



Josep M. Trigo Rodríguez

La Terra en perill

**L'impacte d'asteroides
i cometes**



La Terra en perill

Josep M. Trigo Rodríguez

La Terra en perill

**L'impacte d'asteroides
i cometes**



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Edicions

Col·lecció
Catàlisi

ÍNDIX

<i>Prefaci</i> , per Iwan Williams	11
<i>Introducció</i>	13
Capítol 1. Boles de foc que anuncien caigudes de meteorits	19
Terminologia: asteroide, cometa i meteoroides	23
Quantes tones arriben a la Terra?	24
Com es crea un meteor? L'ablació a l'atmosfera	25
La cerca de meteorits	29
Una breu introducció als tipus de meteorits	34
El valor de recuperar meteorits	36
Qüestions del capítol 1	39
Capítol 2. Els cossos progenitors dels meteorits i les seves rutes cap a la Terra.	43
L'origen dels asteroides i els meteorits	45
El cinturó principal d'asteroides	46
La llei de Titius-Bode	48
Una aplicació bàsica de les lleis de Kepler	51
Els principals tipus d'asteroides: les classes espectrals	56
Les resonàncies com a fonts de meteorits	59
Objectes transicionals i cometes	62
Cometes: el cinturó transneptunià i el núvol d'Oort	65
Qüestions del capítol 2	63

Capítol 3. L'origen i la natura dels cometes	73
Impactes amb cometes.	80
Missions pioneres a cometes	81
La missió Stardust i els materials del cometa 81P/Wild 2.	84
La missió <i>Rosetta</i> i el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko	89
El cinturó transneptunià	94
Qüestions del capítol 3.	96
Capítol 4. El risc associat a cometes de període curt: quin és el seu origen?	99
La natura fràgil, fosca i elusiva dels cometes	100
Impactes, esclats atmosfèrics i els seus marcadors	102
Aquests esclats atmosfèrics han estat enregistrats en la història escrita?	106
Asteroides i cometes a la regió propera a la Terra	109
El cometa Encke i el complex dels Tàurids	111
Fou l'esdeveniment de Tunguska una advertència del cometa Encke?.	113
Una gran carabassa per a Halloween: (2015) TB145	116
Qüestions del capítol 4.	119
Capítol 5. Quantificant la natura i magnitud del perill d'impacte amb asteroides	121
Identificant les fonts de perill	123
Programes de seguiment	129
Descobrint asteroides propers a la Terra.	133
Asteroides sotmesos a forces capritxoses	136
Els asteroides que giren més ràpid	139
L'efecte de marea en els passos propers a la Terra.	141
Datant l'estada de meteorits a l'espai	143
Quantificant el perill d'impacte: l'escala de Torí.	146
La fita del descobriment d'asteroides de l' <i>Spaceguard</i>	148
El perill actual d'impacte per part de petits asteroides	150
Quines lliçons hem d'aprendre?.	153

DART: la nostra capacitat per desviar asteroides	155
Qüestions del capítol 5	156
Capítol 6. Cràters i extincions en el registre geològic	161
Cràters: evidència directa d'impactes colossals	164
L'escala geològica: buscant el rastre de catàstrofes	166
Les extincions del Fanerozoic	169
Els pioners de la teoria de l'impacte	171
L'aventura científica del <i>Meteor Crater</i>	172
El reconeixement de l'impacte de Chicxulub i el límit K/T	174
L'impacte de l'asteroide Eltanin	178
Qüestions del capítol 6	181
<i>Bibliografia</i>	185

PREFACI

Els meteorits representen l'únic material d'origen extraterrestre que es pot estudiar en un laboratori, amb l'única excepció dels materials transportats per les missions espacials de retorn de mostres. Per tant, estudiar-los pot oferir pistes essencials sobre l'origen del sistema solar i de la vida mateixa. Conèixer l'origen i la història evolutiva del meteorit és, doncs, d'una importància crucial. La pregunta clau és: on es van originar, en cometes o en asteroides? També cal conèixer el grau de canvis que han patit des de la seva formació, durant l'alliberament del cos pare a l'arribada a la superfície de la Terra. Alguns d'aquests canvis s'esdevenen durant el trànsit brusc del meteorit a través de l'atmosfera del planeta, mentre que d'altres poden tenir lloc mentre es troba a la superfície de la Terra. Reconstruir-ne la trajectòria seguida a través de l'atmosfera i calcular-ne, a partir d'ella, l'òrbita en el sistema solar resulta, per tant, fonamental per comprendre la història del meteorit. Trigo-Rodríguez ha dedicat una fracció considerable de la seva vida professional a aquests problemes i és un expert reconegut en aquest camp. En aquest llibre ens posa a les mans el seu coneixement sobre aquests temes a un nivell que resulta comprensible per al no expert. A més d'entendre la història dels meteorits, és important comprendre'n l'evolució des del moment que passen a formar part d'un cos gran. Això requereix un estudi exhaustiu de l'estructura i l'evolució del cos progenitor. Per exemple, quins canvis interns ocorren després d'una col·lisió, cosa que produeix un escalfament

considerable tant de l'asteroide com del meteorit. Aquests aspectes es tracten a fons en el llibre des de la perspectiva única de l'autor com a expert en l'estudi d'aquests processos, tant en meteorits com en materials cometaris, que porta a terme als laboratoris del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC).

A més de ser important per a l'avenç de la ciència, conèixer la història d'un meteorit i inferir-ne les propietats fisicoquímiques del cos pare són qüestions rellevants per a l'avaluació de l'amenaça que representen per a la vida a la Terra i sobre com reduir el nivell de risc per a la humanitat. En conclusió, en aquest llibre, el doctor Trigo-Rodríguez fa un esforç considerable per resumir el nostre coneixement actual en aquests camps que serà crucial per tractar altres temes clau, com ara poder desviar asteroides, tal com ho farà la missió DART, o identificar els objectius més rellevants per a l'exploració del nostre sistema solar en el futur pròxim.

IWAN WILLIAMS

Professor emèrit

School of Physics and Astronomy, Queen Mary

Universitat de Londres

INTRODUCCIÓ

La nostra vida està íntimament lligada al planeta Terra i es fa difícil pensar que l'existència de tota la humanitat de sobte es pugui posar en escac. Ni tan sols solem pensar que un fenomen celeste ens pogués arribar a afectar d'aquesta manera. No cal ni dir que aquesta actitud denota com en continua sent, d'incauta, la nostra espècie en ple segle XXI. No resulta gens sorprenent en una societat que encara nega, si més no en part, la influència antropogènica en el canvi climàtic malgrat el cúmul d'evidències científiques obtingudes en les darreres dècades.

Certament, ens basem en bona mesura en l'experiència acumulada i en el llegat històric, subjecte a la interpretació dels fenòmens celestes. Tanmateix, la nostra espècie fa poc temps relativament que deixa constància escrita del que s'esdevé, i aquest llegat presenta un biaix més que considerable. La ciència ens ajuda a desxifrar a les roques certs fenòmens succeïts antigament al nostre planeta, tan inexorables com temibles, que possiblement tinguin la capacitat de fer-nos canviar de manera de pensar. En aquest llibre pretenc divulgar els ensenyaments de diverses disciplines, algunes tristament relegades, pel que fa als impactes amb asteroides i cometes. Astrofísica, geologia, geofísica i paleontologia s'uneixen en aquest camp força desconegut pel gran públic. L'obra que teniu a les mans pretén posar remei a aquesta carència d'informació rigorosa divulgant el paper que sabem que aquestes hecatombes han tingut en la història de la vida a la Terra.

Malgrat la raresa relativa d'aquests impactes en el nostre imaginari col·lectiu, els asteroides i els cometes són objectes comuns que molts científics estudiem apassionadament i que són tema de moltes notícies científiques. En determinades ocasions, alguns d'aquests objectes protagonitzen uns encontres relativament propers amb el nostre planeta que, com a mínim, ens haurien d'incitar a la reflexió. Tanmateix, la premsa escrita està molt sovint més preocupada pel sensacionalisme que per la divulgació rigorosa. Amb tot això, es banalitza un problema molt seriós i, com a conseqüència directa, aquest perill arribat del cel no ocupa l'espai que es mereix. En certa manera, es manté endormiscat en la nostra consciència i sembla que el nostre interès només s'activa si sentim alguna notícia sobre l'aproximació perillosa d'un asteroide a la Terra. Hauríem de pensar que és només quelcom per contemplar en el marc de la ciència-ficció? Què passaria si un dia determinat un encontre inesperat canviés la nostra percepció del problema? Per què no posem fil a l'agulla si es tracta del perill evitable més gran al qual ens enfrontem?

El registre geològic indica que l'impacte de cossos celestes ha estat summament comú en la història de la Terra, tot i que ha afluixat de manera exponencial al llarg del temps. Sortosament, avui en dia els impactes es produeixen de mitjana en una escala temporal relativament gran. Malgrat tot, no hi ha dubte que existeixen evidències indiscutibles d'impactes catastròfics que van marcar l'evolució de la vida a la Terra fa relativament poc en la història geològica. Fins fa poques dècades, ens trobàvem sotmesos a l'atzar d'aquestes tempestes celestes, però durant els darrers temps hem completat la catalogació dels asteroides més grans i potencialment perillosos, la font principal de risc. Les grans potències han pres consciència del perill latent i han posat en marxa programes de seguiment que, en les properes dècades, probablement donaran pas a projectes espacials pal·liatius. No és moment de passar a l'acció, però sí de fer guàrdia, de completar la catalogació i el seguiment dels objectes potencialment perillosos, de llançar missions d'exploració i de recollida

de mostres per comprendre millor el perill al qual ens enfrontem i, sobretot, de començar a preparar-nos.

La societat en pren consciència lentament gràcies, entre altres iniciatives, al paper que molts científics hem exercit en la divulgació del problema en el marc internacional del Dia de l'Asteroides. La destrucció local motivada per l'ona de xoc del superbòlid de Txeliàbinsk va suposar una posada en escena del perill associat als impactes, que va servir d'avantsala perfecta per a aquesta iniciativa. No tan sols hi ha perill quan es produeix un impacte directe que excava un cràter o genera un terratrèmol submarí de dimensions gegantines. Grans boles de foc, il·lustrades per l'esdeveniment del 30 de juny de 1908 sobre Tunguska, es poden arribar a fragmentar eficientment i, encara que no generin un cràter, esclafar amb la seva ona de xoc una regió sencera i, al cap de pocs minuts, incinerar-la en arribar-hi el gas calent fruit de l'ablació de la roca que el produeix. Aquest esdeveniment succeït a la remota àrea de Tunguska ja no és l'únic episodi meteòric contemporani. La magnitud i la perillositat de l'enorme superbòlid que va caure sobre Txeliàbinsk van ser un recordatori que els impactes d'asteroides de poques desenes de metres, com el que es va produir al damunt de Tunguska el 1908, poden ser més freqüents del que ens pensàvem, que era que només succeïrien una vegada per segle.

Gràcies a les múltiples filmacions i als estudis duts a terme sobre el meteorit de Txeliàbinsk, l'origen clarament meteòric de Tunguska ha deixat de ser menystingut sobre la base d'altres teories, la majoria força ridícules. Hem d'enfrontar un perill real i comú a tota la humanitat que ens hauria de fer pensar en el que fem per defensar-nos, però no dels nostres semblants, sinó d'aquell perill abstracte que ens hauria d'unir en pro d'un objectiu d'autodefensa comuna. No pretenc caure en utopies, però la necessitat ens pot portar en un futur a una finalitat de col·laboració multinacional a la qual no estem gaire acostumats. Afrontar-la no tan sols significarà guanyar punts per a la supervivència de la nostra espècie, sinó

també progressar en nom del desenvolupament de noves disciplines científicotecnològiques, com ara l'exploració tripulada d'altres mons i la mineria espacial.

Els programes de seguiment i catalogació dels anomenats *cossos menors* fa unes quantes dècades que recopilen informació. Coneixem força bé el perill associat als asteroides més grans, els que tenen un diàmetre que oscil·la entre els cent metres i uns pocs quilòmetres, però dels de poques desenes de metres, com el que va protagonitzar la caiguda meteòrica de Txeliàbinsk, encara en desconeixem un bon percentatge. Les nostres carències continuen sent un motiu de preocupació que impulsa l'aparició de nous programes de seguiment telescòpic, i, fins i tot, esperem que s'engegui aviat un projecte per a l'ús de telescopis espacials dedicats a completar la catalogació i el seguiment d'aquests objectes.

Però no tot s'acaba amb els asteroides. Els cometes també haurien de ser font de desassossec, si bé, com veurem en aquest llibre, la seva freqüència d'impacte és un ordre de magnitud inferior al que s'associa amb els asteroides. Encara que el perill pugui ser estadísticament menor, no resulta gens negligible pensant en els embats inesperats de cometes de llarg període. Per acabar-ho d'adobar, el 10 d'octubre de 2015, amb el descobriment d'un objecte de més de sis-cents metres de diàmetre denominat (2015) TB145, vam prendre consciència col·lectiva de l'existència de nuclis de cometes extingits amb peculiaritats preocupants: foscos, ràpids i inesperats. Aquell objecte es va descobrir amb només tres setmanes de marge i, afortunadament, va passar a una distància una mica superior a la de la Lluna. Tot això ens fa plantejar si la naturalesa atzarosa d'aquests encontres, capaços d'assolar el nostre planeta, no ens hauria de motivar encara més per desenvolupar sistemes palliatius per tal de lluitar contra aquestes amenaces. I també ens fa plantejar si, per tal d'assegurar la persistència de la nostra espècie, hauríem de colonitzar la Lluna i la Mart.

Aquest llibre també pretén descriure la naturalesa dels cossos que ens posen en perill, des de la matèria rocosa amb diferents graus de duresa i

densitat que conforma els asteroides fins a la mixta i porosa que atribuïm als cometes, formats per una barreja de partícules rocoses, gels i matèria orgànica, com han demostrat les missions Stardust (NASA) i Rosetta (ESA). Diverses generacions d'astrònoms portem temps seguint i determinant les òrbites d'aquests objectes. I ara els nostres ordinadors moderns n'integren les òrbites per estudiar com evolucionen en funció del temps. Aquests estudis ens permeten comprendre els mecanismes dinàmics que els acosten a la Terra. En funció d'aquestes aproximacions, i del registre geològic, n'extraïem dades essencials sobre la freqüència d'impacte contra el nostre planeta. El llegat estratigràfic inclou evidències geològiques clares sobre la transcendència d'una sèrie d'encontres, rars, però cabdals, durant la història de la vida al nostre planeta. L'estudi i la quantificació de catàstrofes prèvies ens aporten pistes per poder afrontar futurs reptes de supervivència davant d'eventuals impactes.

Seria il·lògic pensar que la interacció de la Terra amb el seu entorn queda reduïda als impactes més grans. Cada nit, la Terra intercepta milions de partícules. La majoria són diminutes, de desenes de micres a pocs centímetres, i en molt bona mesura s'evaporen, però també aporten materials a l'atmosfera més alta on es condensen, cosa que produeix microesfèrules que sedimenten gravitatòriament fins que arriben a terra. L'estudi dels sediments lacustres i oceànics revela la magnitud de l'aportació constant de matèria interplanetària, que arriba a la Terra a raó d'unes dues-centes mil tones a l'any. A més d'aquest flux continu i intens de partícules diminutes, cada any es produeixen desenes de caigudes de meteorits anunciades per espectaculars boles de foc, unes caigudes que ens permeten estudiar els materials formatius dels asteroides als nostres laboratoris.

Per tant, amb aquest llibre pretenc posar èmfasi a la necessitat de prendre consciència del perill associat als impactes dels asteroides i els cometes. Abordo el problema basant-me en les evidències científiques obtingudes en els darrers segles, sense pretendre crear alarmismes. I hi veurem que, si volem quantificar i explicar aquests perills, cal que fo-

mentem l'exploració d'aquests objectes amb el valor afegit de poder abordar la mineria espacial i contestar preguntes claus sobre el nostre origen. Al cap i a la fi, pot ser que només siguem el fruit de l'oportunitat que un asteroide va proporcionar als mamífers, fa uns seixanta-cinc milions d'anys, perquè evolucionessin després de l'hecatombe que va induir el declivi dels dinosaures. Si hem après a llegir el llibre geològic de la Terra, ens hauríem de considerar una espècie afortunada, i els seus ensenyaments ens haurien de posar en guàrdia.

CAPÍTOL 1

Boles de foc que anuncien caigudes de meteorits

El cel nocturn sembla immutable i, en el curt espai d'una vida humana, les estrelles semblen eternament estàtiques en la seva posició relativa entre si. No obstant això, la nostra visió impertorbable de l'univers és només un miratge, una mera aparença que, sota una nit estel·lar, el fenomen meteòric és capaç de desmuntar en pocs minuts. Cada nit, desenes d'estels fugaços s'escampen pel nostre firmament a una distància que, encara que semblava estel·lar per als nostres avantpassats, té lloc a l'atmosfera terrestre, generalment a menys de cent quilòmetres per sobre dels nostres caps.

Aquestes ràpides columnes de llum exemplifiquen que l'espai interplanetari no és pas buit, sinó ple de pols i roques, que són el producte directe de l'erosió d'asteroides, de cometes i dels mateixos planetes. Encara que no en siguem conscients, a través de col·lisions entre asteroides o de la sublimació dels gels que formen els cometes, petites partícules o, fins i tot, grans roques són propulsades al medi interplanetari per viatjar a velocitats supersòniques. Aquests fragments, que es mouen a velocitats relatives de centenars de milers de quilòmetres per hora (km/h), quan són interceptades per la Terra colpegen els gasos de l'atmosfera i els ionitzen, tot creant el rastre de llum que anomenem *meteor*.

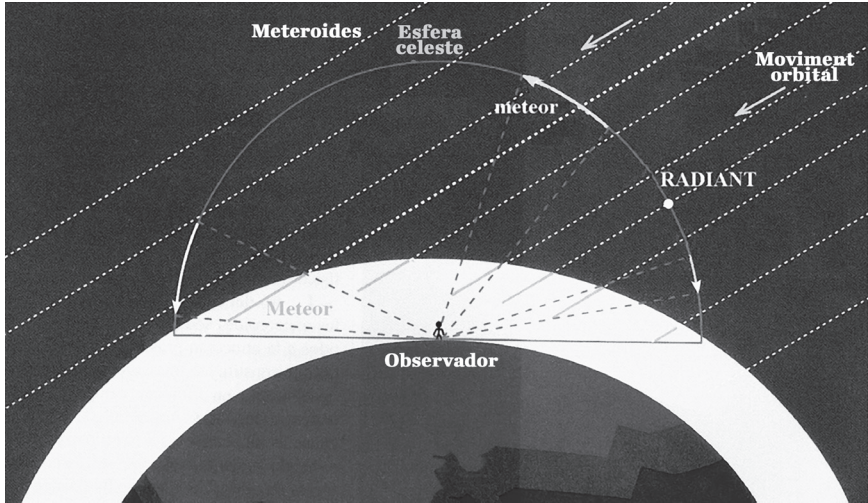


Figura 1.1. El radiant d'una pluja de meteoros es produeix per la perspectiva en què les partícules colpegen l'atmosfera des d'un eixam de meteoros en què les partícules segueixen òrbites similars.

Quan la Terra intercepta els eixams de partícules deixats enrere per asteroides i cometes, es produeix el que es coneix com a *pluja d'estels fugaos*. Cada meteor segueix una trajectòria diferent entre les estrelles i, si les tracem, veurem que cada nit hi ha regions del cel que són fonts d'estels fugaos. Aquestes zones del cel s'anomenen *radiants* (fig. 1.1).

Pel que fa a la lluminositat d'estrelles i meteoros, els astrònoms han definit un sistema logarítmic per definir la magnitud de la brillantor dels estels que mirem. Així, en la convenció astronòmica, les estrelles més lluminoses tenen magnituds negatives: la més lluminosa és Sírius i té una magnitud de $-1,5$, mentre que el planeta Venus sol tenir de mitjana una magnitud de -4 . Hi ha al voltant de 6.000 estrelles visibles a simple vista que tenen una magnitud de $+6$ o inferior. El concepte de magnitud neix de l'obra pionera d'Hiparc d'Alexandria (?-127 aC), que va dividir els estels visibles en sis classes, amb magnitud 0 els més brillants i magnitud $+6$ els més febles visibles a simple vista. Basant-se en aquesta classificació,