



Josep M. Trigo Rodríguez

La Tierra en peligro

**El impacto de asteroides
y cometas**



La Tierra en peligro

Josep M. Trigo Rodríguez

La Tierra en peligro

**El impacto de asteroides
y cometas**



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Edicions

Colección
Catàlisis

SUMARIO

<i>Prefacio</i> , por Iwan Williams	11
<i>Introducción</i>	13
Capítulo 1. Bóolidos que anuncian rocas caídas del cielo	19
Terminología: asteroide, cometa y meteorode	23
¿Cuántas toneladas llegan a la Tierra?	24
¿Cómo se crea un meteoro? La ablación en la atmósfera	25
La búsqueda de meteoritos	29
Tipos de meteoritos	34
El valor de recuperar meteoritos	36
Cuestiones del capítulo 1	39
Capítulo 2. Cuerpos progenitores de meteoritos y sus rutas hacia la Tierra.	43
El origen de los asteroides y los meteoritos	45
El cinturón principal de asteroides	46
La ley de Titius-Bode	48
Principales tipos de asteroides: clases espectrales	54
Las resonancias como fuentes de meteoritos	57
Objetos de transición y cometas	60
Los cometas: el cinturón transneptuniano y la nube de Oort	63
Cuestiones del capítulo 2	65

Capítulo 3. El origen y la naturaleza de los cometas	69
El impacto con cometas	76
Misiones pioneras y revolucionarias	77
La misión Stardust y los materiales del 81P/Wild 2.	80
La misión Rosetta y el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.	85
El cinturón transneptuniano	89
Cuestiones del capítulo 3	91
Capítulo 4. El embate de cometas de período corto y su origen.	93
La naturaleza frágil, oscura y esquiva de los cometas	94
Impactos, estallidos atmosféricos y sus marcadores	96
¿Hay estallidos atmosféricos registrados en la historia?	100
Asteroides y cometas en la región próxima a la Tierra	102
El cometa Encke y el complejo de las Táuridas	104
¿Fue el evento de Tunguska un aviso del cometa Encke?	107
Una gran calabaza para Halloween: 2015 TB145.	109
Cuestiones del capítulo 4	112
Capítulo 5. Cuantificar las dimensiones, la naturaleza y el peligro de impacto por asteroides.	117
Programas de seguimiento	124
Descubriendo asteroides próximos a la Tierra	128
Asteroides sometidos a fuerzas caprichosas	130
Asteroides «peonza»	134
El efecto marea en los pasos próximos a la Tierra	136
La estancia de los meteoritos en el espacio	137
Cuantificando el peligro de impacto: la escala de Turín.	140
El reto del descubrimiento de asteroides del programa Spaceguard	142
El peligro actual de impacto	145
¿Qué lecciones deberíamos extraer?	148
DART: nuestra capacidad para desviar asteroides	149
Cuestiones del capítulo 5	151

Capítulo 6. Cráteres y extinciones en el registro geológico	157
Cráteres: evidencia directa de impactos colosales	160
La escala geológica: buscando huellas de hecatombes.	162
Las extinciones del Fanerozoico	165
Los precursores de la teoría de impacto	167
La aventura científica del <i>Meteor Crater</i>	168
El reconocimiento de la catástrofe de Chicxulub y el límite K/T.	170
El impacto del asteroide Eltanin	175
Cuestiones del capítulo 6	177
 <i>Bibliografía</i>	 181

PREFACIO

Los meteoritos representan el único material de origen extraterrestre que puede ser estudiado en un laboratorio, con la única excepción de los materiales devueltos por las misiones espaciales de retorno de muestras. Por lo tanto, su estudio puede dar pistas esenciales sobre el origen del sistema solar y de la vida misma. Conocer tanto el origen como la historia evolutiva del meteorito es, por lo tanto, de crucial importancia. La pregunta clave es: ¿en dónde se originaron, en cometas o asteroides? También hemos de preguntarnos por el nivel de cambios que se han producido desde su formación y posterior liberación desde el cuerpo padre hasta su llegada a la superficie de la Tierra. Algunos de estos cambios acontecen durante el brusco tránsito del meteorito a través de la atmósfera de la Tierra, mientras que otros pueden tener lugar mientras está en la superficie de la Tierra. Reconstruir la trayectoria seguida a través de la atmósfera y calcular a partir de ella su órbita en el sistema solar resulta, por tanto, fundamental para comprender la historia del meteorito. Trigo-Rodríguez ha dedicado una fracción considerable de su vida laboral a estos problemas y es un reconocido experto en este campo. En este libro pone en nuestras manos su conocimiento de estos temas a un nivel comprensible para el no experto. Además de comprender la historia de los meteoritos hay que comprender su evolución desde que pasan a formar parte de un cuerpo mayor. Esto requiere un estudio exhaustivo de la estructura y evolución del cuerpo progenitor. Por ejemplo, qué cambios tienen lugar

después de una colisión, lo que produce un calentamiento considerable tanto del asteroide como del meteorito. Estos aspectos se tratan a fondo en el libro desde la perspectiva única del autor como experto en el estudio de estos procesos, tanto en meteoritos como en materiales cometarios, que realiza en los laboratorios del CSIC.

Además de ser importante para el avance de la ciencia, conocer la historia de un meteorito, e inferir de él las propiedades físico-químicas de su cuerpo padre, son cuestiones relevantes para la evaluación de la amenaza que representan para la vida en la Tierra y cómo reducir el nivel de riesgo para la humanidad. En conclusión, en este libro Trigo-Rodríguez hace un esfuerzo considerable para resumir nuestro conocimiento actual en estos campos que será crucial para tratar otros temas clave como, por ejemplo, poder desviar asteroides como hará la misión DART, o identificar los objetivos más relevantes para la exploración de nuestro sistema solar en el futuro próximo.

IWAN WILLIAMS

Profesor emérito

School of Physics and Astronomy, Queen Mary

Universidad de Londres

INTRODUCCIÓN

Nuestra vida está íntimamente ligada al planeta Tierra y se hace difícil pensar que la existencia de toda la humanidad pueda ponerse en jaque de repente. Ni tan siquiera solemos pensar que un fenómeno celeste pudiese llegar a afectarnos de tal manera. Ni que decir tiene que esa actitud denota lo incauta que continúa siendo nuestra especie en pleno siglo XXI. No resulta nada sorprendente en una sociedad que todavía niega, al menos en parte, la influencia antropogénica en el cambio climático pese al cúmulo de evidencia científica obtenida en las últimas décadas.

Ciertamente, nos basamos en buena medida en la experiencia acumulada y en el legado histórico, sujeto a la interpretación de los fenómenos celestes. Sin embargo, nuestra especie lleva relativamente poco tiempo dejando constancia escrita de lo que acontece y ese legado tiene un sesgo más que considerable. La ciencia nos ayuda a descifrar en las rocas ciertos fenómenos acaecidos antaño en nuestro planeta, tan inexorables como temibles, que posiblemente tengan la capacidad de hacernos cambiar nuestra manera de pensar. En este libro pretendo divulgar las enseñanzas de diversas disciplinas, algunas tristemente relegadas, respecto a los impactos con asteroides y cometas. Astrofísica, geología, geofísica y paleontología se unen en ese campo bastante desconocido por el gran público. La obra que tiene en sus manos pretende remediar esa carencia de información rigurosa divulgando el papel que sabemos que tales hecatombes han tenido en la historia de la vida en la Tierra.

Pese a la rareza relativa de tales impactos en nuestro imaginario colectivo, los asteroides y cometas son objetos comunes que muchos científicos estudiamos apasionadamente y que son tema de muchas noticias científicas. En ciertas ocasiones, algunos de esos objetos protagonizan encuentros relativamente próximos con nuestro planeta que deberían, cuando menos, incitarnos a la reflexión. Sin embargo, la prensa escrita está muy a menudo más preocupada por el sensacionalismo que por la divulgación rigurosa. Con todo ello, se banaliza un problema muy serio y, como consecuencia directa, ese peligro venido del cielo no ocupa el papel que merece. En cierto modo, permanece aletargado en nuestra conciencia y parece que solo activa nuestro interés si oímos alguna noticia sobre la aproximación peligrosa de un asteroide a la Tierra. ¿Deberíamos pensar que solo es algo para contemplar en el marco de la ciencia ficción? ¿Qué pasaría si un determinado día un encuentro inesperado cambiase nuestra percepción del problema? ¿Por qué no ponernos manos a la obra si es el mayor peligro evitable al que nos enfrentamos?

El registro geológico indica que el impacto de cuerpos celestes ha sido sumamente común en la historia de la Tierra, aunque ha decrecido de manera exponencial a lo largo del tiempo. Por fortuna, hoy en día sucede por término medio en una escala temporal relativamente grande. Pese a ello, no cabe duda que existe evidencia indiscutible de impactos catastróficos que marcaron la evolución de la vida en la Tierra hace relativamente poco en la historia geológica. Hasta hace pocas décadas, permanecíamos sometidos al azar de estas tormentas celestes, pero en los últimos tiempos hemos completado la catalogación de los mayores asteroides potencialmente peligrosos, la principal fuente de riesgo. Las grandes potencias han tomado conciencia del peligro latente y han puesto en marcha programas de seguimiento que, en las próximas décadas, darán posiblemente paso a proyectos espaciales paliativos. No es momento de pasar a la acción, pero sí de hacer guardia, completar la catalogación y el seguimiento de los objetos potencialmente peligrosos, lanzar misiones de ex-

ploración y retorno de muestras para comprender mejor el peligro al que nos enfrentamos y, sobre todo, comenzar a prepararnos.

La sociedad toma lentamente conciencia gracias, entre otras iniciativas, al papel que muchos científicos hemos tomado en la divulgación del problema en el marco internacional del Día del Asteroide. La destrucción local motivada por la onda de choque del superbólido de Cheliábinsk supuso una puesta en escena del peligro asociado a impactos que sirvió de antesala perfecta a tal iniciativa. No solo hay peligro cuando se produce un impacto directo que excava un cráter o genera un maremoto de gigantescas dimensiones. Grandes bolas de fuego, ilustradas por el evento del 30 de junio de 1908 sobre Tunguska, pueden llegar a fragmentarse eficientemente y, aunque no generen un cráter, aplastar con su onda de choque una región entera y, pocos minutos después, incinerarla al llegar el gas caliente fruto de la ablación de la roca que lo produce. Este suceso ocurrido sobre la remota área de Tunguska ya no es el único evento meteórico contemporáneo. La magnitud y peligrosidad del enorme superbólido aparecido sobre Cheliábinsk fue un recordatorio de que los impactos de asteroides de pocas decenas de metros, como el acontecido sobre Tunguska en 1908, pueden ser más frecuentes de lo que pensábamos y sucederían una vez por siglo.

Gracias a las múltiples filmaciones y los estudios realizados sobre Cheliábinsk, el origen claramente meteórico de Tunguska ha dejado de ser ninguneado sobre la base de otras teorías, la mayoría bastante ridículas. Hemos de hacer frente a un peligro real y común a toda la humanidad que nos debería hacer pensar en qué hacemos para defendernos, no de nuestros semejantes, sino de ese peligro abstracto que nos tendría que unir en pro de un objetivo de autodefensa común. No pretendo caer en utopías, pero la necesidad puede llevarnos a un fin de colaboración multinacional al que no estamos demasiado acostumbrados. Afrontarlo no solo significará ganar puntos para la supervivencia de nuestra especie, sino también progresar en aras del desarrollo de nuevas disciplinas científico-

tecnológicas tales como la exploración tripulada de otros mundos y la minería espacial.

Los programas de seguimiento y catalogación de los llamados *cuerpos menores* llevan varias décadas recopilando información. Conocemos bastante bien el peligro asociado a los mayores asteroides, aquellos cuyo diámetro oscila entre cien metros y pocos kilómetros, pero todavía desconocemos un buen porcentaje de aquellos de pocas decenas de metros, como el que protagonizó la caída meteórica de Cheliábinsk. Nuestras carencias continúan siendo un motivo de preocupación que impulsa la aparición de nuevos programas de seguimiento telescópico, e incluso esperamos que pronto se ponga en marcha un proyecto para el uso de telescopios espaciales dedicados a completar la catalogación y el seguimiento de estos objetos.

Pero no todo acaba en los asteroides. Los cometas también deberían ser fuente de desasosiego, si bien, como veremos en este libro, su frecuencia de impacto es un orden de magnitud inferior al asociado a asteroides. Aunque el peligro pueda ser estadísticamente menor, no resulta nada despreciable pensando en los embates de inesperados cometas de largo período. Por si fuera poco, el 10 de octubre de 2015, con el descubrimiento de un objeto de más de seiscientos metros de diámetro denominado 2015 TB145, tomamos conciencia colectiva de la existencia de núcleos de cometas extintos con peculiaridades preocupantes: oscuros, rápidos e inesperados. Aquel objeto se descubrió con solo tres semanas de margen y afortunadamente pasó a una distancia algo superior a la de la Luna. Todo esto nos hace plantearnos si la naturaleza azarosa de estos encuentros capaces de asolar nuestro planeta no debería motivarnos aún más a desarrollar sistemas paliativos para luchar contra esas amenazas. También nos hace plantearnos si, para asegurar la persistencia de nuestra especie, deberíamos colonizar la Luna y Marte.

Este libro también pretende describir la naturaleza de los cuerpos que nos ponen en peligro, desde la materia rocosa con diferentes grados de

dureza y densidad que conforma los asteroides hasta la mixta y porosa que atribuimos a los cometas, formados por una mezcla de partículas rocosas, hielos y materia orgánica, como han demostrado las misiones Stardust (NASA) y Rosetta (ESA). Varias generaciones de astrónomos llevamos tiempo siguiendo y determinando las órbitas de estos objetos. Ahora nuestros modernos ordenadores integran sus órbitas para estudiar cómo evolucionan en función del tiempo. Tales estudios nos permiten comprender los mecanismos dinámicos que los aproximan a la Tierra. En función de esas aproximaciones y del registro geológico extraemos datos esenciales sobre su frecuencia de impacto contra nuestro planeta. El legado estratigráfico alberga evidencia geológica clara de la transcendencia de esos raros pero capitales encuentros en la historia de la vida sobre nuestro planeta. El estudio y la cuantificación de catástrofes previas nos aportan pistas para poder afrontar futuros retos de supervivencia ante eventuales impactos.

Sería ilógico pensar que la interacción de la Tierra con su entorno queda reducida a grandes impactos. Cada noche la Tierra intercepta millones de partículas. La mayoría son diminutas partículas de decenas de micras a pocos centímetros que se evaporan en buena medida, pero que aportan materiales a la alta atmósfera y se condensan produciendo microesférulas que sedimentan gravitatoriamente hasta alcanzar el suelo. El estudio de sedimentos lacustres y oceánicos revela la magnitud de la continua aportación de la materia interplanetaria que alcanza la Tierra a razón de unas doscientas mil toneladas al año. Además de ese flujo continuo e intenso de diminutas partículas, cada año se producen decenas de caídas de meteoritos anunciadas por espectaculares bolas de fuego. Tales eventos afortunados nos permiten estudiar los materiales formativos de los asteroides en nuestros laboratorios.

Por tanto, con este libro pretendo enfatizar la necesidad de tomar conciencia del peligro asociado a impactos de asteroides y cometas. Abordo el problema basándome en la evidencia científica obtenida en los últimos

siglos, sin pretender crear alarmismos. Veremos que, si deseamos cuantificar y explicar tales peligros, debemos fomentar la exploración de esos objetos con el valor añadido de poder abordar la minería espacial y contestar preguntas clave sobre nuestro origen. Al fin y al cabo, quizá no seamos sino el fruto de la oportunidad que un asteroide proporcionó a los mamíferos hace unos sesenta y cinco millones de años para evolucionar tras la hecatombe que indujo el declive de los dinosaurios. Si hemos aprendido a leer el libro geológico de la Tierra deberíamos considerarnos una especie afortunada y sus enseñanzas deberían ponernos sobre aviso.

CAPÍTULO 1

Bólidos que anuncian rocas caídas del cielo

El firmamento nocturno parece inmutable y en el corto espacio de una vida humana las estrellas se antojan eternamente estáticas en su posición relativa entre ellas. Sin embargo, nuestra visión estática del universo es apenas un espejismo, una simple apariencia que, bajo una noche estrellada, el fenómeno meteórico es capaz de desmontar en pocos minutos. Cada noche decenas de estrellas fugaces recorren nuestro firmamento a una distancia que, aunque se antojaba estelar para nuestros antepasados, transcurre en la atmósfera terrestre, generalmente a menos de cien kilómetros sobre nuestras propias cabezas.

Esos rápidos trazos luminosos ilustran que el espacio interplanetario no está, ni mucho menos, vacío sino plagado de polvo y rocas que son el producto directo de la erosión de asteroides, cometas y los mismos planetas. Aunque no seamos conscientes, mediante colisiones entre asteroides o la sublimación de los hielos que forman los cometas, pequeñas partículas o incluso grandes rocas son impulsadas al medio interplanetario a velocidades hipersónicas. Tales fragmentos se desplazan a velocidades relativas de cientos de miles de kilómetros por hora. Al ser interceptadas por la Tierra, las partículas golpean los gases de la atmósfera y crean la luz que produce la estrella fugaz.

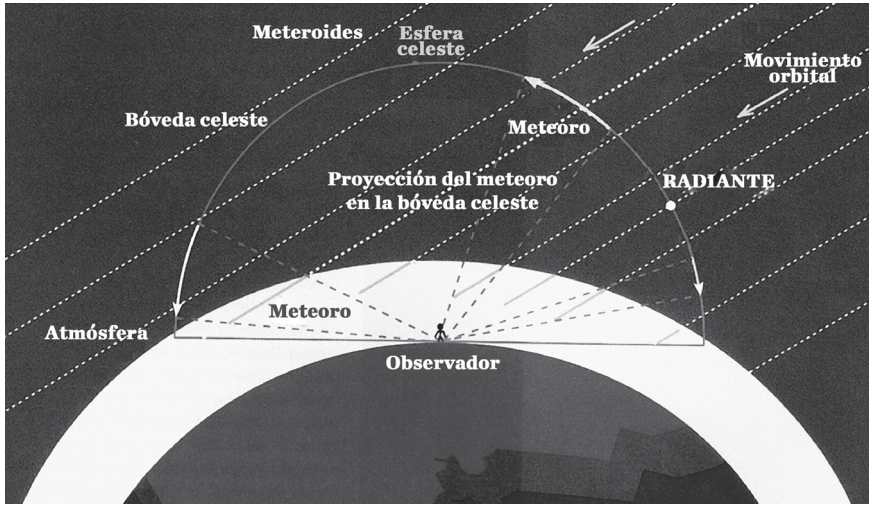


Figura 1.1. El radiante de una lluvia de meteoros se produce por la perspectiva en la que las partículas inciden en la atmósfera desde un enjambre meteórico en el que las partículas siguen órbitas similares (J. M. Trigo/CSIC-IEEC).

Cuando la Tierra intercepta los enjambres de partículas dejadas por los asteroides y los cometas, se producen las conocidas lluvias de estrellas fugaces. Cada meteorito sigue una trayectoria diferente entre las estrellas y, si las trazásemos, veríamos que cada noche hay regiones de la bóveda celeste que son fuentes de estrellas fugaces. A tales zonas de cielo se las denomina *radiantes* (figura 1.1).

Volviendo a la luminosidad de estrellas y meteoros, los astrónomos hemos definido un sistema logarítmico para definir la magnitud de brillo de las estrellas que contemplamos. Así, en la convención astronómica, los astros más luminosos poseen magnitudes negativas: la estrella más luminosa es Sirio y posee magnitud -1,5, mientras que Venus suele tener magnitud -4. Existen unas seis mil estrellas visibles a simple vista que poseen magnitud +6 o inferior. El concepto de magnitud surge de la labor pionera de Hiparco de Alejandría (c. 190 a. C. -127 a. C.), quien dividió las estre-