

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 2013.

IMPACTOS SOBRE LA TIERRA

Pablo de Vicente Abad

*Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Abstract

The Earth receives around 30 000 tons of material from meteoroids every year. Most of them cause meteor showers, some, fireballs and a few of them meteoroids that impact on the ground. The Earth is also subject to big impacts from Near Earth Objects larger than 100 m. In the past these impacts have probably carried life to our planet but also destruction and large extinctions of species. The possibility of large impacts that could put into risk our civilization causes great worry. Some programs are currently underway to detect, monitor and compute the trajectory of Potentially Hazard Objects. Two web pages list and classify the impact risk by Near Earth Asteroids.

There are some ideas to shift the trajectory of hazard asteroids but all of them require spacecraft technology currently not available. For the time being only a very few spacecraft missions have been launched to land on an asteroid or shoot a comet with a small impactor. In the future a big asteroid or comet will impact the Earth and by then, human beings should have developed and tested a technology to avoid it. It will probably not happen soon, but we should be ready.

Introducción

El 22 de febrero de 2012, un telescopio robótico del Observatorio de Mallorca detectó un nuevo asteroide de unos 45 metros de diámetro. La noticia saltó a los medios 12 días después y en algunos periódicos se

podieron leer entonces titulares advirtiendo de que un pequeño asteroide pasaría muy cerca de la Tierra un año después.

La posibilidad de que objetos procedentes de fuera de la atmósfera terrestre caigan sobre la superficie de la Tierra causa gran preocupación en la población. Los amantes de los comics saben que los invencibles y valientes galos de la aldea de Asterix sólo temen una cosa: que el cielo caiga sobre sus cabezas. Se trata de una preocupación comprensible. Dado que este asunto recibe bastante atención haremos un recorrido por lo que sabemos en la actualidad sobre impactos de objetos extraterrestres sobre nuestro planeta, comenzando por los más pequeños y finalizando por los de mayor tamaño. También describiremos como se estima el riesgo de colisión, los daños causados y finalmente las medidas que se pueden tomar para evitar impactos peligrosos.

Meteoros, meteoroides, bólidos y meteoritos

La palabra *meteoro* en castellano se utiliza para referirse a fenómenos atmosféricos, como la precipitación, suspensión o depósito de partículas sólidas y líquidas, produzcan o no efectos ópticos o eléctricos. Dentro de esta clasificación entran las nubes, la lluvia, el granizo, las heladas, las ventiscas, los truenos, las auroras y otros muchos eventos. Sin embargo la palabra *meteoro* en inglés sólo se refiere al fenómeno astronómico conocido vulgarmente como *estrella fugaz*. En astronomía, un *meteoro* es el fenómeno luminoso que produce un *meteoroides* cuando atraviesa la atmósfera terrestre. La mayor parte de los meteoros que se observan proceden de partículas del tamaño de un grano de sal o menores y su intensidad es considerable. Una partícula del tamaño de un guisante produciría una estrella fugaz espectacular y extraordinariamente brillante.

El nombre de *meteoroides* se aplica a las “pequeñas” partículas que pueblan el espacio interplanetario. La Unión Astronómica Internacional (UAI) considera meteoroides a un objeto sólido que se mueve en el espacio interplanetario y que es menor que un asteroide y mayor que un átomo. No se trata de una definición muy exacta, porque ambos límites son bastante difusos. Se ha propuesto que se consideren meteoroides los objetos mayores de 100 micras (por debajo se considera *polvo interplanetario*) y menores que 10 m. Sin embargo, recientemente se han descubierto y bautizado asteroides de 10 m de tamaño por lo que el límite superior se podría rebajar hasta 1 m. Todavía no existe acuerdo sobre estos valores.

La composición de los meteoroides no es uniforme y su densidad es muy variable. Los menos densos son porosos, compuestos de fragmentos de polvo con hielo y con densidades entre 0,3 y 0,8 g/cm³ (la mitad que la del hielo), y los más densos son rocas de hierro y níquel. La composición se puede estudiar a partir de su trayectoria en la atmósfera y del espectro de luz que emiten.

La Tierra recibe aproximadamente 30 000 toneladas de polvo interplanetario y meteoroides al año. Esto se debe a que en su movimiento de traslación alrededor del Sol colisiona con ellos. Algunos meteoroides son restos de cometas, fragmentos de asteroides o simplemente residuos de la formación del sistema solar. En una noche oscura y despejada, se pueden ver unos diez meteoros por hora habitualmente distribuidos temporalmente de manera irregular. El mecanismo que produce el fenómeno luminoso es la compresión del aire y la elevada velocidad de los meteoroides. Cuando un objeto viaja por la atmósfera el aire frente a él se comprime y se calienta. Si la velocidad del objeto es elevada, la temperatura del aire sube hasta miles de grados y se ilumina. Cuando el aire se calienta, la temperatura del meteoroides también lo hace, hasta que habitualmente se volatiliza. Por esta razón las estrellas fugaces suelen ser visibles durante un máximo de uno o dos segundos. Estos eventos ocurren en la termosfera, a partir de unos 120 km por encima de la superficie terrestre, donde la densidad es bastante baja pero suficiente para calentar y detener estas partículas. A una altura de 80 km la mayor parte de los meteoroides se ha volatilizado.



Figura 1: Lluvia de meteoros de las Leónidas en 1998. Se observaron 156 objetos durante 4 horas de tiempo de exposición. Fotografía de J. Tóth del observatorio de Modra.

La velocidad de los meteoroides oscila entre los 11 km/s, 30 veces la velocidad del sonido, y 72 km/s. Estas velocidades son una combinación

de la velocidad de traslación de la Tierra en torno al Sol (30 km/s), de la velocidad de los meteoroides en el espacio y la gravedad de la Tierra. Los meteoroides que proceden de cometas conservan parte de la velocidad de traslación del cometa progenitor y por ello pueden alcanzar los 42 km/s. Si el sentido de la trayectoria es opuesto al de traslación de la Tierra se obtienen velocidades máximas de 72 km/s en la atmósfera terrestre. La velocidad media de los meteoroides que atraviesan la órbita de la Tierra es de unos 20 km/s.

Cuando los meteoroides aparecen agrupados se les denomina *enjambres* y en ese caso, normalmente, están asociados a los restos de un cometa progenitor cuya órbita atraviesa la de la Tierra. Son ampliamente conocidos como *lluvias de estrellas* y se producen en ciertos días del año. En estos casos los meteoroides parecen proceder de un lugar del cielo conocido como *radiante*. Las lluvias de meteoroides reciben el nombre de la constelación en la que se encuentra el radiante. Una de las lluvias de estrellas más famosas son las Perséidas, cuyo máximo se produce entorno al 12 de agosto pero que se extienden unos días antes y después del máximo. Las Perséidas se originan por la traza del cometa 109P/Swift-Tuttle, que tiene un periodo de 133 años y cuya última aparición se produjo en 1992.

Los meteoros cuya magnitud aparente es superior a -4 (un número más negativo indica mayor brillo) reciben el nombre de *bolas de fuego* o *bólidos*. Una magnitud de -4 es el límite para poder ver a simple vista un astro durante el día. El planeta más luminoso, Venus, puede llegar a tener magnitud $-4,9$. Por tanto los bólidos son más brillantes que casi todos los planetas. Cuando la magnitud aparente del bólido es -14 o superior suelen producirse explosiones en el trayectoria generando sonidos audibles. Los superbólidos, de magnitud -17 , son visibles incluso desde satélites en órbita en torno a la Tierra. El aspecto de un bólido es fácilmente reconocible, tiene aspecto ahusado con un brillo considerable en la cabeza y una traza en el cielo que puede durar unos segundos. A veces se observan nódulos brillantes a lo largo de la trayectoria. Obviamente los bólidos se corresponden con objetos de tamaños superiores a los que producen los meteoros y son menos frecuentes. Suelen ser objetos individuales atravesando la atmósfera de la Tierra y por tanto no están asociados a lluvias de estrellas.

En los bólidos la compresión del aire y su elevada temperatura, cerca de $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$, hace que los objetos, además de calentarse intensamente, sufran aplanamiento por el frente de choque. En la mayor parte de los casos y dependiendo de la densidad del objeto este se fragmenta en centenares o miles de partes todas viajando a enormes velocidades dentro de la atmósfera y sufriendo un calentamiento enorme que las fracciona hasta que finalmente en décimas de segundo todas ellas se volatilizan. Esto es una explosión. La energía liberada por la explosión de un objeto de 1 m de tamaño es de varios centenares de toneladas de TNT (no llega al

kilotón). La altura en la atmósfera a la que se produce la volatilización del meteoroides es variable y depende de su composición. Así, los meteoroides con metales se volatilizan a alturas más bajas porque son más densos. La frecuencia de los bólidos es difícil de estimar pero puede estar en unos 50 al año para objetos de 1 m y uno al año para objetos de 5 m.

Los meteoroides cuyo progenitor es un asteroide suponen sólo un 5% del total; por tanto la mayor parte de estos son de origen cometario. De hecho se han observado bólidos con magnitud -15 de origen cometario que no han generado meteoritos.



Figura 2: Un bólido sobre el estado de Nevada, Estados Unidos, el 22 de Abril de 2012. Imagen publicada por NASA en su página web y fotografiada por Lisa Warren.

Cuando el meteoroides es muy grande, superior a 10 m, algunos de los fragmentos que se originan pueden ralentizarse antes de explotar. Al decelerarse sobreviven a su paso por la atmósfera e impactan en el suelo. En estos casos reciben el nombre de *meteorito*. Los meteoritos que impactan contra el suelo habitualmente, entre unos pocos kg y 7000 kg, reducen considerablemente su velocidad debido a la capa de aire que atraviesan, hasta alcanzar una velocidad terminal de unos pocos centenares de kilómetros por hora, entre 320 y 650 km/h. La velocidad terminal es resultado del equilibrio entre la atracción gravitatoria, que acelera el meteorito, y la viscosidad del aire, que lo frena, ya que la velocidad cósmica de entrada desaparece al atravesar la atmósfera.

Para que un bólido dé lugar a uno o varios meteoritos se tienen que cumplir varias condiciones:

- La magnitud del bólido debe ser superior a -8 o -10 .
- El progenitor del meteoroides debe ser un asteroide con material denso.

- El meteoroido debe entrar en la atmósfera con una velocidad relativamente baja.

Los meteoroides cuya masa es superior a 10 toneladas (diámetros superiores a 1,5 o 2 m), reducen su velocidad original fuera de la atmósfera (velocidad cósmica) hasta el 6% y por tanto impactan el suelo con velocidades entre 1,2 y 4,3 km/s. Si la masa es 1 000 toneladas (diámetros entre 5 y 10 m), la velocidad cósmica sólo se reduce hasta el 70% y si supera las 100 000 toneladas la velocidad de impacto es la velocidad cósmica, y por tanto es como si no existiera atmósfera.

La posibilidad de que un meteorito mate una persona es muy remota y de hecho hasta la fecha no se conoce ningún caso documentado. Hay casos registrados de personas que han resultado heridas por meteoritos como resultado de rebotes después del impacto original, pero nunca directamente alcanzadas. El caso más conocido fue el de Ann Hodges una estadounidense en Alabama que en 1955 sufrió el impacto de un meteorito de 4 kg de peso que atravesó el tejado de su casa. El meteorito le produjo abrasiones en la cadera y en una mano.



Figura 3: Cóndrulos de condrita Bjurböl. Imagen tomada de Wikimedia.

Cerca del 84% de los meteoritos que caen a la Tierra son condritas, meteoritos rocosos no metálicos cuyos componentes no se han fundido a pesar de haber alcanzado temperaturas altas. Proceden de asteroides y son una muestra excelente para comprender la química primitiva del sistema solar y su edad, ya que, en muchos casos, la no fusión de sus elementos

los ha preservado tal y como se formaron hace miles de millones de años. Su principal constituyente son silicatos. Se caracterizan por estar formados por pequeñas esferas, conocidas como cóndrulos, de diámetros inferiores al milímetro formados por minerales diversos. Las condritas proceden de las primeras etapas de la formación del sistema solar, y su crecimiento se produjo a partir de granos de polvo de la nube molecular progenitora. Las condritas se clasifican en función del grado de alteración sufrido, por altas temperaturas o por acción del agua. El 4% de las condritas caídas sobre la Tierra son carbonáceas, es decir contienen compuestos de carbono y se cree que se formaron en las partes más alejadas del sistema solar. Este tipo de condritas son especialmente importantes porque contienen agua, o elementos alterados por ella, y compuestos orgánicos como aminoácidos. Se cree que los compuestos orgánicos en el sistema solar son abundantes y pudieron jugar un papel importante en la aparición de la vida en la Tierra.

El 16% restante de los meteoritos procede de asteroides diferenciados, es decir que han sufrido fusión en su interior. En estos el hierro y otros metales pesados se concentra en el interior, y los basaltos y silicatos en el exterior. Existe un grupo extraordinariamente pequeño y raro de meteoritos que proceden de la Luna, otros planetas rocosos y sus lunas, que se habrían formado por el impacto de un gran meteoroido sobre su superficie y han viajado hasta la Tierra. Hace años surgió una gran polémica con el meteorito ALH 84001 procedente de Marte porque se observaron estructuras que se interpretaron como residuos fosilizados de bacterias. Todavía no se ha confirmado ni desmentido el origen biológico de dichas estructuras.

El estudio de los bólidos resulta muy interesante porque si su trayectoria se registra desde diferentes puntos del cielo se puede determinar su órbita y el origen que da lugar al meteoroido. En el año 1997 se estableció en España la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (SPMN). Se trata de un proyecto interuniversitario, en el que intervienen astrónomos profesionales y aficionados, que realiza observaciones continuas de actividad meteórica que ha dado lugar a resultados importantes. En este momento cuentan con catorce estaciones con cámaras CCD¹ de todo el cielo o/y cámaras de vídeo para la detección de meteoros y bólidos que cubren todo el territorio español. Los resultados más interesantes de los últimos años han sido el estudio del meteorito de Villabeto de la Peña el 4 de enero de 2004 y el de Puerto Lápice el 10 de mayo de 2007. La SPMN determinó a partir de la descripción de los testigos, vídeo y fotografías la órbita del primero y el origen del segundo (el asteroide Vesta).

Las pocas órbitas que se han determinado de los meteoritos caídos hasta la fecha en la Tierra indican que todos ellos proceden del cinturón de asteroides entre las órbitas de Marte y Júpiter.

¹Dispositivo electrónico que capta la luz con sensibilidad y permite formar una imagen.

Cometas y asteroides: origen de meteoroides y meteoritos

Como ya hemos comentado en la sección anterior la mayor parte de los meteoroides son de origen cometario y la mayor parte de los meteoritos son de origen asteroidal, por lo que resulta interesante saber algo más sobre sus progenitores.

Los cometas son cuerpos menores compuestos de hielo y rocas que orbitan en torno al Sol en diferentes trayectorias. Muchas de las trayectorias son elípticas muy excéntricas por lo que se acercan mucho al Sol y tienen un periodo muy largo. Los cometas se ven en el cielo con aspecto difuso y una cola de menor brillo en dirección opuesta al Sol. La atmósfera que envuelve el núcleo se llama coma o cabellera.

Los cometas siempre han llamado la atención del hombre por su súbita aparición, corta permanencia, aspecto característico y por su facilidad de identificación en el cielo nocturno. Antes de la existencia de los telescopios se registraban unos 10 cometas por siglo. Casi siempre estuvieron asociados a creencias supersticiosas y habitualmente eran signos de mal augurio.



Figura 4: Imagen del cometa Halley tomada por el observatorio de Yerkes en 1910.

En 1705 Edmund Halley utilizando la teoría de la gravitación, recientemente formulada por Isaac Newton, publicó un trabajo sobre cometas una de cuyas mayores contribuciones fue una tabla con las órbitas de 24 cometas registrados entre 1337 y 1698. De ellos 22 correspondían a objetos

diferentes y uno se repetía 3 veces. Predijo que se trataba de un cometa con un periodo de 76 años que, cuando se confirmó su siguiente aparición una vez que Halley ya había muerto, recibiría su nombre.

En la actualidad (junio de 2012) se han clasificado unos 4 557 cometas, de los que unos centenares son de periodo corto y unos 1 500 son los conocidos como “rascasoles”, por acercarse mucho al Sol. Se cree que el periodo de algunos cometas se acorta por la influencia gravitatoria de los planetas gigantes. Esta modificación en la trayectoria se suele producir si el cometa pasa “cerca” del planeta. La UAI ha establecido un método para denominarlos, compuesto de un número que indica el año del descubrimiento, una letra que indica el medio mes de dicho descubrimiento y un segundo número que indica el número de orden del descubrimiento. Todo ello va precedido de una letra que especifica el tipo de cometa: P de periódico o C de no periódico. Si el cometa es periódico, y tras su segundo paso por el perihelio, se coloca un número delante de la letra indicando el número de orden del descubrimiento. Por ejemplo el cometa Halley sería, según esta denominación, 1P/1682 Q1. Los cometas más famosos se suelen denominar sin el año de descubrimiento, como por ejemplo el 109P/Swift-Tuttle que mencionamos anteriormente como progenitor de las Perséidas.

En 1860 W. Huggins, también británico, comenzó el estudio de la química de los cometas al obtener por primera vez un espectro de varios de ellos. Unos años más tarde se descubrió la relación entre la órbita de los cometas, los restos dejados por ellos y las lluvias periódicas de meteoros. En 1950, el astrónomo norteamericano F. Whipple, propuso un modelo de cometa en el que éste estaba compuesto por un núcleo de hielo y rocas en rotación en torno a sí mismo. Esta hipótesis explica la presencia del halo y la cola y la aceleración y deceleración en función de la rotación en torno a sí mismo. El núcleo del cometa está rodeado de una atmósfera llamada cabellera que resulta de la sublimación de sus materiales a medida que se acerca al Sol. La presión de radiación del Sol, es decir sus fotones, hace que restos de polvo y rocas del cometa se separen de éste ligeramente, formando una cola de polvo que se sitúa casi a lo largo de su órbita. Esta cola es visible porque las partículas que la componen reflejan la luz del Sol. Debido al tamaño de los granos de polvo la luz reflejada está levemente enrojecida. La cabellera sufre la acción del viento solar y genera otra cola formada por gas ionizado, que apunta siempre en la dirección opuesta al Sol y suele tener un color azulado. Estas dos estructuras, el gas ionizado y el polvo y rocas forman las dos colas de un cometa. A veces las dos colas están claramente diferenciadas. La cola ionizada puede llegar a medir decenas de millones de kilómetros, la cabellera un millón de kilómetros y su núcleo unos pocos kilómetros.

La primera misión espacial a un cometa fue la International Comet Explorer (ICE) que pasó cerca del cometa 21P/Giacobini-Zinner en 1985 y realizó observaciones de 1P/Halley en 1986. Hubo 5 misiones (dos

japonesas, dos rusas y una europea, la Giotto) que exploraron el 1P/Halley entre los años 1992 y 1998. En 1998 se lanzó la misión Deep Space 1 que pasó junto a los cometas 107P/Wilson-Harrington y 19P/Borelly en 2001. Wilson-Harrington es un objeto interesante pues últimamente se comporta más como un asteroide que como cometa. 19P/Borrelly es un cometa de muy corto periodo (6,8 años).



Figura 5: Las dos colas del cometa Hale-Bopp: la azulada procede de gas ionizado, la blanca procede del polvo. Imagen de APOD (Astronomy Picture of the Day) publicada en diciembre de 2000. La imagen fue tomada por John Gleason en marzo de 1997.

La Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó la misión Rosetta en 2004 con el objetivo de situarse junto al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko y enviar un módulo que aterrice sobre su núcleo en 2014. La misión continuará estudiando el cometa hasta 2015, año en el que se producirá su paso por el perihelio.

La NASA lanzó en 1999 y en 2005 las misiones espaciales Stardust y Deep Impact, para estudiar los cometas 81P/Wild 2 y 9P/Tempel 1 respectivamente. La primera situó una sonda en la cabellera del cometa y capturó muestras de material que luego trajo a la Tierra. La segunda misión consistió en el lanzamiento de un proyectil sobre el cometa para

luego observar la composición del gas y polvo que se originó. A partir de este experimento se consiguió la primera evidencia de que la superficie del cometa estaba cubierta por una fina capa de hielo. Así mismo también se observó la presencia de material orgánico que se supone estuvo presente en la mezcla prebiótica de la Tierra. La misión Stardust también permitió descubrir glicina, un aminoácido utilizado por los seres vivos para crear proteínas.

La presencia de compuestos orgánicos y agua en cometas permite aventurar que los cometas jugaron un papel fundamental en la aparición de la vida en la Tierra y que la vida en el universo puede ser más común de lo que sospechamos.

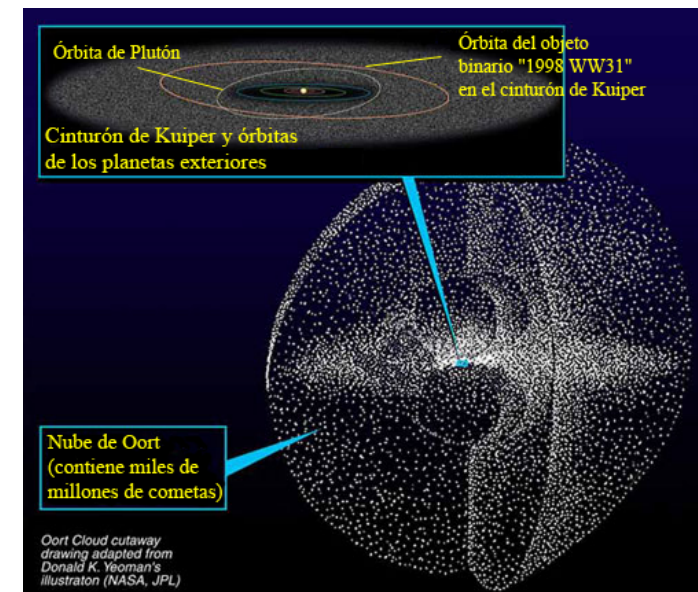


Figura 6: Representación artística de la nube de Oort y el cinturón de Kuiper, por D.K. Yeoman de NASA/JPL.

Se cree que los cometas de periodo largo (más de 200 años) se originan en la Nube de Oort, una nube esférica en torno al Sol a una distancia entre 2 000 y 100 000 unidades astronómicas, en el exterior del sistema solar. Se sabe que las órbitas de los cometas son inestables por su pérdida de material y la influencia gravitatoria de los planetas del sistema solar, y por tanto no se han podido formar en dichas órbitas. El astrónomo holandés Jan Oort postuló la existencia de un repositorio donde se originan, en la parte externa del sistema solar, que recibe el nombre de nube de Oort. Se cree que la nube de Oort podría albergar miles de millones de cometas, y que se

trata de un remanente del anillo protoplanetario que se formó alrededor del Sol hace 4 500 millones de años. Los cometas de periodo corto se originan en el cinturón de Kuiper, situado en la eclíptica y más allá de Plutón, entre 30 y 100 unidades astronómicas.

Los asteroides son cuerpos menores, de tamaño menor que los planetas, en órbita alrededor del Sol, habitualmente situados en la parte interior del sistema solar. Los cuerpos menores más allá de la órbita de Júpiter suelen recibir el nombre de centauros², troyanos neptunianos, y objetos transneptunianos. La mayor parte de los asteroides conocidos están situados en el cinturón entre Marte y Júpiter. Se trata de objetos que no lograron crear un planeta durante la formación del sistema solar. Estos cuerpos son acelerados por la gravedad de Júpiter y su alta velocidad impide que tras una colisión se agreguen. Sin la presencia de Júpiter, las colisiones serían más lentas permitiendo agregamientos de los trozos y probablemente, tras un tiempo, la formación de un cuerpo mayor. Algunos fragmentos, resultado de las colisiones entre asteroides, se desplazan con el tiempo hacia los planetas interiores. Los asteroides cercanos a la Tierra o NEAs constituyen una familia especialmente importante por su probabilidad de impactar con ella como veremos más adelante.

Los troyanos son asteroides asociados a planetas que no colisionan con ellos porque orbitan en torno a los puntos de Lagrange L4 y L5. Los puntos de Lagrange son lugares de equilibrio gravitatorio en la órbita de un planeta, de modo que los objetos en dichos puntos orbitan en torno al Sol manteniendo la misma posición relativa respecto del planeta. Existen cinco puntos de Lagrange en cada órbita, y L4 y L5 son puntos de equilibrio estable.

Los asteroides se pueden clasificar según su composición en carbonáceos, rocosos y metálicos. Los asteroides grandes, con un diámetro promedio superior a 100 km, han sufrido diferenciación química. Es decir, su interior se fundió y permaneció así durante millones de años, permitiendo que el hierro y el níquel se desplazarán al centro y los materiales menos densos hacia el exterior. Se estima que existen entre 1 y 2 millones de asteroides con tamaños superiores a 1 km. Los asteroides compuestos de hierro de tamaños inferiores a 1 km suelen proceder de colisiones entre dos asteroides, de los que uno al menos ha sufrido diferenciación química.

Ha habido algunas misiones espaciales dedicadas (parcial o completamente) a estudiar algunos asteroides. Las primeras se limitaron a fotografiarlos, en su viaje hacia otros destinos, como la Mariner 9, que fotografió las lunas de Marte, Phobos y Deimos, probablemente dos asteroides capturados por el planeta. Las formas de estos se revelaron irregulares, como las de las patatas. El primer asteroide verdadero fotografiado fue el 951

²Los centauros tienen órbitas inestables que cruzan o han cruzado las de los planetas gigantes.

Gaspra por la sonda Galileo en su viaje hacia Júpiter en 1991. Dos años más tarde pasó junto al asteroide 243 Ida.



Figura 7: El asteroide 951 Gaspra desde la sonda Galileo en octubre de 1991. Imagen de NASA.

La primera misión específicamente diseñada para ir a un asteroide fue la Near Shoemaker de NASA en 1997. Esta misión voló a 1 200 km del asteroide 253 Mathilde, más tarde orbitó en torno a 433 Eros y aterrizó con éxito sobre su superficie. En el año 2005 la misión japonesa Hayabusa aterrizó sobre el asteroide 25143 Itokawa y tomó muestras que trajo de vuelta a la Tierra.

Otras misiones posteriores han sido Rosetta, ya mencionada antes, de la ESA, que visitó en 2008, el asteroide 2867 Steins y en 2010, 21 Lutetia, el segundo mayor asteroide visitado hasta la fecha. La misión Dawn de NASA llegó en julio de 2011 a 4 Vesta, el mayor asteroide visitado hasta la fecha. Vesta tiene una forma casi esférica pero irregular, con un diámetro promedio de 525 km. Dawn ha estudiado Vesta durante un año. Se sabe que está compuesto por un núcleo de hierro y su superficie está cubierta de cráteres. Dos de ellos, situados en el polo sur, son especialmente grandes y como resultado del choque que los originó se produjeron ondulaciones en la superficie que recorren la superficie del asteroide. Dawn ha abandonado Vesta en julio de 2012 en dirección a Ceres, un planeta enano de hielo y rocas. Con un diámetro promedio de 950 km, es el cuerpo más grande del cinturón de asteroides. La llegada de la sonda se producirá en 2015.

Se han programado dos misiones espaciales que en el futuro irán a asteroides para tomar muestras que serán enviadas de vuelta a la Tierra. Se trata de la misión japonesa Hayabusa 2 prevista para 2015 y la misión OSIRIS-REx de NASA para el año 2016.

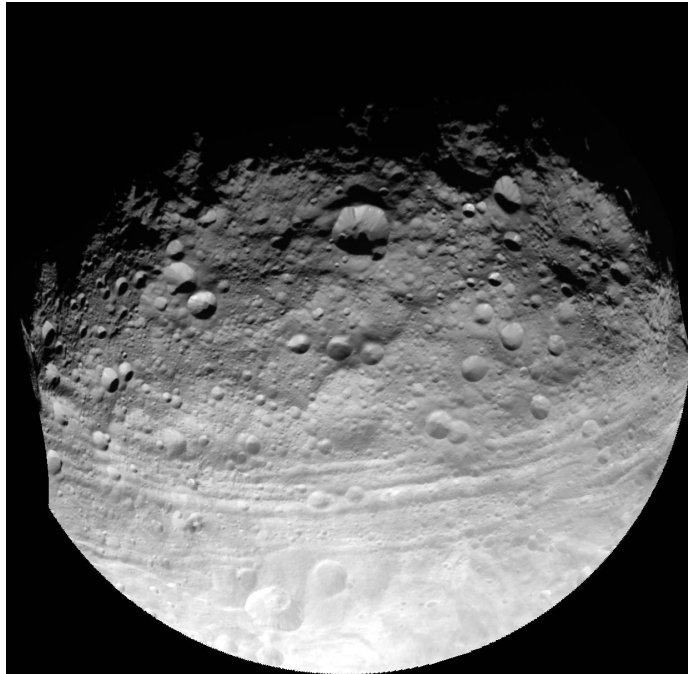


Figura 8: El asteroide Vesta desde la sonda Dawn de NASA en 2011. En la superficie se pueden apreciar cráteres y en el ecuador ondulaciones, probablemente consecuencia de un choque con un asteroide menor contra uno de sus polos. Imagen de NASA.

Grandes impactos conocidos: cráteres en la Tierra

La Tierra desde su formación ha sufrido millones de impactos de meteoritos sobre su superficie. Durante la formación del sistema solar el bombardeo fue continuo y, si la hipótesis del Gran Impacto es correcta, un evento fue especialmente relevante. Hace unos 4 500 millones de años un cuerpo del tamaño de Marte colisionó con la Tierra. Los fragmentos vaporizados se insertaron en la órbita de la Tierra, quedaron atrapados por su campo gravitatorio y se agregaron para formar la Luna. El calor generado produjo una salida de gases de la corteza terrestre que pudo resultar decisiva en la formación de la atmósfera e hidrosfera del planeta.

Tras la formación de la Luna hay un periodo que va desde hace 4 100 millones de años hasta hace 3 800 millones de años conocido como el Gran Bombardeo Tardío, en el que se produjeron numerosos cráteres de impacto en la Luna. Por inferencia se cree que lo mismo ocurrió en Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. De hecho se estima que el número de impactos en la Tierra es superior al recibido por la Luna debido a la diferencia de tamaño y masa entre ambas. Es probable que este periodo esté asociado al desplazamiento de las órbitas de los planetas gigantes gaseosos hacia el Sol. En su desplazamiento dispersaron cuerpos del cinturón de asteroides y del cinturón de Kuiper que adquirieron órbitas excéntricas que atravesaban las de los planetas interiores y dieron lugar al bombardeo.

Tras ese periodo aparece la vida en la Tierra. De hecho los primeros fósiles están datados hace 3 500 millones de años, pero se tienen evidencias de que la vida surgió antes. Durante el bombardeo de cometas y asteroides la temperatura en la superficie era tan elevada que impedía la formación de suficiente agua y moléculas orgánicas para que prosperase la vida. Se piensa que tras el Gran Bombardeo Tardío los impactos continuaron de modo menos intenso y que los cometas suministraron agua y moléculas orgánicas a la Tierra.

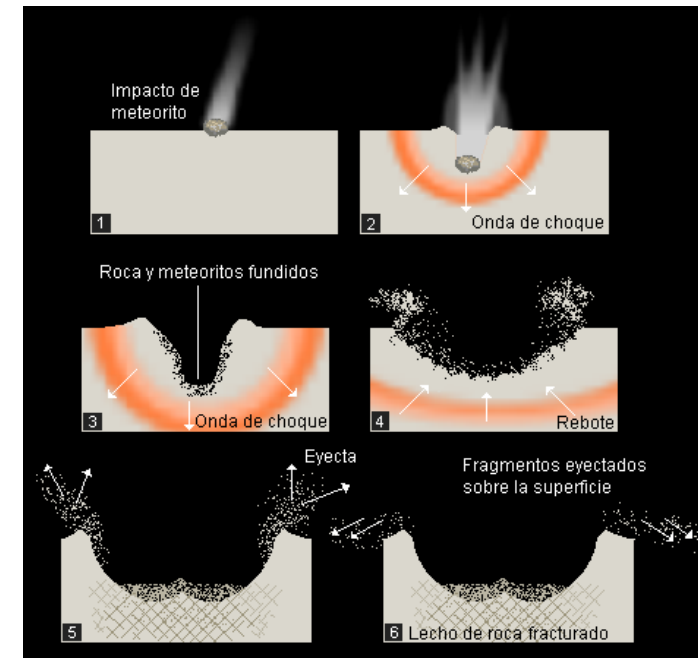


Figura 9: Secuencia en la formación de un cráter de impacto. Imagen de L.M. Benítez tomada de Wikipedia.

Cuando un meteorito o asteroide impacta sobre la superficie de un planeta produce un cráter. Se forma una onda de choque sobre el terreno y un agujero en cuya superficie se funden las rocas y el meteorito. La onda de choque rebota y eyecta material por los bordes elevando estos hasta generar un pared. En algunos casos, en los cráteres superiores a 4 km de diámetro, se crean un pico o anillos en el centro y el lecho de roca bajo el cráter se fractura.

La Tierra es un planeta geológicamente activo y esa dinámica ha borrado las huellas de los impactos. A pesar de ello se tienen evidencias de algunos pocos cráteres en su superficie. En la actualidad se mantiene una base de datos (Earth Impact Database) que clasifica los cráteres de impacto en confirmados, probables con diferentes grados de probabilidad y descartados. En la actualidad hay 178 cráteres confirmados y unos 650 probables. La antigüedad de los cráteres confirmados varía desde hace 2 400 millones de años hasta la actualidad y con diámetros entre los 160 km y los pocos metros. El mayor cráter confirmado es el Vredefort en Sudáfrica, de 160 km de diámetro entre sus bordes y una antigüedad de 2 023 millones de años. Fue causado por un asteroide de 5 a 10 km de diámetro del tipo de las condritas. El segundo cráter confirmado en tamaño es el Chicxulub, en la península del Yucatán con un diámetro de 150 km y una antigüedad de 65 millones de años. Se trata de un cráter muy famoso sobre el que nos extenderemos en la siguiente sección.

Uno de los cráteres más icónicos es el Cráter Barringer en Arizona, Estados Unidos. Se produjo por el impacto de un asteroide de hierro-níquel de unos 45 m de diámetro hace 50 000 años. Todavía existe hierro de origen meteórico mezclado con roca en sus paredes. Se trata probablemente del cráter mejor conservado en la superficie terrestre, a pesar de que se formó un lago en su interior y su profundidad decreció con la sedimentación. Tras el final de la glaciación, el clima en la zona cambió (originalmente era un bosque) y se secó preservando su existencia.

El cráter de más reciente formación confirmado es el de Carancas en Perú de 13 m de diámetro y 4,5 m de profundidad. Se formó en el año 2007 tras el impacto de un meteorito de tipo condrita de unos 3 m de tamaño. El cráter hizo aflorar agua con arsénico que produjo efectos nocivos en la población cercana.

Finalmente mencionaremos también el evento de Tunguska acaecido el 30 de junio de 1908 en Siberia. Se trató de una explosión aérea de unos 10 a 15 megatones a unos 8 km de altura producida por un bólido de unos 50 a 80 m. Incendió y derribó árboles en un área de unos 50 km de diámetro. Sólo los árboles que estaban en la vertical de la explosión quedaron en pie. Originalmente se propuso que la explosión se produjo por la desintegración de un cometa compuesto de hielo y roca. Sin embargo en la actualidad, y tras comprobar que los modelos numéricos predicen que un cuerpo de baja densidad con esa energía cinética no puede atravesar la troposfera, la

hipótesis más aceptada es que fue un cuerpo de origen asteroidal el causante de la explosión.



Figura 10: Imagen aérea del Cráter Barringer en Arizona, Estados Unidos.

La tasa de formación de cráteres depende del flujo de asteroides sobre la Tierra. Existen dos métodos para calcularlo. El método astronómico consiste en medir el número y brillo de asteroides cercanos, obtener el diámetro de estos cuerpos a partir de su brillo y calcular la fracción de ellos que cruza la órbita y posición de la Tierra en un intervalo de tiempo. El método geológico consiste en utilizar el número, tamaño y edad de los cráteres en una área determinada de la Tierra. Estableciendo una relación entre el tamaño del cráter y el diámetro del proyectil se puede obtener el flujo de estos últimos. También ha sido habitual extrapolar el recuento de cráteres en la Luna y su ritmo de formación, y obtener un valor para la Tierra.

Hasta hace poco se pensaba que el ritmo de formación de cráteres en la Luna era probablemente constante desde hace 3 000 millones de años y con bastante certeza desde hace 400 millones de años. Sin embargo recientemente, y utilizando el método geológico descrito más arriba, se han obtenido conclusiones diferentes estudiando los cráteres con una antigüedad inferior a 500 millones de años:

- La tasa de formación de cráteres en la Tierra cambió hace 125 millones de años aumentando bruscamente en un factor 2 a 4. Se ha postulado que dicho aumento se produjo como consecuencia de una

colisión entre dos cuerpos de 60 y 160 km de diámetro promedio en el cinturón de asteroides hace 160 millones de años. Los fragmentos se desplazaron lentamente hasta la órbita de la Tierra aumentando el flujo de impactos durante 100 millones de años. El máximo se produjo 40 millones de años después de la colisión. Este aumento del flujo de asteroides es el origen más probable del asteroide que generó el cráter Chicxulub.

- La atmósfera es un excelente escudo para detener proyectiles de tamaños inferiores a 80 m. La protección es parcial para proyectiles entre 80 m y 800 m de tamaño.
- El método astronómico subestima el número de cráteres de diámetros superiores a 10 km y antigüedad inferior a 125 millones de años en un factor 4 y sobrestima el número de cráteres de tamaños inferiores a 4 km en un factor 10.

La figura muestra el número de cráteres formados en los últimos 125 millones de años en áreas seleccionadas de la Tierra en función del diámetro del cráter y del proyectil.

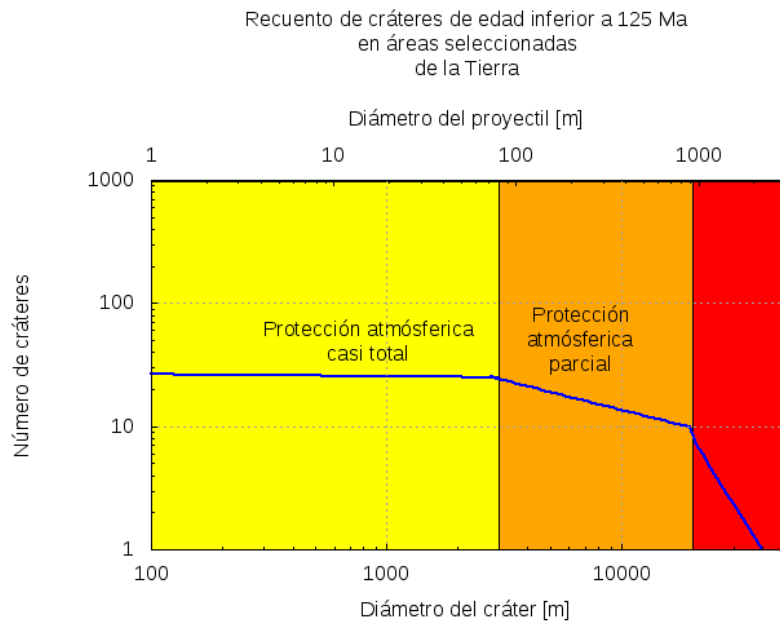


Figura 11: Número de cráteres de edad inferior a 125 millones de años en áreas seleccionadas de la Tierra. La curva de la izquierda es casi plana por el efecto protector de la atmósfera. Las curvas son aproximaciones a los valores reales (discretos).

Chicxulub: la extinción de los dinosaurios

Desde hace tiempo se conoce la existencia de una fina capa de 1 cm de grosor llamada Cretácico-Terciario (K-T en inglés) en los sedimentos correspondientes al fin de la era Mesozoica, hace 65 millones de años, fecha que coincide con la extinción masiva de los dinosaurios. En 1980 L. Álvarez, W. Álvarez, F. Asaro y H. Michels descubrieron que dicha capa tenía un alto contenido en iridio. Dado que dicha concentración es mucho mayor en los asteroides que en la Tierra, propusieron que se debía al impacto de un asteroide cuyos restos se extendieron por toda la superficie terrestre. Durante 12 años la hipótesis fue muy discutida, pero al cabo de este tiempo se descubrió la existencia de un cráter (Chicxulub) en la península del Yucatán con un diámetro similar al estimado por L. Álvarez y colaboradores. Desde su descubrimiento la explicación del impacto ha sido considerada la más plausible y se cree que el cráter Chicxulub es la prueba y la huella de ese evento apocalíptico.

Hace 65 millones de años un asteroide de 10 km de diámetro, ligeramente más grande que el Everest, se aproximó a la Tierra. Al entrar en la atmósfera creó un inmenso frente de choque calentando la atmósfera en muchos kilómetros a la redonda. Su luminosidad era probablemente similar a la del Sol e incendió y comprimió brutalmente todo aquello que estaba bajo él. El asteroide cayó al mar, en el golfo de México, y parte de su energía cinética se empleó en transformar el agua en vapor. Como la profundidad en el golfo de México es pequeña, la velocidad no disminuyó apreciablemente y el asteroide golpeó fuertemente la plataforma continental.

La colisión con la corteza terrestre produjo una tremenda explosión que envió rocas fundidas y vapor de agua a varios kilómetros de altura y distancia. La columna que se originó brillaba tanto como el Sol. Además el impacto produjo un intenso terremoto que provocó la muerte de los seres vivos en un radio de centenares de kilómetros. La onda de choque en el aire se propagó a gran velocidad creando un sonido atronador que posiblemente dejó sordos a muchos animales. Finalmente el choque con el mar produjo un gigantesco tsunami de centenares de metros de altura y una velocidad de 600 km/h que arrasó las costas cercanas y se introdujo en el interior devastando todo a su paso.

Todos los residuos que saltaron despedidos hacia arriba lo hicieron a unas velocidades enormes, de varios kilómetros por segundo. Al volver a caer se calentaron y se convirtieron en una lluvia de fuego en un radio de miles de kilómetros alrededor. Prácticamente todo el planeta se incendió. Debido a los incendios toda la atmósfera se oscureció durante un periodo de varios meses produciendo después un descenso dramático de la temperatura en lo que se conoce como *invierno nuclear*.

El impacto se produjo sobre una zona arcillosa con minerales. El frente de choque del impacto creó nitratos que a su vez formaron ácido nítrico

que cayó sobre la superficie terrestre. También cloro y otros compuestos químicos del asteroide ascendieron hasta las capas altas de la atmósfera destruyendo la capa de ozono. Se produjo la desaparición del 75% de la vida marina y terrestre. Supuso el final de los dinosaurios y la oportunidad para el florecimiento de los mamíferos.

Este escenario apocalíptico lo produjo un cuerpo menor, de sólo 10 km de diámetro. En el espacio interplanetario existen objetos mayores y en algún momento de la historia de la Tierra volverán a impactar sobre ella. Es simplemente una cuestión de tiempo.

NEOs y los programas de observación

Existe un documental televisivo que recrea la caída del asteroide que provocó el cráter Chicxulub y los acontecimientos posteriores hasta un año después. Su visión resulta muy instructiva y a su finalización uno se pregunta si, en el caso de una colisión similar en el futuro, la humanidad tendría una oportunidad para sobrevivir a ese cataclismo o mejor aún, si se podría evitar. ¿Qué podemos hacer? Obviamente lo primero es investigar; y esto ya ha comenzado. Sabemos mucho más de lo que conocíamos hace 40 años. Después es necesario observar cuerpos potencialmente peligrosos y catalogarlos. Finalmente hay que desarrollar una tecnología que desvíe los asteroides más peligrosos antes de que impacten sobre la Tierra.

En la actualidad existen varios programas de observación de cuerpos menores cercanos a la Tierra, los NEOs. NEO es un acrónimo cuyo significado es Near Earth Object (Objeto cercano a la Tierra). Los NEOs son asteroides o cometas desestabilizados por otros planetas cuyas órbitas pasan cercanas a la trayectoria de la Tierra. Como ya se mencionó en la sección sobre cometas y asteroides, son cuerpos menores que se pueden considerar restos del proceso de formación del sistema solar y cuya investigación proporciona mucha información sobre su origen. La mayor parte de los NEOs son NEAs (Near Earth Asteroids), asteroides cercanos a la Tierra, y sólo una pequeña parte son cometas. La UAI considera NEAs a los cuerpos menores cuya distancia al Sol es inferior a 1,3 unidades astronómicas (UAs) y por tanto a 0,3 UAs de la Tierra. Los NEAs se dividen en tres grupos:

- Los tipo Atón, cuyo semieje orbital es inferior al de la Tierra, y ocasionalmente cruzan su órbita.
- Los tipo Apolo, con semiejes orbitales superiores a la Tierra pero que pueden cruzar su órbita. Potencialmente son los más peligrosos.
- Los tipo Amor, cuyo semieje orbital es superior al de la Tierra y menor que el de Marte.

Los PHA (Potentially Hazard Asteroids), acrónimo que significa Asteroides Potencialmente Peligrosos, son un subgrupo de los NEAs, cuyas órbitas son similares a la de la Tierra (fundamentalmente son asteroides tipo Apolo), y son tan grandes que la atmósfera de nuestro planeta no puede actuar de escudo volatizándolos. En caso de impacto producirían daños locales, regionales o globales sobre la superficie de la Tierra. La distancia a partir de la cual un NEA es considerado un PHA es cuando su órbita le acerca a la Tierra a una distancia inferior a 7,5 millones de kilómetros, unas 20 veces la distancia a la Luna. El diámetro mínimo a partir del que se considera peligroso es 140 m.

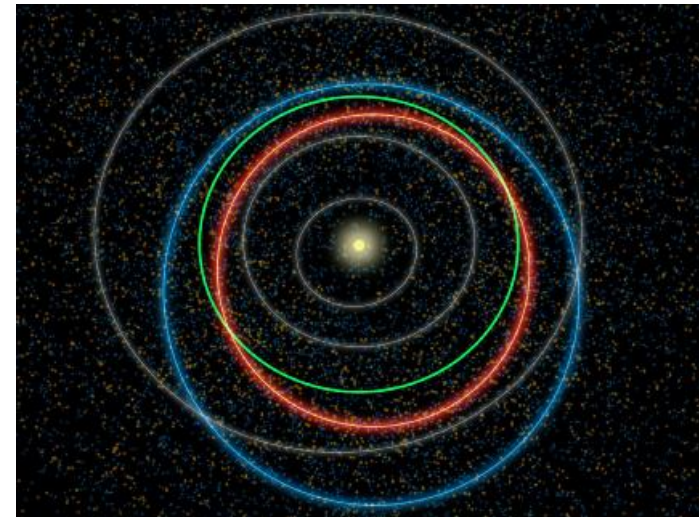


Figura 12: Órbitas de un NEA en azul y un PHA en naranja. La órbita de la Tierra está pintada en verde. La órbita del PHA cruza la de la Tierra dos veces por año. También se han pintado otros NEAs que aparecen como puntos en la imagen. Imagen propiedad de NASA.

De acuerdo con la UAI, con fecha de agosto de 2012, se han descubierto 892 NEAs con diámetros superiores a 1 km, lo que supone un 92% de una población estimada en 966 con estas características. De los NEAs antes mencionados, 158 se han clasificado como PHAs. Se conocen 8 101 NEAs con diámetros inferiores a 1 km, de los que 1 167 son PHAs.

La mejor estimación del número de PHAs hasta la fecha (mayo de 2012) la ha realizado la misión espacial WISE de la NASA que, a partir de observaciones en el infrarrojo, ha proporcionado datos de un centenar de PHAs. Esta pequeña muestra permite realizar extrapolaciones a toda la población de PHAs existentes. Se cree que existen unos 4 700 PHAs

(1 500 arriba o abajo). Hasta la fecha se han detectado con los programas de observación entre un 20% y un 30% de estos objetos. WISE también ha permitido descubrir que existen más PHAs en órbitas con muy poca inclinación respecto de la de la Tierra de lo que se pensaba anteriormente. Probablemente esto se deba a que muchos de estos objetos proceden de colisiones entre dos asteroides en el cinturón entre Marte y Júpiter. Los cuerpos más masivos están más cerca de la eclíptica y sus fragmentos permanecen en órbitas de poca inclinación.

El cuadro siguiente resume el número de NEAs estimados y descubiertos hasta el 12 de agosto de 2012, clasificados por tamaño e incluye el porcentaje de NEAs descubiertos respecto de los estimados.

NEAs descubiertos, estimados y fracción en función del diámetro

diámetro	observados	estimados	observados/estimados
>1 km	892	966 ± 45	92%
1 km - 140 m	4 401	~ 14 000	31%
140 m - 40 m	2 140	285 000	1%
40 m - 1 m	1 560		

Cuadro resumen proporcionado por la UAI en agosto de 2012.

La observación individual de los NEOs se hace habitualmente desde telescopios en tierra. Es necesario que los telescopios dispongan de CCDs con gran amplitud de campo y un movimiento rápido que permita seguirlos. Cuanto más cerca está un NEO de la Tierra, más rápido parece su movimiento respecto del fondo de estrellas. La sensibilidad de las CCDs es importante ya que permite la detección de NEOs débiles o/y lejanos.

Existen varios programas específicos de observación y detección de NEOs en diferentes observatorios astronómicos. Los programas que han producido el mayor número de resultados son el Catalina Sky Survey de la Universidad de Arizona, el programa de monitorización LINEAR proyecto conjunto de la fuerza aérea norteamericana y NASA, el patrullaje Pan-STARRS de la universidad de Hawai y el proyecto NEO-WISE de la misión espacial WISE mencionada anteriormente.

En el año 1996 se creó la Spaceguard Foundation con delegaciones en varios países con el objetivo de promover y coordinar el estudio y detección de NEOs e informar sobre su potencial peligro para la Tierra. El sistema Spaceguard agrupa a un conjunto de observatorios en todo el mundo. Unos pocos centros se dedican al descubrimiento de objetos nuevos y la mayor parte a su seguimiento posterior. En España la sede está en el Observatorio de Mallorca.

Cuando un telescopio descubre un NEO remite la información al MPC (Minor Planet Center) o Centro de Planetas Menores en Boston, Estados Unidos. Los programas de cálculo de órbitas NEO de NASA/JPL y

NEODyS-2, proyecto italo-español financiado parcialmente por la Agencia Espacial Europea, analizan los datos, les asignan una posibilidad de impacto y publican los resultados en una página web.

Este artículo de divulgación comienza con el descubrimiento de un NEA de tipo Apolo por uno de los telescopios del Observatorio de Mallorca. Se trata del asteroide 2012 DA14 de 45 m de diámetro que cruza el plano de la órbita de la Tierra dos veces por año. Según el Minor Planet Center, NEODyS-2 y Sentry el 15 de febrero de 2013, a las 19:27 UTC (tiempo universal coordinado) y con un error de 23 minutos, pasará a una distancia de la Tierra de 30 000 km, es decir más cerca que los satélites geostacionarios. Este paso tan cercano a la Tierra modificará su órbita de modo impredecible.

Las tablas de riesgo de impacto. Las escalas de Turín y de Palermo

El programa NEO de JPL mantiene una tabla centinela (Sentry) con información sobre NEAs. En ella sólo se incluyen objetos con probabilidad de impacto en los próximos 100 años. La tabla incluye entre otros datos la probabilidad de impacto, el momento estimado y los daños según las escalas de Turín y Palermo. La tabla se puede consultar en la web de NASA/JPL.

La tabla de riesgo de NEOdyS-2 contiene información similar aunque calculada de un modo diferente e incluyendo objetos con probabilidad de impacto hasta 2080. También se utiliza la escala de Palermo y Turín para evaluar la probabilidad de impacto y los daños estimados. En ambas tablas se puede obtener información adicional de cada objeto, como por ejemplo sus parámetros orbitales, magnitud, albedo, etc, pulsando sobre su nombre.

El hecho de que un objeto aparezca en las tablas sólo indica que su órbita puede cruzar la de la Tierra en un futuro. Existe una amplia gama de trayectorias que puede seguir y al menos una de ellas puede ser peligrosa. Los objetos aparecen en la tabla cuando se observan por primera vez. En estos casos su órbita futura no está bien determinada. Lo más probable y lo que suele ocurrir constantemente, es que al realizar nuevas observaciones del objeto, la trayectoria quede mejor definida y la órbita del objeto deje de cruzar la de la Tierra con lo que el objeto desaparece de las listas. Existen objetos que sólo se observan una vez y luego se “pierden”. Estos objetos se mantienen en la tabla a la espera de poder ser observados en el futuro.

La escala de Turín (o Torino) es una escala de daños cualitativa de 0 a 10 que tiene en cuenta la probabilidad de impacto y la energía que liberaría dicho impacto. El valor 0 indica que no hay ninguna posibilidad de daños, 1 indica que la probabilidad de impacto es muy baja y que observaciones futuras probablemente recalificarán la probabilidad de impacto a 0. Los

valores entre 2 y 4 constituyen la zona amarilla y requieren la atención de los astrónomos para reevaluar la probabilidad de impacto, los valores entre 5 y 7 constituyen la zona naranja o de amenaza y en ella se incluyen los objetos que pueden producir con gran probabilidad una catástrofe regional o global. En estos casos es necesario crear planes de contingencia. Los valores entre 8 y 10 constituyen la zona roja y de colisión asegurada. El 8 se asigna a fenómenos de destrucción locales que en caso de caída en el mar generarían tsunamis. Se producen una vez cada 50 a 1 000 años. El 9 produciría una catástrofe de carácter regional con grandes tsunamis si cae en el océano. Un evento como este estaría producido por un asteroide de un tamaño de 200 m y se producen una vez cada 10 000 o 100 000 años. El valor 10 se asigna a eventos que producen catástrofes climáticas globales y pueden amenazar el futuro de la civilización como la conocemos hasta ahora. En general se puede considerar que un asteroide de un 1 km de diámetro o superior producirá daños a escala global. Este tipo de eventos se produce aproximadamente cada 100 millones de años.

La escala de Palermo es una escala desarrollada por especialistas para ordenar el riesgo de impactos, teniendo en cuenta fechas, energías y probabilidades de estos. Se trata de una herramienta de comunicación entre astrónomos y no está diseñada para el gran público. La escala compara la probabilidad de un impacto potencial con el riesgo promediado para objetos del mismo tamaño o mayor a lo largo de los años hasta la actualidad. Se trata de una escala logarítmica en la que un valor de 0 indica que la probabilidad de impacto es igual a la promedio, -2 indica que es 1% inferior a la promedio y +2 que es 100 veces superior a la promedio. En el cálculo se tiene en cuenta la probabilidad de que se produzca el evento dividido por la probabilidad anual de un impacto similar o mayor y por el tiempo que resta hasta el impacto. En la práctica valores por debajo de -2 se refieren a eventos que no precisan atención, entre -2 y 0 necesitan una monitorización cuidadosa, y superior a 0 indica eventos que deberían causar cierta preocupación. La suma de las probabilidades de los diferentes posible impactos es lo que se conoce como valor acumulado en la escala de Palermo.

Objetos con valor 1 en la escala de Turín (según tablas Sentry y NEODyS-2)

NEA	año de impacto	tamaño (km)	Palermo	Turín
2011 AG5	2040-2047	140	-1.00	1
2007 VK184	2048-2057	130	-1.56	1

La tabla cambia a lo largo del tiempo incluyendo y retirando objetos.

En la fecha de redacción de este artículo, agosto de 2012, sólo figuran 2 objetos que en la escala de Turín tengan un valor superior a 0, los asteroides 2011 AG5 y 2007 VK184. La probabilidad de impacto de ambos es pequeña y se sitúa entre los años 2040 y 2057. De cualquier modo la

órbita se recalculará cuando sean visibles de nuevo en los años 2014 y 2013 respectivamente. De acuerdo con la escala de Turín ambos objetos tienen asignado un 1, y de acuerdo con la de Palermo, tiene asignado un máximo de -1 y -1,6 respectivamente. Apophis es un NEA de 270 m del que se habló en los medios de comunicación recientemente. En este momento tiene asignado un valor de 0 en la escala de Turín. La tabla Sentry contiene en este momento 402 objetos y la NEODyS-2 335.

Medidas de protección. Ciencia ficción y realidad

Hace unos años se estrenó una película de Hollywood cuyo argumento gira en torno a un asteroide que se acerca a la Tierra en rumbo de colisión. Un equipo de astronautas, mineros petrolíferos y militares salvan heroicamente al planeta Tierra en una misión espacial que viaja al asteroide donde hacen detonar una bomba nuclear en su interior. Probablemente este es el tipo de solución en el que pensaría mucha gente ante esta circunstancia: emplear la herramienta más poderosa de destrucción de que dispone la humanidad. Sin embargo es muy posible que no fuera lo más adecuado o que simplemente que no funcionara.

Ya sabemos que hay asteroides rocosos y metálicos. Un asteroide rocoso pequeño con una densidad de 2 o 3 gramos por centímetro cúbico probablemente se fragmentara con una explosión. Sin embargo es muy improbable que una bomba nuclear destruyera un asteroide compuesto de hierro; como mucho lo calentaría. Incluso los asteroides de menor densidad, casi porosos, como el 253 Mathilde, serían difícil de destruir.

Se ha experimentado disparando proyectiles contra materiales rocosos y porosos. En el primero de los casos el asteroide se fragmenta, pero en el segundo no ocurre nada apreciable. Es equivalente a disparar contra un saco de arena en el que el proyectil es absorbido sin daños internos. En el caso de un pequeño asteroide rocoso que se pudiera romper, la multitud de fragmentos generados extenderían el daño a un área más grande en la Tierra, incluso aunque dichos fragmentos fueran menores. Por otra parte, muchos de los asteroides contienen compuestos de cloro y bromo que podrían destruir la capa de ozono. Romperlos en pedazos no evitaría ese daño en la atmósfera de la Tierra. En vista de estos efectos adversos, si la fragmentación resulta peor que un sólo impacto, este último escenario sería preferible, ya que al menos se podría determinar con mejor precisión su trayectoria.

Existen ideas más sutiles que emplear la fuerza bruta para evitar el impacto de asteroides contra la Tierra. Revisemos algunas de las propuestas hechas hasta la fecha.

Se puede disparar un proyectil, no nuclear, contra un asteroide con el objetivo de cambiar su trayectoria, no de fragmentarlo. En el año 2005

NASA, durante la misión Deep Impact, envió un proyectil de 370 kg a 10 km/s sobre el núcleo del cometa Tempel 1. Se cree que tras el impacto se formó un cráter de 150 m de diámetro y 30 m de profundidad. Esta misión, muy compleja técnicamente porque el cometa se mueve a varios km/s, demostró la viabilidad de acercarse a cuerpos menores y disparar proyectiles sobre ellos. Tras el impacto, equivalente a unas 5 toneladas de TNT, el núcleo del cometa emitió gases durante 13 días. Se desconoce cuál fue el cambio producido en la trayectoria del cometa, pero probablemente fue prácticamente inapreciable dadas las dimensiones del proyectil, menores de 1 m, y las del núcleo del cometa, unos 7 km aproximadamente.

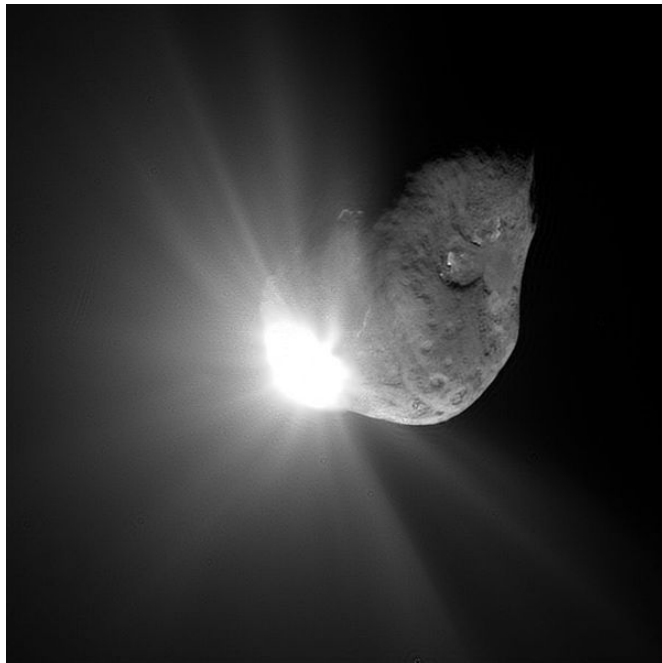


Figura 13: Imagen del núcleo del cometa Tempel 1,67 segundos después de recibir un impacto de la misión Deep Impact de la NASA. Imagen propiedad de NASA.

La Agencia Espacial Europea está estudiando esta posibilidad y ha puesto en marcha el estudio de una misión llamada Don Quijote. Esta misión estaría compuesta por dos módulos: Sancho orbitaría en torno al asteroide para obtener información de él, e Hidalgo sería el proyectil de unos 530 kg. Antes del impacto Sancho se retiraría a una distancia de seguridad y después de él volvería a acercarse para estudiar sus efectos.

Más tarde Sancho enviaría una sonda sobre el cráter para conocer las propiedades de la superficie tras la colisión.

Otra de las propuestas consiste en detonar una bomba en la cercanía del asteroide de modo que se genere una cantidad de calor suficiente que vaporice los gases en su superficie. Estos se expulsarían, como en el caso de los gases de un motor, proporcionando al asteroide un impulso que lo desviaría de su trayectoria. El impulso sería bastante pequeño y dependería del tamaño del asteroide, pero tras varias explosiones, es posible que la trayectoria de la órbita se desplazara lo suficiente para evitar la colisión con la Tierra. Este tipo de solución funcionaría con todo tipo de asteroides independientemente de su densidad. El principal requisito es que esta operación habría que realizarla con varios años de antelación para que el cambio en la órbita fuera apreciable. Probablemente diez años sería el mínimo y 100 años sería óptimo. El principal problema es que es necesario detectar con mucha antelación el asteroide y, si estos son pequeños, esto es especialmente difícil.

Desviar un asteroide para evitar una primera colisión con la Tierra, como en las propuestas anteriores, sería un éxito pero puede suponer colocarlo en rumbo de colisión en posteriores pasos cerca de la Tierra. Para evitar que esto ocurra sería óptimo controlar su órbita, algo técnicamente más complejo.

Una de las opciones contempladas consiste en aterrizar un cohete o nave espacial sobre la superficie del asteroide, anclarlo a este “boca abajo” y encender un motor que le aplique un impulso en la dirección adecuada. La idea es sencilla pero llevarla a cabo puede resultar muy complicado técnicamente. La superficie del asteroide puede ser porosa, llena de escombros que se deshacen o metálica y muy dura. Anclar el satélite puede resultar especialmente difícil. Además hay numerosos asteroides que giran caóticamente por lo que además de complicar el aterrizaje, una vez conseguido no se podrían encender los motores continuamente; sólo en el momento en el que la superficie donde se ha producido el aterrizaje se orienta en la dirección adecuada.

Si resulta difícil aterrizar, ¿Por qué no “aparcar” una nave espacial junto al asteroide? La gravedad del asteroide tirará de la nave espacial, y esta del asteroide. Para evitar que ambos colisionen es necesario encender los motores y aplicar un impulso pequeño que contrarreste la gravedad. Al mismo tiempo el cohete debe empujar suavemente en la dirección deseada. Probablemente para esta operación sea necesario al menos un par de cohetes situados en direcciones diferentes. Esta técnica es muy sencilla de aplicar pero también requiere ponerla en práctica varios años antes del paso del asteroide junto a la Tierra. Si el asteroide pasa periódicamente cerca de la Tierra, habría que hacerlo una o varias pasadas antes del pase peligroso que impactaría en la Tierra. Aunque parezca sorprendente puede que el tirón que es necesario aplicar no sea muy grande, especialmente si de lo que se trata es de desviar el satélite del área que conduce a una colisión

en una órbita posterior. Si el desvío hay que hacerlo inmediatamente antes de la colisión, la tracción gravitacional a emplear debe ser mucho mayor.

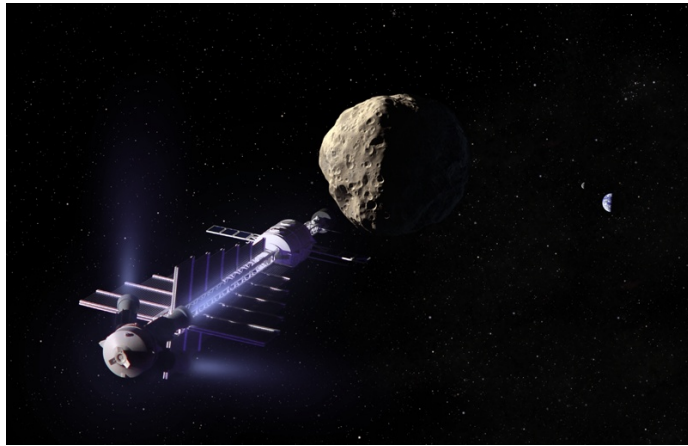


Figura 14: Tractor gravitatorio para arrastrar un asteroide fuera de su órbita. Se trataría de una nave espacial de 20 toneladas alimentada con un reactor nuclear. Emplearía motores iónicos para moverse y arrastrar el asteroide de modo continuo. Imagen de Dan Durda (FIAAA, Fundación B612).

Alternativamente se podría emplear una nave espacial más ligera que lanzara continuamente iones sobre el asteroide que a su vez transmitirían su impulso al asteroide. Es un equivalente al de la tracción gravitatoria comentada antes.

Poner en práctica estas ideas está fuera del alcance de la tecnología actual. Impactar un proyectil es probablemente lo único que funcionaría ahora. Una mejora de la tecnología actual y la posibilidad de realizar pruebas nos permitiría modificar la órbita de un PHA. Es más, sería incluso posible colocar un asteroide en órbita alrededor de la Tierra para poder extraer sus minerales. Quizá este último objetivo fuera un aliciente para la inversión de capital privado en un proyecto tecnológico de este tipo.

Conclusión

La investigación de los cuerpos menores del sistema solar es importante; no sólo porque nos permite conocer mejor el origen del sistema solar, sino también porque nos proporcionará información sobre el origen de la vida en la Tierra y la posibilidad de que se produzca fuera de esta. Además su estudio nos permite evaluar mejor el peligro potencial de impactos de

asteroides o cometas sobre la Tierra. Conocer los asteroides y cometas, su composición, órbita y origen son fundamentales.

Resulta irónico pensar que la vida en la Tierra probablemente comenzó con el bombardeo de cometas y asteroides sobre la Tierra y que esta puede desaparecer por el impacto devastador de uno de estos cuerpos. Los asteroides y cometas son portadores de vida, y de muerte, y a veces simplemente cambian el rumbo de la primera. Como ya hemos visto en el caso del impacto que originó el Chicxulub, tras un impacto, la vida no desaparece totalmente. Hace 65 millones de años se extinguieron la mayor parte de las especies, pero surgió una oportunidad para otras, como los mamíferos. La raza humana probablemente debe su existencia, entre muchos otros factores, a ese impacto y a la posterior desaparición de los dinosaurios.

Sin embargo un eventual impacto que ahora acabe con la civilización tal y como la conocemos es un motivo serio de preocupación para la humanidad. Es seguro que un asteroide o un cometa de tamaño grande impactarán de nuevo sobre la Tierra en el futuro. Lo que desconocemos es cuándo. Mientras tanto es importante continuar con los programas de observación, detección y predicción de órbitas de cuerpos menores, y desarrollar una tecnología capaz de desviar los asteroides potencialmente peligrosos. Esta tecnología requiere inversión y misiones espaciales.

Para saber más: bibliografía

Para saber más sobre bólidos y meteoritos, incluso para informar sobre avistamientos de los primeros y hallazgos de los segundos, puede consultar la web: <http://www.spmn.uji.es/> de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos y la de la Organización Internacional de Meteoros: <http://www.imo.net/>. Le animamos a que informe de estos eventos si ha tenido la fortuna de presenciarlos. Su contribución será utilizada y agradecida.

El libro “Asteroids III” (2002) de la Universidad de Arizona editado por W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, y R.P. Binzel es una obra de referencia actualizada sobre asteroides. En él se puede encontrar una sección con varios capítulos sobre impactos de asteroides. También se puede encontrar una estimación de la cantidad de material interplanetario recogida por la Tierra a lo largo del año.

La hipótesis de que la formación de cráteres no ha sido constante ha sido formulada por S.N. Ward y S. Day en la revista “Earth, Planets and Space” (2008). La variabilidad en el flujo de asteroides había sido propuesta un año antes por W. Bottke, D. Vokrouhlický y D. Nesvorný en un artículo de Nature en 2007. Estos últimos autores son los que postulan que dicho evento se puede deber a la colisión de dos cuerpos en el cinturón de asteroides.

La base de datos de cráteres de impacto se encuentra en la página <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/>. También en <http://impacts.rajmon.cz/> hay una base de datos creada por el grupo de estudios de campo de impactos.

En la web <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/> la NASA mantiene información sobre NEOs. La tabla Sentry de riesgo de impacto de JPL se puede consultar en <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/> y en <http://newton.dm.unipi.it/neodys2/index.php?pc=4.1> la de NEODyS-2.

La Unión Astronómica Internacional mantiene información sobre NEAs en la página: <http://www.iau.org/public/nea/>.