un valor

⁶El mesurament original parla de 5 000 estadis, però desafortunadament no coneixem el valor exacte dels estadis utilitzats per Eratòstenes.

per a la velocitat de precessió de $45''/\text{any}$. El valor correcte hi és molt pròxim: $50.27''/\text{any}$.

Ptolemeu d'Alexandria (85-165 d.C.)

Ptolemeu d'Alexandria va escriure una obra enciclopèdica d'astronomia en 13 volums que va ser introduïda a Europa pels àrabs amb el nom de l'*Almagest*. Hi va ampliar el catàleg d'Hiparc fins a 1 100 estels i introduí una descripció de l'univers que és coneguda com el *sistema ptolemaic*.



Figura 1.6: Ptolemeu d'Alexandria en un gravat del Renaixement.

El sistema aristotèlic ja estudiat no podia explicar els moviments retrògrads dels planetes. La configuració del Sistema Solar fa que la trajectòria observada dels planetes des de la Terra presente moviments retrògrads (en el capítol 4 s'explica amb detall aquest fet). Des de la Terra, observem que en determinats moments el planeta s'atura i canvia el sentit del seu moviment amb relació als estels fixos durant unes quantes setmanes, i després torna a moure's en el sentit inicial, anomenat directe (vegeu la figura 1.7). Per poder explicar aquesta observació, Ptolemeu adoptà *el sistema dels epicicles*, introduït segles abans per Apol·loni de Perge (262-190 a.C.). Aquest sistema és un model purament geomètric en el qual el planeta es mou a velocitat constant sobre la circumferència d'un cercle anomenat *epicycle*. Al mateix temps, el centre de l'epicycle gira al voltant de la Terra amb velocitat constant sobre un cercle major anomenat *deferent*. En la figura 1.8 podem observar el funcionament d'aquest model, que produeix els moviments retrògrads fent ús només de combinacions de moviments circulars i uniformes.