



Nassio Bayarri. *La casa del pare còsmic*, 2009. Acrílic i cartró sobre taula, 195 x 225 cm.

DEL CEL A LA TERRA

L'ASTRONOMIA DELS SEGLES XVII I XVIII I LES SEUES CONSEQÜÈNCIES EPISTEMOLÒGIQUES

Ana Rioja Nieto

From Heaven to Earth. Astronomy in the Seventeenth and Eighteenth Centuries and its Epistemological Outcome.

The growth of astronomy in the seventeenth and eighteenth centuries was the culmination of a mathematization process of planetary motions. In the transition from the eighteenth to the nineteenth centuries, it was to become a model applied to terrestrial phenomena (light, electricity, magnetism, etc.) with vital consequences for all science thereafter.

Actualment és perfectament natural pensar que les disciplines que s'estudien en una Facultat de Físiques precisen de la matemàtica com a eina indispensable. No obstant això, la matematització dels fenòmens físics (moviments celestes, caiguda de greus, llum, calor, electricitat, magnetisme, etc.) ha constituït un procés lent i gradual, que va començar a Grècia, amb la geometrització dels moviments dels astres. Concretament en l'Acadèmia de Plató es va elaborar el primer model planetari de caràcter geomètric, degut a un deixeble d'aquest filòsof, Èudox de Cnidos (s. IV aC). A aquest model va seguir una altra manera de geometritzar el cel que, al segle II dC, va ser sistematitzada i perfeccionada per l'alexandri Claudi Ptolemeu. En tots dos casos, d'acord amb principis platònics molt consolidats, es partia del supòsit segons el qual tots els moviments celestes són *uniformes, circulars i regulars*, i tenen lloc al voltant de la Terra, és a dir, són *geocèntrics*.

Aquest plantejament va ser heretat per l'Edat Mitjana (a partir de la recuperació del saber grec a final del segle XII) i continuava vigent en la primera meitat del segle XVI, època en la qual Nicolau Copèrnic (1473-1543) va introduir una reforma que, en principi, podia semblar menor: les òrbites planetàries circulars tenien com a centre no la Terra, sinó el Sol, de manera que el model era heliocèntric. Però la resta del plantejament heretat (circularitat i uniformitat de les òrbites) es mantenia.

Mig segle després, ja en el segle XVII, Johannes Kepler (1571-1630) es comptava entre els escassos autors que,

junt amb contemporanis seus com ara Galileu Galilei (1564-1642) o René Descartes (1596-1650), acceptava la reforma heliocèntrica de Copèrnic, si bé al principi encara compartia idèntics pressupòsits sobre la mencionada circularitat i uniformitat de les òrbites celestes. Es comprèn així el caràcter radicalment innovador de la formulació de les famoses tres lleis dels moviments planetaris de Kepler, molt en especial la primera (en què se substituïen les òrbites circulars per òrbites elíptiques) i la segona (en què es reemplaçaven les velocitats angulars uniformes per les velocitats areolars uniformes, la qual cosa de fet significava negar la uniformitat dels moviments planetaris). Amb aquestes lleis es tancava un capítol de la història de l'astronomia que s'havia iniciat en l'Acadèmia platònica, alhora que en començava un altre que culminaria en Newton dècades després. Però sempre mantenint-se la idea que el cel podia i havia de ser geometritzat.

«LA MATEMATITZACIÓ DELS FENÒMENS FÍSICS HA CONSTITUÏT UN PROCÉS LENT I GRADUAL, QUE VA COMENÇAR A GRÈCIA, AMB LA GEOMETRITZACIÓ DELS MOVIMENTS DELS ASTRES»

■ DELS MOVIMENTS PLANETARIS A LES CAUSES: LA GRAVITACIÓ UNIVERSAL

L'astronomia geomètrica, des de Plató i Èudox fins a Kepler, va ser de caràcter estrictament cinemàtic, de manera que consistia en una pura descripció del desplaçament espaciotemporal dels cossos celestes sense cap tipus de referència a la causa que el produeix. Això no vol dir pas que el tema no haguera estat plantejat, sinó que l'explicació dominant durant segles no va ser donada pels astrò-



© Mitoos

A dalt, esquema inclòs en el *De Revolutionibus* de Nicolàs Copèrnic, on l'astrònom desenvolupa el seu sistema heliocèntric. A la dreta: Anònim. *Nicolàs Copèrnic*, segona meitat del segle XVI. Oli sobre tela, 40 x 67 cm.

noms i geòmetres sinó pels físics, és a dir, pels estudiosos de la *physis*, hereus de la influent física qualitativa aristotèlica. I d'acord amb la tradició aristotèlica, vigent encara en la primera meitat del segle XVII, el Sol no representava cap paper mecànic, de manera que aquest astre era font de llum i de calor, però no de moviment. La causa del moviment dels planetes no hi tenia res a veure.

Kepler, però, per primera vegada es pregunta el 1619 si no pot ser que els planetes romanguen en repòs a menys que s'hi exercisca una acció motriu, si potser aquesta acció no procedeix del Sol i si no es debilitarà amb la distància, ja que els planetes es desplacen tant més lentament com més allunyats es troben de l'esmentat astre. Amb això Kepler obre un camí a la dinàmica celeste (estudi del moviment a partir de les forces responsables d'aquest), que culminarà en Newton.

Tothom coneix la gran llei de la dinàmica de Newton (1642-1727), la llei de gravitació universal formulada el 1687 segons la qual la força de la gravetat és directament proporcional al producte de les masses i inversament proporcional al quadrat de la seua distància.

Però més enllà de la formulació de la llei, qüestió fonamental és la de la naturalesa de la força: per primera vegada s'afirma que la causa del desplaçament dels planetes en la seua òrbita és la mateixa que la que fa caure als cossos sobre la Terra. Durant segles s'havien pres com a fets totalment independents. No obstant això, amb Newton la sorpresa serà que la gravetat, tradicionalment considerada com a fenomen exclusivament ter-



© Galleria degli Uffizi, Firenze

restre, s'aplica també als fenòmens celestes. En efecte, ara resulta que si en el cel es compleixen les tres lleis de Kepler i si en la Terra regeix la llei de caiguda dels greus (llei del moviment uniformement accelerat) publicada per Galileu el 1638, és degut al fet que sobre tots els cossos, tant celestes com terrestres, actua la força de la gravetat. La gravitació és *universal*.

Ara bé, la mecànica newtoniana havia d'afrontar un problema conceptual no menyspreable. Newton havia definit la gravetat en termes de «força d'atracció que opera a distància». Així, per exemple, el Sol atrau la Terra (i recíprocament) sense que entre el Sol i la Terra hi haja res més que l'espai buit. I la qüestió és com pot un cos actuar allí on no hi és, com és possible predicar l'atracció entre cossos inerts, i com pot propagar-se aquesta suposada atracció sense un mitjà material transmissor.

El mateix Newton no va deixar de considerar que s'enfrontava a un problema greu. El *concepte* de força d'atracció a distància estava molt lluny de ser satisfactori, però en canvi la *llei* ho era per complet, ja que permetia predir amb una exactitud fins llavors desconeguda tot de fenòmens mecànics en el cel, en la Terra i en el mar (marees). Després de molt diverses vicissituds, Newton va acabar resignant-se a no resoldre el problema conceptual, però no sense esgrimir amb passió el mèrit si haguera trobat el més important: la relació matemàtica que regeix la relació entre els moviments, ja siguin celestes



© Sternwarte Kremsmünster

Anònim. *Johannes Kepler*, 1610. Oli sobre llenç, 35,5 x 44,5 cm. El 1619 Kepler es planteja per primera vegada si els planetes es desplacen a causa d'una força comú i si aquesta procedeix del Sol, ja que observa que els planetes es desplacen més lentament quant més allunyats estan de l'astre.

o terrestres, i les causes que els produeixen (la força de gravitació). En la troballa d'aquesta relació residia tot el projecte teòric que va batejar com a *mecànica racional*, en la qual allò formal, la precisió, els aspectes quantitius, la predictivitat i l'eficàcia s'anaven decantant com a valors superiors d'explicació.

■ ASTRONOMIA MECÀNICA I ASTRONOMIA OBSERVACIONAL

El segle XVIII va conèixer un gran desenvolupament, tant de l'astronomia mecànica com de l'astronomia de posició. La primera era considerada com una gran part de la denominada matemàtica mixta, i la seua funció consistia a realitzar els càlculs astronòmics del Sistema Solar. En definitiva es tractava d'abordar qüestions matematico-mecàniques, però amb la important novetat de traduir la mecànica newtoniana, del llenguatge geo-

**«DURANT EL SEGLE XVIII
ELS TEMES AVUI ESTUDIATS
SOTA EL RÈTOL DE FÍSICA
EREN DESCONEGUTS
O S'ABORDAVEN DE MANERA
PURAMENT DESCRIPTIVA»**



© Collecció particular

Giusto Suttermans. *Galileu Galilei*, c. 1640-1650. Oli sobre llenç, 59,4 x 80,5 cm. La introducció del telescopi per a l'observació astronòmica per part de Galileu el 1610 va significar una ampliació de l'univers conegut fins aleshores. En ampliar la grandària dels objectes, Galileu va veure per primera vegada satèl·lits d'altres planetes.

mètric en què havia estat escrita a la seua versió analítica (de les figures geomètriques a les equacions). Els seus actors principals van ser matemàtics francesos, o almenys francòfons, com ara d'Alembert, Euler, Lagrange o Laplace. Com a resultat es va obtenir un coneixement extraordinàriament rigorós i precís del Sistema Solar, gràcies al qual era possible predir el comportament de planetes, satèl·lits i cometes.

Simultàniament, als grans observatoris astronòmics fundats en el segle XVII, com el de París i sobretot el de Greenwich, es realitzava una activitat pacient i fonamental d'observació del cel mitjançant telescopis, fruit de la qual va ser l'elaboració d'excel·lents mapes estel·lars fonamentals, per exemple, per a la navegació. Però a més l'observació telescòpica dels cossos celestes, inaugurada per Galileu el 1609, va introduir importants novetats pel que fa als pobladors del Sistema Solar.

Des de l'antiguitat grega i fins a la mencionada data, el nombre



Sir Godfrey Kneller. *Sir Isaac Newton*, 1702 (detall). Oli sobre llenç, 62,2 x 75,6 cm. A la dreta, portada de la primera edició dels *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* de Newton, on el físic desenvolupa la llei de gravitació.

de planetes havia romàs fix (Mercuri, Venus, Mart, Júpiter i Saturn, als quals, amb la reforma copernicana, es va unir la Terra). Abans d'aquesta reforma la Lluna no era un satèl·lit de la Terra sinó un cos celeste que, com tots els altres (inclòs el Sol, que no era concebut en absolut com un estel), girava al voltant d'una Terra immòbil situada al centre del món. Amb Copèrnic, tot va passar a desplaçar-se entorn del Sol, excepte la Lluna, que ho feia al voltant de la Terra. Per tant, quan a començament del segle XVII Galileu va orientar el seu rudimentari telescopi cap al cel, es tenia coneixement de sis planetes i un sol satèl·lit (de fet, a ull nu no s'aconsegueix veure'n més). No obstant això, gràcies a l'ampliació de la grandària dels

**«EL 1619 KEPLER ES
PREGUNTA PER PRIMERA
VEGADA SI ÉS QUE ELS
PLANETES NO ROMANEN EN
REPÒS A MENYS QUE S'HI
EXERCESCA UNA ACCIÓ
MOTRIU»**

objectes, Galileu va poder albirar per primera vegada satèl·lits d'altres planetes, en concret quatre de Júpiter.

A partir de llavors la llista no va fer sinó augmentar. El 1675 Christiaan Huygens (1629-1695) va observar el primer satèl·lit de Saturn, al qual van seguir-ne quatre més gràcies a Giovanni D. Cassini (1625-1712) entre 1671 i 1684. Un segle més tard William Herschel (1738-1822), proveït amb grans i potents telescopis molt diferents del galileà, donava a conèixer dos satèl·lits més d'aquest planeta. Però el més extraordinari és que va

afegir un nou planeta a una llista inamovible durant segles. Es tracta d'Urà, localitzat per Herschel el 13 de març de 1781 (i al principi confós amb un cometa). El 1787 va descobrir així mateix dos satèl·lits d'aquest planeta.

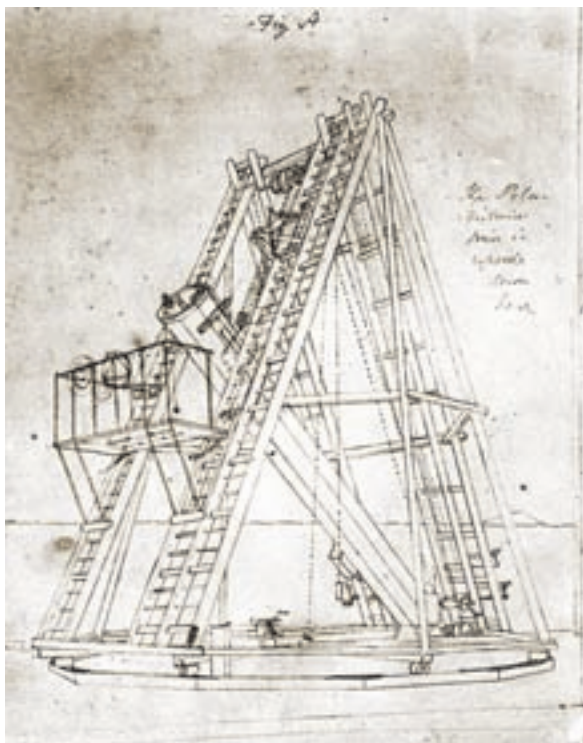
En conjunt pot afirmar-se que la combinació de càlcul i observació va fer de l'astronomia la disciplina més prestigiosa de finals del segle XVIII. No és gens estrany que es tractara d'aconseguir en la Terra un èxit semblant a l'obtingut en l'estudi del cel.

■ EL PROGRAMA LAPLACIÀ O LA VISIÓ ASTRONÒMICA DE LA NATURESA

El gran matemàtic i astrònom Pierre Simon Laplace (1749-1827) és qui de manera més explícita va apostar pel que podríem denominar una «visió astronòmica de la naturalesa», és a dir, per l'aplicació del mètode de l'astronomia en la cerca de qualsevol llei de la naturalesa. En la transició del segle XVIII al XIX, com que

la mecànica celeste era la ciència matematitzada de la naturalesa per excel·lència, del que es tractava era de bastir un pont metodològic entre els fenòmens celestes i els terrestres, intentant una decidida matematització dels fenòmens relatius a la llum, la calor, l'electricitat, el magnetisme o el comportament dels fluids.

En aquest programa sistemàtic d'investigació encapçalat per Laplace van col·laborar homes de ciència de la talla de Poisson, Gay-Lussac, Ampère, Fourier, Coulomb o Lagrange. Ens trobem en les dècades anteriors a la constitució de la física entesa com a conjunt de disciplines (termodinàmica, electromagnetisme, teoria de gasos en el marc de la mecànica estadística, etc.). De fet, durant el segle XVIII, mentre que la mecànica



© MÈTODE

William Herschel va utilitzar grans i potents telescopis, com el de la imatge, ja molt diferents al de Galileu, que li van permetre aprofundir en l'estudi del sistema solar.

es desenvolupava a l'empena de la matemàtica aplicada, els temes avui estudiats sota el rètol de física eren desconeguts o s'abordaven de manera purament descriptiva (per descomptat aquest era el cas de la calor, l'electricitat o el magnetisme).

En canvi, segons l'opinió de Laplace, respecte als cossos del Sistema Solar havia estat possible un plantejament *sistemàtic*, en el qual, partint d'observacions precises acumulades durant segles, en primer lloc es van formular lleis generals dels moviments planetaris i en segon lloc es va accedir al suprem i universal principi de gravitació, fins finalment descendir des d'aquest principi a l'explicació de tots els fenòmens celestes (sempre dins dels límits del Sistema Solar). En definitiva, el que havia permès la consideració del món celeste com a *sistema* era la llei de gravitació universal, i en general la mecànica racional newtoniana que havia establert matemàticament les relacions entre moviments i forces. En això consistia el seu enorme potencial, a pesar dels problemes conceptuals anteriorment mencionats.

Així, després del procés de matematització dels fenòmens celestes, ara li tocava el torn als terrestres, en un ambiciós projecte les conseqüències del qual s'es-



© Smithsonian Institution Libraries

El matemàtic i astrònom Pierre Laplace va apostar per utilitzar el mètode de l'astronomia en la recerca de qualsevol llei de la natura. Es podria dir que Laplace va inaugurar una «visió astronòmica de la natura».

tenen a tota la física posterior. La precisió, el rigor, la capacitat de predicció, l'eficàcia que proporcionava l'ús d'un llenguatge formal matemàtic es van convertir en valors superiors d'explicació. Una axiologia que es farà present en el debat entre filòsofs i científics durant el romanticisme i en l'actualitat. En qualsevol cas, bé pot afirmar-se que des del cel es va iniciar una millor comprensió de la Terra. I serà precisament des de la Terra quan en el segle XIX s'iniciï una renovada conquesta del cel, ja no sols planetari, sinó estel·lar. ☺

BIBLIOGRAFIA

- LAPLACE, P. S., 2006. *Exposición del Sistema del mundo*. J. Ordóñez i A. Rioja (eds.). Crítica. Barcelona.
- NEWTON, I., 1987. *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*. 2 vols. E. Rada (ed.). Alianza Editorial. Madrid.
- NORTH, J. D., 2005. *Historia Fontana de la astronomía y de la cosmología*. F.C.E. Mèxic.
- RIOJA, A. i J. ORDÓÑEZ, 1999. *Teorías del Universo. Vol. I: De los pitagóricos a Galileo*. Síntesis. Madrid.
- RIOJA, A. i J. ORDÓÑEZ, 1999. *Teorías del Universo. Vol. II: De Galileo a Newton*. Síntesis. Madrid.
- RIOJA, A. i ORDÓÑEZ, J., 2006. *Teorías del Universo. Vol. III: De Newton a Hubble*. Síntesis. Madrid.

Ana Rioja Nieto. Professora titular del Departament de Filosofia I. Universidad Complutense de Madrid.