

**DISSERTACIÓ
PRELIMINAR SOBRE
EL FUNCIONAMENT
DELS CELS**



**RESSONS DE
CIÈNCIA, 5**

**UNA DISSERTACIÓ
PRELIMINAR
SOBRE EL
FUNCIONAMENT DELS
CELS**

Mary Somerville

Traducció i notes de Marc Figueras

Títol original: *A Preliminary Dissertation on the Mechanisms of the Heavens* (1831)

1a edició: abril de 2026

Aquesta traducció © 2026 per Marc Figueras està llicenciada sota Creative Commons Reconeixement-CompartirIgual 4.0 Internacional.



ISBN 9798255979325

Impressió: Amazon

Imatge de la coberta: *Portrait of Mary Somerville*, per James Rannie Swinton, 1844

Imatge de la contracoberta: *Portrait of Mary Fairfax, Mrs. William Somerville*, per Thomas Phillips, 1834

ÍNDEX

Pròleg a aquesta edició.....	i
DISSERTACIÓ PRELIMINAR.....	1
NOTES	119

PRÒLEG A AQUESTA EDICIÓ

El cinquè volum de la col·lecció «Ressons de ciència» presenta el breu text conegut com *Dissertació preliminar* que Mary Somerville va escriure com a introducció a la seva monumental *El funcionament dels cels*, de 1832.

Mary Fairfax Greig Somerville va ser una destacada científica, matemàtica i erudita escocesa, considerada una de les figures més influents de la ciència del segle XIX. Va néixer el 26 de desembre de 1780 a Jedburgh, Escòcia, filla del vicealmirall sir William George Fairfax. Tot i provenir d'una família ben posicionada socialment, la seva educació formal va ser extremadament limitada i poc sistemàtica, ja que en aquella època no es considerava necessari que les dones rebessin formació acadèmica.

La seva passió per les matemàtiques va néixer de manera accidental; als 13 anys, va sentir com el pintor Alexander Nasmyth comentava que la geometria d'Euclides era la base de la perspectiva i de l'astronomia, el que la va portar a estudiar

l'obra d'Euclides i textos d'àlgebra d'amagat dels seus pares. El seu primer matrimoni el 1804 amb Samuel Greig no va ser feliç, ja que ell menyspreava la capacitat intel·lectual de les dones i no tenia interès cap mena d'interès per la ciència. No obstant això, en quedar vídua el 1807, Mary va utilitzar la seva independència financera per reprendre els seus estudis en solitari de matemàtiques, astronomia i física.

El 1812, es va casar amb el seu cosí, el doctor William Somerville, qui, a diferència del primer marit, va ser un suport constant en les seves ambicions intel·lectuals i la va encoratjar a participar en els cercles científics més elitistes de Londres i Europa. Per mitjà de William, Mary va tenir accés a biblioteques i a grans científics com Charles Babbage i John Herschel, fill del descobridor d'Urà. El 1826, va publicar el seu primer article a les *Proceedings of the Royal Society* i, d'aquesta manera, es convertí en la primera dona a publicar-hi un treball científic propi.

La seva fama internacional es va consolidar amb la traducció a l'anglès de la monumental *Mécanique Céleste* de Laplace, publicada el 1831 i titulada *The Mechanisms of the Heavens*. Somerville no es limità a fer-ne una traducció, sinó que amplià el text de Laplace i explicà les derivacions matemàtiques amb força més detall que l'original. La seva altura científica queda

demostrada pel fet que fou un dels llibres de text obligatoris a Cambridge durant mig segle.

Poc després, va publicar el que podríem anomenar un autèntic supervendes, *On the Connexion of the Physical Sciences* (1834), una obra que avui es considera un dels primers llibres de divulgació científica i on descriu de manera entenedora i dirigida a un lector sense grans coneixements matemàtics l'astronomia, la física, la química, la geografia, la meteorologia i l'electromagnetisme tal com s'entenien en aquell moment. Va ser per a una ressenya d'aquest llibre que William Whewell va encunyar per primera vegada la paraula *scientist*, 'científic', en llengua anglesa, ja que no trobava cap altre terme que abastés totes les capacitats demostrades per Somerville en aquesta obra.

A més de la seva tasca científica, Somerville va ser una ferma defensora del sufragi femení i de l'educació de les dones; de fet, la seva signatura va ser la primera a la petició de John Stuart Mill al Parlament britànic el 1868. Va morir a Nàpols el 1872, als 91 anys. El Somerville College d'Oxford duu actualment el seu nom.

L'obra que presentem ara, *A Preliminary Dissertation on the Mechanisms of the Heavens*, va ser escrita originalment per Mary

Somerville com una introducció al seu magnífic *The Mechanism of the Heavens*.

El projecte sencer va néixer d'una petició de lord Brougham, en representació de la Society for the Diffusion of Useful Knowledge, ja que volia un text que expliqués al públic general els complexos principis de la *Mécanique Céleste* de Pierre-Simon Laplace.

En la *Dissertació preliminar*, Somerville fa un ràpid repàs divulgatiu dels conceptes que tractarà molt més a fons en l'obra. Al lector actual el pot sorprendre el pes que dona en aquesta introducció a temes no pas senzills d'astronomia posicional o a tota la teoria de les mareas, per exemple. En aquest sentit, cal pensar que en aquells moments aquests aspectes eren el gran assoliment de la mecànica newtoniana i eren objectiu de recerca aprofundida i d'atenció permanent entre totes les persones interessades en els avenços científics.

L'objectiu principal de *The Mechanisms of the Heavens* és explicar la naturalesa de les lleis de gravitació de Newton aplicades als moviments dels planetes de manera que fossin comprensibles per a aquells que no dominaven les altes matemàtiques. Sense eliminar l'aparat matemàtic, Somerville amplia moltes de les derivacions de Laplace per fer-les més entenedores i accessibles. Tot i així, tal com comenta a la *Dissertació*

preliminar, subratlla que una comprensió completa només és possible per a aquells que dominen les branques més altes de la ciència matemàtica, però defensa que una visió general està a l'abast de molts.

La recepció de l'obra sencera i de la *Dissertació preliminar* va ser tan positiva que Somerville la va ampliar i transformar el 1834 en el seu llibre més famós, *On the Connexion of the Physical Sciences*, eliminant-ne les fórmules per arribar a un públic encara més ampli, i augmentant-ne el contingut per abastar totes les ciències físiques

Dissertació preliminar sobre el funcionament dels cels

Per tal de donar una certa idea de l'objecte d'aquesta obra,¹ tal vegada no fora sobrer oferir algunes consideracions preliminars sobre la naturalesa del tema que es proposa investigar, així com sobre els mitjans que ja han estat emprats amb tan assenyalat èxit a fi i efecte d'acostar a l'abast de les nostres facultats aquelles veritats que semblarien situades tan lluny d'elles.

Tot el coneixement que posseïm dels objectes externs reposa sobre l'experiència, la qual ens forneix el saber dels fets; i la comparació d'aquests fets estableix relacions, a partir de les quals, per inducció —aquesta creença intuïtiva que causes semblants produiran efectes semblants— som conduïts a lleis generals. Així, l'experiència ens ensenya que els cossos cauen a la superfície de la Terra amb velocitat accelerada i en proporció a llurs masses. Isaac Newton

demostrà, per mitjà de la comparació, que la força que ocasiona la caiguda dels cossos a la superfície terrestre és idèntica a aquella que reté la Lluna en la seva òrbita; i la inducció el menà a concloure que, així com la Lluna és mantinguda en la seva òrbita per l'atracció de la Terra, també els planetes poden ésser retinguts en les seves per l'atracció del Sol. Seguint aquests passos arribà al descobriment d'una d'aquelles forces amb que el Creador ha ordenat que la matèria actuï recíprocament sobre la matèria.

L'astronomia física és la ciència que compara i identifica les lleis del moviment observades a la Terra amb els moviments que tenen lloc en els cels; que segueix, mitjançant una cadena ininterrompuda de deduccions a partir del gran principi que governa l'univers, les revolucions i rotacions dels planetes i les oscil·lacions dels fluids en llurs superfícies; i que estima els canvis que el sistema ha experimentat fins al moment actual o que pot experimentar en l'esdevenidor, canvis l'acompliment dels quals exigeix milions d'anys.

Han calgut els esforços combinats dels astrònoms, des de la primera albada de la civilització, per a establir la teoria mecànica de l'astronomia: els camins dels planetes han estat observats durant segles amb una perseverança que meravella si hom considera la imperfecció, i fins i tot la manca, dels instruments. Els moviments reals de

la Terra han estat separats dels moviments aparents dels planetes, s'han descobert les lleis de llurs revolucions i, al seu torn, el descobriment d'aquestes lleis ha dut al coneixement de la gravitació de la matèria. D'altra banda, partint del principi de la gravitació, cada moviment en el sistema del món ha estat explicat amb tal plenitud que cap fenomen astronòmic no pot ja ésser transmès a la posteritat sense que se n'hagin determinat les lleis.

La ciència, considerada com la recerca de la veritat, la qual només es pot assolir per mitjà d'una investigació pacient i exempta de prejudicis, en què res no és massa gran per a ésser intentat ni res tan menut que es pugui legítimament menysprear, ofereix sempre una ocupació d'interès extraordinari i d'elevada meditació. La contemplació de les obres de la creació eleva l'esperit i el duu a l'admiració de tot allò que és gran i noble, i així aconsegueix l'objecte de qualsevol mena d'estudi, que, en les elegants paraules de sir James Mackintosh, és inspirar l'amor a la veritat, a la saviesa i a la bellesa, sobretot a la bondat, la més alta bellesa, i vers aquell esperit suprem i etern que conté tota veritat i tota saviesa, tota bellesa i tota bondat.² Mitjançant l'amor o la delitosa contemplació i persecució d'aquests fins transcendents per ells mateixos, l'ànima de l'home s'alça per damunt dels objectes baixos i peribles i es

prepara per a aquells destins eminents que són reservats a tots aquells que són capaços d'entomar-los.

Els cels ofereixen el més sublim objecte d'estudi que la ciència pot proposar: la magnitud i l'esplendor dels astres, la inconcebible rapidesa amb què es mouen i les enormes distàncies que els separen imprimeixen en l'esperit una certa noció de l'energia que els manté en llurs moviments amb una durada a la qual no albirem límits. No menys manifesta és la bondat de la gran Causa Primera en haver dotat l'home de facultats per mitjà de les quals pot no sols apreciar la magnificència de les seves obres, sinó també resseguir, amb precisió, la manera amb què actuen les seves lleis, aprofitar el globus que habita com a base des d'on mesurar la magnitud i la distància del Sol i dels planetes i fer del diàmetre de l'òrbita terrestre el primer graó d'una escala per la qual pugui ascendir fins al firmament estrellat.

Aquestes recerques, alhora que ennobleixen l'esperit, inculquen també humilitat, atès que mostren que hi ha una barrera que cap energia, ni de l'enteniment ni del cos, no ens permetrà mai travessar: per més profundament que penetrem les immensitats de l'espai, resten encara innumbrables sistemes, en comparació dels quals aquells que ens semblen tan poderosos s'esvaeixen en la insignificança o fins i tot esdevenen

invisibles. De la mateixa manera, ens mostren que no sols l'home, sinó el globus que habita, i àdhuc tot el sistema del qual forma una part tan petita, podria ésser anorreat i la seva extinció passar desapercebuda en la immensitat de la creació.

Només aquelles persones destres en les branques superiors de la ciència matemàtica i mecànica poden assolir un coneixement complet de l'astronomia física; només ells poden apreciar en tota la seva extensió l'extrema bellesa dels resultats així com la dels mitjans a través dels quals s'obtenen. Tanmateix, una habilitat suficient en l'anàlisi per tal de seguir-ne l'esquema general, per tal d'albirar la dependència mútua de les diverses parts del sistema i per tal de comprendre per quins procediments hom ha arribat a algunes de les conclusions més extraordinàries és perfectament a l'abast de molts que defugen l'empresa, tal vegada esporuguits per dificultats que no són més formidables que les inherents a l'estudi dels elements de qualsevol branca del saber, i que potser exageren per no haver distingit prou entre el grau de preparació matemàtica necessari per a fer descobriments i aquell que és indispensable per a comprendre el que d'altres han fet. Que l'estudi de les matemàtiques i llur aplicació a l'astronomia té un gran interès, ho concediran tots aquells que hi han consagrat temps i atenció; i només ells

poden mesurar el goig d'arribar a la veritat, sia en el descobriment d'un món, sia en el d'una nova propietat dels nombres.



Newton ha demostrat que una partícula de matèria situada lluny de la superfície d'una esfera buida és atreta per aquesta de la mateixa manera que si la seva massa, o tota la matèria que conté, fos reunida en el seu centre. El mateix és, doncs, cert d'una esfera sòlida, que pot considerar-se composta d'un nombre infinit d'esferes buides concèntriques. Això, tanmateix, no s'esdevé en el cas d'un esferoide; ara bé, els cossos celestes són tan pròxims a la forma esfèrica i es troben a distàncies tan remotes els uns dels altres, que s'atreuen i són atrets com si cadascun fos un punt dens situat en el seu centre de gravetat, circumstància que facilita en gran manera la investigació de llurs moviments.

L'atracció de la Terra sobre els cossos a la seva superfície, en aquella latitud el quadrat del sinus de la qual és $\frac{1}{3}$, és la mateixa que si fos una esfera perfecta;³ i l'experiència mostra que allí els cossos cauen, durant el primer segon, un espai de 16,0697 peus. La distància mitjana de la Lluna a la Terra és aproximadament seixanta vegades el radi mitjà del nostre globus. Si el nombre

16,0697 és disminuït en la proporció d'1 a 3.600 —que és el quadrat de la distància de la Lluna a la Terra— hom troba que correspon exactament a l'espai que la Lluna recorreria en el primer segon de la seva caiguda vers la Terra, si no fos impedida per la seva força centrífuga, nascuda de la velocitat amb què es mou en la seva òrbita. Així doncs, la Lluna és retinguda en la seva òrbita per una força del mateix origen i regulada per la mateixa llei que aquella que fa caure una pedra a la superfície terrestre. La Terra, per tant, es pot considerar el centre d'una força que s'estén fins a la Lluna; però com que l'experiència ensenya que l'acció i la reacció de la matèria són iguals i contràries, la Lluna ha d'atreure la Terra amb una força igual i oposada.

Newton demostrà que un cos projectat en l'espai es mou segons una secció cònica si és atret per una força dirigida vers un punt fix i d'intensitat inversament proporcional al quadrat de la distància, però que qualsevol desviació d'aquesta llei el farà descriure una corba de naturalesa diferent. Kepler establí, per observació directa, que els planetes descriuen el·lipses entorn del Sol, i observacions posteriors han mostrat que els cometes també es mouen segons seccions còniques. De tot això se segueix que el Sol atreu tots els planetes i cometes en raó inversa del quadrat de llurs distàncies al seu centre i que, per tant, és el centre

d'una força que s'estén indefinidament en l'espai i comprèn en la seva acció tots els cossos del sistema.

Kepler deduí igualment de l'observació que els quadrats dels temps periòdics dels planetes, és a dir, dels temps de llurs revolucions entorn del Sol, són proporcionals als cubs de llurs distàncies mitjanes al centre. D'aquí es dedueix que la intensitat de la gravitació de tots els cossos envers el Sol és la mateixa a distàncies iguals i, per consegüent, que la gravitació és proporcional a les masses, car, si hom suposa els planetes i els cometes situats a igual distància del Sol i lliurats únicament als efectes de la gravetat, arribarien a la seva superfície en un mateix temps. Els satèl·lits també graviten respecte a llurs primaris segons la mateixa llei amb què aquests graviten respecte al Sol. En conseqüència, per la llei d'acció i reacció, cada cos és ell mateix centre d'una força atractiva que s'estén indefinidament en l'espai; i d'aquesta extensió neixen totes aquelles pertorbacions mútues que fan tan complicats els moviments celestes i tan difícil llur investigació.

La gravitació de la matèria, dirigida vers un centre i que atreu directament en raó de la massa i inversament en raó del quadrat de la distància, no li pertany només considerada en conjunt; de fet, cada partícula actua sobre cada partícula segons la mateixa llei quan es troben a distàncies

apreciables l'una de l'altra. Si el Sol actués sobre el centre de la Terra sense atreure cadascuna de les seves partícules, les mareas serien molt més grans que no són ara, i en altres aspectes també diferirien notablement. La gravitació de la Terra vers el Sol resulta de la gravitació de totes les seves partícules, les quals, al seu torn, atreuen el Sol en proporció de llurs respectives masses. Hi ha igualment una acció recíproca entre la Terra i cada partícula situada a la seva superfície; si no fos així, i si alguna porció de la Terra, per petita que fos, n'atragués una altra sense ésser ella mateixa atreta, el centre de gravetat del globus es desplaçaria en l'espai, cosa que és impossible.

La forma dels planetes resulta de l'atracció recíproca de les partícules que els componen. Una massa fluida aïllada, si es trobés en repòs, assumiria la forma d'una esfera en virtut de l'atracció mútua de les seves partícules; ara bé, si la massa gira entorn d'un eix, s'aplana als pols i s'eixampla a l'equador, a conseqüència de la força centrífuga que neix de la velocitat de rotació. Car la força centrífuga fa disminuir la gravetat de les partícules a l'equador, i l'equilibri només pot subsistir quan aquestes dues forces queden compensades gràcies a un augment de gravetat; així, com que la força atractiva és la mateixa sobre totes les partícules situades a igual distància del centre d'una esfera, les partícules equatorials s'allunyarien del

centre fins que llur augment en magnitud equilibra la força centrífuga per llur atracció. La conseqüència és que l'esfera esdevé un esferoide oblat. I un fluid que cobreixi parcialment o totalment un cos sòlid, com l'oceà i l'atmosfera cobreixen la Terra, ha d'assumir aquesta forma per tal de romandre en equilibri. La superfície del mar és, doncs, esferoidal, i la de la Terra només s'aparta d'aquesta figura allí on s'eleva per damunt o s'enfonsa per sota del nivell de les aigües; en qualsevol cas, aquesta desviació és tan petita que esdevé inapreciable si es compara amb la magnitud del globus. Tal és la forma de la Terra i dels planetes; però la compressió o aplanament als pols és tan lleu que fins i tot Júpiter, la rotació del qual és la més ràpida, difereix ben poc d'una esfera.

Encara que, a causa de les immenses distàncies que els separen, els planetes s'atreuen mútuament com si fossin esferes, els satèl·lits són prou a la vora dels seus cossos principals per quedar sensiblement afectats en llurs moviments per la forma dels primaris. La Lluna, per exemple, és tan propera a la Terra que l'atracció recíproca entre cadascuna de les seves partícules i cadascuna de les partícules de la massa prominent a l'equador terrestre ocasiona perturbacions considerables en els moviments d'ambdós cossos. L'acció de la Lluna sobre la matèria situada a l'equador

de la Terra produeix una nutació en l'eix de rotació; i la reacció d'aquesta mateixa matèria sobre la Lluna és la causa d'una nutació corresponent en l'òrbita lunar.⁴

Si una esfera en repòs en l'espai rep un impuls que passa pel seu centre de gravetat, totes les seves parts es mouran amb igual velocitat en línia recta; ara bé, si l'impuls no passa per aquest centre, les seves partícules, en posseir velocitats desiguals, li comunicaran un moviment de rotació al mateix temps que es desplaçarà en l'espai. Aquests moviments són independents l'un de l'altre, de manera que un impuls contrari, dirigit a través del centre de gravetat, n'aturaria la progressió sense interferir en la rotació. Com que el Sol gira entorn d'un eix, sembla probable que, si no ha rebut cap impuls en direcció contrària aplicat al seu centre de gravetat, es mogui en l'espai acompanyat de tots aquells cossos que componen el sistema solar, circumstància que en res no alteraria llurs moviments relatius. Car, en virtut de l'experiència que ens ensenya que la força és proporcional a la velocitat [*sic*],⁵ les atraccions recíproques d'un sistema romanen iguals, tant si el seu centre de gravetat és en repòs com si es mou uniformement en l'espai. S'ha calculat que, si la Terra hagués rebut el seu moviment d'un únic impuls, aquest hauria hagut de passar per un

punt situat a unes vint-i-cinc milles del seu centre.

Atès que els moviments de rotació i de translació dels planetes són independents l'un de l'altre, tot i que probablement comunicats per un mateix impuls, constitueixen matèries d'investigació distintes.

Un planeta es mou en la seva òrbita el·líptica amb una velocitat que varia a cada instant, en virtut de dues forces: l'una, dirigida vers el centre del Sol; l'altra, en la direcció de la tangent a l'òrbita, nascuda de l'impuls primitiu que li fou comunicat en el moment d'ésser llançat a l'espai. Si la força tangent cessés, el planeta cauria vers el Sol per efecte de la gravetat; i, si el Sol no l'atraués, el planeta s'allunyaria indefinidament seguint la tangent. Així, quan un planeta es troba en l'afeli, és a dir, en el punt de l'òrbita més distant del Sol, l'acció d'aquest domina la seva velocitat i l'atreu amb un moviment accelerat, que és de tal magnitud que acaba per superar l'atracció solar i el fa passar de llarg en el periheli, el punt de l'òrbita més proper al Sol; aleshores, disminuint gradualment de velocitat, arriba de bell nou a l'afeli, on novament preval l'atracció del Sol. En aquest moviment, els radis vectors —o línies imaginàries que uneixen els centres del Sol i dels planetes— escombren àrees iguals en temps iguals.

Si els planetes fossin atrets només pel Sol, aquesta seria sempre llur trajectòria; i com que la seva acció és proporcional a la seva massa, immensament superior a la de tots els planetes junts, l'el·lipse constitueix l'aproximació més ajustada als seus moviments reals, els quals són extremadament complicats a causa de l'atracció mútua entre ells. Així, no es desplacen segons cap corba coneguda o simètrica, sinó per trajectòries que ara s'acosten i ara s'allunyen de la forma el·líptica exacta, i els seus radis vectors no descriuen àrees exactament proporcionals al temps. D'aquesta manera, les àrees esdevenen un indicador de l'existència de forces pertorbadores.

Determinar el moviment de cada cos quan és pertorbat per tots els altres excedeix el poder de l'anàlisi; cal, doncs, estimar l'acció pertorbadora d'un únic planeta a la vegada. D'aquí sorgeix el cèlebre problema dels tres cossos, que originàriament consistia en la Lluna, la Terra i el Sol: donades les masses de tres cossos que parteixen de tres punts determinats, amb velocitats conegudes tant en magnitud com en direcció, i suposant que els cossos graviten mútuament amb forces directament proporcionals a les seves masses i inversament al quadrat de les distàncies, es tracta trobar les trajectòries descrites per aquests cossos i la seva posició en qualsevol instant donat.

Per mitjà d'aquest problema es determinen els moviments de translació de tots els cossos celestes. Es tracta d'un problema d'extraordinària dificultat, i seria infinitament més complicat si l'acció pertorbadora no fos molt menor que la força central. Com que la influència pertorbadora de cada cos es pot calcular per separat, s'assumeix que l'acció de tot el sistema a l'hora de pertorbar un planeta és igual a la suma de totes les pertorbacions particulars que pateix, segons el principi mecànic general que estableix que la suma de qualsevol nombre d'oscil·lacions petites és gairebé igual al seu efecte simultani i combinat.

En virtut de l'acció recíproca de la matèria, l'estabilitat del sistema depèn de la intensitat de l'impuls primitiu dels planetes i de la proporció de llurs masses respecte de la del Sol; car la naturalesa de les seccions còniques segons les quals es mouen els cossos celestes depèn de la velocitat amb què foren primerament llançats a l'espai. Si aquesta velocitat hagués estat tal que els planetes descrivissin òrbites d'equilibri inestable, llurs atraccions mútues haurien pogut transformar-les en paràboles o fins i tot en hipèrboles, i així, la Terra i els planetes podrien haver-se esvaït a través de l'abisme de l'espai des de fa eres immemorials. Però, com que llurs òrbites difereixen ben poc del cercle, cal que l'impuls impartit hagi estat exactament el necessari per assegurar la

permanència i l'estabilitat del sistema. A banda d'això, la massa del Sol és immensament superior a la dels planetes; i, com que llurs desigualtats guarden amb llurs moviments el·líptics la mateixa proporció que llurs masses respecte a la del Sol, les perturbacions mútues no fan sinó augmentar o disminuir les excentricitats de les seves òrbites en quantitats extremadament petites. Per consegüent, la gran magnitud de la massa solar és la causa principal de l'estabilitat del sistema. No hi ha en tot el món físic un exemple més esplèndid de l'adequació dels mitjans a l'acompliment del fi que el que ofereix l'ajustament delicat d'aquestes forces.

Les òrbites dels planetes presenten una inclinació molt petita respecte del pla de l'eclíptica en el qual es desplaça la Terra i, per aquesta raó, els astrònoms hi refereixen llurs moviments en una època determinada com a posició coneguda i fixa. Les trajectòries dels planetes, si hom en desatén les perturbacions mútues, són el·lipses que s'aproximen molt al cercle, els plans de les quals, lleument inclinats respecte a l'eclíptica, la tallen en línies rectes que passen pel centre del Sol; els punts on l'òrbita interseca el pla de l'eclíptica reben el nom de *nodes*.

Les òrbites dels planetes descoberts en temps més recents s'aparten en major grau de l'eclíptica (l'òrbita de Pal·les, per exemple, presenta una

inclinació de 35°) i, per això mateix, llur determinació presenta més dificultats.⁶ Aquests petits planetes no exerceixen cap influència sensible en possibles pertorbacions dels altres, però els seus moviments sí que esdevenen molt irregulars a causa de la proximitat de Júpiter i de Saturn.

Els planetes estan sotmesos a pertorbacions de dues menes distintes, totes dues nascudes de l'acció constant de llurs atraccions recíproques. Una d'aquestes depèn de les seves posicions relatives: comença en zero, creix fins a un màxim, disminueix i torna a ésser nul·la quan els planetes retornen a les mateixes posicions mútues. En virtut d'aquestes variacions, el planeta pertorbat ara s'allunya del Sol, ara s'hi apropa; adés és atret per damunt del pla de la seva òrbita, adés per sota, segons la situació del cos que exerceix la pertorbació. Tots aquests canvis, que s'acompleixen en períodes breus —alguns en pocs mesos, altres en anys o en centúries— reben el nom de *pertorbacions periòdiques* o *desigualtats periòdiques*.

Les desigualtats de l'altra mena, bé que igualment ocasionades per l'energia pertorbadora dels planetes, són del tot independents de llurs posicions relatives; depenen únicament de les posicions respectives de les òrbites, les formes i situacions de les quals en l'espai pateixen alteracions en quantitats molt petites al llarg d'immensos

períodes de temps, i per això són anomenades *pertorbacions seculars*.

En virtut de pertorbacions d'aquesta mena, els àpsides —els extrems dels eixos majors de totes les òrbites— experimenten un moviment directe en l'espai, bé que variable, amb l'excepció dels de Venus, que tenen un moviment retrògrad. Les línies dels nodes es mouen amb velocitat també variable en sentit contrari. Els moviments d'ambdues línies són extremadament lents: calen més de 109.770 anys perquè l'eix major de l'òrbita terrestre completi una revolució sidèria i 20.935 anys per a completar el seu moviment tròpic.⁷ L'eix major de l'òrbita de Júpiter necessita fins a 197.561 anys per a efectuar la seva revolució sota la sola acció pertorbadora de Saturn. Els períodes en què giren els nodes són igualment molt extensos. A més d'això, la inclinació i l'excentricitat de cada òrbita es troben en un estat de canvi perpetu, si bé lentíssim. En el temps present, les inclinacions de totes les òrbites disminueixen, però amb tanta lentitud que la de l'òrbita de Júpiter és només sis minuts menor ara que no ho era pas en temps de Ptolemeu. L'excentricitat terrestre decreix al ritme de 3.914 milles per segle; i, si aquesta disminució fos uniforme, caldrien 36.300 anys perquè l'òrbita de la Terra esdevingués circular. Però, enmig de totes aquestes vicissituds, els eixos majors i els moviments mitjans

dels planetes romanen permanentment independents dels canvis seculars; estan tan íntimament lligats per la llei de Kepler segons la qual els quadrats dels períodes són proporcionals als cubs de les distàncies mitjanes dels planetes al Sol que l'un no pot variar sense afectar l'altre.

Amb l'excepció d'aquests dos elements, sembla que tots els cossos es troben en moviment, i que cada òrbita és en estat de canvi perpetu. Per minses que siguin aquestes alteracions, hom podria suposar-les susceptibles d'acumular-se, al llarg dels segles, fins al punt de trastornar l'ordre de la natura, d'alterar les posicions relatives dels planetes, de posar fi a les vicissituds de les estacions i de provocar col·lisions que durien tot el nostre sistema, avui tan harmoniós, cap a una confusió caòtica. Davant conseqüències tan terribles, és natural de preguntar-se quina prova tenim que la creació serà preservada d'una catàstrofe d'aital magnitud. Car res no pot ésser conegut per observació directa, atès que l'existència del gènere humà no ha ocupat sinó un punt en el temps mentre que aquestes vicissituds abracen miríades d'eres. La prova és tan simple com convincent. Totes les variacions del sistema solar, tant les seculars com les periòdiques, es poden expressar analíticament per mitjà dels sinus i cosinus d'arcs circulars que creixen amb el temps; i com que un sinus o un cosinus no poden excedir

mai el radi, sinó que han d'oscil·lar entre zero i la unitat, per molt que el temps augmenti, se'n segueix que, quan les variacions han arribat, per canvis lents, a un màxim en un període perllongat, disminueixen amb la mateixa lentitud fins a assolir llur valor mínim, i aleshores inicien un nou cicle, oscil·lant així perpètuament entorn d'un valor mitjà. De totes maneres, això no s'esdevindria si els planetes es moguessin en un medi resistent; car en tal cas tant l'excentricitat com els eixos majors de les òrbites variarien amb el temps, de manera que l'estabilitat del sistema acabaria per quedar destruïda. Ara bé, si els planetes es mouen efectivament en un medi eteri, aquest ha d'ésser d'una rarefacció extrema, puix que la seva resistència ha estat fins ara del tot imperceptible.

Tres circumstàncies han estat generalment considerades com a necessàries per a provar l'estabilitat del sistema: la petitesa de les excentricitats de les òrbites planetàries, llur escassa inclinació i la revolució de tots els cossos —tant planetes com satèl·lits— en una mateixa direcció. Tanmateix, aquestes no constitueixen condicions necessàries: la periodicitat mateixa dels termes en què s'expressen les desigualtats és suficient per assegurar-nos que, encara que ignorem l'abast dels límits i la durada d'aquell gran cicle que probablement comprèn milions d'anys, no

excediran mai allò que és requerit per a la conservació de l'estabilitat i de l'harmonia del conjunt, a la preservació del qual cada circumstància se'ns apareix tan bellament i meravellosament disposada.

El mateix pla de l'eclíptica, tot i que se suposa fixat en una època determinada per comoditat dels càlculs astronòmics, està sotmès a una variació secular molt petita, de 52,109", ocasionada per l'acció recíproca dels planetes; però, com que aquesta variació és també periòdica, l'equador terrestre, que hi és inclinat en un angle d'uns 23° 28', no coincidirà mai amb el pla de l'eclíptica; i així no pot produir-se una primavera perpètua. La rotació de la Terra és uniforme; per tant, el dia i la nit, l'estiu i l'hivern, continuaran llurs vicissituds mentre el sistema perduri o no sigui pertorbat per causes foranes.

[Q]ue l'esfera estelada dels planetes
i les estrelles fixes, en llurs canvis
de prop imita; laberints excèntrics,
travats els uns als altres, tortuosos,
i molt més regulars com menys ho semblen.⁸



L'estabilitat del nostre sistema fou establerta per Lagrange, «un descobriment», afirma el

professor Playfair, «que ha de fer el seu nom per sempre memorable en la ciència, i venerat per aquells que es delecten en la contemplació de tot allò que és excel·lent i sublim. Després del descobriment de Newton sobre les òrbites el·líptiques dels planetes, el descobriment de Lagrange de les seves desigualtats periòdiques és, sens dubte, la veritat més noble de l'astronomia física; i, pel que fa a la doctrina de les causes finals, es pot considerar com la més gran de totes».

Malgrat la permanència del nostre sistema, les variacions seculares en les òrbites planetàries haurien estat extremament incòmodes per als astrònoms quan es feu necessari comparar observacions separades per llargs intervals de temps. Aquesta dificultat fou superada per Laplace, qui demostrà que, siguin quins siguin els canvis que el temps pugui produir tant en les òrbites mateixes com en el pla de l'eclíptica, hi ha un pla invariable que passa pel centre de gravetat del Sol, entorn del qual tot el sistema oscil·la dins de límits estrets, i que es determina gràcies a aquesta propietat: si s'hi projecta cada cos del sistema i la massa de cadascun d'ells es multiplica per l'àrea descrita en un temps determinat per la seva projecció sobre aquest pla, la suma de tots aquests productes és un màxim. Aquest pla de màxima inèrcia, que no és pas peculiar del sistema solar sinó que existeix en tot sistema de cossos

sotmesos únicament a llurs atraccions mútues, roman sempre paral·lel a si mateix i manté una posició fixa, a partir de la qual es poden estimar les oscil·lacions del sistema al llarg d'un temps il·limitat. És situat aproximadament a mig camí entre les òrbites de Júpiter i Saturn i és inclinat respecte de l'eclíptica en un angle d'aproximadament $1^{\circ} 35' 31''$.⁹

Totes les desigualtats, tant periòdiques com seculars, deduïdes de la llei de la gravitació, han estat tan perfectament confirmades per l'observació, que l'anàlisi ha esdevingut un dels mitjans més segurs per a descobrir les irregularitats planetàries, ja sigui quan són massa petites o bé quan llurs períodes són massa llargs per a ésser detectades per altres mètodes. Tot i així, Júpiter i Saturn presenten unes desigualtats que durant molt de temps van semblar discordants amb aquesta llei. Totes les observacions, des de les dels xinesos i els àrabs fins als nostres dies, proven que durant segles els moviments mitjans de Júpiter i Saturn han estat afectats per grans desigualtats amb uns períodes molt llargs, constituint així el que semblava una anomalia en la teoria dels planetes. Feia temps que l'observació havia deixat clar que cinc vegades el moviment mitjà de Saturn és gairebé igual a dues vegades el de Júpiter, una relació que la sagacitat de Laplace reconegué com la causa d'una desigualtat periòdica

en el moviment mitjà de cadascun d'aquests planetes, la qual completa el seu període en prop de 929 anys julians, i en un d'ells provoca un avançament i en l'altre, un retard. Aquestes desigualtats són estrictament periòdiques, ja que depenen de la configuració dels dos planetes; i la teoria és plenament confirmada per l'observació, que mostra que en el curs de vint segles el moviment mitjà de Júpiter s'ha avançat en $3^{\circ} 23'$, mentre que el de Saturn s'ha retardat en $5^{\circ} 13'$.

Hom podria imaginar que l'acció recíproca dels planetes proveïts de satèl·lits hauria d'ésser diferent de la influència d'aquells que no en tenen; però les distàncies dels satèl·lits als seus planetes principals són incomparablement menors que les distàncies dels planetes al Sol i entre ells mateixos, de manera que el sistema format per un planeta i els seus satèl·lits es mou gairebé com si tots aquests cossos estiguessin reunits en llur centre comú de gravetat. De totes maneres, és cert que l'acció del Sol pertorba en certa mesura el moviment dels satèl·lits al voltant del seu planeta principal.

Els canvis que es produeixen en el sistema planetari es mostren a petita escala en Júpiter i els seus satèl·lits; i com que el temps necessari per a la progressió de les desigualtats d'aquestes petites llunes només s'estén a alguns segles, es pot considerar com un compendi d'aquell gran cicle

que els planetes no completaran sinó al cap de miríades de segles. Les revolucions dels satèl·lits entorn de Júpiter són del tot semblants a les dels planetes entorn del Sol; és cert que són pertorbats per aquest, però la seva distància és tan gran que llurs moviments són gairebé els mateixos que si no estiguessin sota la seva influència. Els satèl·lits, com els planetes, foren probablement projectats en òrbites el·líptiques, però l'aplanament de l'esferoide de Júpiter és molt considerable a causa de la seva ràpida rotació, i com que les masses dels satèl·lits són prop de 100.000 vegades menors que la de Júpiter, la immensa quantitat de matèria protuberant al seu equador degué ben aviat conferir la forma circular observada en les òrbites del primer i el segon satèl·lits, forma que la seva atracció superior mantindrà sempre. El tercer i quart satèl·lits, en trobar-se més allunyats de la influència del planeta, es mouen en òrbites amb una excentricitat molt petita. La mateixa causa fa que les òrbites dels satèl·lits romanquin gairebé en el pla de l'equador de Júpiter, per la qual cosa els veiem quasi sempre en una mateixa línia; i la poderosa acció d'aquesta massa equatorial és la raó per la qual el moviment dels nodes d'aquests petits cossos és molt més ràpid que el del planeta mateix. Els nodes del quart satèl·lit completen una revolució en 520 anys, mentre que els de l'òrbita de Júpiter en requereixen

50.673, prova de l'atracció recíproca entre cada partícula de l'equador de Júpiter i els satèl·lits. Encara que els dos primers satèl·lits es mouen sensiblement en cercles, adquireixen una lleugera el·lipticitat a causa de les pertorbacions que experimenten.

Les òrbites dels satèl·lits no conserven cap inclinació permanent ni respecte al pla de l'equador de Júpiter ni respecte al pla de la seva òrbita, sinó respecte d'uns plans determinats que passen entre ambdós i per llur intersecció; aquests presenten una inclinació tant més gran envers l'equador com més allunyat és el satèl·lit, circumstància deguda enterament a la influència de l'aplanament de Júpiter.

Entre els moviments mitjans i les longituds mitjanes dels tres primers satèl·lits de Júpiter regeix una llei singular. L'observació sembla indicar que el moviment mitjà del primer satèl·lit, sumat al doble del tercer, és igual al triple del segon; i que la longitud mitjana del primer, menys tres vegades la del segon, més dues vegades la del tercer, és sempre igual a dos angles rectes. La teoria prova que, encara que aquestes relacions haguesin estat només aproximades quan els satèl·lits foren llançats a l'espai, llurs atraccions mútues les haurien establert i mantingut.¹⁰

Aquestes relacions s'estenen als moviments sinòdics dels satèl·lits i, per consegüent, afecten

llurs eclipsis i tenen una influència molt considerable sobre tota la teoria. Com que els satèl·lits es mouen gairebé en el pla de l'equador de Júpiter, el qual té una inclinació molt petita respecte al pla de la seva òrbita, sovint són eclipsats pel planeta. L'instant del començament o de la fi d'un eclipsi marca el mateix moment de temps absolut per a tots els habitants de la Terra; així, el temps d'aquests eclipsis observat per un viatger i comparat amb el temps de l'eclipsi calculat per a Greenwich o per a qualsevol altre meridià fix, dona la diferència de meridians en temps i, per tant, la longitud geogràfica del lloc d'observació. Han calgut tots els perfeccionaments dels instruments moderns per fer útils al navegant els eclipsis d'aquestes llunes distants, i ara aquest sistema de cossos, invisible a ull nu i conegut per l'home només amb l'ajut de la ciència, li permet travessar l'oceà, escampant la llum del coneixement i els beneficis de la civilització fins a les regions més remotes, i retornar carregat amb els productes d'un altre hemisferi.

Encara més: els eclipsis dels satèl·lits de Júpiter han estat el mitjà d'un descobriment que, tot i no ésser tan immediatament aplicable a les necessitats humanes, revela una propietat de la llum, aquell medi sense la influència vivificant del qual totes les bel·leses de la creació ens serien un buit. S'observa que els eclipsis del primer satèl·lit

que tenen lloc quan Júpiter és a la vora de la conjunció s'endarrereixen 16' 26" respecte als que s'esdevenen quan el planeta és en oposició. Però com que Júpiter és més a prop nostre en l'oposició que en la conjunció en una quantitat igual a tota l'amplada de l'òrbita terrestre, aquesta diferència s'ha atribuït al temps que els raigs de llum triguen a travessar l'òrbita de la Terra, una distància de 192 milions de milles; i d'això s'ha estimat que la llum viatja a la velocitat de 192.000 milles per segon.¹¹ Tan gran és aquesta velocitat, que la Terra, movent-se a dinou milles per segon, necessitaria dos mesos per recórrer una distància que un raig de llum travessa en vuit minuts. El descobriment posterior de l'aberració de la llum confirmà aquest resultat sorprenent.

Els objectes semblen situats en la direcció dels raigs que en procedeixen. Si la llum es propagués instantàniament, tot objecte, tant si és en repòs com en moviment, apareixeria en la direcció exacta d'aquests raigs; però com que la llum necessita un cert temps per a viatjar, quan Júpiter es troba en conjunció el veiem mitjançant uns raigs que el van deixar 16' 26" abans; i durant aquest interval nosaltres hem canviat de posició a causa del moviment de la Terra en la seva òrbita. Per això atribuïm a Júpiter una posició en la qual no es troba realment. La seva posició veritable és en la diagonal del paral·lelogram els costats

del qual estan en la proporció de la velocitat de la llum a la velocitat de la Terra en la seva òrbita, és a dir, en la proporció 192.000 a 19.

De fet, a conseqüència de l'aberració, cap dels cossos celestes no és exactament en el lloc on sembla ésser. En efecte, si la Terra estigués en repòs, els raigs procedents d'una estrella passarien al llarg de l'eix d'un telescopi dirigit cap a ella, però si la Terra comencés a moure's en la seva òrbita amb la seva velocitat habitual, aquests raigs toparien amb el costat del tub; caldria, doncs, inclinar lleugerament el telescopi per tal de veure l'estrella. L'angle comprès entre l'eix del telescopi i la línia traçada cap a la posició veritable de l'estrella és la seva aberració, la qual varia en quantitat i direcció segons la part de l'òrbita terrestre en què ens trobem, però que en els casos ordinaris no excedeix mai els vint segons d'arc.

La velocitat de la llum deduïda de l'aberració observada de les estrelles fixes correspon perfectament amb la que proporcionen els eclipsis del primer satèl·lit de Júpiter. El fet d'obtenir el mateix resultat per vies tan diferents no deixa cap dubte sobre la seva veritat. En l'astronomia física es troben moltes coincidències tan belles com aquesta, derivades de circumstàncies aparentment poc prometedores i dissemblants, i revelen dependències que d'altra manera potser no hauríem pogut descobrir. La identitat de la velocitat

de la llum a la distància de Júpiter i a la superfície de la Terra mostra que aquesta velocitat és uniforme; i si la llum consisteix en vibracions d'un fluid elàstic o èter que omple l'espai —la hipòtesi que concorda millor amb els fenòmens observats—, la uniformitat de la seva velocitat indica que la densitat d'aquest fluid, en tota l'extensió del sistema solar, ha d'ésser proporcional a la seva elasticitat. Entre les conjectures afortunades confirmades per l'experiència posterior, la de Francis Bacon no és de les menys remarcables. «Em produeix un dubte», diu el restaurador de la veritable filosofia, «si veiem el rostre del cel serè i estrellat en l'instant mateix en què realment existeix o bé algun temps després, i si no hi ha, respecte dels cossos celestes, un temps veritable i un temps aparent, no menys que un lloc veritable i un lloc aparent, com diuen els astrònoms a causa de la paral·laxi. Sembla increïble que les espècies o els raigs dels cossos celestes puguin travessar en un instant l'immens interval que ens separa d'ells; o que no requereixin, almenys, una porció considerable de temps».

Com que els grans descobriments solen conduir a una varietat de conseqüències, l'aberració de la llum ofereix una prova directa del moviment de la Terra en la seva òrbita; i la seva rotació és demostrada per la teoria dels cossos que cauen, ja que la força centrífuga que engendra retarda les

oscil·lacions del pèndol en passar del pol a l'equador. Així, ha estat necessari un alt grau de coneixement científic per dissipar els errors dels sentits.

El poc que es coneix de les teories dels satèl·lits de Saturn i d'Urà és, en tots els aspectes, semblant al que s'ha establert per a Júpiter. La gran compressió de Saturn fa que els seus satèl·lits es moguin gairebé en el pla del seu equador. Quant a la situació de l'equador d'Urà, no en sabem res amb certesa, ni tampoc del seu grau de compressió.¹² Les òrbites dels seus satèl·lits són gairebé perpendiculars al pla de l'eclíptica.



La nostra companya constant, la Lluna, ens reclama ara l'atenció. Diverses circumstàncies concorren a fer que els seus moviments siguin alhora els més interessants i els més difícils d'investigar de tots els cossos del nostre sistema. En el sistema solar, cada planeta pertorba cada planeta; però en la teoria lunar el Sol és la gran causa pertorbadora: la seva immensa distància és compensada per la seva magnitud enorme, de manera que els moviments de la Lluna són més irregulars que els dels planetes. I, a causa de la gran el·lipticitat de la seva òrbita i de la mida del Sol, les aproximacions als seus moviments són

feixugues i difícils, més enllà del que podrien imaginar aquells no avesats a aquestes investigacions. Ni l'excentricitat de l'òrbita lunar ni la seva inclinació respecte al pla de l'eclíptica no han experimentat canvis deguts a desigualtats seculares, però, en canvi, el moviment mitjà, els nodes i el perigeu estan sotmesos a variacions molt notables.

A partir d'un eclipsi observat a Babilònia pels caldeus el 19 de març de l'any 721 abans de l'era cristiana, es coneix la posició de la Lluna a partir de la del Sol en l'instant de l'oposició; d'aquí es pot determinar la seva longitud mitjana.¹³ Però la comparació d'aquesta longitud mitjana amb una altra, calculada retrospectivament per al mateix instant a partir d'observacions modernes, mostra que la Lluna efectua avui la seva revolució entorn de la Terra amb més rapidesa i en menys temps que antigament i que l'acceleració del seu moviment mitjà ha anat augmentant d'edat en edat com el quadrat del temps. Tots els eclipsis antics i intermedis confirmen aquest resultat. Com que els moviments mitjans dels planetes no presenten desigualtats seculares, aquest fet semblava una anomalia inexplicable. En un temps fou atribuït a la resistència d'un medi eteri que ompliria l'espai; en un altre, a la transmissió successiva de la força gravitatòria. Però, com que Laplace demostrà que cap d'aquestes causes —encara que existissin—

no exerceix influència sobre els moviments del perigeu o dels nodes lunars, tampoc podrien afectar el moviment mitjà, ja que una variació d'aquest element per tal causa aniria inseparablement unida a variacions en els dos anteriors. Aquest gran matemàtic, en estudiar la teoria dels satèl·lits de Júpiter, advertí que les variacions seculares en els elements de l'òrbita de Júpiter, degudes a l'acció dels altres planetes, ocasionen canvis corresponents en els moviments dels seus satèl·lits. Això el portà a sospitar que l'acceleració del moviment mitjà de la Lluna podia estar relacionada amb la variació secular de l'excentricitat de l'òrbita terrestre; l'anàlisi ha demostrat que havia trobat la causa veritable.

Si l'excentricitat de l'òrbita terrestre fos invariable, la Lluna estaria sotmesa a una pertorbació variable deguda a l'acció del Sol, d'acord amb la revolució anual de la Terra, però aquesta pertorbació seria periòdica, ja que es repetiria sempre que el Sol, la Terra i la Lluna retornessin a les mateixes posicions relatives. Tanmateix, a causa de la lenta i incessant disminució de l'excentricitat de l'òrbita terrestre, la revolució del nostre planeta es realitza cada any a distàncies lleugerament diferents del Sol. La posició de la Lluna respecte del Sol experimenta un canvi corresponent, de manera que l'acció mitjana del Sol sobre la Lluna varia d'un segle a un altre i produeix

l'augment secular de la seva velocitat anomenat acceleració. Aquest nom és molt escaient en l'època present i continuarà essent-ho durant un vast nombre d'eres, perquè mentre l'excentricitat de la Terra disminueixi, el moviment mitjà de la Lluna s'accelerará, però quan l'excentricitat hagi passat pel seu mínim i comenci a augmentar, el moviment mitjà es retardará d'edat en edat. Actualment l'acceleració secular és d'uns $10''$, però el seu efecte sobre la posició de la Lluna creix com el quadrat del temps. És remarcable que l'acció dels planetes, així reflectida pel Sol cap a la Lluna, sigui molt més sensible que la seva acció directa, tant sobre la Terra com sobre la mateixa Lluna. La disminució secular de l'excentricitat —que no ha alterat l'equació del centre del Sol en vuit minuts des dels primers eclipsis registrats— ha produït, en canvi, una variació d' $1^{\circ} 48'$ en la longitud de la Lluna i de $7^{\circ} 12'$ en la seva anomalia mitjana.¹⁴

L'acció del Sol produeix un moviment ràpid però variable en els nodes i en el perigeu de l'òrbita lunar. Els primers, tot i que retrocedeixen durant la major part de la revolució de la Lluna i avancen durant una part menor, completen la seva revolució sideral en 6.793,4212 dies, El segon, encara que el seu moviment és de vegades retrògrad i de vegades directe, ho fa en 3.232,5807 dies, és a dir, en poc més de nou anys.

Tan gran és, però, la diferència entre l'energia pertorbadora del Sol i la de tots els planetes reunits, que l'eix major de l'òrbita terrestre necessita no menys de 109.770 anys per a efectuar el mateix. És evident que la variació secular que canvia la distància del Sol a la Terra i ocasiona l'acceleració del moviment mitjà de la Lluna ha d'afectar també el moviment dels nodes i del perigeu; i, en conseqüència, tant per la teoria com per l'observació, aquests dos elements estan sotmesos a una desigualtat secular, derivada de la variació de l'excentricitat de l'òrbita terrestre, que els vincula amb l'acceleració; de manera que tots dos són retardats quan el moviment mitjà és anticipat. Les variacions seculares d'aquests tres elements es troben en la proporció dels nombres 3, 0,735 i 1; i d'aquí resulta que els tres moviments de la Lluna, respecte del Sol, del seu perigeu i dels seus nodes, són contínuament accelerats, i llurs equacions seculares són com els nombres 1, 4 i 0,265, o, segons les investigacions més recents, com 1, 4,6776 i 0,391. La comparació dels antics eclipsis observats pels àrabs, grecs i caldeus —malgrat llur imperfecció— amb les observacions modernes confirma plenament aquests resultats de l'anàlisi.

Les edats futures faran progressar aquestes grans desigualtats, que en algun període remotíssim seran equivalents a moltes circumferències.

Són, en efecte, periòdiques; però, qui en pot determinar el període? Hauran de transcórrer milions d'anys abans que aquest gran cicle es completi; però «aquests canvis, encara que rars en el temps, són freqüents en l'eternitat».

La Lluna és tan pròxima que l'excés de matèria a l'equador de la Terra produeix variacions periòdiques en la seva longitud i latitud; i, com que la causa ha d'ésser proporcional a l'efecte, la comparació d'aquestes desigualtats —calculades per la teoria— amb les determinades per l'observació mostra que la compressió de l'esferoide terrestre, és a dir, la relació entre la diferència dels diàmetres polar i equatorial respecte al diàmetre equatorial, és de $\frac{1}{305,05}$. S'ha demostrat analíticament que si una massa fluida de matèria homogènia, les partícules de la qual s'atreuen en raó inversa del quadrat de la distància, girés entorn d'un eix, com la Terra, adoptaria la forma d'un esferoide amb una compressió igual a un factor $\frac{1}{230}$. D'això es desprèn que la Terra no és homogènia, sinó que la seva densitat disminueix del centre cap a la circumferència. Els eclipsis de la Lluna demostren que la Terra és rodona, i les seves desigualtats determinen no sols la forma, sinó també l'estructura interna del nostre planeta; uns resultats de l'anàlisi que no s'haurien pogut anticipar. Desigualtats semblants en els satèl·lits de Júpiter demostren que la seva massa tampoc no

és homogènia i que la seva compressió és de $\frac{1}{13,8}$.

Els moviments de la Lluna han esdevingut avui de més importància per al navegant i el geògraf que els de cap altre astre, a causa de la precisió amb què es determina la longitud mitjançant les ocultacions d'estrelles i les distàncies lunars. La teoria lunar ha arribat a tal grau de perfecció, que els instants d'aquests fenòmens, observats sota qualsevol meridià i comparats amb els calculats per a Greenwich a l'*Almanac Nàutic*, donen la longitud de l'observador amb un error de només unes poques milles. La precisió d'aquesta obra és, evidentment, d'una importància extrema per a una nació marítima, i hi ha motius per esperar que les noves efemèrides, actualment en preparació, seran, amb diferència, l'obra més perfecta d'aquest gènere que s'hagi publicat mai.

De la teoria lunar es dedueix la distància mitjana del Sol a la Terra i, en conseqüència, les dimensions de tot el sistema solar; car les forces que retenen la Terra i la Lluna en llurs òrbites són respectivament proporcionals als radis vectors de la Terra i de la Lluna, cadascun dividit pel quadrat del seu temps periòdic. Com que la teoria lunar proporciona la relació d'aquestes forces, s'obté la relació entre les distàncies del Sol i de la Lluna a la Terra, d'on resulta que la distància del

Sol a la Terra és gairebé 396 vegades més gran que la de la Lluna.

El mètode per trobar les distàncies absolutes dels cossos celestes en milles és, de fet, el mateix que s'empra per mesurar distàncies dels objectes terrestres. Des de les extremitats d'una base coneguda es mesuren els angles que formen els raigs visuals procedents de l'objecte amb ell; la seva suma, restada de dos angles rectes, dona l'angle oposat a la base; d'aquesta manera, per trigonometria, es poden calcular tots els angles i costats del triangle i, en conseqüència, es troba la distància a què està situat l'objecte. L'angle sota el qual es veu la base del triangle des de l'objecte és la seva paral·laxi, que evidentment augmenta i disminueix amb la distància; per tant, la base ha de ser molt gran per ser visible des dels cossos celestes. Però el globus terrestre, les dimensions del qual es determinen mitjançant un mesurament real, proporciona un estàndard de mesures amb el qual comparem les distàncies, masses, densitats i volums del Sol i els planetes.



Els cursos dels grans rius, que en general són navegables en una mesura considerable, demostren que la curvatura de la terra difereix poc de la de l'oceà; i com que les altures de les

muntanyes i els continents són, en qualsevol cas, força insignificants en comparació amb la magnitud de la Terra, sabem que la seva figura està determinada per una superfície que en cada punt és perpendicular a la direcció de la gravetat, és a dir, a la línia de plomada, i és la mateixa que tindria el mar si continués al voltant de la Terra sota els continents. Aquesta és la figura que s'ha mesurat de la manera següent.

Un meridià terrestre és una línia que passa pels dos pols i en què tots els punts de la qual tenen el mateix migdia de manera simultània. Si es coneguessin les llargàries i curvatures dels diferents meridians, es podria determinar la figura de la Terra, però la llargària d'un grau és suficient per obtenir la figura de la Terra si es mesura en diferents meridians i en una varietat de latituds. Si la Terra fos una esfera, tots els graus tindrien la mateixa llargària, però en cas contrari, les llargàries dels graus seran més grans on la curvatura sigui menor; una comparació de la llargària dels graus en diferents parts de la superfície terrestre en determinarà, per tant, la mida i forma.

Un arc de meridià es pot mesurar observant la latitud dels seus punts extrems i després mesurant la distància entre ells en peus o braces; la distància així determinada a la superfície de la terra, dividida pels graus i parts d'un grau continuts en la diferència de les latituds, donarà la

llargària exacta d'un grau, essent la diferència de les latituds l'angle contingut entre les verticals a les extremitats de l'arc. Aquest procediment no seria pas gaire difícil si la distància no estigués obstruïda i es trobés a nivell del mar, però a causa dels innumbrables obstacles a la superfície de la terra, cal connectar els punts extrems de l'arc mitjançant una sèrie de triangles, els costats i angles dels quals es mesuren o es calculen de manera que la llargària de l'arc es determina amb un càlcul molt laboriós. A conseqüència de les desigualtats de la superfície, cada triangle es troba en un pla diferent i, per tant, s'han de reduir mitjançant càlculs als triangles corresponents si s'haguessin mesurat a la superfície del mar; i com que la Terra és esfèrica, requereixen una correcció per reduir-los de triangles plans a triangles esfèrics.

S'han mesurat arcs de meridià en diverses latituds, tant al nord com al sud, així com arcs perpendiculars al meridià. A partir d'aquestes mesures sembla que la llargària dels graus augmenta des de l'equador fins als pols gairebé com el quadrat del sinus de la latitud; en conseqüència, la convexitat de la Terra disminueix des de l'equador fins als pols. Hi ha moltes discrepàncies, però la figura que més s'acosta a aquesta llei és un el·lipsoide de revolució, el radi equatorial del qual és de 3.962,6 milles i el radi polar de 3.949,7; la diferència, 12,9 milles, dividida pel radi

equatorial, és de $\frac{1}{308,7}$, o aproximadament $\frac{1}{309}$; aquesta fracció s'anomena compressió de la Terra, perquè, segons sigui més gran o més petita, l'el·lipsoide terrestre està més o menys aplanat als pols. El resultat no difereix gaire del que s'obté a partir de les desigualtats lunars. Si suposem que la Terra és una esfera, la llargària d'un grau del meridià és de $69 \frac{1}{22}$ milles britàniques; per tant, 360 graus, o la circumferència sencera del globus, és de 24.856, i el diàmetre, que és una mica menys d'un terç de la circumferència, és de 7.916 o més o menys 8.000 milles. Eratòstenes, que va morir 194 anys abans de l'era cristiana, va ser el primer a donar un valor aproximat de la circumferència terrestre, mitjançant la mesura d'un arc entre Alexandria i Siene.

Ara bé, hi ha un altre mètode per trobar la figura de la Terra, totalment independent de qualsevol dels precedents. Si la Terra fos una esfera homogènia sense rotació, la seva atracció sobre els cossos a la seva superfície seria la mateixa a tot arreu i, si fos el·líptica, la força de la gravetat teòricament hauria d'augmentar, des de l'equador fins als pols, com el quadrat del sinus de la latitud; però per a un esferoide en rotació, segons les lleis de la mecànica, la força centrífuga varia com el quadrat del sinus de la latitud des de l'equador, on és més gran, fins als pols, on s'anul·la; i com que tendeix a expulsar els cossos

enfora de la superfície, disminueix els efectes de la gravetat en una petita quantitat. Per tant, per gravitació, que és la diferència d'aquestes dues forces, la caiguda dels cossos s'hauria d'accelerar en anar de l'equador als pols proporcionalment al quadrat del sinus de la latitud, mentre que el pes del mateix cos hauria d'augmentar en aquesta proporció. Això es demostra directament per les oscil·lacions del pèndol, ja que si la caiguda dels cossos s'accelera les oscil·lacions seran més ràpides, i perquè sempre es puguin realitzar en un mateix temps, la longitud del pèndol s'ha de modificar. Ara, mitjançant nombrosos i molt acurats experiments, s'ha demostrat que un pèndol, que fa 86.400 oscil·lacions en un dia mitjà a l'equador, farà les mateixes a cada punt de la superfície terrestre si la seva longitud augmenta, en anar cap al pol, com el quadrat del sinus de la latitud. A partir de la mitjana d'aquests valors, sembla que la compressió de l'esferoide terrestre és d'aproximadament $\frac{1}{342}$, que no difereix gaire de la obtinguda a partir de les desigualtats lunars i dels arcs del meridià. La quasi coincidència d'aquests tres valors, deduïts per mètodes tan independents entre si, mostra que les tendències mútues dels centres dels cossos celestes entre ells i l'atracció de la Terra sobre els cossos a la seva superfície resulten de l'atracció recíproca de totes les seves partícules. Es pot afegir una altra prova:

la nutació de l'eix terrestre i la precessió dels equinoccis són ocasionades per l'acció del Sol i la Lluna sobre la matèria protuberant a l'equador terrestre i, tot i que aquestes desigualtats no donen un valor exacte de la compressió terrestre, mostren que la fracció que l'expressa està compresa entre els límits $\frac{1}{279}$ i $\frac{1}{578}$.

Es podria esperar que s'arribés a la mateixa compressió amb cadascun dels mètodes si les diverses tècniques d'observació es poguessin aplicar sense errors. Tanmateix, això no és el cas, ja que es troben discrepàncies tant en els graus del meridià com en la longitud del pèndol que mostren que la figura de la Terra és molt complicada; però són tan petites en comparació amb els resultats generals, que es poden descartar. La compressió deduïda de la mitjana del conjunt sembla ser d'aproximadament $\frac{1}{578}$; la que dona la teoria lunar té l'avantatge de ser independent de les irregularitats de la superfície terrestre i de les atraccions locals.



Un cop determinada la forma i la mida de la Terra, aquesta proporciona un estàndard de mesura amb el qual es poden comparar les dimensions del sistema solar.

La paral·laxi d'un cos celeste és l'angle sota el qual es veuria el radi de la Terra si es mirés des del centre d'aquest cos, i proporciona el mitjà per determinar les distàncies del Sol, la Lluna i els planetes. Suposem que, quan la Lluna és a l'horitzó en l'instant de la sortida o la posta de Sol, es tracen línies des del seu centre fins a l'observador i fins al centre de la Terra; aquestes formarien un triangle rectangle amb el radi terrestre, que té una longitud coneguda, i com que la paral·laxi o angle a la Lluna es pot mesurar, disposem de tots els angles i un costat i, en conseqüència, es pot calcular la distància de la Lluna al centre de la Terra. La paral·laxi d'un objecte es pot trobar si dos observadors sota el mateix meridià, però a una distància molt gran l'un de l'altre, observen les seves distàncies zenitals el mateix dia en el moment del seu pas pel meridià. Mitjançant observacions contemporànies al cap de Bona Esperança i a Berlín, es va trobar que la paral·laxi horitzontal mitjana de la Lluna era de 3.454,2"; d'aquí, la distància mitjana de la Lluna és aproximadament seixanta vegades el radi terrestre mitjà, o aproximadament 240.000 milles. Com que la paral·laxi és igual al radi de la Terra dividit per la distància de la Lluna, sota el mateix paral·lel de latitud, varia amb la distància de la Lluna a la Terra i demostra l'el·lipticitat de l'òrbita lunar; i quan la Lluna es troba a la seva

distància mitjana, varia amb els radis terrestres, demostrant així que la Terra no és una esfera.

Tot i que el mètode descrit és prou precís per trobar la paral·laxi d'un objecte tan proper com la Lluna, no serveix per al Sol, que és tan remot que el més petit error d'observació conduiria a un resultat fals; ara bé, gràcies als trànsits de Venus es pot evitar aquesta dificultat. Quan aquest planeta es troba als seus nodes, o a menys d' $1,25^\circ$ d'ells, és a dir, en el pla de l'eclíptica o gairebé, de vegades es veu passar per sobre del Sol com una taca. Si poguéssim imaginar que el Sol i Venus no tinguessin paral·laxi, la línia descrita pel planeta al seu disc i la durada del trànsit serien les mateixes per a tots els habitants de la terra; però com que el Sol no és tan remot que el semidiàmetre de la Terra no tingui una magnitud sensible quan es veu des del seu centre, la línia descrita pel planeta en el seu pas pel disc solar sembla estar més a prop o més lluny del seu centre en funció de la posició de l'observador, de manera que la durada del trànsit varia amb els diferents punts de la superfície terrestre on s'observa. Com que aquesta diferència de temps és un efecte de la paral·laxi, proporciona els mitjans per calcular-la a partir dels moviments coneguts de la Terra i Venus, pel mateix mètode que per als eclipsis de Sol. De fet, la relació de les distàncies de Venus i el Sol respecte a la Terra en el moment del trànsit es coneix

a partir de la teoria del seu moviment el·líptic; en conseqüència, s'obté la relació de les paral·laxis d'aquests dos cossos, que és inversament proporcional a les seves distàncies; i com que el trànsit dona la diferència de les paral·laxis, s'obté la del Sol. El 1769, la paral·laxi del Sol es va determinar mitjançant observacions d'un trànsit de Venus fetes a Wardhus, a Lapònia, i a Otaheite, al mar del Sud, sent aquesta última observació l'objecte del primer viatge de Cook. El trànsit va durar unes sis hores a Otaheite, i la diferència en la durada en aquestes dues estacions va ser de vuit minuts; a partir d'això es va trobar que la paral·laxi del Sol era de $8,72''$, un valor que, per altres consideracions, s'ha reduït posteriorment a $8,575''$. Amb aquest valor, la distància mitjana del Sol sembla ser d'un $95.996.000$ milles, o noranta-sis milions de milles aproximadament. Això es confirma per una desigualtat en el moviment de la Lluna que depèn de la paral·laxi del Sol i que quan es compara amb l'observació dona $8,6''$ per a la paral·laxi del Sol.

La paral·laxi de Venus es determina pels seus trànsits, la de Mart per observació directa. Per tant, les distàncies d'aquests dos planetes a la Terra es coneixen en radis terrestres i, en conseqüència, se'n poden calcular les distàncies mitjanes al Sol; i com que les relacions de les distàncies dels planetes al Sol es coneixen per la llei de

Kepler, les seves distàncies absolutes en milles es troben fàcilment.

Per molt lluny que sembli la Terra del Sol, n'és a prop en comparació amb Urà; aquest planeta no està a menys de 1.843 milions de milles de la lluminària que escalfa i anima el món; per a ell, situat a la vora del sistema, el Sol no ha de semblar gaire més gran que Venus per a nosaltres. La Terra ni tan sols ha de ser visible com un objecte telescòpic per a un cos tan remot; tanmateix, l'home, habitant de la Terra, s'alça més enllà de les vastes dimensions del sistema al qual pertany el seu planeta i assumeix el diàmetre de la seva òrbita com la base d'un triangle, el vèrtex del qual s'estén fins a les estrelles.

Per sublim que sigui la idea, aquesta suposició resulta ineficaç, ja que les posicions aparents de les estrelles fixes no canvien sensiblement per la revolució anual de la Terra; i amb l'ajuda derivada dels refinaments de l'astronomia moderna i els instruments més perfectes, encara és dubtós si s'ha detectat una paral·laxi sensible, fins i tot en el més proper d'aquests sols remots.¹⁵ Si una estrella fixa tingués la paral·laxi d'un segon, la seva distància al Sol seria de 20.500.000 milions de milles. A aquesta distància, no només l'òrbita terrestre es redueix fins a un punt, sinó que tot el sistema solar, quan es veu en el focus del telescopi més potent, podria estar cobert pel gruix del

fil d'una aranya. La llum, que vola a la velocitat de 200.000 milles per segon, trigaria tres anys i set dies a recórrer aquest espai; així doncs, una de les estrelles més properes podria haver-se encès o extingit més de tres anys abans que poguéssim ser conscients d'un esdeveniment tan poderós.¹⁶ Però aquesta distància ha de ser petita en comparació amb la del més remot dels cossos visibles al cel. Les estrelles fixes són sens dubte lluminoses com el Sol i, per tant, és probable que no estiguin més a prop les unes de les altres que el Sol ho està de la més propera. A la Via Làctia i a les altres nebuloses estrellades, algunes de les estrelles que ens semblen properes a les altres poden estar molt per darrere en la profunditat il·limitada de l'espai; fins i tot es pot suposar racionalment que estiguin situades milers de vegades més lluny: la llum, per tant, necessitaria milers d'anys per arribar a la Terra des d'aquestes miríades de sols, dels quals el nostre no és més que «el company tènue i remot».

Les masses dels planetes que no tenen satèl·lits es coneixen comparant les desigualtats que produeixen en els moviments de la Terra i entre ells, determinades teòricament, amb les mateixes desigualtats obtingudes per mitjà de l'observació, ja que la causa pertorbadora ha de ser necessàriament proporcional a l'efecte que produeix. Però com que les quantitats de matèria en dos planetes

primaris qualssevol estan en proporció directa als cubs de les distàncies mitjanes a les quals giren els seus satèl·lits i en proporció inversa als quadrats dels seus períodes, la massa del Sol i de qualsevol planeta que tingui satèl·lits es pot comparar amb la massa de la Terra. D'aquesta manera es calcula que la massa del Sol és 354.936 vegades més gran que la de la Terra; i aquesta és la causa de les grans pertorbacions de la Lluna i el ràpid moviment del perigeu i els nodes de la seva òrbita. Fins i tot Júpiter, el més gran dels planetes, és 1.070,5 vegades menor que el Sol. La massa de la Lluna es determina a partir de quatre fonts diferents: de la seva acció sobre l'equador terrestre, que ocasiona la rotació de l'eix de rotació, de la seva paral·laxi horitzontal, d'una desigualtat que produeix en la longitud del Sol i de la seva acció sobre les marees. Les tres primeres quantitats, calculades a partir de la teoria i comparades amb els seus valors observats, donen una massa igual a, respectivament, $\frac{1}{71}$, $\frac{1}{74,2}$ i $\frac{1}{69,2}$ parts de la de la Terra, que no difereixen gaire entre si; ara bé, de la seva acció en les marees, que proporciona el quart mètode, la seva massa sembla ser aproximadament la setanta-cinquena part de la de la Terra, un valor que no pot diferir gaire de la veritat.

Els diàmetres aparents del Sol, la Lluna i els planetes es determinen mitjançant mesures; per

tant, els seus diàmetres reals es poden comparar amb els de la Terra, ja que el diàmetre real d'un planeta és al diàmetre real de la Terra (8.000 milles) com el diàmetre aparent del planeta és al diàmetre aparent de la Terra vista des del planeta, és a dir, al doble de la paral·laxi del planeta. El diàmetre aparent mitjà del sol és de 1.920" i amb la paral·laxi solar de 8,65", es troba que el diàmetre del Sol és d'unes 888.000 milles; per tant, si el centre del Sol coincidís amb el centre de la Terra, el seu volum no només inclouria l'òrbita de la Lluna, sinó que s'estendria gairebé fins al doble d'aquesta distància, ja que la distància mitjana de la Lluna a la Terra és d'unes seixanta vegades el radi mitjà de la Terra o 240.000 milles; de manera que el doble de la distància de la Lluna és de 480.000 milles, que difereix poc del radi solar. El seu radi equatorial probablement no és gaire inferior a l'eix major de l'òrbita lunar.

El diàmetre de la Lluna és només de 2.160 milles, mentre que el diàmetre de Júpiter, de 88.000 milles, és incomparablement menor que el del Sol. El diàmetre de Plànetes no supera gaire les 71 milles, de manera que un habitant d'aquest planeta, en un dels nostres vagons de vapor, podria fer la volta al seu món en cinc o sis hores.

La forma oblata dels cossos celestes indica un moviment rotatori, i això s'ha confirmat, en la majoria dels casos, traçant punts a les seves

superfícies, des d'on s'han determinat els seus pols i temps de rotació. La rotació de Mercuri és desconeguda, a causa de la seva proximitat al Sol; i la dels nous planetes encara no s'ha determinat. El sol gira en vint-i-cinc dies i deu hores al voltant d'un eix que està orientat cap a un punt a mig camí entre l'estrella polar i Lira, amb el pla de rotació inclinat una mica més de 70° respecte al que gira la Terra. A partir de la rotació del Sol, hi ha moltes raons per creure que té un moviment progressiu en l'espai, tot i que la direcció a la qual tendeix encara és desconeguda; però com a conseqüència de la reacció dels planetes, descriu una petita òrbita irregular al voltant del centre d'inèrcia del sistema, sense desviar-se mai de la seva posició en més del doble del seu propi diàmetre, o unes set vegades la distància de la Lluna a la Terra.

El Sol i tots els seus acompanyants giren d'oest a est en uns eixos que romanen gairebé paral·lels a si mateixos en cada punt de la seva òrbita, i amb velocitats angulars que són sensiblement uniformes. Tot i que la uniformitat en la direcció de la seva rotació és una circumstància fins ara inexplicable en l'economia de la Natura, a partir del disseny i l'adaptació de totes les altres parts a la perfecció del conjunt és una coincidència tan remarkable que no pot ser accidental; i com que les revolucions dels planetes i satèl·lits també són

d'oest a est, és evident que ambdues han d'haver sorgit de les causes primitives que han determinat els moviments planetaris.

Els planetes més grans giren sobre sí mateixos en períodes més curts que els planetes més petits i la Terra; en conseqüència, la seva compressió és més gran i l'acció del Sol i dels seus satèl·lits provoca una nutació en els seus eixos i una precessió dels seus equinoccis semblant a la que s'obté a l'esferoide terrestre per l'atracció del Sol i la Lluna sobre la matèria prominent a l'equador. En comparar els períodes de les revolucions de Júpiter i Saturn amb els temps de la seva rotació, sembla que un any de Júpiter conté gairebé deu mil dels seus dies i el de Saturn, uns trenta mil dies saturnians.¹⁷

L'aspecte de Saturn no té equivalent en el sistema del món; està envoltat per un anell més brillant i tot que ell mateix i que sempre roman al pla del seu equador. Vist amb un telescopi prou bo, es pot apreciar que consisteix en dos anells concèntrics, dividits per una banda fosca. Segons les lleis de la mecànica, és impossible que aquest cos pugui mantenir la seva forma només per l'adhesió de les seves partícules; per força ha de girar amb una velocitat que generi una força centrífuga suficient per equilibrar l'atracció de Saturn. L'observació confirma la certesa d'aquests principis, i mostra que els anells giren al voltant del planeta

en 10 hores i mitja, valor que és considerablement inferior al temps que trigaria un satèl·lit a girar al voltant de Saturn a la mateixa distància.¹⁸ El seu pla està inclinat respecte a l'eclíptica en un angle de 31° i com a conseqüència d'aquesta obliqüitat en la posició sempre ens semblen el·líptics, però amb una excentricitat tan variable que fins i tot ocasionalment són com una línia recta traçada a través del planeta. Actualment, els eixos aparents dels anells es veuen en la relació de 1.000 a 160; i el 29 de setembre de 1832, el pla dels anells passarà pel centre de la Terra, quan només seran visibles amb instruments superiors i apareixeran com una fina línia que travessa el disc de Saturn. El primer de desembre del mateix any, el pla dels anells passarà pel centre del Sol.

Un resultat singular de la teoria és que els anells no podrien mantenir la seva estabilitat de rotació si fossin de gruix uniforme a tot arreu, ja que la més petita pertorbació en destruiria l'equilibri, cada cop més fins que finalment es precipitarien a la superfície del planeta. Els anells de Saturn han de ser, per tant, sòlids irregulars d'amplades desiguals a les diferents parts de la circumferència, de manera que els seus centres de gravetat no coincideixen amb els centres de les seves figures.

El professor Struve també ha descobert que el centre de l'anell no és concèntric amb el centre de

Saturn; l'interval entre la vora exterior del globus del planeta i la vora exterior de l'anell, és, per un costat, d'11,073", i per l'altre, d'11,288"; en conseqüència, hi ha una excentricitat del centre del globus respecte al centre de l'anell de 0,215".

Si els anells obeïssin forces diferents, no romandrien en el mateix pla, però la poderosa atracció de Saturn sempre els manté, a ells i als satèl·lits, en el pla del seu equador. Els anells, per la seva acció mútua i la del Sol i els satèl·lits, han d'oscil·lar al voltant del centre de Saturn i produir fenòmens de llum i ombra, els períodes dels quals s'estenen a molts anys.



Els períodes de rotació de la Lluna i els altres satèl·lits són iguals als temps de les seves revolucions, de manera que aquests cossos sempre mostren la mateixa cara cap als seus primaris; tanmateix, com que el moviment mitjà de la Lluna està sotmès a una desigualtat secular que finalment equivaldrà a moltes circumferències, si la rotació de la Lluna fos perfectament uniforme i no estigués afectada per les mateixes desigualtats, deixaria de contrarestar exactament el moviment de revolució i així la Lluna, en el transcurs de les eres, mostraria successivament i gradual tots els seus altres punts cap a la superfície de la

Terra. Però la teoria demostra que això no pot passar mai, perquè la rotació de la Lluna, tot i que no participa de les desigualtats periòdiques de la seva revolució, es veu afectada per les mateixes variacions seculars, de manera que els seus moviments de rotació i revolució al voltant de la Terra sempre s'equilibraran entre si i romandran iguals. Aquesta circumstància sorgeix de la forma de l'esferoide lunar, que té tres eixos principals de diferents longituds en angle recte entre si. La Lluna està aplanada als pols a causa de la seva força centrífuga, per tant, el seu eix polar és el menor; els altres dos es troben en el pla del seu equador, però el dirigit cap a la Terra és el més gran. L'atracció de la Terra, com si hagués estirat aquesta part de l'equador de la Lluna, porta constantment cap a nosaltres l'eix més gran, i en conseqüència el mateix hemisferi, cosa que fa que la seva rotació participi en les variacions seculars del seu moviment mitjà de revolució. Fins i tot si les velocitats angulars de rotació i revolució no haguessin estat ben equilibrades al començament del moviment de la Lluna, l'atracció de la Terra hauria dut l'eix més gran cap a la direcció de la línia que uneix els centres de la Terra i la Lluna, de manera que oscil·laria a cada costat d'aquesta línia de la mateixa manera que un pèndol oscil·la a cada costat de la vertical sota la influència de la gravitació.

No és perceptible cap libració d'aquest tipus, i com que la més petita pertorbació la faria evident, és evident que si la Lluna ha rebut mai l'impacte d'un cometa, la massa d'aquest últim hauria d'haver estat extremadament petita; si només hagués estat la centmil·lèsima part de la massa terrestre, hauria fet que la libració fos sensible. Existeix una libració similar en els moviments dels satèl·lits de Júpiter; però tot i que el cometa de 1767 i 1779 va passar pel mig d'ells, la seva libració encara roman insensible. És cert que la Lluna és susceptible de libracions segons la posició de l'espectador; quan surt, una part de la vora occidental del seu disc és visible i, en canvi, és invisible a la posta, i passa el contrari pel que fa a la seva vora oriental.¹⁹ També hi ha libracions derivades de les posicions relatives de la Terra i la Lluna en les seves respectives òrbites, però com que només són aparences òptiques, un hemisferi estarà eternament ocult a la Terra. Per la mateixa raó, la Terra, que ha de ser un objecte tan esplèndid per a un hemisferi lunar, quedarà per sempre oculta a l'altre. A causa d'aquestes circumstàncies, l'hemisferi més remot de la Lluna té el seu dia de quinze dies i una nit de la mateixa durada que ni tan sols està il·luminada per una lluna, mentre que el costat afavorit està il·luminat pel reflex de la Terra durant la seva llarga nit. Una lluna que mostri una superfície tretze vegades

més gran que la nostra, amb totes les varietats de núvols, terra i aigua apareixent successivament a la vista, seria un objecte esplèndid per a un viatger lunar en un desplaçament a les seves antípodes.

La gran alçada de les muntanyes lunars probablement té una influència considerable en els fenòmens del seu moviment, sobretot tenint en compte que la seva compressió és petita i la seva massa considerable.

En la corba que passa pels pols i en aquest diàmetre de la Lluna que sempre apunta a la Terra, la natura ha proporcionat un meridià permanent, al qual s'han referit els diferents punts de la seva superfície i les seves posicions s'han determinat amb tanta precisió com les de molts dels llocs més remarcables de la superfície del nostre globus.

La rotació de la Terra, que determina la durada del dia, es pot considerar un dels elements més importants del sistema del món. Serveix com a mesura del temps i forma la referència de comparació per a les revolucions dels cossos celestes, que pel seu augment o disminució proporcional aviat revelarien qualsevol canvi que poguessin patir. La teoria i l'observació coincideixen a l'hora de demostrar que, entre les innombrables vicissituds que prevalen al llarg de la creació, el període de la rotació diürna de la Terra és immutable. Un fluid, com observa el senyor Babbage, en caure

des d'un nivell superior a un d'inferior, porta amb ell la velocitat deguda a la seva revolució amb la Terra a una distància més gran del seu centre. Per tant, accelerarà, tot i que en un grau gairebé infinitesimal, la rotació diària de la Terra. La suma de tots aquests increments de velocitat, derivats del descens de tots els rius de la superfície terrestre, es faria perceptible amb el temps si la natura, pel procés d'evaporació, no elevés les aigües de tornada cap a les seves fonts; i així, de nou, allunyant la matèria a una distància més gran del centre, destrúis la velocitat generada per la seva caiguda prèvia; d'aquesta manera, el descens dels rius no afecta la rotació de la Terra. Les enormes masses projectades pels volcans des de l'equador fins als pols, i viceversa, sí que l'afectarien, però no hi ha proves d'aquesta mena de convulsions. L'acció pertorbadora de la Lluna i els planetes, que té un efecte tan poderós sobre la revolució de la Terra, no influeix de cap manera en la seva rotació: la fricció constant dels vents alisis a les muntanyes i els continents entre els tròpics no en destorba la velocitat, i la teoria també ho demostra si el mar formés una massa sòlida juntament amb la terra. Però tot i que aquestes circumstàncies siguin ineficients, una variació de la temperatura mitjana certament ocasionaria un canvi corresponent en la velocitat de rotació, ja que en la ciència de la dinàmica, és un principi en un

sistema de cossos o de partícules que giren al voltant d'un centre fix que el moment, és a dir, la suma dels productes de la massa de cadascuna per la seva velocitat angular i distància al centre, és una quantitat constant si el sistema no està alterat per cap causa externa. Ara, com que el nombre de partícules del sistema és el mateix independentment de la seva temperatura, quan les seves distàncies des del centre disminueixen, la seva velocitat angular ha d'augmentar perquè la quantitat precedent pugui romandre constant. D'això es dedueix que, com que el moment angular original amb què la Terra es va projectar a l'espai ha de romandre necessàriament igual, la més petita disminució de calor, en contraure l'esferoide terrestre, n'acceleraria la rotació i, en conseqüència, disminuiria la durada del dia. Malgrat l'augment constant de calor dels raigs solars, els geòlegs creuen, a partir de la naturalesa de les restes fòssils, que la temperatura mitjana del globus està disminuint.²⁰

L'alta temperatura de les mines, les aigües termals i, sobretot, els focs interns que han produït i encara causen tanta devastació al nostre planeta, indiquen un augment de la calor cap al seu centre. L'augment de la densitat dels estrats corresponents a la profunditat i la forma de l'esferoide, que la teoria assigna a una massa fluida en rotació, concorren a dur-nos cap a la idea que la

temperatura de la Terra era originalment tan alta que va reduir totes les substàncies de les quals es compon a un estat de fusió, i que, amb el pas dels segles, s'ha refredat fins al seu estat actual, que encara s'està refredant i que continuarà fent-ho fins que tota la massa arribi a la temperatura del medi en què es troba o, més aviat, a un estat d'equilibri entre aquesta temperatura, el poder refrigerant de la seva pròpia radiació i l'efecte escalfador dels raigs solars. Però fins i tot si aquesta causa és suficient per produir els efectes observats, ha de ser extremadament lenta en el seu funcionament, ja que, com que la rotació de la Terra és una mesura dels períodes dels moviments celestes, s'ha demostrat que si la durada del dia hagués disminuït en una tres-centèsima part de segon des de les observacions d'Hiparc fa dos mil anys, hauria disminuït l'equació secular de la lluna en 4,4". Per tant, no hi ha cap dubte que la temperatura mitjana de la Terra no pot haver variat sensiblement durant aquest temps; en aquest cas, si les aparences exhibides pels estrats es deuen a una disminució de la temperatura interna, bé són una mostra dels immensos períodes necessaris per produir canvis geològics en comparació amb els quals dos mil anys no són res o bé la temperatura mitjana de la Terra havia arribat a un estat d'equilibri abans d'aquestes observacions. Per molt forta que sigui la indicació de la

fluïdesa primitiva de la Terra, com que no hi ha cap prova directa, només es pot considerar una hipòtesi molt probable; ara bé, un dels filòsofs i escriptors elegants més profunds dels temps moderns ha trobat, en la variació secular de l'excentricitat de l'òrbita terrestre, una causa evident de la disminució de la temperatura. Aquest autor consumat, en assenyalar les dependències mútues dels fenòmens, diu: «És evident que la temperatura mitjana de tota la superfície del globus, en la mesura que es manté per l'acció del Sol a un valor més alt que el que tindria si el Sol s'apagués, ha de dependre de la quantitat mitjana dels raigs solars que rep, o, el que ve a ser el mateix, de la quantitat total rebuda en un temps invariable donat; i com que la durada de l'any és immutable en totes les fluctuacions del sistema planetari, se segueix que la quantitat total de radiació solar determinarà, *coeteris paribus*, el clima general de la Terra. Ara bé, no és difícil demostrar que aquesta quantitat és inversament proporcional a l'eix menor de l'el·lipse descrita per la Terra al voltant del Sol, que es considera lentament variable; i que, per tant, com que l'eix major roman, pel que sabem, constant, i l'òrbita és realment molt propera a un cercle, i en conseqüència l'eix menor està en augment, la quantitat mitjana anual de radiació solar rebuda per tota la Terra ha d'estar disminuint. Tenim, per tant, una causa real evident per

explicar el fenomen». ²¹ Els límits de la variació en l'excentricitat de l'òrbita terrestre són desconeguts, però si la seva el·lipticitat ha estat mai tan gran com la de l'òrbita de Mercuri o de Plànetes, la temperatura mitjana de la Terra deu haver estat sensiblement més alta del que és actualment; és impossible de dir si era prou gran per fer que els nostres climes septentrionals fossin aptes per al creixement de plantes tropicals i per a ser llar de l'elefant i altres habitants de la zona tòrrida.

La quantitat relativa de calor rebuda per la Terra en diferents moments durant una sola revolució varia amb la posició del perigeu de la seva òrbita, que completa una revolució tròpica en 20.935 anys. L'any 1250 de la nostra era, i 29.653 anys abans, el perigeu coincidia amb el solstici d'estiu; en ambdós períodes la Terra estava més a prop del Sol durant l'estiu i més lluny d'ell a l'hivern que en qualsevol altra posició dels àpsides: els extrems de temperatura, per tant, devien ser més grans que en l'actualitat. Ara bé, com que l'òrbita terrestre era probablement més el·líptica en èpoques llunyanes, la calor dels estius devia ser molt gran, tot i que possiblement quedava compensada pel rigor dels hiverns; en qualsevol cas, cap d'aquests canvis afecta la durada del dia.

A partir de les petxines marines que es troben als cims de les muntanyes més altes, i a gairebé totes les parts del globus, sembla que s'han elevat

immensos continents per sobre de l'oceà, cosa que ens duu a pensar que també ha d'haver-ne engolit d'altres. Aquesta catàstrofe seria ocasionada per una variació en la posició de l'eix de rotació a la superfície de la Terra; ja que els mars que acaben al nou equador abandonarien algunes parts del globus i n'aclapararien d'altres.

Però la teoria demostra que ni la nutació ni la precessió ni cap de les forces pertorbadores que afecten el sistema tenen la més petita influència sobre l'eix de rotació, que manté una posició permanent respecte a la superfície si la Terra no es veu pertorbada en la seva rotació per alguna causa externa, com la col·lisió d'un cometa, fet que pot haver ocorregut en la immensitat del temps. Aleshores, de fet, l'equilibri només s'hauria pogut restaurar amb el desplaçament dels mars cap al nou equador, cosa que continuarien fent fins que la superfície fos a tot arreu perpendicular a la direcció de la gravetat. Ara bé, és probable que aquesta acumulació de les aigües no fos suficient per restaurar l'equilibri si el desequilibri inicial hagués estat gran, ja que la densitat mitjana del mar és només aproximadament una cinquena part de la densitat mitjana de la Terra, i la profunditat mitjana fins i tot de l'oceà Pacífic no és superior a quatre milles, mentre que el radi equatorial de la Terra supera el radi polar en vint-i-cinc o trenta milles; en conseqüència, la

influència del mar sobre la direcció de la gravetat és molt petita, i com que sembla que un gran canvi en la posició dels eixos és incompatible amb la llei de l'equilibri, els fenòmens geològics s'han d'atribuir a una causa interna. Així, enmig de les poderoses revoltes que han escombrat innombrables races d'éssers organitzats de la terra, que han alçat planures i han soterrat muntanyes a l'oceà, la rotació de la terra i la posició de l'eix a la seva superfície només han experimentat lleugeres variacions. ²²

No hi ha cap dubte que els estrats augmenten en densitat des de la superfície de la Terra fins al seu centre, cosa que fins i tot es demostra per les desigualtats lunars, i a partir de la mesura dels arcs del meridià i les longituds del pèndol dels segons es manifesta que els estrats són el·líptics i concèntrics. Això certament hauria passat si la Terra hagués estat originalment fluida, ja que les parts més denses haurien d'haver-se enfonsat cap al centre a mesura que tota la massa s'acostava a un estat d'equilibri, tot i que l'enorme pressió de la massa que hi descansa és causa suficient per a aquests fenòmens. El professor Leslie observa que l'aire comprimit en la cinquantesena part del seu volum té una elasticitat augmentada cinquanta vegades; si continués contraient-se a aquest ritme, adquiriria, pel seu propi pes, la densitat de l'aigua a una profunditat de trenta-quatre

milles. Però l'aigua mateixa tindria la seva densitat duplicada a la profunditat de noranta-tres milles i fins i tot assoliria la densitat del mercuri a una profunditat de 362 milles. En descendir, per tant, cap al centre a través de 4.000 milles, la condensació dels materials ordinaris superaria qualsevol concepció. En qualsevol cas, l'observació astronòmica no confirma una densitat tan extrema. Així doncs, podria semblar que el nostre planeta ha de tenir una estructura força cavernosa, i que trepitgem una escorça o closca, el gruix de la qual manté una proporció molt petita amb el diàmetre de l'esfera. També és possible que aquesta gran condensació a les regions centrals es pugui contrarestar per l'augment de l'elasticitat a causa d'una temperatura molt alta. El doctor Young afirma que l'acer es comprimiria en una quarta part i la pedra en una vuitena part del seu volum al centre de la Terra. Tanmateix, encara desconeixem les lleis de compressió dels cossos sòlids més enllà d'un cert límit, tot i que a partir dels experiments del senyor Perkins semblen ser capaços d'un grau de compressió més gran del que generalment s'ha suposat.²³



Sembla, doncs, que l'eix de rotació és invariable a la superfície de la Terra, i l'observació

mostra que, si no fos per l'acció del Sol i la Lluna sobre la matèria a l'equador, romandria paral·lel a si mateix en tots els punts de la seva òrbita.

L'atracció d'un cos exterior no només atrau un esferoide cap a ell, sinó que, com que la força varia inversament al quadrat de la distància, li dona un moviment al voltant del seu centre de gravetat, tret que el cos atractor estigui situat en la prolongació d'un dels eixos de l'esferoide.

El pla de l'equador està inclinat respecte al pla de l'eclíptica en un angle d'uns $23^{\circ} 28'$, i la inclinació de l'òrbita lunar sobre aquest és de gairebé 5° ; en conseqüència, a partir de la figura aixafada de la Terra, l'acció del Sol i la Lluna, obliqua i desigual sobre les diferents parts de l'esferoide terrestre, desvia el pla de l'equador de la seva direcció i l'obliga a moure's d'est a oest, de manera que els punts equinoccials tenen un lent moviment retrògrad en el pla de l'eclíptica d'uns $50,412''$ anuals. La tendència directa d'aquesta acció seria fer coincidir els plans de l'equador i de l'eclíptica, però a conseqüència de la rotació de la Terra, la inclinació dels dos plans roman constant, ja que una baldufa que gira conserva la mateixa inclinació respecte al pla horitzontal. Si la Terra fos esfèrica, aquest efecte no es produiria i els equinoccis sempre correspondrien als mateixos punts de l'eclíptica, almenys pel que fa a aquest tipus d'acció. Ara bé, hi ha una altra causa

totalment diferent que opera sobre aquest moviment, que ja s'ha esmentat. L'acció dels planetes entre ells i sobre el Sol ocasiona una variació molt lenta en la posició del pla de l'eclíptica, que n'afecta la inclinació sobre el pla de l'equador i imparteix als punts equinoccials un moviment lent però directe sobre l'eclíptica de 0,312" anuals, completament independent de la figura de la Terra (seria el mateix si fos una esfera). Així, el Sol i la Lluna, en moure el pla de l'equador, fan que els punts equinoccials retrogradin sobre l'eclíptica, mentre que els planetes, en moure el pla de l'eclíptica, els imparteixen un moviment directe, però força menor que el primer; en definitiva, la diferència entre els dos és la precessió mitjana, que, tant per teoria com per observació, es demostra que és d'uns 50,1" anuals. Com que les longituds de totes les estrelles fixes augmenten en aquesta quantitat, els efectes de la precessió es detecten amb facilitat, i així foren descoberts per Hiparc l'any 128 abans de Crist, a partir d'una comparació de les seves pròpies observacions amb les de Timocaris fetes 155 anys abans. En l'època d'Hiparc, l'entrada del Sol a la constel·lació d'Àries marcava el començament de la primavera, però des de llavors els punts equinoccials han retrocedit 30°, de manera que les constel·lacions anomenades *signes del zodíac* ara es troben a una distància considerable de les

divisions de l'eclíptica que duen els seus noms. Amb el desplaçament de 50,1" anuals, els punts equinoccials completaran una revolució sencera en 25.868 anys, però com que la precessió varia en diferents segles, l'extensió d'aquest període es modificarà lleugerament. Com que el moviment del Sol és directe i el dels punts equinoccials és retrògrad, empra menys temps a tornar a l'equador que a arribar a les mateixes estrelles; així, per obtenir la longitud de l'any sideri, s'ha d'augmentar l'any tròpic de 365,242264 dies amb el temps que triga a recórrer un arc de 50,1". Per simple proporció és la 0,014119a part d'un dia, de manera que l'any sideri és de 365,256383 dies.²⁴

La precessió anual mitjana està sotmesa a una variació secular, ja que, tot i que el canvi en el pla de l'eclíptica, que és l'òrbita del Sol, és independent de la forma de la Terra, en portar el Sol, la Lluna i la Terra a diferents posicions relatives d'una època a l'altra, altera l'acció directa dels dos primers sobre la matèria prominent a l'equador. Per aquest motiu, el moviment de l'equinocci és més gran en 0,455" ara que no pas a l'època d'Hiparc i, en conseqüència, la durada real de l'any tròpic és aproximadament 4,154" més curta que en aquell moment. El canvi màxim que pot experimentar per aquesta causa és de 43".

Aquest és el moviment secular dels equinoccis, però de vegades augmenta i de vegades

disminueix per variacions periòdiques, els períodes de les quals depenen de les posicions relatives del Sol i la Lluna respecte a la Terra i són ocasionades per l'acció directa d'aquests cossos sobre l'equador. El doctor Bradley va descobrir que per aquesta acció la Lluna fa que el pol de l'equador descriu una petita el·lipse al cel, els diàmetres de la qual són de 16" i 20". El període d'aquesta variació és de dinou anys, el temps que triguen els nodes de l'òrbita lunar en completar una revolució. El Sol provoca una petita variació en la trajectòria d'aquesta el·lipse: recorre el seu període en mig any. Aquesta nutació en l'eix de la Terra afecta tant la precessió com l'obliquïtat amb petites variacions periòdiques, però a conseqüència de la variació secular en la posició de l'òrbita terrestre, que es deu principalment a l'energia pertorbadora de Júpiter sobre la Terra, l'obliquïtat de l'eclíptica disminueix anualment en 0,52109". Pel que fa a les estrelles fixes, aquesta variació en el transcurs de les edats pot ascendir a deu o onze graus, però l'obliquïtat de l'eclíptica respecte a l'equador no pot variar mai més de dos o tres graus, ja que l'equador seguirà en certa mesura el moviment de l'eclíptica.

És evident que les posicions de tots els cossos celestes es veuen afectades per la precessió i la nutació i, per tant, totes les observacions que se'n

facin s'han de corregir tenint en compte aquestes desigualtats.



Les densitats dels cossos són proporcionals a les seves masses dividides pels seus volums; per tant, si se suposa que el Sol i els planetes són esferes, els seus volums seran com els cubs dels seus diàmetres. Ara bé, els diàmetres aparents del Sol i la Terra a la seva distància mitjana són 1922" i 17,08", mentre que la massa de la Terra és $\frac{1}{354936}$ de la del Sol pres com a unitat; per tant, es dedueix que la Terra és gairebé quatre vegades més densa que el Sol. Aquest cos és tan gran que la seva força atractiva faria que els cossos caiguessin uns 450 peus en un segon; en conseqüència, si fos habitable per a éssers humans, no es podrien moure, ja que el seu pes seria trenta vegades més gran que aquí. Un home de mida moderada pesaria unes dues tones a la superfície de la nostra estrella. Al contrari, a la superfície dels quatre nous planetes seríem tan lleugers que fora impossible mantenir-nos-hi drets a causa de l'excés de la nostra força muscular, ja que un home només pesaria unes poques lliures. Tots els planetes i satèl·lits semblen tenir menys densitat que la Terra. D'altra banda, els moviments dels satèl·lits de Júpiter mostren que la seva densitat

augmenta cap al seu centre, mentre que les irregularitats singulars en la forma de Saturn i la gran compressió de Mart demostren que l'estructura interna d'aquests dos planetes és molt lluny de ser uniforme.

L'astronomia ha estat d'utilitat immediata i essencial per proporcionar estàndards invariables que ens permeten mesurar la durada, la distància, la magnitud i la velocitat. El dia sideri, mesurat segons el temps transcorregut entre dos trànsits consecutius de qualsevol estrella pel mateix meridià, i l'any sideri són unitats immutables amb les quals podem comparar tots els grans períodes de temps. Per la seva banda, les oscil·lacions del pèndol isòcron en mesuren les porcions més petites. Només amb aquests estàndards invariables podem avaluar els canvis lents que altres elements del sistema poden haver experimentat al llarg dels segles.

Els retorns del Sol al mateix meridià i al mateix equinocci o solstici s'han adoptat universalment com a mesura dels nostres dies i anys civils. El dia solar o astronòmic és el temps que transcorre entre dos migdies o mitjanits consecutius; en conseqüència, és més llarg que el dia sideri, a causa del moviment propi del Sol durant una revolució de l'esfera celeste; però com que el Sol es mou amb més rapidesa a l'hivern que al solstici d'estiu, el dia astronòmic s'aproxima més al dia sideri a

l'estiu que a l'hivern. L'obliquïtat de l'eclíptica també n'afecta la durada, ja que en els equinoccis l'arc de l'equador és menor que l'arc corresponent de l'eclíptica i en els solsticis, més gran. Per tant, el dia astronòmic disminueix en el primer cas i augmenta en el segon. Si el Sol es moguéss de manera uniforme a l'equador a una velocitat de 59' 8,3" cada dia, els dies solars serien tots iguals; per tant, el temps que es calcula per l'arribada d'un sol imaginari al meridià, o d'un que se suposa que es mou a l'equador, es denomina *temps solar mitjà*, i és el que donen els rellotges de la vida quotidiana; quan es calcula per l'arribada del sol real al meridià és el *temps aparent*, com el que donen els rellotges de sol. La diferència entre el temps que mostra un rellotge mecànic i un de sol és l'*equació del temps* que es pot trobar a l'*Almanac Nàutic*, i de vegades arriba a setze minuts. El temps aparent i el temps mitjà coincideixen quatre vegades l'any.

Els astrònoms comencen el dia al migdia, però en el càlcul comú el dia comença a mitjanit. A Anglaterra es divideix en vint-i-quatre hores, que es compten per dotze i dotze, però a França, els astrònoms, adoptant la divisió decimal, divideixen el dia en deu hores, l'hora en cent minuts i el minut en cent segons, a causa de la facilitat de càlcul i d'acord amb el seu sistema de pesos i mesures. Aquesta subdivisió no s'utilitza a la vida

quotidiana ni s'ha adoptat en cap altre país, tot i que els seus escriptors científics encara utilitzen aquesta divisió del temps. La durada mitjana del dia, tot i que determinada amb precisió, no és suficient ni per als propòsits de l'astronomia ni per a la vida civil. La durada de l'any és assenyalada per la natura com a mesura de períodes llargs, però la incommensurabilitat que existeix entre la durada del dia i les revolucions del Sol fa que sigui difícil ajustar l'estimació d'ambdós en nombres enters. Si la revolució del Sol es completés en 365 dies, tots els anys tindrien exactament el mateix nombre de dies i començarien i acabarien amb el Sol al mateix punt de l'eclíptica, però com que la revolució del Sol inclou la fracció d'un dia, un any civil i una revolució del Sol no tenen la mateixa durada. Com que aquesta fracció és gairebé la quarta part d'un dia, quatre anys són gairebé iguals a quatre revolucions del Sol, de manera que l'addició d'un dia supernumerari cada quatre anys gairebé compensa la diferència; ara bé, amb el pas del temps cal una correcció addicional, perquè la fracció és inferior a la quarta part d'un dia.

El període de set dies, amb diferència la divisió del temps més permanent i el monument més antic del coneixement astronòmic, va ser utilitzat pels bramans a l'Índia amb les mateixes denominacions que nosaltres, i es trobava igualment als calendaris dels jueus, egipcis, àrabs i assiris. Ha

sobreviscut a la caiguda dels imperis i ha existit entre totes les generacions successives, prova del seu origen comú.

La lluna nova immediatament posterior al solstici d'hivern de l'any 707 des de la fundació de Roma es va convertir en el dia 1 de gener del primer any de Cèsar; el 25 de desembre del seu 45è any es considera la data del naixement de Crist, i es jutja que el 46è any de Cèsar és el primer de la nostra era. L'any precedent és anomenat primer any abans de Crist pels cronòlegs, però els astrònoms l'anomenen any 0. L'any astronòmic comença el 31 de desembre a migdia i la data d'una observació expressa els dies i les hores que realment han transcorregut des d'aquell moment.

Algunes eres astronòmiques remarcables estan determinades per la posició de l'eix major de l'el·lipse solar. Movent-se a un ritme de 61,906" anuals, realitza una revolució tròpica en 20.935 anys. Va coincidir amb la línia dels equinoccis 4.000 o 4.089 anys abans de l'era cristiana, aproximadament el temps que els cronòlegs assignen per a la creació de l'home. L'any 6485 l'eix major tornarà a coincidir amb la línia dels equinoccis, però aleshores el perigeu solar coincidirà amb l'equinocci de primavera, mentre que en la creació de l'ésser humà va coincidir amb l'equinocci de tardor. L'any 1250 l'eix major era

perpendicular a la línia dels equinoccis i aleshores el perigeu solar va coincidir amb el solstici d'hivern i l'apogeu, amb el solstici d'estiu. Per aquest motiu, Laplace va proposar l'any 1250 com a època universal i que l'equinocci de primavera d'aquell any fos el primer dia del primer any.²⁵

Les variacions en les posicions de l'el·lipse solar ocasionen canvis corresponents en la durada de les estacions. En la seva posició actual, la primavera és més curta que l'estiu i la tardor més llarga que l'hivern; i mentre el perigeu solar continuï com és ara, entre el solstici d'hivern i l'equinocci de primavera, el període que inclou la primavera i l'estiu serà més llarg que el que inclou la tardor i l'hivern: en aquest segle la diferència és d'uns set dies. Aquests intervals seran iguals cap a l'any 6485, quan el perigeu arribi a l'equinocci de primavera. Si l'òrbita terrestre fos circular, les estacions serien iguals; les seves diferències sorgeixen de l'excentricitat de l'òrbita terrestre, per petita que sigui, però els canvis són tan graduals que són imperceptibles en el curt espai de la vida humana.



No hi ha cap circumstància en tota la ciència de l'astronomia que desperti un interès més

profund que la seva aplicació a la cronologia. «Nacions senceres», diu Laplace, «han estat escombrades de la terra, amb la seva llengua, les seves arts i les seves ciències, i només han deixat masses informes de ruïnes per marcar el lloc on s'alçaven ciutats poderoses; la seva història, amb l'excepció d'unes poques tradicions dubtoses, s'ha perdut; tot i així, la perfecció de les seves observacions astronòmiques n'assenyala l'antiguitat, fixa els períodes de la seva existència i demostra que fins i tot en aquella època primerenca van assolir un progrés considerable en la ciència».

Ara podem calcular amb gran precisió l'estat antic del cel i, comparant els resultats del càlcul amb observacions antigues, es pot verificar el període exacte en què es van fer i si és correcte, o, si és fals, se'n pot detectar l'error. Si la data és precisa i l'observació és bona, verificarà l'exactitud de les taules modernes i mostrarà a quants segles es poden estendre, sense por de cometre errors. Uns quants exemples ens serviran per assenyalar la importància d'aquest tema.

Als solsticis, el Sol es troba a la seva distància màxima respecte a l'equador, per tant, la seva declinació en aquells moments és igual a l'obliquïtat de l'eclíptica, que antigament es determinava a partir de la longitud meridiana de l'ombra de l'estil d'un rellotge de sol el dia del solstici. Sabem que les longituds de l'ombra meridiana als

solsticis d'estiu i d'hivern es van observar a la ciutat de Layang, a la Xina, 1.100 anys abans de l'era cristiana, a partir de les quals es coneixen les distàncies del Sol respecte al zenit a la ciutat de Layang. La meitat de la suma d'aquestes distàncies zenitals determina la latitud, i la meitat de la seva diferència dona l'obliquïtat de l'eclíptica en l'època d'observació; com que es coneix la llei de variació de l'obliquïtat, s'ha verificat tant el temps com el lloc de les observacions mitjançant càlculs a partir de taules modernes. Així doncs, està clar que els xinesos havien fet alguns avenços en la ciència de l'astronomia en aquell període primerenc; tota la cronologia xinesa es basa en les observacions d'eclipsis, que proven l'existència d'aquell imperi durant més de 4.700 anys.²⁶

D'altra banda, a partir de l'acceleració de la Lluna, Laplace va demostrar que l'època de les taules lunars dels indis, que Bailly situava cap a uns 3.000 anys abans de l'era cristiana, no era més antiga que l'època de Ptolemeu. La gran desigualtat de Júpiter i Saturn, el cicle dels quals abasta 929 anys, és peculiarment adequada per marcar la civilització d'un poble. Els indis havien determinat els moviments mitjans d'aquests dos planetes en aquella part dels seus períodes en què el moviment mitjà aparent de Saturn mostra la màxima lentitud i el de Júpiter, la màxima

rapidesa; els anys en què va succeir això van ser el 3102 abans de l'era cristiana i el 1491 després.

Els retorns dels cometes als seus perihelis poden marcar l'estat actual de l'astronomia per a les èpoques futures.

Les posicions de les estrelles fixes es veuen afectades per la precessió dels equinoccis; i com que es coneix la llei d'aquesta variació, es poden calcular les seves posicions en qualsevol moment. Ara bé, Eudox, un contemporani de Plató, esmenta una estrella situada al pol de l'equador, i a partir dels càlculs sembla que fa uns 3.000 anys χ Draconis no estava gaire lluny d'aquella posició; ara bé, com que Eudox va viure fa només uns 2.150 anys, devia haver descrit un estat anterior del cel, suposadament el mateix que va ser determinat per Quiró cap a l'època del setge de Troia. Totes les circumstàncies coincideixen a demostrar que l'astronomia es va cultivar a les èpoques més reculades de l'antiguitat.²⁷

El coneixement de l'astronomia condueix a la interpretació dels caràcters jeroglífics, ja que es troben sovint signes astronòmics als monuments de l'antic Egipte, que probablement eren utilitzats pels sacerdots per registrar dates. Al sostre del pòrtic d'un temple entre les ruïnes de Dendera, hi ha una llarga filera de figures d'homes i animals, entre les quals hi ha els dotze signes del zodíac, col·locats segons el moviment del Sol: és

probable que la primera figura de la processó representi el començament de l'any. Ara bé, el primer és el lleó com si sortís del temple; i com que és ben sabut que l'any agrícola dels egipcis començava al solstici d'estiu, l'època de les inundacions del Nil, si la hipòtesi anterior és certa, el solstici en el moment en què es va construir el temple devia haver succeït a la constel·lació del Lleó; però com que el solstici ara passa a $21^{\circ} 6'$ al nord de la constel·lació dels Bessons, és fàcil calcular que el zodíac de Dandara devia fer-se fa 4.000 anys.²⁸

L'autora va tenir ocasió de presenciar un exemple d'aquesta aplicació tan interessant de l'astronomia en determinar la data d'un paper enviat des d'Egipte pel senyor Salt, en les investigacions jeroglífiques del difunt doctor Thomas Young, les profundes i variades adquisicions del qual honren no només el seu país, sinó també l'època en què va viure. El manuscrit es va trobar en el sarcòfag d'una mòmia i va resultar ser un horòscop de l'època de Ptolemeu; la seva antiguitat es va determinar a partir de la configuració del cel en el moment de la seva confecció.



La forma de la Terra proporciona un criteri de pesos i mesures per als propòsits ordinaris

de la vida, així com per a la determinació de les masses i distàncies dels cossos celestes. La longitud del pèndol que oscil·la en segons a la latitud de Londres forma l'estàndard de la mesura de longitud britànica. El capità Kater va determinar la seva longitud oscil·lant en el buit a la temperatura de 62 graus Fahrenheit, i reduïda al nivell del mar, en parts de la iarda estàndard imperial, en 39,1387 polzades. El pes d'una polzada cúbica d'aigua a la temperatura de 62 graus Fahrenheit, baròmetre 30, també es va determinar en parts de la lliura troy imperial, d'on es dedueix un estàndard tant de pes com de capacitat.

Els francesos han adoptat el metre com a unitat de mesura lineal, que és igual a la deu milio-nèsima part del quadrant del meridià que passa per Formentera i Greenwich, el punt mitjà del qual es troba gairebé al quaranta-cinquè grau de latitud. Si els estàndards nacionals dels dos països es perdessin en les vicissituds dels afers humans, tots dos es podrien recuperar, ja que es deriven de criteris naturals que es presumeixen invariables. La longitud del pèndol es trobaria amb més facilitat que el metre, però com que cap mesura és matemàticament exacta, un error en l'estàndard original pot finalment esdevenir sensible en mesurar una gran extensió, mentre que l'error que necessàriament ha de sorgir en mesurar el quadrant del meridià es fa totalment insensible

per la subdivisió en prendre la seva deu milionèsima part.

Els francesos han adoptat la divisió decimal no només en temps, sinó també en els seus graus, pesos i mesures, cosa que ofereix una gran facilitat en el càlcul. No ha estat adoptada per cap altre poble, tot i que res fora més desitjable que totes les nacions coincidissin en emprar la mateixa divisió i estàndards, no només per comoditat, sinó perquè ofereixen una idea més definida de les quantitats. És singular que la divisió decimal actual, de graus, pesos i mesures, s'utilitzés a la Xina fa 4.000 anys; i que, en l'època en què Ibn Yunus va fer les seves observacions al Caire, cap a l'any 1000, els àrabs tenien el costum d'emprar les oscil·lacions del pèndol en les seves observacions astronòmiques.



Un dels efectes més immediats i sorprenents d'una força gravitatòria externa a la Terra és l'ascens i descens alternatiu de la superfície del mar dues vegades en el transcurs d'un dia lunar, o 24 h 50 min 48 s de temps solar mitjà. Com que depèn de l'acció del Sol i la Lluna, es troba entre els problemes astronòmics més difícils i menys satisfactoris, amb diferència. La forma de la superfície de l'oceà en equilibri, quan gira amb la

Terra al voltant del seu eix, és un el·lipsoide aplanat als pols, però l'acció del Sol i de la Lluna, sobretot d'aquesta última, pertorba l'equilibri de l'oceà.

Si la Lluna atragués el centre de gravetat de la Terra i totes les seves partícules amb forces iguals i paral·leles, tot el sistema de la Terra i les aigües que la cobreixen cediria a aquestes forces amb un moviment comú i l'equilibri dels mars romandria intacte. La diferència de les forces i la desigualtat de les seves direccions són les úniques que pertorben l'equilibri. L'experiència diària, així com el raonament mecànic estricte, demostra que si diverses ones o oscil·lacions són excitades en un fluid per forces diferents, cadascuna segueix el seu curs i té el seu efecte independentment de la resta. Ara bé, en les marees hi ha tres tipus diferents d'oscil·lacions, que depenen de causes diferents, que produeixen els seus efectes independentment les unes de les altres i que, per tant, es poden estimar per separat.

Les oscil·lacions del primer tipus, que són molt petites, són independents de la rotació de la Terra, i com que depenen del moviment del cos pertorbador en la seva òrbita, són de períodes llargs. El segon tipus d'oscil·lacions depèn de la rotació de la Terra i, per tant, el seu període és gairebé d'un dia. Les oscil·lacions del tercer tipus depenen d'un angle igual al doble de la rotació

angular de la Terra i, en conseqüència, es produeixen dues vegades en vint-i-quatre hores.

Les primeres no presenten cap interès particular i són extremadament petites, però la diferència de dues marees consecutives depèn de les segones. En el moment dels solsticis, aquesta diferència que, segons la teoria de Newton hauria de ser molt gran, és difícilment perceptible a les nostres costes. Laplace ha demostrat que aquesta discrepància prové de la profunditat del mar, i que si la profunditat fos uniforme, no hi hauria cap diferència en les marees consecutives si no fos per les circumstàncies locals; per tant, com que aquesta diferència és extremadament petita, el mar, considerat en una gran extensió, ha de tenir una profunditat gairebé uniforme, és a dir, hi ha una certa profunditat mitjana respecte a la qual la desviació no és gran. Es creu que la profunditat mitjana de l'oceà Pacífic és d'unes quatre milles i la de l'Atlàntic, de només tres. A partir de les fórmules que determinen la diferència de les marees consecutives, també es demostra que la precessió dels equinoccis i la nutació de l'eix terrestre són les mateixes que si el mar formés una massa sòlida amb la terra.

El tercer tipus d'oscil·lacions són les marees semidiürnes, tan notables a les nostres costes; són ocasionades per l'acció combinada del Sol i la Lluna, però com que l'efecte de cadascuna és

independent de l'altra, es poden considerar per separat. En aquestes marees semidiürnes hi ha dos fenòmens que cal distingir especialment, un que passa dues vegades al mes i l'altre, dues vegades a l'any.

El primer fenomen és que les marees augmenten molt a les sizígies, és a dir, en el moment de la lluna nova i la lluna plena. En ambdós casos, el Sol i la Lluna es troben al mateix meridià, ja que quan la Lluna és nova estan en conjunció i quan és plena, en oposició. En cadascuna d'aquestes posicions, la seva acció es combina per produir les marees més altes o vives sota aquell meridià, i les més baixes en aquells punts que es troben a 90° de distància. S'observa que com més amunt puja el mar durant la plenamar, més baix és durant la baixamar. Les marees mortes es produeixen quan la Lluna està en quadratura, i no puguen ni baixen tant com les marees vives. Aquestes augmenten molt quan la Lluna està en el perigeu i és evident que han de passar dues vegades al mes, ja que en aquest temps la Lluna és una vegada nova i una vegada plena.

El segon fenomen de les marees és l'augment que es produeix en el moment dels equinoccis quan la declinació del Sol és igual a zero, cosa que passa dues vegades cada any. Les marees més grans tenen lloc quan hi ha Lluna nova o plena prop dels equinoccis, mentre la Lluna es troba al

perigeu. La inclinació de l'òrbita de la Lluna respecte a l'eclíptica és de $5^{\circ} 9'$ i, per tant, en els equinoccis l'acció de la Lluna augmentaria si el seu node coincidís amb el seu perigeu. Els vents equinoccials sovint eleven aquestes marees a una gran alçada. A més d'aquestes variacions notables, n'hi ha d'altres derivades de la declinació de la Lluna, que té una gran influència en el flux i reflux de les aigües.

Tant l'altura com el moment de la plenamar canvien perpètuament; per tant, per resoldre el problema, cal determinar les altures a les quals pugen, els moments en què es produeixen i les variacions diàries.

Els moviments periòdics de les aigües de l'oceà calculats a partir de la hipòtesi d'un el·lipsoide de revolució completament cobert pel mar són molt lluny de concordar amb l'observació; això es conseqüència de les grans irregularitats de la superfície terrestre (que només està parcialment coberta pel mar), de la varietat de les profunditats de l'oceà, de la manera com s'estén sobre la terra, de la posició i la inclinació de les costes, dels corrents i de la resistència que troben les aigües; causes, en conjunt, que són impossibles d'estimar però que modifiquen les oscil·lacions de la gran massa oceànica. Tanmateix, enmig de totes aquestes irregularitats, el flux i reflux del mar mantenen una proporció suficient amb les forces

que els produeixen per indicar-ne la naturalesa i verificar la llei de l'atracció del Sol i la Lluna sobre el mar. Laplace observa que la investigació d'aquestes relacions entre causa i efecte no és menys útil en filosofia natural que la solució directa de problemes, ja sigui per demostrar l'existència de les causes o per traçar-ne les lleis dels efectes. Com la teoria de les probabilitats, és un complement feliç a la ignorància i la debilitat de la ment humana. Així doncs, el problema de les mareas no admet una solució general; certament cal analitzar els fenòmens generals que haurien de resultar de l'atracció del Sol i de la Lluna, però s'han de corregir en cada cas particular mitjançant les observacions locals que es modifiquen a causa de l'extensió i la profunditat del mar i les circumstàncies peculiars del port.

Com que l'acció pertorbadora del Sol i de la Lluna només es pot fer evident en una gran extensió d'aigua, és evident que l'oceà Pacífic és una de les principals fonts de les nostres mareas; però a conseqüència de la rotació de la Terra i la inèrcia de l'oceà, la marea alta no es produeix fins a un temps després del moment en què la Lluna travessa el meridià. La marea elevada en aquest món d'aigües es transmet a l'Atlàntic, i des d'aquest mar es mou en direcció nord al llarg de les costes d'Àfrica i Europa i arriba cada cop més tard a cada lloc. Aquesta gran onada, però, es

modifica per la marea elevada a l'Atlàntic, que de vegades es combina amb la del Pacífic en alçar el mar i de vegades s'hi oposa de manera que les marees només pugen en proporció a la seva diferència. Aquesta gran onada combinada, reflectida per les costes de l'Atlàntic, que s'estén gairebé de pol a pol, continua cap al nord i passa pels canals irlandesos i britànics fins al mar del Nord, de manera que les marees als nostres ports queden modificades per les d'un altre hemisferi. Així, la teoria de les marees a cada port, tant pel que fa a la seva alçària com als moments en què tenen lloc, és realment una qüestió experimental, i només es pot determinar perfectament emprant la mitjana d'un nombre molt gran d'observacions, incloent-hi diverses revolucions dels nodes lunars.

L'alçària a la qual pugen les marees és molt més gran en canals estrets que en mar obert, a causa dels obstacles que hi troben. En latituds altes, on l'oceà està menys directament sotmès a la influència dels astres, la pujada i baixada del mar és insignificant, de manera que, amb tota probabilitat, als pols no hi ha marees, o tal vegada només una petita marea anual i mensual. El flux i reflux del mar són perceptibles en els rius a una distància molt gran dels seus estuaris. Als estrets de Pauxis, al riu de les Amazones, a més de cinc-centes milles del mar, les marees són evidents; la marea necessita tants dies per ascendir per

aquest poderós corrent que les marees de retorn es troben amb una successió de les que puguen, de manera que en alguna part o altra de les seves costes possibles es produeixen totes les varietats, tant pel que fa a la magnitud com al temps. Cal una extensió d'aigua molt àmplia per acumular l'impuls del Sol i la Lluna de manera que se'n faci sensible la influència; per això les marees del Mediterrani i del mar Negre són gairebé imperceptibles.²⁹

Aquestes commocions perpètuas a les aigües de l'oceà són ocasionades per forces que tenen una proporció molt petita amb la gravitació terrestre: l'acció del Sol en elevar l'oceà és només una $\frac{1}{38448000}$ part de la gravitació a la superfície de la Terra, mentre que l'acció de la Lluna és poc més del doble, ja que aquestes forces estan en la proporció d'1 a 2,35333. A partir d'aquesta proporció, es descobreix que la massa de la Lluna és només $\frac{1}{15}$ part de la de la Terra. L'estat inicial de l'oceà no té cap influència en les marees, ja que siguin quines siguin les seves condicions primitives, aviat han d'haver desaparegut per la fricció i la mobilitat del fluid. Una de les circumstàncies més remarcables de la teoria de les marees és la certesa que, com que la densitat del mar és només una cinquena part de la densitat mitjana de la Terra, l'estabilitat de l'equilibri de l'oceà no pot ser mai subvertida per cap causa física. Per tant,

una inundació general derivada de la mera inestabilitat de l'oceà és impossible.

L'atmosfera, quan està en equilibri, és un el·lipsoide aplanat als pols per la seva rotació conjunta amb la Terra; en aquest estat, els seus estrats tenen una densitat uniforme a altures iguals sobre el nivell del mar, i té una extensió sensiblement finita, tant si consisteix en partícules infinitament divisibles com si no. Segons aquesta última hipòtesi, realment ha de ser finita; i fins i tot si les partícules de matèria són infinitament divisibles, se sap per experiència que és d'una tenuïtat extrema a grans altures. El baròmetre puja en proporció a la pressió superincumbent. A la temperatura de fusió del gel, la densitat del mercuri és a la de l'aire com 10.320 a 1 i, com que l'alçada mitjana del baròmetre és de 29,528 polzades, l'alçària de l'atmosfera per simple proporció ha de ser de 30.407 peus a la temperatura mitjana de 62°, o de 34.153 peus, que és un valor extremadament petit en comparació amb el radi de la Terra. L'acció del Sol i de la Lluna pertorba l'equilibri de l'atmosfera i produeix oscil·lacions similars a les de l'oceà, que provoquen variacions periòdiques en les altures del baròmetre. Tanmateix, són tan extremadament petites que la seva existència en latituds tan allunyades de l'equador roman dubtosa; només una sèrie d'observacions dins dels tròpics pot decidir aquest punt delicat.

Laplace sembla pensar que el flux i el reflux distingibles a París poden ser ocasionats per l'ascens i el descens de l'oceà, que forma una base variable per a una porció tan gran de l'atmosfera.

L'atracció del Sol i de la Lluna no té cap efecte sensible sobre els vents alisis; la calor del Sol provoca aquests corrents aeris en enrarir l'aire a l'equador, cosa que fa que la part més freda i densa de l'atmosfera es precipiti per la superfície de la Terra cap a l'equador, mentre que la que s'escalfa es transporta per les capes més altes en direcció als pols, formant així dos corrents en la direcció del meridià. Ara bé, la velocitat de rotació de l'aire corresponent a la seva situació geogràfica disminueix cap als pols; així doncs, en aproximar-se a l'equador ha de girar més lentament que les parts corresponents de la superfície terrestre, i els cossos que hi ha han de xocar-hi amb l'excés de la seva velocitat, i per la seva reacció trobaran una resistència contrària al seu moviment de rotació; en definitiva, a una persona que suposa que està en repòs li semblarà que el vent bufa en direcció contrària a la rotació de la terra, o d'est a oest, que és la direcció dels vents alisis.

L'atmosfera, d'altra banda, dispersa els raigs del Sol i proporciona totes les formoses tonalitats i la joia del dia. Transmet la llum blava en la major quantitat; com més amunt pugem, el cel

assumeix un to més fosc, però en l'extensió de l'espai el Sol i les estrelles han d'aparèixer com a taques brillants en una negror profunda.

El Sol i la majoria dels planetes semblen estar envoltats d'atmosferes de densitat considerable. L'atracció de la Terra probablement ha privat la Lluna de la seva, ja que la refracció de l'aire a la superfície de la Terra és almenys mil vegades més gran que a la Lluna. L'atmosfera lunar, per tant, ha de ser d'un grau de rarefacció més gran que el que poden produir les nostres millors bombes de buit i, en conseqüència, no hi podria existir cap animal terrestre.³⁰



Molts filòsofs de la més alta autoritat coincideixen en la creença que la llum consisteix en les ondulacions d'un medi eteri altament elàstic que impregna l'espai i que, comunicat als nervis òptics, produeix els fenòmens de la visió. Els experiments del nostre il·lustre compatriota, el doctor Thomas Young, i els del cèlebre Fresnel, mostren que aquesta teoria concorda millor amb tots els fenòmens observats que la de l'emissió de partícules del cos lluminós. Com que el so es propaga per les ondulacions de l'aire, la seva teoria és en molts aspectes similar a la de la llum. Els tons greus o baixos són produïts per vibracions

molt lentes, que augmenten progressivament en freqüència a mesura que la nota es fa més aguda. Quan les vibracions d'un acord musical, per exemple, són inferiors a setze per segon, no comunicarà un so continu a l'oïda. Les vibracions o polsos augmenten en nombre amb l'agudesesa de la nota, fins que finalment es perd tota la sensació de to. Tota l'extensió de l'oïda humana, des de les notes més baixes de l'orgue fins al xiscle més alt conegut dels insectes, com el del grill, inclou unes nou octaves.³¹

Les ondulacions de la llum són molt més ràpides que les del so, però són anàlogues en aquest sentit: tal com a mesura que la freqüència de les pulsacions del so aquest augmenta des dels tons greus fins als més aguts, les de la llum augmenten en freqüència des dels raigs vermells de l'espectre solar fins al violeta extrem. Segons els experiments de sir William Herschel, sembla que la calor comunicada per l'espectre augmenta des dels raigs violeta fins als vermells, però apunta que el màxim dels raigs invisibles calents està situat més enllà del vermell extrem. La calor, amb tota probabilitat, consisteix, com la llum i el so, en les ondulacions d'un medi elàstic i, de fet, tots els principals fenòmens de la calor es poden il·lustrar realment mitjançant una comparació amb els del so. L'excitació de la calor i el so no només són similars, sinó sovint idèntiques, com en la fricció

i la percussió; tots dos es comuniquen per contacte i per radiació, i el doctor Young observa que l'efecte de la calor radiant en augmentar la temperatura d'un cos sobre el qual incideix s'assembla a l'agitació simpàtica d'una corda, quan el so d'una altra corda, que està a l'uníson amb ella, es transmet a través de l'aire. La llum, la calor, el so i les ones dels fluids estan sotmeses a les mateixes lleis de reflexió i, de fet, les seves teories ondulatòries són perfectament similars. Per tant, si podem jutjar per analogia, les ondulacions dels raigs productors de calor han de ser d'una freqüència menor que les del vermell extrem de l'espectre solar; ara bé, si l'analogia fos perfecta, la interferència de dos raigs calents hauria de produir fred, ja que de la interferència de dues ondulacions de llum en resulta fosc, de la interferència de dues ondulacions de so, silenci i de la interferència de dues mareas, l'aigua quieta o l'absència de marea.

La propagació del so requereix un medi molt més dens que el de la llum o la calor i la seva intensitat disminueix a mesura que augmenta la rarefacció de l'aire, de manera que, a una altura molt petita sobre la superfície de la terra, el soroll de la tempesta cessa i el tro ja no se sent en aquelles regions il·limitades on els cossos celestes compleixen els seus períodes en un silenci etern i sublim.

La naturalesa del cos del Sol és impossible de conjecturar, però sembla estar envoltat per un oceà de flames a través del qual el seu nucli fosc apareix com a taques negres, sovint de mida enorme. Els raigs solars, que probablement sorgeixen dels processos químics que tenen lloc contínuament a la seva superfície, es transmeten a través de l'espai en totes direccions; però, malgrat la magnitud del Sol i la calor inconcebible que ha d'existir on es produeix aquesta combustió, ja que la intensitat tant de la seva llum com de la seva calor disminueix amb el quadrat de la distància, la seva influència benèfica amb prou feines es pot sentir als límits del nostre sistema.³² Depèn molt de la manera com incideixen els raigs, un fet que percebem fàcilment pels diferents climes del nostre globus. A l'hivern, la Terra és més a prop del Sol que a l'estiu en $\frac{1}{30}$ part, però els raigs hi incideixen més obliquament a l'hivern que a l'altra meitat de l'any. A Urà, el Sol s'ha de veure com una estrella petita però brillant, no més d'una cent-cinquantena part de com ens sembla a nosaltres, que, tanmateix, és 2.000 vegades més brillant que la nostra lluna per a nosaltres, de manera que realment és un sol per a Urà, i probablement imparteix cert grau de calor. Però si considerem que l'aigua no romandria fluida en cap part de Mart, ni tan sols al seu equador, i que a les zones temperades del mateix

planeta fins i tot l'alcohol i el mercuri es congelarien, podem fer-nos una idea del fred que ha de regnar a Urà, tret que l'èter tingui una certa temperatura. El clima de Venus s'assembla més al de la Terra, tot i que, excepte potser als seus pols, és massa calent per a la vida animal i vegetal tal com existeixen aquí. A Mercuri la calor mitjana, derivada només de la intensitat dels raigs del Sol, ha de ser superior a la del mercuri bullent, i l'aigua bulliria fins i tot als seus pols. Així, els planetes, tot i que són parents de la Terra en moviment i estructura, són totalment inadequats per a l'habitatge de l'ésser humà.

S'ha estimat que la llum directa del sol és igual a la de 5.563 espelmes de cera de mida moderada situades a una distància d'un peu de l'objecte; la de la Lluna probablement només és igual a la llum d'una espelma a una distància de dotze peus. En conseqüència, la llum del Sol és més de tres-centes mil vegades més intensa que la de la Lluna, raó per la qual la llum de la Lluna no imparteix calor, fins i tot quan es focalitza mitjançant un mirall.

En esmentar les peculiaritats de la forma i la naturalesa de la Terra i els planetes, és impossible no fer esment del magnetisme de la Terra, director de la brúixola del mariner i la seva guia a través de l'oceà. Aquesta propietat probablement prové del ferro metàl·lic a l'interior de la Terra o

de la circulació de corrents d'electricitat al seu voltant: la seva influència s'estén per tota la superfície, però la seva acumulació i mancança determinen els dos pols d'aquest gran imant, que no són de cap manera els mateixos que els pols de rotació de la Terra. Com a conseqüència de la seva atracció i repulsió, una agulla suspesa lliurement, tant si és magnètica com si no, només roman en equilibri quan es troba al meridià magnètic, és a dir, al pla que passa pels pols magnètics nord i sud. Hi ha llocs on el meridià magnètic coincideix amb el meridià terrestre; en aquests, una agulla magnètica suspesa lliurement apunta al nord veritable, però si es porta successivament a diferents llocs de la superfície terrestre, la seva direcció es desviarà del nord de vegades cap a l'est i de vegades cap a l'oest. Les línies traçades sobre el globus terraquí a través de tots els llocs on l'agulla apunta cap al nord i el sud s'anomenen línies de variació nul·la i són extremadament complicades. La direcció de l'agulla ni tan sols és constant al mateix lloc, sinó que canvia en pocs anys, segons una llei encara no determinada. El 1657, la línia de variació nul·la va passar per Londres. L'any 1819, el capità Parry, en el seu viatge per descobrir el pas del nord-oest al voltant d'Amèrica, va navegar directament sobre el pol magnètic; i el 1824, el capità Lyon, durant una expedició amb el mateix propòsit, va descobrir

que la variació de la brúixola era de $37^{\circ} 30'$ oest i que el pol magnètic estava situat a $63^{\circ} 26' 51''$ de latitud nord i a $80^{\circ} 51' 25''$ de longitud oest. Tanmateix, sembla que a partir d'investigacions posteriors la llei del magnetisme terrestre és considerablement complicada i l'existència de més d'un pol magnètic a cada hemisferi s'ha fet altament probable. L'agulla també està sotmesa a variacions diürnes; a les nostres latituds es mou lentament cap a l'oest des de les tres de la matinal fins a les dues, i torna a la seva posició anterior al vespre.³³

Una agulla suspesa de manera que només es pugui moure en el pla vertical, s'inclina o s'enfonsa més i més cap a l'horitzó com més s'acosta al pol magnètic. El capità Lyon va descobrir que la inclinació de la latitud i longitud esmentades era de $86^{\circ} 32'$. És impossible saber quines propietats poden tenir els planetes en aquest sentit, però és probable que la Lluna s'hagi tornat altament magnètica, a conseqüència de la seva proximitat a la Terra i perquè el seu diàmetre més gran sempre apunta cap a ella.³⁴



El pas dels cometes mai ha pertorbat sensiblement l'estabilitat del sistema solar; el nucli d'aquests cossos és tan poc dens i el seu trànsit

tan ràpid que el temps no ha estat prou llarg per admetre una acumulació suficient d'ímpetu que produís un efecte perceptible. El cometa de 1770 va passar a menys de 80.000 milles de la Terra sense ni tan sols afectar les nostres marees, i va passar pel mig dels satèl·lits de Júpiter sense alterar-ne els moviments. Si la massa d'aquell cometa hagués estat igual a la massa de la Terra, la seva acció pertorbadora hauria escurçat l'any en una novena part d'un dia; però, tal com mostren els càlculs de Delambre a partir de les observacions solars de Greenwich, la durada de l'any no s'ha vist afectada sensiblement per l'aproximació del cometa. Laplace, per la seva banda, va demostrar que la seva massa no podia ser ni tan sols la cinc-mil·lèsima part de la de la Terra. Les trajectòries dels cometes tenen totes les inclinacions possibles respecte al pla de l'eclíptica i, a diferència dels planetes, el seu moviment és sovint retrògrad. Els cometes només són visibles quan són a prop dels seus perihelis, quan la seva velocitat és tal que el seu quadrat és el doble que la d'un cos que es mogué en cercle a la mateixa distància; en conseqüència, romanen molt poc temps dins de les òrbites planetàries, i com que totes les seccions còniques de la mateixa distància focal coincideixen sensiblement a través d'un petit arc a cada costat de l'extrem del seu eix, costa determinar en quina d'aquestes corbes es mouen els cometes a

partir d'observacions fetes als seus perihelis, com necessàriament ha de ser. En qualsevol cas, és probable que tots es moguin en el·lipses molt excèntriques, tot i que, en la majoria dels casos, la corba parabòlica coincideix més estretament amb els moviments observats. Fins i tot si l'òrbita es determinés amb tota la precisió que admet el cas, pot ser difícil, o fins i tot impossible, identificar un cometa en el seu retorn, perquè la seva òrbita canviaria molt si passés a prop de qualsevol dels grans planetes d'aquest o de qualsevol altre sistema, a conseqüència de la seva energia pertorbadora, que seria molt gran en cossos de naturalesa tan rara. Halley i Clairaut van predir que, a conseqüència de l'atracció de Júpiter i Saturn, el retorn del cometa de 1759 s'endarreriria 618 dies, cosa que va quedar verificada pels fets tan fidelment com es podia esperar.

L'aspecte nebulós dels cometes potser és ocasionat pels vapors que la calor solar fa aixecar a les seves superfícies en el seu pas pels perihelis, i que es condensen de nou a mesura que s'allunyen del Sol. El cometa de 1680, quan era al seu periheli, només es trobava a una distància d'una sisena part del diàmetre del Sol, o unes 148.000 milles de la seva superfície; en conseqüència, estaria exposat a una calor 27.500 vegades més gran que la que rep la Terra. Com que se suposa que la calor del Sol és proporcional a la intensitat

de la seva alçària, és probable que un grau de calor tan intens sigui suficient per convertir en vapor tota substància terrestre amb la qual estem familiaritzats.

En les posicions dels cometes on només s'hauria de veure la meitat del seu hemisferi il·luminat, no mostren fases, fins i tot quan es veuen amb grans augments. Tanmateix, Hevelius i La Hire van observar alguns indicis lleus el 1682; i el 1811 sir William Herschel va descobrir un petit punt lluminós, que va concloure que era el disc del cometa. En general, les seves masses són tan minúscules que no tenen diàmetres sensibles, ja que el nucli està format principalment per estrats més densos de matèria nebulosa, però tan poc densos que s'han vist estrelles a través d'ells. El trànsit d'un cometa sobre el disc solar proporcionaria la millor informació sobre aquest punt. Es va calcular que un esdeveniment d'aquest tipus havia de tenir lloc l'any 1627; malauradament, el Sol estava amagat pels núvols en aquest país, però es va observar a Viviers i a Marsella en el moment en què el cometa havia de ser-hi, però no es va veure cap punt.

Les cues dels cometes sovint són de gran longitud i en general estan situades en els plans de les seves òrbites; els segueixen en el seu descens cap al Sol, però els precedeixen en el seu retorn, amb un petit grau de curvatura. La seva extensió

i forma han de variar en aparença segons la posició de les seves òrbites respecte a l'eclíptica. La cua del cometa de 1680 semblava, a París, estendre's més de seixanta-dos graus. La matèria de què es compon la cua ha de ser extremadament flotant per precedir un cos que es mou amb aquesta velocitat; de fet, la rapidesa del seu ascens no es pot explicar. La part nebulosa dels cometes disminueix cada vegada que tornen als seus perihelis; després de retorns freqüents haurien de perdre-la completament i presentar l'aspecte d'un nucli fix, i això hauria de passar abans en cometes de períodes curts. Laplace suposa que el cometa de 1682 ha d'estar apropant-se ràpidament a aquest estat. Si les substàncies s'evaporesin completament o fins i tot en gran mesura, el cometa desapareixerà per sempre. Així, és possible que hi hagi cometes que han desaparegut de la nostra vista abans del que ho haurien fet per aquesta causa. Dels aproximadament sis-cents cometes que s'han observat en diferents moments, ara s'ha determinat perfectament que tres formen part del nostre sistema; és a dir, que tornen al Sol a intervals de 76, $6 \frac{1}{3}$ i $3 \frac{1}{4}$ anys, aproximadament.³⁵

Durant l'últim segle han aparegut dins l'òrbita terrestre cent quaranta cometes que no s'han tornat a veure; si es considera mil anys com a període mitjà de cadascun, es pot calcular mitjançant

la teoria de les probabilitats que el nombre de cometes que es troben dins de l'òrbita terrestre ha de ser d'uns 1.400; però com que Urà és vint vegades més distant, pot haver-hi no menys d'11.200.000 cometes dins de l'extensió coneguda del nostre sistema. Amb tal quantitat de cossos errants, és possible que algun d'ells entri en trajectòria de col·lisió amb la Terra; però fins i tot si ho fes, el dany seria local i l'equilibri es restauraria aviat. És més probable que la Terra només es desviés una mica del seu curs per l'aproximació del cometa, sense ser tocada.

Per gran que sembli el nombre de cometes, no és absolutament res en comparació amb el nombre d'estrelles fixes. Només unes dues mil són visibles a ull nu, però quan observem el cel amb un telescopi, el seu nombre sembla estar limitat només per la imperfecció de l'instrument. En un quart d'hora, sir William Herschel va estimar que van passar 116.000 estrelles pel camp visual del seu telescopi, que subtendia un angle de 15'. Això es va considerar un exemple d'aglomeració extraordinària, però tot i així, de mitjana, tota l'extensió del cel ha de mostrar uns cent milions d'estrelles fixes que es troben dins l'abast de la visió telescòpica.

Moltes de les estrelles tenen un moviment propi molt petit, especialment μ Cassiopeiae i 61 Cygni, totes dues estrelles petites. Com que el Sol

és decididament una estrella, això és una raó ad-
dicional per suposar que el sistema solar està en
moviment. La distància a què estan situades les
estrelles fixes és massa gran per apreciar-hi cap
disc, però amb tota probabilitat són esfèriques, i
certament ho han de ser si la gravitació impregna
tot l'espai. Amb un bon telescopi semblen un
punt de llum; el seu centelleig prové només de
canvis sobtats en el poder refractiu de l'aire, uns
canvis que no serien apreciables si tinguessin
discs com els planetes. Així, no podem aprendre
res de les distàncies relatives de les estrelles res-
pecte a nosaltres i entre elles a partir dels seus di-
àmetres aparents, però com que la seva paral·laxi
anual és inapreciable, deduïm que hem d'estar a
cent milions de milions de milles de la més pro-
pera; moltes, però, han d'estar molt més allunya-
des, ja que de dues estrelles que semblen juntes,
una pot estar molt més enllà que l'altra en la pro-
funditat de l'espai. La llum de Sírius, segons les
observacions del senyor Herschel, és 324 vegades
més gran que la d'una estrella de sisena magni-
tud, i si suposem que les dues són realment de la
mateixa mida, les seves distàncies a nosaltres han
d'estar en la proporció de 57,3 a 1, perquè la llum
disminueix a mesura que augmenta el quadrat de
la distància del cos lluminós.

De la magnitud absoluta de les estrelles, no se
sap res, només que moltes han de ser molt més

grans que el Sol si tenim en compte la quantitat de llum que emeten. El doctor Wollaston va determinar la relació aproximada que té la llum d'una espelma de cera amb la del Sol, la Lluna i les estrelles, comparant-ne les respectives imatges reflectides en petits globus de vidre plens de mercuri, a partir dels quals va establir una comparació entre les quantitats de llum emeses pels cossos celestes. Mitjançant aquest mètode, va descobrir que la llum del Sol és uns vint milions de milions de vegades més gran que la de Sírius, la més brillant i que se suposa que és la més propera de les estrelles fixes.³⁶ Si Sírius tingués una paral·laxi de mig segon d'arc, la seva distància de la Terra seria 525.481 vegades la distància del Sol a la Terra; i per tant, Sírius, situada on és el Sol, ens semblaria 3,7 vegades més gran que el Sol i donaria 13,8 vegades més llum. Moltes de les estrelles fixes han de ser immensament més grans que Sírius.

De vegades, algunes estrelles han aparegut de sobte, han brillat amb una llum brillant i després han desaparegut. El 1572 es va descobrir una estrella a Cassiopea que va augmentar ràpidament la seva brillantor fins a superar la de Júpiter; després va disminuir gradualment d'esplendor i, després d'exhibir tota la varietat de matisos que indiquen els canvis de combustió, va desaparèixer setze mesos després del seu descobriment,

sense alterar la seva posició. És impossible imaginar res més colossal que una conflagració que pogués ser visible a tal distància.

Algunes estrelles són periòdiques, tal vegada per la interposició de cossos opacs que hi giren al voltant o per taques extenses a les seves superfícies. Molts milers d'estrelles que semblen ser només punts brillants, quan s'examinen acuradament, es descobreix que en realitat són sistemes de dos o més sols que giren al voltant d'un centre comú. Aquestes estrelles dobles i múltiples són extremadament remotes i requereixen els telescopis més potents per mostrar-les separades.

El primer catàleg d'estrelles dobles en què se n'especifica la ubicació i posicions relatives va ser realitzat gràcies al talent i l'empenta de sir William Herschel, a qui l'astronomia està en deute per tants i tan magnífics descobriments. D'ell sorgí la idea de la seva combinació en sistemes binaris i múltiples, una idea que les seves pròpies observacions havien establert sense cap dubte, i que des de llavors ha rebut la confirmació addicional de les observacions del seu fill i de sir James South. El fill de Herschel i el professor Struve de Dorpat han afegit molts milers al nombre d'estrelles múltiples. Els moviments de revolució al voltant d'un centre comú de molts d'aquests astres s'han determinat amb exactitud i els seus períodes s'han establert amb precisió considerable.

Alguns ja han assolit, des del seu primer descobriment, gairebé una revolució sencera, i si es pot confiar en les últimes observacions, una ja està considerablement avançada en el seu segon període. Aquests sistemes interessants ens ofereixen, doncs, una espècie de cronòmetre sideral, mitjançant el qual la cronologia dels cels es marcarà per a les eres futures mitjançant èpoques pròpies, susceptibles de no patir fluctuacions a causa de perturbacions planetàries com les que es produeixen al nostre sistema.

És possible que, entre la multitud de petites estrelles, ja siguin dobles o úniques, algunes es trobin prou a prop per exhibir moviments paral·làctics distingibles, o potser alguna cosa que s'acosti al moviment planetari, fet que demostraria que l'atracció solar no es limita al nostre sistema o que pot conduir al descobriment del moviment propi del Sol. Les estrelles dobles són de diversos tons, però amb més freqüència presenten colors contrastats. L'estrella gran és generalment groga, taronja o vermella, mentre que l'estrella petita és blava, morada o verda. De vegades, una estrella blanca es combina amb una de blava o morada, i més rarament s'uneixen un estel vermell i un de blanc. En molts casos, aquestes aparences es deuen a les influències del contrast en el nostre judici dels colors. Per exemple, en observar una estrella doble on la gran és d'un vermell robí intens,

gairebé de color sang, i la petita d'un verd suau, aquesta última perd el seu color quan la primera queda amagada pel reticle del telescopi. Però hi ha un gran nombre de casos en què els colors estan massa marcats per ser merament imaginaris. El senyor Herschel observa en un dels seus articles a les *Philosophical Transactions*, com un fet molt remarcable, que tot i que les estrelles individuals vermelles són prou comunes, encara no s'ha apreciat cap exemple d'una estrella aïllada blava, verda o porpra.

En algunes parts del cel, les estrelles estan tan juntes que formen cúmuls que a ull nu semblen núvols blancs i prims; així és la Via Làctia, que deu la seva brillantor a la llum difusa de miríades d'estrelles. Molts d'aquests núvols, però, mai es resolten en estrelles separades, ni tan sols amb els augments més alts. Aquesta matèria nebulosa existeix en gran abundància a l'espai i sir William Herschel va observar no menys de 2.500 nebuloses, les posicions de les quals han estat calculades a partir de les seves observacions, reduïdes a una època comuna i endreçades en un catàleg per ordre d'ascensió recta per la seva germana, la senyoreta Caroline Herschel, una dama justament celebrada pels seus coneixements i descobriments astronòmics. La naturalesa i acció d'aquesta matèria escampada pel cel en tanta varietat de formes està envoltada de la més gran

obscuritat. Que és una substància material fosforescent, lluminosa per sí mateixa, en un estat altament dilatat o gasós, però que s'acumula gradualment en estrelles i sistemes siderals per la gravitació mútua de les seves partícules, és la hipòtesi que sembla tenir més acceptació. Tot i així, l'única manera d'obtenir un coneixement real sobre aquest misteriós tema és mitjançant la determinació de la forma, la posició i l'estat actual de cada nebulosa individual; una comparació d'aquests paràmetres amb observacions posteriors mostrarà a les generacions futures els canvis que poden estar passant ara en aquests rudiments de sistemes futurs. Amb aquest punt de vista, el senyor Herschel està ara immers en la difícil i fatigosa investigació, que sembla que no trigarà gaire a finalitzar i els resultats de la qual, per tant, podem esperar veure publicats ben aviat. Els exemples més conspicus es troben a Orió i a Andròmeda. És probable que la llum hagi de viatjar milions d'anys fins la Terra des d'algunes d'aquestes nebuloses.³⁷

Els objectes que trobem al cel són tan nombrosos que no podem imaginar cap part de l'espai on no hi hagi llum que arribi a la vista, però com que les estrelles fixes no serien visibles a aquestes distàncies si no brillessin amb llum pròpia, és raonable inferir que són sols; i si és així, amb tota probabilitat estan acompanyats per sistemes de

cossos opacs, que giren al seu voltant com els planetes al voltant del nostre. Però tot i que no hi ha cap prova que els planetes que no veiem girin al voltant d'aquests sols remots, és cert que hi ha molts cossos invisibles que vaguen per l'espai i que de tant en tant entren dins l'esfera d'atracció de la Terra, s'encenen per la velocitat amb que passen per l'atmosfera i es precipiten amb gran violència sobre la superfície. L'obliquïtat del descens dels meteorits, la matèria peculiar de la qual estan compostos i l'explosió amb què invariablement se n'acompanya la caiguda, mostren que són estranys al nostre planeta. Ocasionalment han aparegut taques lluminoses totalment independents de les fases a la part fosca de la Lluna, que s'han atribuït a la llum que sorgeix en les erupció de volcans; d'aquí s'ha suposat que els meteorits han estat projectats des de la Lluna per l'impuls d'alguna erupció volcànica i fins i tot s'ha calculat que si una pedra fos projectada des de la Lluna en línia vertical i amb una velocitat inicial de 10.992 peus per segon, que és més de quatre vegades la velocitat d'una bala quan es dispara des d'un canó, en lloc de tornar a caure a la Lluna per l'atracció de la gravetat, entraria dins de l'esfera d'atracció de la Terra i giraria al seu voltant com un satèl·lit. Aquests cossos, impulsats ja sigui per la direcció de l'ímpetu inicial o per l'acció pertorbadora del Sol, podrien finalment penetrar

en l'atmosfera terrestre i arribar a la superfície. De totes maneres, sigui d'on sigui que provenen les pedres meteòriques, sembla molt probable que tinguin un origen comú, per la uniformitat, i gairebé podem dir identitat, de la seva composició química.³⁸

La quantitat coneguda de matèria es troba en una proporció molt petita amb la immensitat de l'espai. Per grans que siguin els cossos, les distàncies que els separen són immensament més grans, però com que el disseny es manifesta en cada part de la creació, és probable que si els diversos sistemes de l'univers haguessin estat més a prop els uns dels altres, les seves perturbacions mútues haurien estat incompatibles amb l'harmonia i l'estabilitat del conjunt. És clar que l'espai no està impregnat per l'aire atmosfèric, ja que la seva resistència hauria destruït molt abans la velocitat dels planetes; tampoc podem afirmar que sigui buit quan és travessat en totes direccions per la llum, la calor, la gravitació i possiblement per influències de les quals no podem formar-nos-en cap idea; si està ple d'un medi eteri, només el temps ho demostrarà.

Tot i que ignorem totalment les lleis que regeixen les regions més distants de la creació, se'ns assegura que només una regula els moviments del nostre propi sistema; i com que les lleis generals constitueixen l'objecte final de la recerca

filosòfica, no podem concloure aquestes observacions sense considerar la naturalesa d'aquest poder extraordinari, els efectes del qual hem intentat rastrejar a través d'alguns dels seus laberints. En cert moment es va imaginar que l'acceleració del moviment mitjà de la Lluna era ocasionada per la transmissió successiva de la força gravitatòria, però s'ha demostrat que, per produir aquest efecte, la seva velocitat ha de ser uns cinquanta milions de vegades més gran que la de la llum, que es desplaça a una velocitat de 200.000 milles per segon; per tant, la seva acció fins i tot a la distància del Sol, es pot considerar instantània; tanmateix, les estrelles fixes més properes són tan remotes que es pot dubtar que el Sol hi tingui cap influència sensible.³⁹

L'expressió analítica de la força gravitatòria és una línia recta; les corbes en què es mouen els cossos celestes per la força de la gravitació són només línies de segon ordre; l'atracció d'esferoides segons qualsevol altra llei seria molt més complicada i com que és fàcil demostrar que la matèria podria haver-se mogut segons una varietat infinita de lleis, es pot concloure que la gravitació ha d'haver estat seleccionada per la saviesa divina d'entre una infinitat d'altres lleis, per tal com és la més simple i la que dona la major estabilitat als moviments celestes.

És un resultat singular de la simplicitat de les lleis de la natura, que només admeten l'observació i la comparació de proporcions, el fet que la gravitació i la teoria dels moviments dels cossos celestes són independents de les seves magnituds i distàncies absolutes; en conseqüència, si tots els cossos del sistema solar, les seves distàncies mútues i les seves velocitats disminuïssin proporcionalment, descriurién corbes en tots els aspectes similars a aquelles en què es mouen ara, i el sistema podria reduir-se successivament a les dimensions sensibles més petites i encara exhibir les mateixes aparences. L'experiència demostra que preval una llei d'atracció molt diferent quan les partícules de matèria es col·loquen a distàncies inapreciables les unes de les altres, com en les atraccions químiques i capil·lars i en l'atracció de cohesió. No és evident si es tracta d'una modificació de la gravetat o de l'entrada en acció d'algun poder nou i desconegut; en qualsevol cas, si es produeix un canvi en la llei de la força en un extrem de l'escala, és possible que la gravitació no romangui igual a la immensa distància de les estrelles fixes. Potser arribarà el dia en què fins i tot la gravitació, que ja no es considerarà un principi últim, es podrà resoldre en una causa encara més general, que abasti totes les lleis que regulen el món material.⁴⁰

L'acció de la força gravitatòria no es veu impedida per la intervenció ni tan sols de les substàncies més denses. Si l'atracció del Sol passant pel centre de la Terra i per l'hemisferi diametralment oposat a ell disminuís per qualsevol mena de dificultat a l'hora de penetrar la matèria interposada, les mareas es veurien afectades de manera més evident. La seva atracció també és la mateixa siguin quines siguin les substàncies dels cossos celestes, ja que si l'acció del Sol sobre la Terra diferís en una milionèsima part de la seva acció sobre la Lluna, la diferència ocasionaria una variació en la paral·laxi del Sol de diversos segons, cosa que es demostra impossible per la concordança de la teoria amb l'observació. Així, tota la matèria és permeable a la gravitació i és igualment atreta per ella.

Pel que fa al coneixement humà, la intensitat de la gravitació mai ha variat dins dels límits del sistema solar i cap analogia ens duu a esperar que ho hagi de fer; ans al contrari, hi ha moltes raons per estar segurs que les grans lleis de l'univers són tan immutables com el seu Autor. No només el Sol i els planetes, sinó també les partícules més petites en totes les varietats de les seves atraccions i repulsions i fins i tot la matèria imponderable dels fluids elèctrics, galvànics i magnètics obeeixen a lleis permanents, tot i que no som capaços, en tots els casos, de resoldre els seus

fenòmens en principis generals. Tampoc podem suposar que l'estructura del globus sigui l'única exempta del *fiat* universal, tot i que poden passar segles abans que els canvis que ha experimentat, o que ara estan en curs, es puguin referir a causes existents amb la mateixa certesa amb què els moviments dels planetes i totes les seves variacions seculares es poden referir a la llei de la gravitació. Les traces d'antiguitat extrema que apareixen sempre als ulls del geòleg aporten aquesta informació sobre l'origen de les coses que en va busquem a les altres parts de l'univers. Posen una data al començament dels temps, ja que hi ha moltes raons per creure que la formació de la Terra va ser contemporània amb la de la resta dels planetes, però mostren que la creació és obra d'Aquell per a qui «mil anys són com un dia, i un dia com mil anys».



Litografia de Mary Somerville a partir del retrat de J. Phillips. [CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, via Wikimedia Commons]

Notes

¹ És a dir, l'obra *El funcionament dels cels*, de la qual aquesta *Dissertació preliminar* n'és la introducció. Vegeu els comentaris a la introducció.

² Somerville cita aquí un fragment de l'obra *Progress of Ethical Philosophy*, de l'advocat, jurista i polític escocès James Mackintosh (1765-1832).

³ Somerville fa referència a un resultat matemàtic clàssic en gravitació. Quan es desenvolupa en sèrie el potencial gravitatori d'un esferoide, amb els anomenats polinomis de Legendre, la primera correcció que mostra una desviació respecte a l'esfera perfecta depèn de $1/3 - \sin^2 \varphi$, essent φ la latitud; quan el quadrat del sinus és igual a $1/3$, cosa que correspon a uns 35° , el terme s'anul·la. No és una latitud que tingui res d'especial, simplement, és un punt on la gravetat és exactament la mateixa que tindria una esfera perfecta.

⁴ La nutació és un dels efectes causats per les forces gravitatòries de la Lluna i el Sol en actuar sobre la figura no esfèrica de la Terra, i es produeix perquè aquestes forces no són constants, sinó que varien a mesura que la Terra gira al voltant del Sol i la Lluna al voltant de la Terra. El principal factor que contribueix a la nutació és la inclinació de l'òrbita de la Lluna al voltant de la Terra, una mica més de 5° respecte al pla de l'eclíptica; l'orientació d'aquest pla varia al llarg d'un període d'uns 18,6 anys (anomenat *saros*). Com que l'equador terrestre també està inclinat respecte al pla de l'eclíptica uns $23,4^\circ$ (l'obliquïtat de l'eclíptica), els efectes es combinen per fer variar la inclinació de l'òrbita lunar respecte a l'equador terrestre entre $18,4^\circ$ i $28,6^\circ$ en aquests 18,6 anys. Això fa que l'orientació de l'eix de la Terra també variï durant aquest mateix

període, i que la posició real dels pols celestes descriu una petita el·lipse al voltant de la seva posició mitjana.

⁵ De fet, hauria de dir «proporcional al canvi de velocitat», és a dir, proporcional a l'acceleració.

⁶ Es refereix als quatre primers asteroides del cinturó principal situat entre Mart i Júpiter: Ceres, Pal·les, Juno i Vesta, els únics descoberts abans de 1832, data de publicació del text. El següent asteroide, Astrea, no es descobriria fins 1845.

⁷ És el moviment conegut com a *precessió apsidal*: el temps que triga l'el·lipse terrestre a donar una volta sencera respecte als estels llunyans (període sideri). El període tròpic és el temps que triga l'el·lipse a fer una volta respecte a l'equinocci vernal, és a dir, perquè el periheli torni a produir-se en la mateixa data.

⁸ Versos d'*El paradís perdut* de Milton (cant V, 620-624). Hem utilitzat la versió catalana de Josep M. Boix (Adesiara, 2014).

⁹ És el pla que també s'anomena actualment *pla de Laplace*, que passa pel centre de masses de tot el sistema solar i és perpendicular al vector del moment angular total del sistema. Aquest pla invariable es pot veure com la mitjana ponderada de totes les òrbites planetàries del sistema solar.

¹⁰ Els quatre satèl·lits galileans de Júpiter (els únics coneguts quan Somerville publicà el text) es troben en una ressonància orbital en proporcions 18:14:7:3. Somerville, però, es refereix a la ressonància molt més simple de 4:2:1 entre tres d'ells: Io, Europa i Ganímedes; l'última relació que comenta Somerville s'expressa matemàticament com $\Phi_L = \lambda_{Io} - 3\lambda_{Eu} + 2\lambda_{Ga} \approx 180^\circ$.

¹¹ Efectivament, el primer que utilitzà els eclipsis de les llunes de Júpiter per estimar la velocitat de la llum fou Ole Rømer, el 1676. El seu càlcul li donà un valor d'uns 230.000 km/s. Observacions posteriors amb el mateix mètode (les més

recents de les quals en temps de Somerville eren les de Delambre el 1809) donaren el valor que presenta el text de 308.000 km/s.

¹² L'eix de rotació d'Urà està inclinat 82 graus respecte al pla de la seva òrbita.

¹³ La longitud d'un cos celeste és la seva distància angular respecte a un punt de referència, usualment el punt equinoccial d'Àries, mesurada al llarg de l'eclíptica.

¹⁴ L'anomalia mitjana d'un cos celeste és la distància angular des del periheli de la seva òrbita fins al punt en què es trobaria si la seva velocitat angular fos uniforme.

¹⁵ Justament, mentre Somerville redactava aquest text es començaven a obtenir les primeres paral·laxis estel·lars fiables, que es publicarien poc després del llibre. Les primeres mesures reeixides foren les de Thomas Henderson a Ciutat del Cap, a Sud-àfrica, fetes entre 1832 i 1833, quan va mesurar la paral·laxi d'una de les estrelles més pròximes, α Centauri. Entre 1835 i 1836, l'astrònom Friedrich Georg Wilhelm von Struve, a l'observatori universitari de Dorpat, va determinar la distància de Vega, i en va publicar els resultats el 1837. Friedrich Bessel, amic de Struve, va dur a terme una intensa campanya d'observació entre 1837 i 1838 a l'observatori de Königsberg sobre l'estrella 61 Cygni, utilitzant un heliòmetre, i en va publicar els resultats el 1838. Henderson, per la seva banda, no va publicar els seus resultats fins al 1839, després de tornar de Sud-àfrica. Aquests tres resultats —dos dels quals obtinguts amb els millors instruments disponibles en aquell moment (el gran refractor de Fraunhofer utilitzat per Struve i l'heliòmetre de Fraunhofer emprat per Bessel)— van ser els primers de la història a establir una escala fiable de distàncies fins a les estrelles.

¹⁶ L'estrella més propera a nosaltres, Pròxima Centauri, presenta una paral·laxi de 0,77 segons d'arc, encara inferior a

l'exemple hipotètic que planteja Somerville, i que correspon a una distància de 4,24 anys llum.

¹⁷ El valor per a Júpiter és bàsicament correcte: un any jovità té 10.477 dies jovians (11,8 anys terrestres o 4.332 dies terrestres). El valor per a Saturn és menys correcte: un any saturnià conté en realitat 24.225 dies saturnians (29,45 anys terrestres o 10.755 dies terrestres).

¹⁸ De fet, com que els anells de Saturn estan formats per partícules molt petites, el seu període de rotació depèn de la seva distància al planeta, i es troba entre unes 5 hores per a les partícules dels anells més interns fins a unes 15 hores per als més llunyans. La seva afirmació de que «és considerablement inferior al temps que trigaria un satèl·lit a girar al voltant de Saturn a la mateixa distància» també és incorrecta, tot i que cal tenir en compte que fins als treballs de James Clerk Maxwell no s'establiria que els anells només podien estar formats per innumerables partícules de petites dimensions.

¹⁹ La libració de la Lluna és un conjunt de moviments d'oscil·lació que presenta el disc lunar respecte a un observador terrestre. El més important és la libració en longitud, per la qual la Lluna sembla oscil·lar en la direcció est-oest fins a un màxim de 7° 45'. La libració en latitud provoca que la Lluna es balancegi en direcció nord-sud fins un màxim de 5° 9'. El resultat d'aquestes dues libracions és que des de la Terra es pot veure més de la meitat de la superfície lunar, concretament un 59 %.

²⁰ En realitat, ara sabem que el període de rotació de la Terra es va modificant lentament. Al llarg de milions d'anys, la rotació de la Terra s'ha alentit a causa de les forces de marea produïdes per la interacció amb la Lluna, procés que transfeix moment angular cap al satèl·lit i fa augmentar la durada del dia. Registres geològics com els dels ritmites de marea i els estromatòlits indiquen que fa uns 600 milions d'anys el dia durava aproximadament 21 hores. A més d'aquesta evolució

secular, esdeveniments que redistribueixen la massa del planeta (com grans terratrèmols, els rebots postglacials o fins i tot grans embassaments) poden modificar lleument la durada del dia en alterar el moment d'inèrcia de la Terra. Per exemple, científics de la NASA han calculat que l'aigua emmagatzemada a la presa de les Tres Gorges, al riu Iang-Tsé, ha incrementat la durada del dia terrestre en 0,06 microsegons, a causa del desplaçament de massa implicat.

²¹ El fragment és de l'obra *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy* de John Herschel (fill de William Herschel, descobridor d'Urà), publicat el 1831.

²² Aquí Somerville reflecteix una etapa de transició en la geologia del primer terç del segle XIX, abans de l'inici de la geologia moderna. Parteix d'una observació correcta: la presència de fòssils marins en zones muntanyoses (interpretada avui com a prova que moltes d'aquestes roques es van formar en ambients marins). La primera explicació que planteja, basada en elevacions i enfonsaments catastròfics dels continents deguts a variacions en la posició de l'eix de rotació terrestre, no s'ajusta al coneixement actual, però ella mateixa admet que no sembla una explicació plausible. La geologia moderna explica aquests fets mitjançant la tectònica de plaques, segons la qual els sediments marins poden ser elevats durant processos de col·lisió entre plaques litosfèriques.

²³ Aquest fragment il·lustra les dificultats de la geofísica primerenca per inferir l'estructura interna de la Terra a partir d'arguments indirectes. Somerville recull algunes idees que avui es consideren parcialment encertades, com l'augment de densitat cap a l'interior del planeta i la seva forma aproximadament el·lipsoïdal. Tanmateix, la seva argumentació sobre la compressibilitat extrema de la matèria sota pressió i la conseqüent possibilitat d'una estructura «cavernosa» o d'una escorça relativament prima no concorda amb el coneixement actual. Avui sabem, gràcies sobretot a la sismologia, que la Terra presenta una estructura interna estratificada (escorça,

mantell i nucli) amb densitats creixents però finites, sense grans cavitats buides. La hipòtesi d'una Terra essencialment buida o amb una escorça prima respon a les limitacions experimentals de l'època pel que fa a les lleis de compressió dels sòlids a altes pressions, així com a l'absència de dades directes sobre l'interior terrestre.

²⁴ L'any sideri es defineix com el període de temps necessari perquè la Terra torni al mateix punt de la seva òrbita respecte a les estrelles fixes. L'any tròpic és el període de temps comprès entre dos passos successius del Sol pel punt equinoccial mitjà. No són iguals precisament a causa de la precessió dels equinoccis.

²⁵ Somerville es refereix aquí al lent desplaçament de l'eix major de l'òrbita terrestre (línia dels àpsides), amb un període d'uns 21.000 anys, en bona concordança amb els valors actuals, que ja ha comentat abans en altres ocasions. Tanmateix, atribueix un significat especial a certes alineacions entre aquesta línia i la dels equinoccis, definint-les com a «eres astronòmiques», sense que aquestes configuracions tinguin conseqüències físiques singulars. És rellevant la seva associació d'una d'aquestes alineacions amb la data tradicional de la «creació de l'home», d'acord amb cronologies bíbliques com la de James Ussher, la qual cosa evidencia la persistència d'aquests marcs interpretatius en la ciència de l'època. La referència a Pierre-Simon Laplace i a la seva proposta de fixar una «època universal» en l'any 1250 respon igualment a l'intent, característic de la Il·lustració i dels inicis del segle XIX, de fonamentar cronologies en criteris astronòmics racionals; des de la perspectiva actual, aquests plantejaments es consideren convencionals o culturals més que no pas físicament fonamentats, tot i que la base astronòmica del fenomen descrit és correcta.

²⁶ En aquest paràgraf, l'autora descriu un mètode clàssic d'astronomia observacional per determinar la latitud i l'obliquïtat de l'eclíptica a partir de mesures solars, alhora que reflecteix

la confiança del segle XIX en la capacitat de la ciència per validar dades històriques. Explica correctament que, als solsticis, la declinació del Sol coincideix amb l'angle d'inclinació de l'equador respecte de l'eclíptica (l'obliquïtat de l'eclíptica), i que aquesta es pot inferir a partir de la longitud de l'ombra d'un gnòmon. La referència a observacions antigues a la ciutat de «Layang» (probablement una transliteració imperfecta de la ciutat de Luoyang) s'inscriu en la tradició d'atribuir a la civilització xinesa antiga registres astronòmics molt reculats, alguns dels quals han estat efectivament conservats. Tanmateix, la idea que aquestes observacions poden ser verificades amb precisió a partir de taules contemporànies pressuposa un grau d'exactitud tant en les dades antigues com en la modelització de la variació de l'obliquïtat que avui es considera excessivament optimista. Si bé és cert que l'obliquïtat varia lentament amb el temps (en escales de desenes de milers d'anys) i que aquest fet permet, en principi, fer datacions aproximades, les incerteses en les mesures antigues, en la transmissió textual i en la identificació geogràfica limiten molt aquesta mena de verificacions.

²⁷ Ens trobem aquí amb una interpretació avui considerada especulativa sobre l'antiguitat de l'astronomia. L'autora es basa en la precessió dels equinoccis per suggerir que la descripció atribuïda a Eudox de Cnidos correspondria a una configuració celeste molt anterior a la seva època, identificant-la amb la posició de χ Draconis fa uns tres mil anys. Tanmateix, aquesta inferència es fonamenta en testimonis indirectes i en descripcions estel·lars massa imprecises per permetre una identificació segura. Encara més problemàtica és la referència a Quiró, figura mítica a la qual la tradició clàssica atribuïa una suposada fixació primitiva de l'esfera celeste, sense base històrica verificable. Aquest tipus d'argument, freqüent en l'erudició dels segles XVIII i XIX, tendia a combinar càlculs astronòmics rigorosos amb una lectura literal de fonts antigues i llegendàries. Des de la perspectiva actual, aquestes

reconstruccions es consideren hipotètiques i mancades de fonament empíric sòlid.

²⁸ Aquest passatge és encara més problemàtic i constitueix un exemple paradigmàtic de les interpretacions errònies que, a inicis del segle XIX, es derivaren de l'intent d'aplicar la precessió dels equinoccis a monuments antics. L'autora es refereix al famós Zodíac de Dandara, un relleu astronòmic del temple d'Hathor a Dandara, i proposa datar-lo en uns 4.000 anys d'antiguitat a partir de la posició del solstici dins la constel·lació de Lleó. Aquest raonament pressuposa, d'una banda, que les figures del zodíac representen directament la configuració celeste en el moment de construcció del temple, i, de l'altra, que és possible identificar sense ambigüitats aquestes figures amb constel·lacions modernes i relacionar-les amb el calendari agrícola egipci. Tanmateix, la recerca actual situa el relleu en època ptolemaica, cap al 50 aC, i l'interpreta no com un registre directe d'una configuració celeste puntual, sinó com una representació simbòlica i sincrètica del cosmos, influïda per tradicions egípcies i hel·lenístiques. Les datacions astronòmiques antigues com la de Somerville es consideren avui metodològicament febles, atès que parteixen d'identificacions incertes i d'una lectura excessivament literal de la iconografia. El debat sobre el zodíac de Dandara fou, de fet, un episodi destacat en la història de la ciència, en què diversos autors intentaren demostrar una antiguitat extremadament remota de la civilització egípcia mitjançant arguments astronòmics que posteriorment es revelaren insostenibles i en el qual participaren noms com Joseph Fourier, Thomas Young, Jean-François Champollion i Jean-Baptiste Biot. En aquest sentit, el fragment il·lustra bé la tensió, pròpia del seu temps, entre l'aplicació de mètodes quantitius rigorosos i les limitacions interpretatives imposades pel caràcter simbòlic de les fonts antigues.

²⁹ És totalment correcte que l'amplitud de la marea pot augmentar en canals estrets i estuaris, un fet que era ben conegut

des de molt abans de l'època de Somerville, així com que els efectes de l'ona de marea poden remuntar grans rius a distàncies considerables de la costa, com en el cas dels «estrets de Pauxis», identificables amb l'actual Óbidos, un dels trams més estrets del curs baix de l'Amazones. Tanmateix, l'afirmació que als pols les marees serien negligibles no s'ajusta al coneixement actual: si bé la força generadora de les marees depèn en part de la latitud, la seva amplitud real està dominada per factors com la configuració de les conques oceàniques, la profunditat i els efectes de ressonància, de manera que no es pot establir una correlació simple entre latitud i magnitud de la marea.

³⁰ L'atmosfera de la Lluna, en efecte, és extremadament tènue, fins al punt que pràcticament es considera un buit i a tots els efectes es considera que no en té. La pressió és baixíssima, d'unes 3×10^{-15} atm (0,3 nPa), varia al llarg del dia i té una massa total inferior a 10 tones. Està formada bàsicament per àtoms d'argó i d'heli i es forma per l'alliberament de gasos de l'interior lunar (procés anomenat *desgasificació*) i per l'impacte de micrometeorits, el vent solar i la radiació solar, que alliberen partícules de la superfície (procés anomenat *polvo-rització catòdica*).

³¹ El so són oscil·lacions que es generen i es propaguen en un medi material, mentre que la llum són oscil·lacions del camp electromagnètic i es poden propagar en el buit. En l'època de Somerville la teoria més acceptada de la naturalesa de la llum era l'ondulatòria, tal com ella exposa, però l'existència de camps electromagnètics i de la propagació d'oscil·lacions en ells hauria d'esperar als treballs de Maxwell i, després, de Hertz, ja a la segona meitat del segle XIX.

³² Com que en l'època en què escriu Somerville la fusió nuclear, veritable font d'energia del Sol, encara era desconeguda, es plantejava l'origen de la calor i la llum del Sol a partir de mecanismes de combustió, purament químics i totalment insuficients per explicar-la. Uns anys després de la publicació

de Somerville, Helmholtz i Kelvin van plantejar que la contracció de la massa solar podia explicar la seva emissió de calor. Tanmateix, Arthur Eddington i altres aviat van adonar-se que la quantitat total d'energia disponible a través d'aquest mecanisme només permetia que el Sol brillés durant uns quants milions d'anys en lloc dels milers de milions d'anys que les proves geològiques i biològiques suggerien per a l'edat de la Terra. En qualsevol cas, tots aquests resultats encara estaven en un futur llunyà el 1832.

³³ En aquest paràgraf veiem les dificultats de la física del primer terç del segle XIX per descriure adequadament el camp magnètic terrestre. Les observacions de la declinació i la inclinació magnètica (com les efectuades en expedicions àrtiques per Parry i Lyon, que comenta Somerville) mostraven variacions espacials i temporals que no es podien explicar mitjançant un model dipolar simple. En aquest context, es va difondre la idea que el magnetisme terrestre podia requerir la presència de diversos «pols» en cada hemisferi, formulació que cal entendre com una representació qualitativa d'un camp més complex. El desenvolupament posterior de la teoria, especialment amb els treballs de Gauss, demostrà que el camp magnètic terrestre es pot descriure com una superposició de components (dipolar, quadrupolar, etc.), sense necessitat de postular múltiples pols físics independents. Així, l'afirmació de Somerville reflecteix una etapa intermèdia en la comprensió del geomagnetisme, en què irregularitats reals del camp eren interpretades mitjançant un llenguatge conceptual encara imprecís.

³⁴ Avui sabem que la Lluna presenta un camp magnètic però molt més feble que el de la Terra; la principal diferència és que la Lluna no té actualment un camp magnètic dipolar (com el que generaria una geodinamo al seu nucli), de manera que la magnetització present és molt diversa i el seu origen es troba en les característiques magnètiques de les roques de la seva escorça. Sembla que les roques lunars formades fa entre 1.000

i 2.500 milions d'anys es van crear en un camp d'uns 5 μ T en comparació amb els 50 μ T de la Terra actual.

³⁵ Es refereix als tres cometes que pels volts de 1830 se sabia que eren periòdics: els que actualment reben els noms 1P/Halley, 2P/Encke i 3D/Biela. El 2P/Encke fou descobert per Méchain el 1786 i identificat com a periòdic el 1819. El 3D/Biela fou descobert el 1772 i identificat com a periòdic el 1826, el 1846 es va observar que es dividia en dues parts i ja no s'ha vist més des de 1852; com a resultat, actualment es considera que ha estat destruït, tot i que les restes semblen haver sobreviscut durant algun temps com una pluja de meteors, els andromèdids.

³⁶ Sírius és, efectivament, l'estrella més brillant del cel nocturn, però només és la cinquena estrella més propera a nosaltres, a 8,6 anys llum, per darrera del sistema d' α Centauri, l'estrella de Barnard, Wolf 359 i Lalande 21185. En l'època de Somerville, abans de la primera determinació de paral·laxi estel·lar, només es podien aventurar les distàncies al Sol a partir de la lluminositat aparent de les estrelles.

³⁷ Aquí Somerville ens presenta un bon resum de l'estat de la qüestió sobre les nebuloses a inicis del segle XIX, basat en les observacions de William Herschel i en la tasca de catalogació de Caroline Herschel. Descriu correctament l'existència de cúmuls estel·lars i de regions difuses no resolubles amb els instruments de l'època, així com la naturalesa estel·lar de la Via Làctia. Ara bé, interpreta de manera homogènia aquestes «nebuloses» com a matèria difusa i autolluminosa en procés de condensació, d'acord amb la hipòtesi nebular aleshores dominant. Aquesta interpretació no distingeix entre objectes de naturalesa diversa, ja que avui sabem que sota aquesta denominació s'inclouen tant nebuloses gasoses reals (per exemple, la nebulosa d'Orió), com cúmuls estel·lars, i també galàxies externes a la nostra, com la galàxia d'Andròmeda, la

naturalesa extragalàctica de les quals no fou establerta fins a l'inici del segle XX.

³⁸ Somerville es fa ressò aquí de la hipòtesi, força estesa al seu temps, segons la qual certes lluminositats observades a la superfície lunar serien degudes a erupcions volcàniques, capaces fins i tot de projectar fragments rocosos fora del camp gravitatori lunar. Actualment, però, se sap que la Lluna no presenta activitat volcànica recent, i que aquests fenòmens lluminosos responen a causes diverses, especialment a impactes de meteorits sobre la superfície lunar.

³⁹ Referència a una hipòtesi, debatuda al segle XVIII i inicis del XIX, segons la qual la gravetat es transmetria amb una velocitat finita a través de l'espai, en lloc d'actuar instantàniament com en la formulació de Newton. Aquesta idea fou considerada, entre altres motius, per explicar l'acceleració secular del moviment de la Lluna, però els càlculs mostraren que, per produir l'efecte observat, la velocitat de propagació de la gravetat hauria de ser immensament superior a la de la llum, cosa que la feia inviable dins del marc newtonià. En conseqüència, es mantingué la interpretació de l'acció gravitatòria com a pràcticament instantània.

⁴⁰ Somerville assenyala aquí la invariància d'escala de la gravitació newtoniana, segons la qual les lleis del moviment depenen de relacions entre magnituds i no de valors absoluts, de manera que un sistema reduït proporcionalment conservaria la mateixa dinàmica. Ara bé, observa que aquest comportament no es manté a distàncies molt petites, on intervien forces de cohesió, capil·laritat i processos químics, interpretats encara com possibles modificacions de la gravetat o com efectes d'una força desconeguda. Avui en dia sabem que tots aquests fenòmens s'expliquen per l'electromagnetisme, el paper fonamental del qual en l'estructura de la matèria i en les interaccions quotidianes dels cossos no fou plenament comprès fins a la segona meitat del segle XIX. Cal destacar el suggeriment de Somerville en el sentit que la gravetat podria no

ser una llei última, sinó derivar d'un principi més general, idea que anticipa una línia de pensament que culminaria en els intents moderns d'unificació de les forces fonamentals.