

¿Qué fueron, qué son y qué serán los cometas? (II)

Pedro J. Gutiérrez y Rafael Rodrigo.

Desde mediados del siglo XVI hasta mediados del siglo XX, se pudo comprender la naturaleza más básica de los cometas. Brahe demostró que los cometas eran en realidad objetos celestes, no relacionados con la atmósfera terrestre. Edmond Halley reveló que algunos cometas orbitaban alrededor del Sol de manera periódica. La hipótesis de Newton de que la coma y las colas reflejaban la luz del Sol fue confirmada observacionalmente y finalmente, el desarrollo y uso de nueva instrumentación permitió empezar a conocer la composición de los cometas. Ante la necesidad de una fuente para todo el material que formaba la coma y las colas se postuló la existencia de un núcleo, oculto tras la coma e inaccesible para el ojo y para los telescopios. Al establecerse y demostrarse la relación entre las lluvias de meteoros y la trayectoria u órbita de algunos cometas, se formuló el primer modelo sobre la estructura y composición del núcleo de los cometas: el banco de arena. Según este modelo, el núcleo estaba compuesto de material meteoroide que al ser calentado por el Sol liberaba diferentes componentes gaseosos como agua, metano, monóxido o dióxido de carbono, etc. Una vez liberados, estos compuestos se “rompían” o transformaban en otros por acción de la radiación solar (fotoionización y fotodisociación) dando lugar a los compuestos que se observaban en la coma y en las colas.

Sin embargo, este modelo era insuficiente para explicar algunas observaciones. Una de las cosas que este modelo no podía explicar era la supervivencia de algunos cometas que habían pasado muy cerca del Sol. Un cuerpo que pase muy cerca del Sol es sometido a una fuerte tensión. Esto hace que un conjunto de partículas sueltas, sin cohesión, difícilmente pueda superar un acercamiento al Sol o a cualquier planeta del Sistema Solar. Sin embargo, ya en 1843 se había observado que un cometa había atravesado la corona solar sobreviviendo a su paso. Otro de los hechos que no podía explicar era los cambios que se producían en el período orbital de algunos cometas, como el caso del cometa Encke. Fueron precisamente esos cambios en el período orbital, que reciben el nombre de cambios no gravitacionales, lo que utilizó el Dr. Fred Whipple (1906-), de la Universidad de Harvard y afectuosamente llamado el Dr. Cometa, para establecer la validez de un nuevo modelo del núcleo de los cometas, la *bola sucia de nieve*.

La bola sucia de nieve.

En 1950, Whipple propuso que los núcleos de los cometas son, principalmente, un conglomerado de hielos tales como agua, amoníaco, metano, monóxido de carbono y otras posibles moléculas madre de los compuestos observados en la coma, mezclados con material meteoroide (polvo) formando como una gran bola de nieve sucia. Whipple, a partir de observaciones de diferentes cometas, postuló también que, aproximadamente, dos terceras partes del núcleo estaba constituidos por hielo y solo una tercera parte por polvo. Además estableció que la condición mas crítica para la existencia de esta bola de nieve sucia es que se debía haber formado a una temperatura muy baja, inferior a los -200°C . Si se hubiesen formado a temperaturas superiores sólo podría haber hielo de agua en el núcleo.

Whipple describió distintas etapas en la evolución de los núcleos que orbitan alrededor del Sol. En una primera etapa, cuando el núcleo se aproxima a su perihelio, el Sol calienta los hielos de la superficie que se vaporizan arrastrando consigo el polvo más pequeño o ligero. Las partículas más grandes o pesadas quedarían en la superficie

formando una especie de manto aislante. Sucesivos pasos alrededor del Sol, irían mermando la cantidad de hielo presente en el núcleo sugiriendo así que el estado final de un cometa podría ser el de un cuerpo oscuro, similar a un asteroide. Whipple incluso propuso que el asteroide Hidalgo podría ser, en realidad, el resto de un cometa que había gastado todo su hielo.

Con estas suposiciones, y retomando la idea original de Bessel, el gas que se liberaba cuando el cometa se acercaba al Sol producía una fuerza de reacción sobre el núcleo, similar a la que permite desplazarse a un cohete, que modificaba ligeramente su órbita alrededor del Sol. Así, el modelo podía explicar los cambios observados en el período orbital de algunos cometas y Whipple estimó que la cantidad de gas necesaria para producir los cambios observados era relativamente pequeña, asegurando la supervivencia de los cometas durante largos períodos de tiempo. Whipple también estimó el tamaño del núcleo de algunos cometas llegando a la conclusión de que tenían un radio aproximado entre 1 y varios kilómetros.

Este modelo de núcleo también podía ser utilizado para interpretar o explicar otras observaciones. Algunos cometas habían experimentado en un período muy corto de tiempo un aumento espectacular de su brillo, pudiendo aparecer incluso 1000 veces más brillantes que antes del aumento; como si hubieran sufrido una "explosión". Según Whipple las "explosiones" observadas podían ser debidas a una fragmentación o hundimiento de las partes más débiles del manto produciéndose un aumento de la cantidad de gas liberado. Otra circunstancia que permitiría explicar las "explosiones", chorros y estructuras en la coma sería precisamente la mezcla de hielos. Por ejemplo, sabemos que el hielo de monóxido de carbono se transforma en gas a una temperatura inferior que la del hielo de agua. Así, una zona constituida por monóxido de carbono que estuviese rodeada por hielo de agua, al calentarse se comportaría como una olla a presión y podría originar una "explosión".

Es necesario decir que aunque el modelo de la bola sucia de nieve era consistente con la mayoría de los hechos observacionales que el modelo del banco de arena no podía explicar, éste último siguió teniendo firmes defensores hasta bien entrados los años 70.

Órbitas cometarias: Hipótesis de Oort

En el mismo año que en el que Whipple propuso el modelo de la bola sucia de nieve, el astrónomo holandés Jan Oort (1900-1992), de la universidad de Leiden, publicó también un trabajo importantísimo sobre el origen de los cometas. A partir de las órbitas de los cometas conocidos, Oort observó que la inmensa mayoría de los cometas que habían sido descubiertos hasta la fecha habían pasado cerca del Sol sólo una vez en su vida. Calculando el punto más alejado del Sol de las orbitas de esos cometas, Oort estableció que una gran parte de los cometas debían proceder de una región situada entre 50000 y 150000 veces la distancia de la Tierra al Sol. Oort, predijo así, la existencia de una especie de nube esférica que rodeaba al Sistema Solar donde residían los cometas. Además, Oort estimó que para que se produjese el número de cometas observados hasta la fecha, en la nube esférica debían haber entre cien mil millones y un billón de cometas, teniendo una masa, en total, inferior a la decima parte la masa de la Tierra. Según la hipótesis de Oort la "historia" de los cometas se podía explicar fácilmente. La acción gravitatoria de estrellas que pasasen relativamente cerca del Sistema Solar producirían una perturbación en la nube esférica que sacaba de su letargo algunos cometas. Parte de esos cometas entrarían en la parte interna del Sistema Solar, donde las perturbaciones de Júpiter provocarían que la mitad de los cometas empezasen a moverse en órbitas alrededor del Sol y la otra mitad fuesen enviados hacia el medio

interestelar. Sucesivos pasos por la región planetaria provocarían que algunos de los cometas capturados evolucionasen hasta órbitas con un período muy corto.

Sin embargo y si bien los cometas residían y podían proceder de esa nube, dada la baja densidad de materia en la región en la que estaba situada, no se podían haber formado allí. Una posible explicación es que se podrían haber formado en la región planetaria, desde donde habrían sido exiliados a la nube.

La naturaleza del viento solar y las colas de los cometas.

También a esa época corresponden los trabajos pioneros de Biermann (1907-1985) y Alfvén (1908-1995) sobre el viento solar. Ya en 1943, Hoffmeister (1892-1968) había observado que las colas rectas o de iones presentaban un pequeño ángulo de aberración, es decir, se desviaban ligeramente de la dirección antisolar. Este ángulo fue correctamente interpretado por Biermann en 1951 quien, continuando con la idea establecida por Lodge a principios de siglo, propuso que los choques producidos entre las partículas que constituían el viento solar y las moléculas de la coma era lo que originaba y explicaba las colas rectas. Sin embargo, las altas velocidades a las que se desplazaban algunas estructuras presentes en las colas exigían que el viento solar fuese, en realidad, más denso de lo que se había estimado que era. En 1957, Alfvén solventó esta inconsistencia argumentando que el viento solar arrastra consigo un campo magnético, el campo magnético interplanetario, que es en realidad el que acelera los iones hacia la cola recta.

Con el modelo de Biermann y Alfvén se completaba la teoría de formación de las colas. Las colas rectas y azuladas están formadas por iones, que son acelerados, prácticamente, en la dirección antisolar por las líneas del campo magnético interplanetario. Las colas curvadas y amarillentas están formadas por pequeños granos de polvo que se mueven por acción de la presión ejercida por la radiación solar y la atracción del Sol de acuerdo con las ideas originales de Bessel y Arrhenius.

Observaciones modernas. La composición de los cometas.

Se puede decir que los años 50 suponen el comienzo de una nueva era en la Astronomía y Astrofísica cometarias. Tras el modelo nuclear de Whipple y la hipótesis de Oort, los cometas dejaron de ser un simple fenómeno espectacular cuya naturaleza era enigmática para convertirse en objeto de un intenso y necesario estudio. Al sospecharse que los cometas se podían haber formado en la región planetaria y que posteriormente habrían sido exiliados a la nube de Oort, los núcleos podían contener material original del Sistema Solar. Su pequeña masa (como indicaba el hecho que los gases liberados pudiesen modificar su trayectoria en el cielo), su fragilidad (como indicaban las fracturas observadas) y su vida muy alejados del Sol, preservarían ese material prácticamente sin alterarlo ni térmica ni geológicamente, al menos en la parte más interna del núcleo.

En las últimas décadas, la ciencia cometaria ha progresado fundamentalmente gracias al desarrollo tecnológico. El radar, los radiotelescopios, la instrumentación espacial y, sobre todo, la exploración *in situ* mediante sondas espaciales, nos ha permitido estudiar nuevos aspectos sobre la composición, comportamiento y evolución de los cometas.

En los años 70, mediante la utilización de los observatorios espaciales de la NASA llamados OAO-2 y OGO-5, se pudo estimar de manera precisa que en la coma de los

cometas Tago-Sato-Kosaka, Encke y Bennett, había casi igual cantidad de hidrógeno que de OH. Esos dos compuestos se obtienen cuando una molécula de agua se rompe por acción de la luz (fotodisociación) y por tanto todo parecía indicar que el agua era el principal constituyente de los cometas. Estos observatorios espaciales permitieron detectar también la presencia de otros compuestos cuya existencia se sospechaba, como el monóxido de carbono, el cual estaba presente en una cantidad mucho menor que la del OH.

La confirmación definitiva de que el agua es el principal constituyente de los cometas no se obtuvo hasta la reciente visita del cometa Halley en 1985. El observatorio espacial KAO, que orbitaba a una altura de 12 km, permitió detectar por primera vez la presencia directa de la molécula de agua. Las medidas realizadas confirmaban, inequívocamente, que el agua era el componente volátil mayoritario del cometa Halley. Desde entonces, la observación de diferentes cometas nos ha permitido saber que el hielo de agua constituye, aproximadamente, el 85 % del material volátil de los cometas. El monóxido de carbono es el segundo componente mayoritario, presente en cantidades que varían entre un 2 % y un 10 % la cantidad de agua.

Exploración in situ del cometa Halley.

En lo que constituyó un programa de exploración espacial sin precedentes, el cometa Halley fue estudiado *in situ* entre el 6 y el 14 de Marzo de 1986 por 5 sondas espaciales. Estas sondas fueron Giotto, de la Agencia Espacial Europea (ESA), las japonesas Suisei y Sakigake, las soviéticas Vega 1 y Vega 2 y la sonda ICE de la NASA. Aún así no se puede decir que ésta fuera la primera exploración *in situ* de un cometa. La NASA, que previamente había desechado por cuestiones presupuestarias la exploración *in situ* de un cometa, redirigió el satélite ISEE-3, en órbita terrestre y destinado a la exploración del medio interplanetario, a la observación del cometa Halley. Esta sonda, renombrada como *International Cometary Explorer* (ICE), en su viaje hacia el Halley, pasó cerca del cometa Giacobini-Zinner y pudo estudiar su interacción con el viento solar. Por tanto, estrictamente y como consecuencia de una decisión tomada poco antes de la aparición del Halley, el cometa Giacobini-Zinner es el primer cometa observado *in situ*. El principal resultado de esta misión fue la confirmación de las predicciones de los modelos de la cola de iones sobre su estructura y composición.

De las 5 sondas espaciales, las dos japonesas y el ICE estaban especialmente diseñadas para estudiar la interacción del viento solar con la coma y las medidas tomadas por sus instrumentos confirmaron las predicciones generales de los modelos teóricos. Las otras 3 sondas, Giotto y las Vega 1 y 2, estaban equipadas con una instrumentación más completa, incluyendo cámaras para fotografiar el núcleo y la coma.

La observación *in situ* nos proporcionó la confirmación de que el modelo de núcleo cometario de Whipple era, en términos generales, correcto. Las imágenes tomadas por las cámaras de las Vega y la Cámara Multicolor de Giotto mostraron la presencia del núcleo como un cuerpo sólido, monolítico, voluminoso e irregular con grandes cráteres, depresiones y montañas con altura de varios cientos de metros. El tamaño era aproximadamente el de un elipsoide de 16 km de largo por 8 de ancho y su superficie era muy rugosa y oscura, reflejando menos luz que el más oscuro de los materiales terrestres conocidos. Las imágenes mostraban que el polvo procedía de la región iluminada por el Sol advirtiéndose la presencia de fuertes estructuras con forma de chorros. Sin embargo, otros instrumentos que midieron la distribución de polvo alrededor del núcleo mostraron que la densidad de partículas era más o menos uniforme, con ligeras condensaciones que correspondían a los chorros.

Otras de las sorpresas que revelaron los instrumentos de las sondas fue la existencia de una alta densidad de partículas de polvo con un tamaño muy pequeño, con un radio que mide en torno a la cien millonésima parte de un metro. Dado su tamaño, estas partículas no pueden ser detectadas mediante observaciones desde la tierra, indicando que la cantidad de polvo presente en el núcleo era mayor de lo que se pensaba.

Con respecto al gas, las imágenes no podían mostrar su presencia debido a que los tiempos de exposición debían ser necesariamente muy cortos. Por ello no se pudo saber exactamente desde dónde era emitido el gas, es decir si era emitido desde toda la superficie o sólo de algunas zonas discretas. Utilizando modelos teóricos muy simples, se estimó que sólo entre el 10 y el 20 % de la superficie debía emitir gas, mientras que el resto de la superficie debía ser inerte, sin emisión de gas. Se estimó también que la temperatura, al menos de una región de la superficie en el momento del encuentro era, aproximadamente, de unos 100 °C, mucho mayor de la temperatura que debería tener el hielo de agua, unos -173 °C. Teniendo en cuenta los resultados de los modelos teóricos, la medida de la temperatura y la presencia de chorros de polvo en la coma, se aceptó que el núcleo no era homogéneo: debía tener regiones activas de las que escapaba el gas y que debían estar aproximadamente a -173 °C y regiones inactivas, formadas por un manto de polvo con temperaturas superiores a los 100 °C. Desde el año 1985 y la visita del Halley, esa es la descripción de la superficie de los cometas más aceptada, sin embargo existen ciertas dudas con respecto a que sea correcta. Desde entonces, los modelos teóricos han evolucionado considerablemente para estudiar efectos hasta entonces no considerados y que pueden tener una fuerte influencia en la interpretación de los resultados. El modelo utilizado para interpretar las observaciones del Halley se basa esencialmente en que el gas se debe producir exactamente sobre la superficie. Los modelos actuales consideran que el gas puede proceder también desde el interior del núcleo y algunos incluyen fenómenos tan exóticos como el “efecto invernadero de estado sólido”. Según este efecto, la radiación solar que calienta el núcleo es absorbida en una capa con un determinado espesor, no en una superficie infinitamente delgada como antes se suponía. Estas, aparentemente, pequeñas diferencias tienen fuertes implicaciones. Por ejemplo, un núcleo con efecto invernadero produciría dos veces menos gas que un núcleo sin efecto invernadero, por lo que la superficie “activa” necesaria para explicar la actividad del cometa Halley sería entre el 20% y el 40% de su superficie total. Mas importante aún, si se supone que el gas procede desde el interior y no desde la misma superficie, el núcleo del cometa Halley debería ser activo prácticamente en su totalidad. Basándose en este resultado, algunos científicos han propuesto que los chorros presentes en las imágenes del Halley no se deben a que el gas y el polvo se emiten desde zonas aisladas de la superficie sino a efectos debidos a la topografía del núcleo.

Otras observaciones modernas.

Recientemente, mediante la utilización de cámaras de imagen CCD y telescopios de gran diámetro, así como el telescopio espacial Hubble, se han podido estudiar cometas cuando se encuentran a grandes distancias del Sol, donde la energía solar que llega no es suficiente para producir la sublimación de los hielos. Esto nos ha permitido observar directamente los núcleos de varios cometas, ocultos tras la coma cuando están cerca del Sol, y estimar sus tamaños aproximados. Estos varían desde los 600 metros de radio del cometa Wirtanen hasta los 10 km del cometa Neujmin 1 o los, aproximadamente, 40 km del cometa Hale-Bopp.

Con respecto a la composición, la mejora de la instrumentación científica y, en especial, la utilización de los radiotelescopios ha permitido detectar la presencia de más de 60 compuestos diferentes en las comas y colas de diferentes cometas. Las visitas de los cometas espectaculares Hyakutake, en 1996, y Hale-Bopp, un año más tarde, permitieron casi triplicar el número de compuestos detectados en cometas. En particular se detectó la presencia de una gran número de compuestos orgánicos, aunque en una cantidad inferior al 1% la del agua, como el ácido fórmico, el metanol y el formato metílico, que es, hasta la fecha, la molécula orgánica detectada más grande. Sin embargo y aunque los avances en la detección e identificación de compuestos presentes en los cometas han sido enormes durante los últimos años, aun quedan muchas incógnitas por resolver a este respecto. Actualmente, es necesario realizar un enorme trabajo de laboratorio y el correspondiente esfuerzo teórico para poder identificar todas los compuestos minoritarios presentes en los cometas, sospechándose que, cómo mínimo, hay entre 100 y 200. Algunos de estos compuestos pueden contener claves comprender cómo se formaron los cometas. Por ejemplo, todavía no se ha detectado el nitrógeno, cuya presencia es necesaria para explicar la, al menos aparente, detección de nitrógeno ionizado en las colas. La detección de nitrógeno, al ser un componente que se evapora muy fácilmente, nos indicaría a qué temperatura máxima se formaron los núcleos cometarios. Por otro lado, todavía no está claro cual es el origen de muchas de las especies detectadas, es decir si se encuentran directamente en el núcleo o si, por el contrario, son el producto de reacciones químicas.