



LA CONSISTENCIA DE LOS COMETAS

Tan frágiles por naturaleza
como fascinantes
por composición

*El Dr. Josep M. Trigo
i Rodríguez realiza su
labor investigadora en el
Instituto de Ciencias del
Espacio (CSIC) y en el
Institut d'Estudis Espacials
de Catalunya.*

*Para contactar:
trigo@ieec.uab.es*

JOSEP M. TRIGO

El comportamiento de los cometas y de sus fragmentos permite ahondar en varias de sus propiedades físicas. Los resultados son tan sorprendentes y prometedores para ampliar nuestro conocimiento de las etapas formativas del sistema planetario que no cabe duda que se fomenta y multiplica nuestra fascinación hacia ellos. El autor pretende esbozar brevemente algunas de las líneas de investigación que está desarrollando en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC) en relación con el estudio de los objetos más primitivos que han sobrevivido en el Sistema Solar hasta nuestros días, categoría en la que no solo entran los cometas sino también los asteroides de tipo condritico.

No cabe duda que la diversidad físico-química de los cometas ha causado la fascinación de varias generaciones de astrónomos. En ellos sorprende no sólo su peculiar riqueza en compuestos orgánicos, hecho que movió al Prof. Joan Oró a sugerir su conexión con el origen de la vida en la Tierra (Oró, 1961), sino también su fascinante comportamiento vistos desde la lejanía en que los contemplamos. Según un cometa se acerca progresivamente al Sol desarrolla la denominada coma, una extensa envoltura de gas y polvo que los hace ser objetos visibles a grandes distancias. La sublimación de los hielos y la emisión de diminutas partículas minerales embebidas en ellos se encarga de alimentar constantemente esa envoltura alrededor de los cometas. Cuando al adentrarse en los dominios de los planetas terrestres la luz solar irradia con más eficacia su superficie, la temperatura progresivamente aumenta haciendo que la sublimación de hielos sea más intensa y el desarrollo de las colas de polvo y plasma es completo. Tales fastuosas colas de polvo y gas se extienden cientos de millones de kilómetros desde el núcleo cometario. No entraré en este artículo a describir estos detalles «fisonómicos» que son tratados repetidamente en otros trabajos sino como el comportamiento de los cometas y de sus

fragmentos está permitiendo profundizar en algunas de sus propiedades físicas.

En particular, una de las que los hace ser objetos únicos en el Sistema Solar es su bajísima consistencia, fiel reflejo de sus condiciones de formación en los fríos límites exteriores de nuestro sistema planetario, sometidos a un entorno rico en hielos y compuestos orgánicos. Las rocas terrestres más frágiles son dos o tres órdenes de magnitud más consistentes por lo que es difícil hacerse una idea clara de la fragilidad de los cometas. Esta es una propiedad física esencial en futuras misiones espaciales que tengan el objetivo de posarse sobre un cometa, pero sobre todo proporciona claves sobre el origen y la evolución de estos cuerpos (Trigo-Rodríguez & Llorca, 2006). La enorme fragilidad de algunos cometas hace que sucumban, cual inmensa bola de nieve y polvo, a pasos próximos por el perihelio bajo creciente radiación solar. Otros parecen ser pilas de escombros que se desintegran en múltiples piezas ante el efecto de marea gravitatoria que tiene lugar en su aproximación a algún planeta. Un ejemplo famoso fue la extraordinaria fragmentación del cometa Shoemaker-Levy 9 al alcanzar el perijove de su órbita de captura por el gigante Júpiter, que finalizó en el impacto de esos fragmentos con la atmósfera joviana (Figura 1). En este artículo de divulgación pretendo enfatizar los recientes avances que hemos realizado en la comprensión de estos objetos y la labor que astrónomos profesionales y amateur realizan hoy en día, codo a codo, en su estudio. Ejemplos recientes resultarán útiles para comenzar a comprender no sólo qué son los cometas sino también para responder acerca de su papel en las fases iniciales de formación del Sistema Solar y de otros sistemas planetarios.

ASTROS CAMBIANTES

Los recientes estudios en el laboratorio de las partículas recuperadas por la sonda *Stardust* del cometa 81P/Wild 2 han confirmado los análisis espectroscópicos remotos, mostrando que los cometas son frágiles

*(En la página anterior):
Figura 1. La enorme masa de Júpiter ha hecho que innumerables cometas hayan caído sobre él. El último de ellos fue el cometa Shoemaker-Levy 9 tras el célebre impacto de sus fragmentos entre el 16 y el 22 de julio de 1994. Composición de varias imágenes tomadas por la cámara de campo amplio WFPC-2 del Telescopio Espacial Hubble. (H. Weaver, T. E. Smith -STScI-, J. T. Trauger, R.W. Evans -JPL- y NASA)*

Figura 2. Las tres principales regiones en las que han permanecido almacenados asteroides y cometas. De izquierda a derecha, el Cinturón principal de Asteroides, el Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort. (Imagen adaptada NASA/JPL-Caltech/R. Hurt)

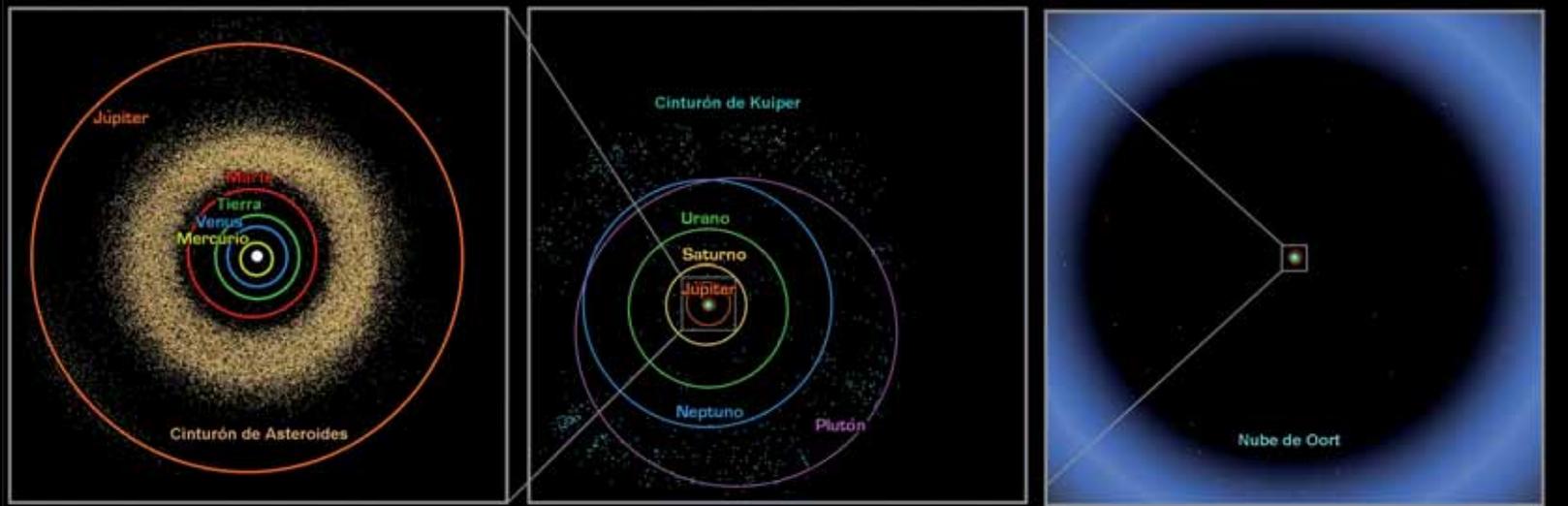


Figura 3. Una extraordinaria tormenta meteórica es previsible cuando la Tierra intercepte en el 2022 la densa cortina de escombros del 73P/Schwassmann-Wachmann 3, fragmentado en 1995. Será una oportunidad única para estudiar la composición y estructura de ese cometa. Imagen del cometa tomada el 19 de abril de 2006 por el Telescopio Espacial Hubble. (NASA, ESA, H. Weaver –APL/JHU–, M. Mutchler y Z. Levay –STScI–)



agregados de hielo, materia orgánica y diminutos granos minerales formados en las regiones exteriores del Sistema Solar. Precisamente la abundancia de tales compuestos volátiles sitúa la región de formación de estos objetos a gran distancia del Sol (Figura 2). Sin embargo, los diferentes datos que nos han proporcionado diversas misiones espaciales recientes sugieren que las propiedades físicas de cada cometa e incluso su composición química podrían estar forjadas por la peculiar historia de encuentros y desencuentros con los planetas, el número de aproximaciones al asteroide, y también por los impactos con otros objetos que hayan ido modelando, en mayor o menor medida, su superficie.

Distinguir un cometa por la apariencia difusa de su coma vista desde millones de kilómetros puede resultar engañoso pues objetos formados de maneras muy diferentes podrían sufrir ese comportamiento en sus aproximaciones al Sol. Todo objeto cuya composición externa mayoritariamente volátil sufra sublimación bajo la radiación solar sería considerado un cometa ante nuestra simplificada definición, ignorantes tanto de su estructura interna como de su propia evolución. Sin embargo, durante la fase formativa de los planetas muchos objetos rocosos formados en las regiones interiores del Sistema Solar fueron dispersados por los planetas hacia órbitas alejadas. Existe una región más

allá de Neptuno que es denominada Cinturón de Kuiper que podría albergar algunos objetos de transición de este tipo. Incluso más allá, a decenas de miles de unidades astronómicas del Sol podría haber también objetos de este tipo apenas irreconocibles externamente de otros objetos nacidos en regiones más externas. Aquellos objetos almacenados en esas regiones pudieron agregar gran cantidad de hielo y materia orgánica en sus regiones superficiales. Los diferentes tipos de objetos que pueden comportarse a las distancias en que los

contemplamos como cometas podrían diversificar todavía más las propiedades físicas a esperar de un núcleo cometario.

LA MAGIA COMETARIA: FRAGMENTACIONES Y ESTALLIDOS

Uno de los primeros cometas que se fragmentó en tiempos modernos fue el D/Biela en su paso por el perihelio de 1846. Su ruptura en dos piezas fue seguida por los diferentes observatorios de la época y más tarde dio lugar a una de las más fascinantes tormentas de meteoros de la historia reciente que fue observada por Josep Comas Solà en plena juventud. La evolución separada de los diferentes fragmentos de éste y otros muchos cometas ha sido estudiada en gran detalle en base al seguimiento astrométrico de la evolución de sus trozos tras su ruptura. Durante la fragmentación de un cometa el papel de las fuerzas diferenciales no gravitatorias se hace muy importante y determina la deriva de los diferentes fragmentos. Los estudios de las fuerzas no gravitatorias en cometas son también fuente de una pléyade de información sobre propiedades esenciales de los cometas tales como su masa e incluso su densidad cuando el volumen es bien conocido (Blüm *et al.*, 2005; Gutiérrez y Davidsson, 2007).

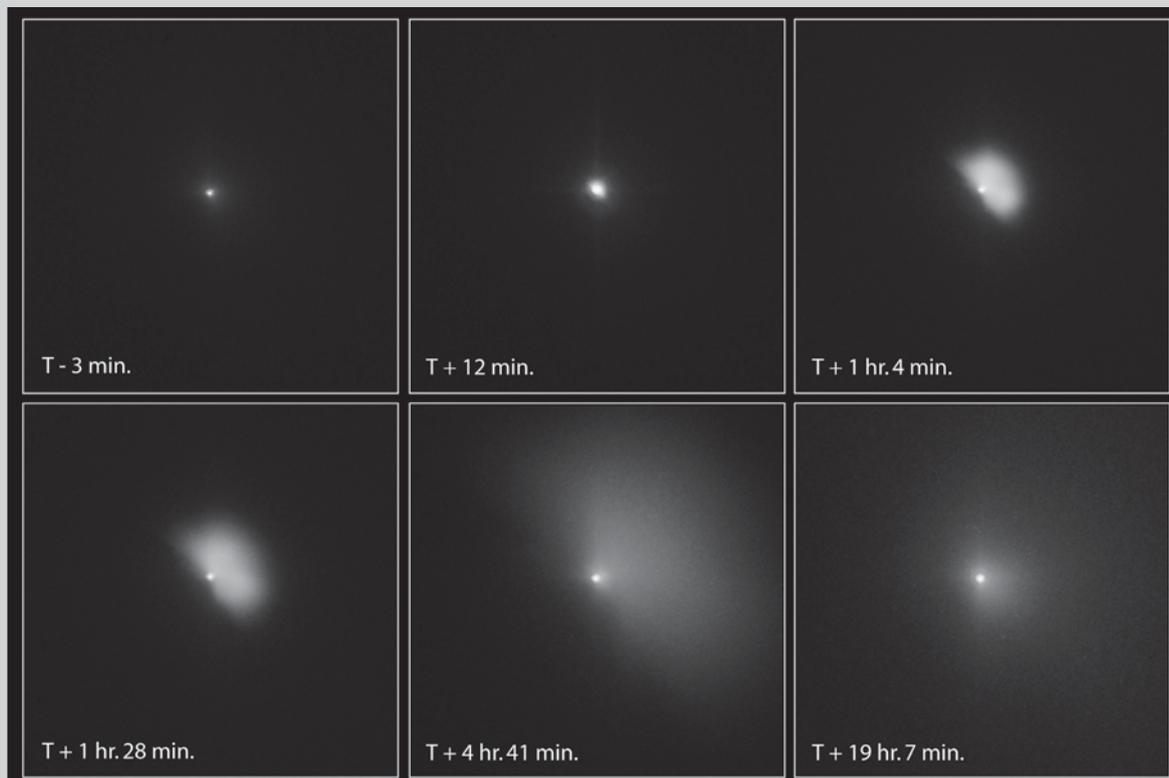


Figura 4. El impacto del proyectil lanzado por la sonda Deep Impact sobre la superficie del cometa 9P/Tempel 1 el 4 de julio de 2005 activó la luminosidad de la envoltura coma. Fluctuaciones en la luminosidad de estas tenues envolturas proporcionan información sobre la densidad espacial y el tamaño de las partículas desprendidas, típicamente de pocas micras. En la figura, T es el tiempo del impacto. (NASA, ESA, P. Feldman –Johns Hopkins University–, y H. Weaver – APL/JHU–)

Hay numerosos casos que demuestran la relación entre los procesos de fragmentación y los llamados *outbursts* (que traduciríamos por estallidos o incrementos súbitos de luminosidad). Estos estallidos preconiando una fragmentación inminente se han observado en cometas que hicieron historia como el C/1975 V1 West, 73P/Schwassmann-Wachmann 3 –ver Figura 3– y C/1999 S4 (Linear). El origen de estas fragmentaciones posiblemente se encuentre en que los fragmentos son realmente bloques constitutivos del cometa, débilmente agregados en colisiones de baja velocidad. Muchos cometas podrían tener un núcleo formado por estas pilas de escombros cósmicos (bloques de pocos cientos de metros apilados que son conocidos como *rubble piles*). Un debilitamiento de su consistencia como consecuencia de una progresiva sublimación de hielos (en pasos muy próximos al perihelio) o un consiguiente desgaste evolutivo podría ser el inductor de esa fragmentación. De hecho, existen complejos de cuerpos dinámicamente relacionados que indican que los cometas de periodo corto acaban sus días desintegrándose en múltiples piezas, algunas de las cuales puede adoptar apariencia asteroidal. Un claro ejemplo es el cometa 2P/Encke, asociado a la importante corriente meteórica de las Táuridas que además aparece emparentado con varios asteroides. En otros casos la fragmentación es inducida por un paso cercano a un cuerpo planetario, donde el efecto de marea gravitatoria experimentado de manera diferencial por cada uno de los bloques constitutivos del cometa puede conllevar al debilitamiento de su estructura y consiguiente fractura.

Sin embargo, no todos los estallidos en la magnitud de los cometas se producen por la ruptura catastrófica del núcleo sino que a veces involucra el desprendimiento de secciones del núcleo cometario. Algo similar pero a menor escala ocurrió tras el impacto del proyectil lanzado por la sonda *Deep Impact* contra el cometa 9P/Tempel 1 (Figura 4). Precisamente un gran descubrimiento fue su curiosa estructura, formada por la presencia de diferentes «capas» o «tapetes» heterogéneamente distribuidos sobre su superficie (Belton *et al.*, 2006). Tales estructuras resultaron sin embargo familiares a nuestra comunidad dado que también habrían sido observadas durante las aproximaciones de las sondas *Deep Space 1* al cometa 19P/Borrelly o de *Stardust* al cometa 81P/Wild 2 (Figura 5). De hecho, en Houston hace dos años se presentaron imágenes y explicaciones similares en la sesión dedicada al análisis de resultados del primitivo cometa 81P/Wild 2 durante la *Lunar & Planetary Science Conference*. En realidad, estos bloques que destacan sobre la superficie media de estos cometas podrían ser en cierto modo compatible con los modelos de Dina Prialnik de cristalización de las superficies cometarias de los que hablaré más adelante.

Sin embargo, la hipótesis de Belton *et al.* (2006) va aún más allá sugiriendo que tales mesetas son consecuencia del propio proceso de agregación de los denominados cometesimales. Dadas las altas porosidades que esperamos para tales progenitores y las bajas velocidades relativas con las que impactarían sobre el núcleo gestor de un cometa, los cometesimales colapsarían en tapetes como los observados. Usando un símil más comprensible para el lector,

Figura 5. La estructura en capas del cometa 9P/Tempel 1 en base a las imágenes de la sonda Deep Impact. (Adaptado de Belton et al., 2007)

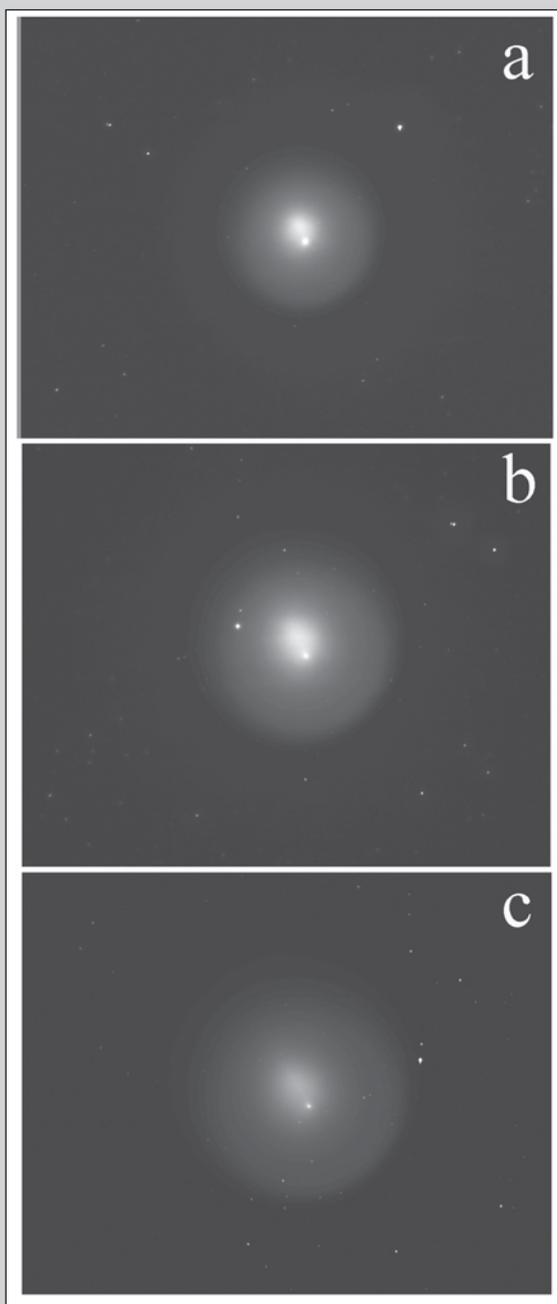
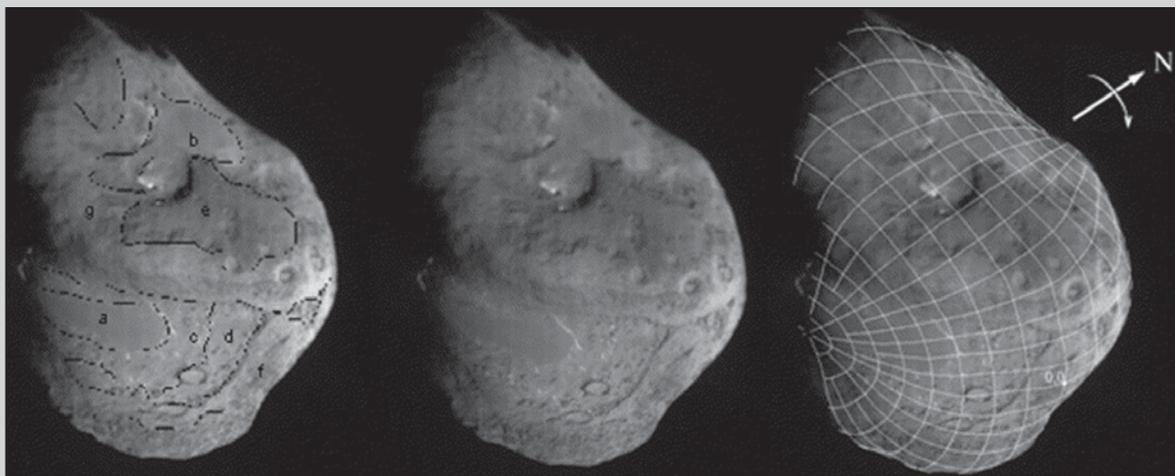


Figura 6. Expansión del polvo y gas desprendido del 17P/Holmes tras su estallido del 24 de octubre de 2007. Secuencia de tres imágenes tomadas en: a) 30,99 oct., b) 1,95 nov., y c) 2,94 nov. 2007. Imágenes Montseny Astronomical Observatory (MPC B06, J.M. Trigo)

algo parecido a lo que ocurriría si lanzásemos bolas de nieve sobre un suelo nevado. Sucesivos tapetes de hielo sucio débilmente compactado en el impacto irían construyendo las estructuras observadas por estas sondas espaciales. Aunque un determinado cometa pudiese haber estado sometido a impactos en su superficie más externa, debido al progresivo desgaste del cometa bajo la radiación solar, al retirarse las capas externas la preservada estructura primigenia quedaría al descubierto, formando las mesetas observadas en los cometas 9P/Tempel 1, 19P/Borrelly y 81P/Wild 2.

Dada la fragilidad de esas capas, formadas por agregados minerales diminutos (micras) esas estructuras son pulverizadas. La presión del gas generado por la exposición de zonas vírgenes a la radiación solar o fruto de la sublimación de los hielos mezclados contribuirá impulsando las finas partículas de polvo hacia el medio interplanetario. Rápidamente este modelo de capas apiladas ha ganado muchos defensores pues explica los estallidos observados en algunos de estos objetos. Es el caso de los cometas 29P/Schwassmann-Wachmann 1 y el 17P/Holmes, con estallidos espectaculares pero que sin embargo no van asociados a la disgregación del núcleo cometario sino de estas capas externas. Tales regiones bajo el calentamiento de la radiación solar se desprenderían, sublimando o fragmentándose dada su baja consistencia y desprendiendo los finos granos minerales. Tales bloques pese a poseer incluso masas de cientos de millones de toneladas serán muy eficientemente pulverizados, provocando espectaculares estallidos en los que el cometa puede llegar a incrementar su luminosidad en muchas magnitudes. Un magnífico ejemplo ha sido el proporcionado por el reciente estallido del cometa 17P/Holmes (Figuras 6 y 7) en que la magnitud del cometa se incrementó en unas 14 magnitudes. Nuestro equipo de investigación ha estado siguiendo extensivamente desde hace varios años el cometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (Figura 8) que se considera prototipo de este tipo de estallidos, con la colaboración de destacados astrónomos amateur (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2008). En el



Figura 7.
a) Imagen interna de la coma del 17P/Holmes tomada el 7,92 de noviembre de 2007.
b) La aplicación de un algoritmo Larson-Sekania revela la estructura interna, destacando una región rica en polvo desprendida tras el estallido del 24 de octubre de 2007. (Gualba Observatory-MPC442, A. Sánchez)

caso del cometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1, su distancia heliocéntrica es tan alta que se sospecha que el principal mecanismo sea la transición de fase del hielo amorfo a cristalino, proceso que conlleva una reducción de la consistencia de la superficie. Pese a que desde la Tierra observamos a este fascinante Centauro a distancias típicas de entre 5 y 6 unidades astronómicas, los estallidos pueden ser seguidos con telescopios amateur y se caracterizan por la emisión de densas cortinas de polvo en forma de abanico (Figura 8). Sospechamos que aquellos cometas que hayan permanecido almacenados en regiones externas, a grandes distancias del astro rey, deben haber preservado la original estructura amorfa en que el hielo de agua y otros compuestos originalmente condensan. Cuando esa transición de fase ocurre hay también un cambio de volumen que puede resquebrajar la superficie e inestabilizarla. También podría sucumbir ante la presión del gas que ha ido acumulando en el interior del cometa en esa transición de fase, o bien ante una reacción altamente exotérmica cuando regiones ricas en material altamente volátil fuesen expuestas tras la ruptura al brusco calentamiento por la radiación solar. Observaciones remotas han proporcionado todavía poca luz al respecto del mecanismo (o mecanismos) responsable de estos estallidos. Por ello, nuestro equipo está sistemáticamente monitorizando la evolución en la magnitud de estos cometas noche tras noche. El estallido en sí no es sino el brusco incremento en la luminosidad del falso núcleo (y más tarde de la coma) del cometa.

Este proceso se produce cuando las diminutas partículas de polvo fino (cuyo diámetro es de pocas micras) se expanden desde las regiones activas hacia el medio interplanetario. La densidad de partículas por unidad de superficie actúa incrementando la sección eficaz de reflexión y dispersión de la radiación solar. Asimismo, la rápida sublimación de los hielos en el interior de la coma del cometa produce masivas emisiones de polvo y gas que se expanden rápidamente

desde el núcleo, bien ejemplificado en la «burbuja» exterior observada en el cometa 17P/Holmes.

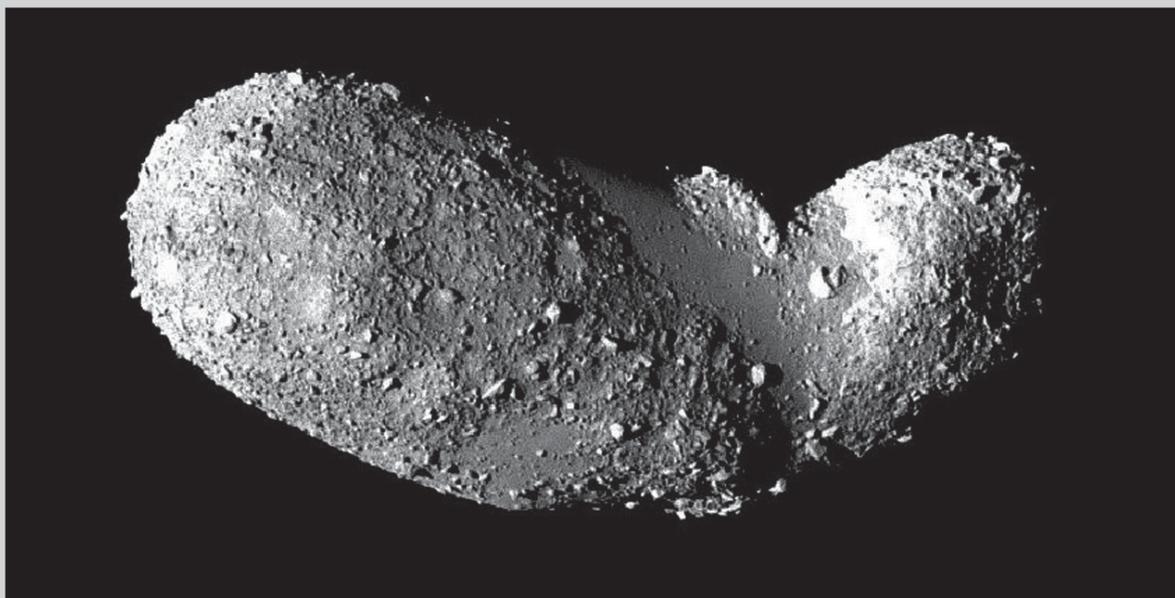
TAN FRÁGILES COMO PRIMITIVOS

El comité de nomenclatura de la Unión Astronómica Internacional (UAI) definió el término meteoróide como toda aquella partícula sólida en órbita solar con un diámetro desde pocas micras hasta unos 10 metros. La mayoría de fragmentos cometarios, sometidos a progresiva desintegración en el medio interplanetario acaban terminando en esta categoría de objetos cuyo estudio supone un enorme interés. Aunque son muy abundantes y constituyen auténticas sondas representativas en buena medida de la composición físico-química de sus objetos progenitores. Afortunadamente llegan continuamente a la Tierra y producen brillantes bolas de fuego cuyos espectros permiten conocer su composición química. De hecho, la atmósfera terrestre, además de suponer un efectivo escudo ante el impacto de meteoroides, nos permite detectar estos objetos, estudiar sus trayectorias y



Figura 8.
Desarrollo de la coma del cometa 29P/Schwassmann-Wachmann 1 tras un brillante estallido. Imagen del 23 de julio de 2007 tomada por Sensi Pastor y José Antonio de los Reyes desde el Observatorio Municipal de Murcia (J76-La Murta).

Figura 9.
El asteroide Itokawa es un objeto reagrupado del tipo denominado «pila de escombros». Sus propiedades físicas (densidad y porosidad) también indican que se formó con el reagrupamiento de grandes bloques tras un impacto entre sus asteroides progenitores. (JAXA)



órbitas para conocer su origen y también determinar su composición química.

Durante la rápida entrada en la atmósfera de la Tierra las partículas cometarias sufren progresivamente la presión hidrodinámica hasta que se produce su ruptura. Al ser frágiles agregados de granos minerales similares a las Partículas de Polvo Interplanetario (usualmente conocidas por el acrónimo inglés IDP), su consistencia es realmente baja por lo que la mayoría de ellas se fragmentan en la atmósfera terrestre a presiones dinámicas de unos 10 kPa (Trigo-Rodríguez y Llorca, 2006). Lo realmente fascinante que descubrimos en ese trabajo fue la existencia de enjambres de partículas cometarias cuya consistencia variaba un par de órdenes de magnitud. Cometas de periodo corto altamente procesados por colisiones como el 2P/Encke y el extinto (hoy en día con comportamiento asteroidal) 3200 Faetón, producen partículas más consistentes que se fracturan en torno a 20-50 kPa. Por el contrario, cometas como el 21P/Giacobini-Zinner producen partículas que se fracturan a tan sólo 400 Pa.

Uniendo toda esta evidencia, facilitada por los meteoroides que llegan a la Tierra desde diferentes cometas, a nuestro conocimiento actual de los procesos de compactación por impactos y de alteración térmica y acuosa, ocurridos en asteroides primitivos (de tipo condrítico), hemos recientemente propuesto que la consistencia de estos cuerpos puede indicar si son primigenios o no (Trigo-Rodríguez y Blüm, 2008). Nuestro estudio sugiere que la mayoría de los objetos de pequeño tamaño presentes en el Sistema Solar interior han sido altamente procesados por diferentes procesos. Así lo muestran también los estudios realizados en el laboratorio de los procesos ocurridos durante las primeras fases de agregación, indicando que tanto planetesimales como especialmente cometesimales fueron cuerpos

extraordinariamente porosos (Blüm *et al.*, 2006). En nuestro escenario, a lo largo de los más de 4.500 millones de años transcurridos desde su formación, los pequeños asteroides y cometas situados en regiones internas habrían sufrido innumerables procesos, tendiendo a compactarlos y alterarlos químicamente hasta el punto de enturbiar nuestra comprensión de los procesos iniciales de formación de estos ladrillos constructores de los planetas. Aquellos cometas almacenados en regiones externas (Cinturón de Kuiper o Nube de Oort) podrían haber sido preservados en buena medida de esos procesos. En cualquier caso, estos primeros balbuceos en nuestra comprensión de la evolución físico-química de estos fascinantes objetos deberán ser corroborados y revisados por futuras misiones espaciales como podría ser la misión *Marco Polo* de la Agencia Espacial Europea que pretende traer una muestra de un asteroide en colaboración con la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA). Esta floreciente agencia nipona ya tiene entre sus éxitos recientes la exploración del asteroide Itokawa, una de las más fructíferas misiones de exploración de estos objetos realizadas hasta la fecha (Figura 9).

Estas misiones a cometas o asteroides primitivos se vislumbran esenciales para continuar ampliando nuestro conocimiento de las primeras fases formativas del Sistema Solar. Como claro ejemplo de ello, los recientes estudios realizados por sondas a los cometas de la familia de Júpiter 9P/Tempel 1 y 81P/Wild 2 han supuesto un impulso enorme a este campo. La interpretación del creciente volumen de datos continúa pero todo parece indicar que muchos cometas son objetos primitivos, débilmente procesados y con una química fascinante. Todo ello unido a su diversidad, posiblemente fruto de peculiares historias de encuentros y desencuentros con los planetas, los hará ser destino clave de futuras misiones de exploración interplanetaria. **A**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- * Belton, M. J. S. *et al.* (2007). «The internal structure of Jupiter family cometary nuclei from Deep Impact observations: The *talp* or *layered pile* model». *Icarus* 187, 332-344.
 - * Blum, J., R. Schräpler, B. J. R. Davidsson y J. M. Trigo-Rodríguez (2006). «The physics of protoplanetary dust agglomerates. I. Mechanical properties and relations to primitive bodies in the Solar System». *Astrophysical Journal* 652, 1768-1781.
 - * Gutiérrez, P. J. y B. J. R. Davidsson (2007). «Non-gravitational force modeling of comet 81P/Wild 2. II. Rotational evolution», *Icarus* 191, 651-664.
 - * Oró, J. (1961). «Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth», *Nature* 190, 389-390.
 - * Trigo-Rodríguez, J. M. y J. Blüm (2008). «Tensile strength as an indicator of the degree of primitiveness of undifferentiated bodies». *Planetary & Space Science*, en prensa.
 - * Trigo-Rodríguez, J. M. y J. Llorca (2006). «Cometary meteoroids strength: clues to the structure and evolution of comets». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 655-660.
 - * Trigo-Rodríguez, J. M., E. García Melendo, B. J. R. Davidsson, A. Sánchez, D. Rodríguez, J. Lacruz, J. A. de los Reyes y S. Pastor (2008). «Outburst activity in comets: I. Continuous monitoring of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1». *Astronomy & Astrophysics*, en prensa.
 - * Trigo-Rodríguez, J. M., B. Davidsson, P. Montañés-Rodríguez, A. Sánchez, y B. Troughton (2008b). «All-sky cameras detection and telescope follow-up of the 17P/Holmes outburst», *Lunar Planet. Sci.* 39, abstract #1627, Lunar and Planetary Institute, Houston.
-