

MODELOS COMETARIOS

Cuando la casualidad histórica reunió a mentes preclaras en una misma época, haciendo coincidir parte de sus vidas, pudo establecerse sin lugar a más interpretaciones fantasiosas que realmente eran astros con una órbita definida y predecible en el tiempo. Johannes Kepler, Isaac Newton y Edmond Halley hicieron pues posible un avance sin retorno hacia la comprensión de aquellos astros esporádicos que atemorizaron a la humanidad.

El primero de estos hombres estableció las leyes de la mecánica celeste, el segundo las leyes de la gravitación universal y el último fijó por primera vez la fecha de retorno de uno de estos astros.

Otra cosa bien diferente era el conocimiento acerca de su composición y estructura que se reducía a adivinanzas y teorías sin posibilidad de confirmación hasta que la técnica no desarrolló los instrumentos adecuados para su identificación. A finales del siglo XIX los espectroscopios habían alcanzado edad suficiente para saber rasgos de la composición química y era sabido que el agua era un componente primordial en las diferentes capas.

Se definieron con más claridad las partes de un cometa y se hicieron diferenciaciones entre la cola, la coma y el núcleo o parte más profunda y que es realmente el astro generador de las otras estructuras.



Siendo el agua un componente abundante, los astros con cabellera deberían tener hielos en su interior pues proceden de lugares lejanos entre los planetas donde las temperaturas son extraordinariamente bajas en comparación con las que cotidianamente nos relacionamos y hemos establecido como patrón de medida.

El modelo del "montón de grava"

El modelo más aceptado al inicio del siglo XX suponía que los cometas estaban constituidos por un aglomerado de partículas de material meteorítico, de naturaleza extremadamente porosa, con una cantidad notable de moléculas de gas que, liberadas por la acción del Sol, originaban la coma. Tal modelo, denominado del "montón de grava", se dedujo a partir del análisis de la coma y del material meteorítico, cuya procedencia se asociaba hacía tiempo a restos de cometas. El problema de la estabilidad gravitacional, considerado crucial para la supervivencia del cometa a la acción del Sol, fue resuelto en 1902 por O. Callandreau. Este investigador demostró que para un aglomerado de 10 kilómetros de radio y 10^{17} g de masa la estabilidad gravitacional estaba garantizada.

Del modelo del montón de grava se pueden hacer las siguientes consideraciones (Tempesti, 1985):

El número de moléculas de C_2 de la coma se puede estimar en 10^{35} - 10^{37} , indicación derivada del estudio de los espectrogramas. La vida media de la coma es inferior a un día, lo que implica que se renueva completamente de forma cotidiana.

Análisis de laboratorio indican que el material meteorítico es capaz de absorber, por término medio, 10^{19} moléculas de gas por gramo. Esto lleva a suponer, considerando un núcleo de 10^{18} g, la presencia de un total de 10^{37} moléculas absorbidas.

En este punto las cuentas no salen. Asumiendo que el número total de moléculas de la coma es 10 veces el de C_2 , resulta obvio que una coma cometaria producida según el modelo del montón de grava sólo podría ser alimentada durante un día.

El modelo de Whipple

En 1950 el astrónomo Fred L. Whipple puso en discusión este modelo y propuso uno nuevo, el de la "bola de nieve sucia", que descartaba el concepto de núcleo cometario como agregado de materiales meteoríticos agrupados por la gravedad. Whipple introdujo en su lugar un núcleo compacto, compuesto por hielo y materiales no volátiles. En este modelo, 1 gramo de hielo puede producir entre 10^{22} y 10^{23} moléculas, lo que implica una disponibilidad teórica de 10^{40} - 10^{41} moléculas. Por lo tanto, respecto al modelo anterior, es posible una actividad cometaria de 103 a 104 veces más larga.

Al delinear las características de su modelo, Whipple inició el análisis de las temperaturas de fusión y ebullición de las moléculas responsables de la formación de la coma (CH_4 , CO_2 , NH_3 , C_2N_2 y H_2O). Cuando el núcleo se aproxima al perihelio, el aumento de irradiación solar hace aumentar a su vez la temperatura superficial de la zona expuesta al Sol. De este modo, provoca la evaporación del hielo y su dispersión en el espacio circundante. Además, el material meteorítico con dimensiones por debajo de cierto límite es expulsado a causa de la baja atracción gravitatoria del núcleo, dando origen a la formación de la cola de polvo. Se puede verificar también que cualquier partícula más grande o de mayor densidad puede desaparecer por choque térmico, pero normalmente permanecerán en la superficie. Se produce así un estrato aislante responsable de la reducción de pérdida de gas del núcleo en los pasos sucesivos del cometa.

Si toda la radiación solar fuese absorbida por un objeto esférico situado a 1 U.A. (Unidad Astronómica) del Sol, el objeto perdería en un año, por evaporación de su superficie, una capa de hielo de alrededor de 4 metros (Whipple, 1950). Hay que tener presente, sin embargo, que si el material meteorítico fuese una agregación de grano grueso y débilmente cementado, la conducción calorífica sería bajísima a causa de la reducida superficie de contacto entre las partículas. Esto implicaría una reducción del coeficiente de transmisión del calor en un factor de 104 respecto al de un cuerpo sólido compacto, volviendo poco eficaz a esta forma de transmisión del calor. El mecanismo más eficiente para la transferencia del calor solar desde la superficie del núcleo a su interior parece ser la emisión de radiación a baja temperatura.

De esta forma, la parte más interna del núcleo cometario siempre estará extremadamente fría, no sólo por la baja conductividad térmica ya mencionada, sino también porque el calor disponible ha estado implicado en la evaporación. Se trata de un mecanismo muy eficaz de refrigeración en el vacío.

Además de la producción y el mantenimiento de la coma en el curso de un paso por el perihelio veremos otros tres hechos cruciales por los cuales el modelo precedente (del "montón de grava") era inadecuado: La presencia de los cometas usualmente denominados "sungrazers" o rasantes. Se aproximan muchísimo al Sol pero no se desintegran por completo. El calor extremadamente elevado debería sublimar todo el gas absorbido y gran parte de su material meteorítico. Por otra parte, las fuerzas de marea disgregarían fácilmente los pequeños cuerpos que componen el núcleo.

La presencia de cometas periódicos. La estructura de montón de grava no puede absorber nuevos materiales para reemplazar los expulsados durante el paso anterior, dada la bajísima disponibilidad que ofrece el espacio interplanetario. Por lo tanto, sería imposible para un cometa presentarse varias veces a su cita con el contenido necesario de sustancias volátiles.

El movimiento no gravitacional de los cometas. El modelo que se creía válido antes de Whipple no explica cómo algunos cometas anticipan su retorno al perihelio y otros, al contrario, lo retrasan. El Encke, por ejemplo, anticipa su retorno, por término medio, unas 2 horas y media, teniendo en cuenta todas las perturbaciones gravitacionales. El Halley, en tanto, se retrasa alrededor de 4 días.

El modelo propuesto por Whipple superaba brillantemente todos estos obstáculos:

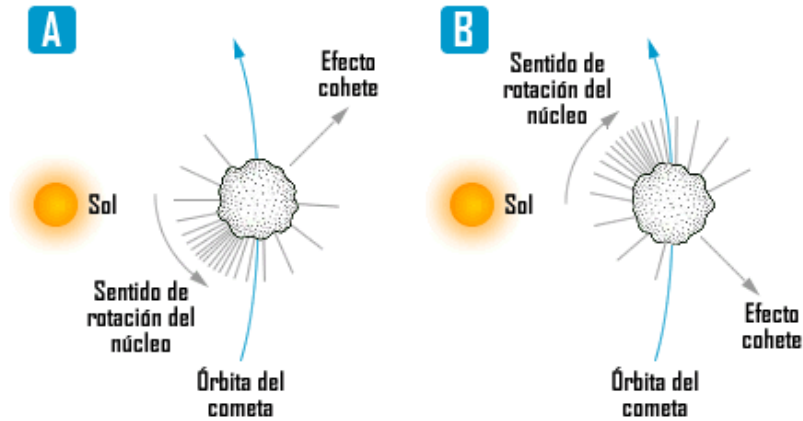
Un cuerpo compacto, con las dimensiones de un núcleo cometario, tiene éxito al pasar por la vecindad del Sol sin volatilizarse del todo, ya que solamente consume una fina capa exterior. Es posible que se puedan producir fracturas del núcleo, como en el Ikeya-Seki, pero no la completa dispersión.

Si el núcleo está compuesto principalmente por hielo, no hay necesidad de reemplazar en órbita el material sublimado que ha dado origen a la coma. La masa estimada del núcleo cometario puede, de hecho, dar sobrada cuenta de los numerosos pasos de los cometas periódicos.

La causa del movimiento no gravitatorio de los cometas puede identificarse con una fuerza de reacción a la expulsión de gas del núcleo. Fue propuesta por Bessel en la primera mitad del siglo XIX y se contrapone a la hipótesis de la existencia de un medio interplanetario resistente. En el modelo del montón de grava, el cálculo no tenía en cuenta que el gas liberado podía tener intensidad suficiente. En el modelo de Whipple, por el contrario, la velocidad térmica de expulsión de las moléculas del núcleo, como consecuencia de la sublimación del hielo (con valores de decenas de m/s), pueden justificar un efecto cohete. En el Halley, la sonda Giotto encontró verdaderos chorros de gas y polvo saliendo a través de fisuras en la corteza superficial del núcleo, en el lado

opuesto al Sol. El anticipo o retardo del regreso al perihelio de un cometa se puede explicar recurriendo a este efecto cohete y a la presencia de un movimiento de rotación en el núcleo.

Figura 1: Rotación del núcleo de un cometa

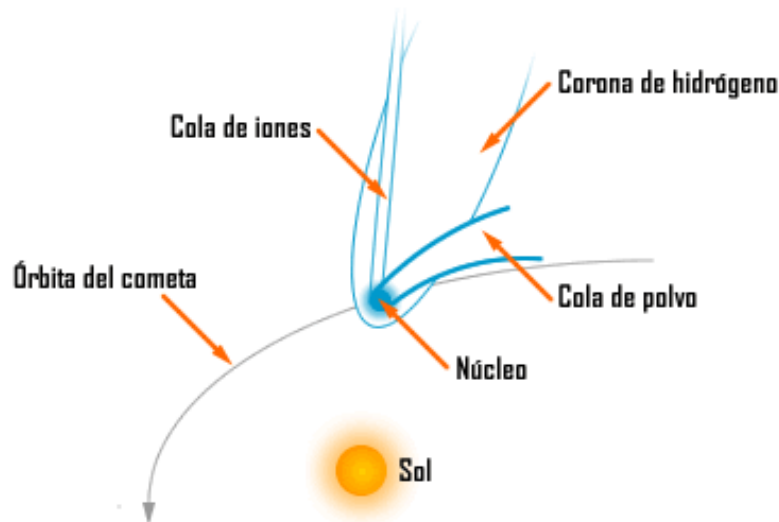


PIERO TEMPESTI, "GIORNALE DI ASTRONOMIA" VOL. 11, N.2, PAG. 145; 1985

En la figura 1, si la rotación del núcleo es acorde con el movimiento de revolución (opción "A"), la reacción de los chorros de material eyectado empujará al cometa en el mismo sentido de traslación de su órbita, alargándola y haciendo que aumente el período entre los sucesivos pasajes por el perihelio. En cambio, si el núcleo rota en dirección opuesta a su movimiento orbital en torno al Sol (opción "B"), el efecto cohete causará una fuerza desaceleradora que empujará al cometa hacia el interior en dirección al Sol, con la consiguiente disminución del período entre los sucesivos pasajes por el perihelio.

En resumen, un cometa está compuesto por un núcleo aglomerado de hielo y polvo, cuya estructura interna nos es desconocida, y que orbita en torno al Sol. El aumento de la temperatura al aproximarse al perihelio provoca la evaporación del hielo, con la consiguiente expulsión de materiales volátiles y polvo que forman la coma. La interacción de esta estructura con el campo magnético interplanetario y con el viento solar origina una estela visible, denominada cola, que siempre apunta en la dirección opuesta al Sol (véase la figura 2).

Figura 2: Un cometa cerca del perihelio



CALVIN HAMILTON, "VIEWS OF THE SOLAR SYSTEM"; 1996

Resulta interesante, antes de pasar a analizar detalladamente la morfología de los cometas, revisar una tabla que muestra la abundancia relativa de las sustancias gaseosas volátiles (hielos) y no volátiles (a la temperatura terrestre ordinaria) de los cuerpos de nuestro sistema solar (Tempesti, 1985). Verificaremos de este modo la consistencia de la teoría que identifica la zona entre Urano y Neptuno como la región principal de formación de los cuerpos cometarios:

Cuerpos celestes	Gases	Volátiles	No volátiles
Sol	0,99	0,015	0,0025
Planetas terrestres	Trazas	Trazas	1,0
Júpiter	0,9	0,1	Trazas
Urano/Neptuno	Trazas	0,85	0,15
Cometas	Trazas	0,90	0,10

Una segunda tabla, según los datos obtenidos por varias sondas durante la última visita del cometa Halley (L'Astronomia, 1990), permite una ulterior confrontación entre el material cometario y los valores típicos del sistema solar, analizando la abundancia relativa de isótopos de algunos elementos. Tal confrontación permite expresar dos consideraciones:

La concordancia sustancial de los parámetros del Halley con los que se refieren al sistema solar para el carbono, nitrógeno y azufre no puede más que confirmar el origen solar del material cometario.

La discordancia en el caso de la relación deuterio/hidrógeno puede interpretarse en términos evolutivos, ya que la intensa fotodisociación del agua produce la liberación de enormes cantidades de hidrógeno y este fenómeno afecta preferentemente al hidrógeno normal, más ligero que el deuterio (Guaita, 1990).

Relación	Halley	Sistema solar
D / H	5×10^{-4}	10^{-5}
$^{12}\text{C} / ^{13}\text{C}$	80 +/- 20	89
$^{14}\text{N} / ^{15}\text{N}$	250 +/- 100	270
$^{34}\text{S} / ^{32}\text{S}$	0,045 +/- 0,01	0,044

El núcleo

Lo que más dificulta el análisis de un núcleo cometario es la imposibilidad de su observación directa. Cuando la distancia a nosotros es favorable para una observación sencilla, en realidad el núcleo está completamente escondido en la coma generada por su acercamiento al Sol. Cuando, por el contrario, la coma está ausente, el núcleo se halla ya a una distancia tal de nuestro planeta que no puede ser observado debido a sus dimensiones reducidas.

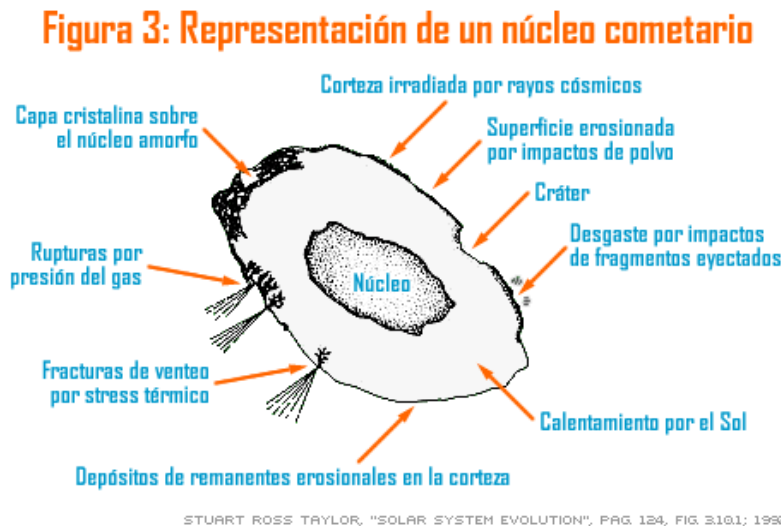
Las dimensiones actualmente estimadas para los núcleos cometarios van desde algunos cientos de metros a algunas decenas de kilómetros. El análisis completo del núcleo del cometa Halley por la sonda Giotto en marzo de 1986 hizo posible la determinación de sus medidas en $15 \times 7,2 \times 7,2$ kilómetros, evidenciando también una forma altamente irregular. La localización del máximo de actividad del núcleo del Halley (encontrado por las sondas Vega 1, Vega 2 y Giotto), justo en los extremos del elipsoide resultante de excluir la forma irregular del núcleo, puede depender de un mecanismo de sublimación preferencial en ciertas zonas. Es, por lo tanto, preferible pensar que el cometa ha nacido con forma irregular como un aglomerado de fragmentos (Keller y Thomas, 1989).

En el modelo más recientemente propuesto para los núcleos cometarios no se prevé una estructura compacta como la sugerida por Whipple, sino un agregado de fragmentos, con el hielo actuando como cemento (Mc Sween y Weissman, 1989). Tal descripción está en línea con la hipótesis de la estructura de algunos asteroides y puede explicar el origen de los fenómenos meteoríticos mediante la dispersión de material cometario en el espacio. Inevitablemente, sin embargo, tenemos que convenir con Taylor (1992) que, en nuestro estado actual de conocimientos, la estructura interna de los núcleos cometarios es todavía un misterio. Las mejores perspectivas para develarlo están relacionadas con el éxito de la sonda espacial europea Rosetta, que en el 2014 intentará analizar in situ el núcleo del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.

De gran importancia para la determinación de los parámetros físicos de los cometas ha sido, también en este caso, la contribución de las sondas, y en especial de la Giotto. Ésta ha permitido medir las emisiones del núcleo del Halley, cuantificando la de gas en 2×10^7 g/s y la de polvo en $0,3 - 1,0 \times 10^7$ g/s. De estos datos se deduce

que cada paso por la proximidad del Sol supone la pérdida de alrededor de 10^{14} g. Dado que la estimación de la masa total sugiere un valor de 10^{17} g, podemos aceptar con gran probabilidad sus numerosos pasos (una treintena) minuciosamente registrados en las crónicas históricas. Otro dato extremadamente significativo procurado por las observaciones en la vecindad del núcleo del cometa Halley es su color oscuro: de hecho, refleja sólo un 4% de la luz solar incidente.

Continuando con el análisis de los núcleos cometarios, la figura 3 esquematiza su estructura de un modo muy significativo y fue confirmada mediante las imágenes del Halley enviadas a la Tierra por la sonda Giotto.



Se pueden notar los diferentes procesos que han modificado la morfología inicial del cometa: los más importantes, desde el punto de vista observacional, son las fracturas que dejan salir el gas y el polvo destinados a alimentar las estructuras de la coma y de la cola.

Una última información importante obtenida en la aproximación de la Giotto al Halley (la sonda pasó a unos 600 kilómetros del núcleo del cometa) fue la localización de las zonas de sublimación del gas. Éstas aparecen bien delimitadas localmente, y corresponden a una superficie activa evaluable en torno al 10% de la superficie total del núcleo.

Las modestas dimensiones calculadas para los núcleos cometarios han sido confirmadas también mediante observaciones de radar. En el caso de las campañas de la NASA y el JPL efectuadas sobre el cometa Hyakutake, se ha registrado un núcleo de sólo 1 a 3 kilómetros de diámetro. Se concluye, dada la intensa actividad manifestada, que la superficie activa del núcleo es notablemente superior al 10% observado para el Halley (Cremonese, 1996).

Diferente, sin embargo, es el caso del Hale-Bopp, para el cual, suponiendo una fracción del 10 al 20% de la superficie como activa, se estima un núcleo de 30 a 40 kilómetros de diámetro. Esta medida ha sido confirmada por el análisis de la radiación térmica emitida por el núcleo, por las imágenes infrarrojas tomadas por el satélite europeo ISO, y a través del análisis del perfil de luminosidad de la coma, de donde se deduce la cantidad de la luz reflejada por el núcleo, y de allí sus dimensiones.

Ya se ha señalado el hecho de que en una revolución se consumiría la reserva interna de hielo a no ser por la imposibilidad de salir del material por la presencia de una corteza protectora. En caso contrario, el aspecto del núcleo no sería muy distinto al de un asteroide, y la discriminación entre objetos pertenecientes a ambas clases sería prácticamente imposible (Wetherill y Shoemaker, 1982).

Un último aspecto a subrayar respecto del núcleo de un cometa, es el análisis de su rotación. En la descripción del modelo de Whipple se evidencia que la rotación del núcleo, asociada al efecto cohete, es fundamental para interpretar los movimientos considerados no gravitacionales (anticipo y retraso del retorno al perihelio) del cometa.

La hipótesis de la rotación del núcleo se basaba inicialmente sólo en argumentos de tipo estadístico (no se conoce ningún cuerpo celeste que no esté dotado de rotación), pero al refinarse las técnicas fotométricas se pudo confirmar los datos teóricos. Quedan algunas dudas al cuantificar con precisión el período de rotación, pero esto depende de las dificultades observacionales que se derivan de la pequeñez del núcleo, de su forma a menudo

irregular y de la posible impredecibilidad del mecanismo de emisión del gas y polvo que sigue a una variación de la reactividad al calor solar. Para el Halley, por ejemplo, hay indicaciones contradictorias entre la periodicidad de 53 horas sugerida por las observaciones de la raya Lyman- α del hidrógeno (confirmadas en las imágenes ópticas tomadas por la sonda Giotto) y la periodicidad de 7,4 días que se deduce de medidas fotométricas en la banda del C₂, del CN y del OH.

El Hyakutake, por el contrario, ha mostrado una rotación más rápida, con un periodo estimado de 6-8 horas. Esta elevada velocidad de rotación, sumada a las pequeñas dimensiones del núcleo y a la intensa actividad interpretada como consecuencia de una superficie joven y no recubierta todavía de ninguna corteza protectora, sugiere la hipótesis de que este cometa sea un fragmento separado recientemente (¡siempre en relación a las escalas de tiempo cósmico!) de un cuerpo cometario mucho más grande (Crippa et al., 1996).

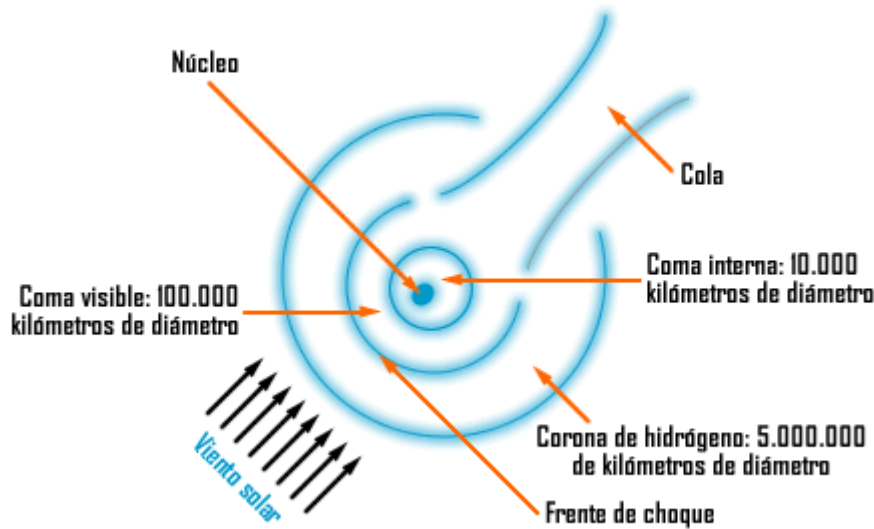
La coma

La coma es el elemento morfológico que da nombre a los cometas. El primer aspecto a destacar de la coma es su enorme extensión con respecto al núcleo. Por la imposibilidad de efectuar una medida unívoca, se puede asumir, en el momento de máximo desarrollo, unas dimensiones típicas de entre 30 mil y 100 mil kilómetros.

La coma está constituida por gas expulsado por el núcleo. Las variaciones en sus dimensiones, durante la aproximación al Sol, depende de dos mecanismos que se oponen entre si: por un lado, la subida de las temperaturas que, aumentando la producción de gas, tiende a extenderla; por otro lado, la mayor presión de la radiación solar, que tiende a reducirla.

La coma de un cometa está formada por tres capas concéntricas: procediendo desde el núcleo hacia el exterior encontramos una primera capa reducida llamada coma interna o molecular, a continuación la coma intermedia o de radicales y finalmente una capa enorme llamada corona de hidrógeno.

Figura 4: Estructura de un cometa



PIERO TEMPESTI, "GIORNALE DI ASTRONOMIA" VOL. 11, N.2, PAG. 145; 1985

La estructura y las dimensiones típicas de una coma se esquematizan en la figura 4. Debe notarse, sin embargo, que los valores mostrados son extremadamente variables de un cometa a otro, como se puede ver también en la siguiente tabla:

Nombre del cometa	Coma visible	Corona de hidrógeno
Tago-Sato-Kosaka (1969 IX)	500.000 Km.	15.000.000 Km.
Bennett (1970 II)	900.000 Km.	2.000.000 Km.
Encke	400.000 Km.	1.000.000 Km.

La formación de la coma es el elemento que permite localizar al cometa en observaciones visuales cuando se halla por término medio a unas 3 UA del Sol. Es la observación de la nebulosidad de la coma lo que busca el rastreador de cometas.

Hablando de la localización visual de los cometas, es oportuno hacer una breve consideración sobre la luminosidad de estos cuerpos celestes. Si el núcleo fuese un objeto inactivo bajo la luz solar, su magnitud dependería de la distancia al Sol (r) y de la distancia al observador (Δ) según una proporción cuadrática, sugiriendo una relación del tipo:

$$m = m_0 + 5\log(\Delta) + 5\log(r)$$

Pero el núcleo es fuertemente reactivo a la radiación solar y por lo tanto la relación debe ser sustituida por:

$$m = m_0 + 5\log(\Delta) + 2,5n \log(r)$$

En la cual la dependencia es del tipo r^n .

En la mayor parte de los casos los valores de n están comprendidos entre 2,5 y 11,5. Por lo tanto, n resulta muy variable de un cometa a otro y, a menudo, también para un mismo cometa. A este propósito bastará recordar la gran desilusión asociada al cometa Kohoutek (1973 XII). El valor estimado inicialmente (4,0) lo habría llevado a la magnitud aparente -3, pero el parámetro n , por el contrario, bajó al valor 2,0. Por lo tanto, el cometa, en el momento de máxima luminosidad, solamente llegó a la cuarta magnitud.

Gracias a las primeras observaciones espectroscópicas (realizadas por G. Donati y W. Huggins en 1864) se descubrió que la coma de los cometas está constituida por compuestos de C, H, O y N.

En la coma de un cometa que se acerca mucho al Sol se ven otras rayas importantes de emisión de metales en estado atómico, como Na, K, Mn, Cu, Fe, Co y Ni. Estos metales provienen de la vaporización del material meteorítico del núcleo. La doble raya amarilla del Na fue encontrada por primera vez analizando el cometa 1882 II en la proximidad de su perihelio, a solamente 0,06 UA del Sol. El análisis detallado de las sustancias encontradas en la coma sugirió que las moléculas observadas no eran más que emanaciones del núcleo. Esto implica que las moléculas expulsadas del núcleo deberán ser más complejas (provienen de otras moléculas madre). Estas moléculas madre constituyen la coma interna, estructura no directamente accesible a la observación, que originan, por disociación provocada por la radiación solar, las consiguientes moléculas hijas (que a su vez constituyen la capa intermedia o coma visible).

Las moléculas hijas son principalmente el radical OH, el carbono bimolecular (C_2) que origina la banda de Swan, el cianógeno (CN) y el óxido de carbono ionizado (CO^+).

La abundancia espectroscópica del oxidrilo (OH^+) y el hecho de que se viene encontrando un aumento de luminosidad de la coma a distancias inferiores a 3 UA (distancia a la que se llega a una temperatura que permite la evaporación del hielo de agua) induce a concluir que es el propio hielo de agua el que predomina entre los hielos cometarios. Lo sugiere también la presencia del hidrógeno.

La confirmación llegó en 1970 cuando el satélite QAO 2 encontró en torno a la coma del cometa Tago-Sato-Kosoka (1969 IX) una capa enorme de hidrógeno, inobservable desde la Tierra, mediante observaciones en longitudes de onda ultravioleta. Del análisis de los datos, encontrados también gracias al satélite, se puede deducir que el agua constituye alrededor del 80% de las moléculas que emanan del núcleo. Además del agua, entre las moléculas madre hay en cantidad mucho menor de anhídrido carbónico (CO_2), ácido isocianhídrico (HNC), amoníaco (NH_3), cianuro de metilo (CH_3CN) y metano (CH_4).

El estudio de la abundancia relativa del ácido isocianhídrico (HNC) respecto al ácido cianhídrico (HCN) observada en el cometa Hyakutake han llevado a W. M. Irvine y colaboradores (1996) a constatar que tal relación es muy similar a la observada en las nubes moleculares interestelares. Se comprueba además que es distinta de la relación de equilibrio que se encuentra en la zona más externa de la nebulosa solar, donde se piensa que se formaron los cometas. Este hecho, del cual se han propuesto varias explicaciones, no hace más que confirmar que todavía hay muchos puntos oscuros en la comprensión plena de estos cuerpos celestes.

De observaciones de radio del Hyakutake también emerge la presencia de abundantes emisiones ($2,2 \times 10^{26}$ moléculas/s) de etano (C_2H_6) con el pico en la región nuclear, hallazgo que induce a considerar el etano como molécula-madre y no como producto de disociación (Cremonese, 1996).

Causó cierta perplejidad el descubrimiento de emisiones de rayos X de baja energía en el cometa Hyakutake,

realizado el 27 de marzo de 1996 por el satélite alemán ROSAT (IAUC 6373). Desde entonces ese fenómeno ha sido observado en otros ocho o nueve cometas, y ya están en estado avanzado algunas hipótesis que explicarán las emisiones.

Una primera hipótesis prevé un mecanismo de captura de rayos X de origen solar por parte de la nube molecular de agua y la sucesiva reemisión en un proceso de fluorescencia. Una segunda hipótesis explica el fenómeno recurriendo al mecanismo de reflexión de rayos X de origen solar por obra de los granos submicroscópicos del polvo expulsado del núcleo (Caprara, 1996; Cremonese, 1996).

Sugerida por los investigadores de la Universidad de Michigan, la hipótesis que se piensa más plausible es que el fenómeno es debido a la violenta interacción entre los átomos y las moléculas de la coma con el viento solar. Esto llevaría a la captura de electrones, cuya sucesiva caída a niveles energéticos inferiores tendría como resultado la emisión energética en la región de rayos X del espectro.

Las colas

Siendo tradicionalmente lo más característico de un cometa (y lo más espectacular), la cola no siempre acompaña las apariciones de estos cuerpos celestes. En otras ocasiones, las colas alcanzan proporciones considerables, como en el caso del Ikeya-Seki (1965 VIII) cuya cola llegó a tener la excepcional longitud de casi 1 UA. Que la cola estuviese de alguna manera ligada a la emisión de material del núcleo empujado por la fuerza general repulsiva del Sol se había supuesto desde el inicio del siglo XIX (Olbers y Bessel). La teoría estaba también soportada por el dato observacional que sugería siempre una orientación en la dirección opuesta al Sol. Ya a finales de 1800, Svante Arrhenius identificaba esta fuerza con la presión ejercida por la radiación electromagnética.

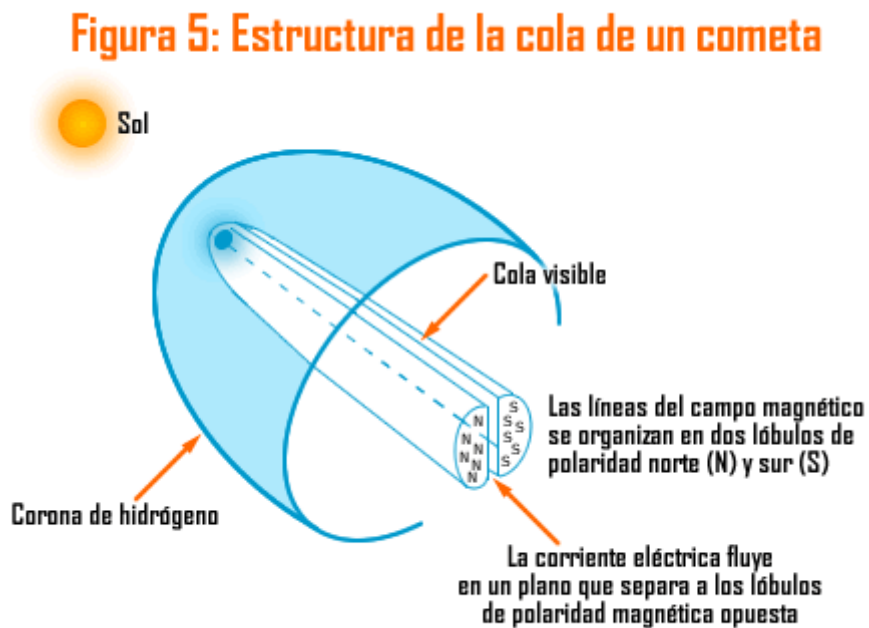
El análisis espectroscópico de la cola cometaria muestra la presencia de dos componentes distintos, coexistiendo, de hecho, uno con espectro continuo de tipo solar con otro de espectro de bandas luminosas. La interpretación que se deriva es que el continuo es debido a la reflexión de la luz solar por obra del polvo (expulsado del núcleo como el gas), mientras que el de emisión es causado por el gas excitado por la radiación solar. Esta doble naturaleza se vuelve evidente en algunos casos en el cual se ha podido notar una verdadera bifurcación de la cola cometaria, como en el caso del cometa Mrkos (1957 V).

Además del análisis espectroscópico, también la observación visual permite identificar la tipología de la cola. En el caso de la cola de polvo se puede notar una estructura de arco, mientras que la cola de plasma está caracterizada por una estructura rectilínea dispuesta a lo largo de la dirección Sol-cometa. La forma típica arqueada de la cola de polvo se explica gracias a la acción de tres componentes: la velocidad del cometa en su movimiento orbital, la fuerza gravitatoria (atractiva) que se ejerce sobre los granos de polvo y la presión de la radiación solar (repulsiva). La relación entre las dos últimas debe permanecer prácticamente constante, a iguales dimensiones de las partículas y a cualquier distancia del Sol porque ambas varían con el inverso del cuadrado de la distancia. No es constante, en cambio, la velocidad del cometa en su órbita, para la cual vale la tercera ley de Kepler, que prevé un aumento progresivo de la velocidad en su aproximación al perihelio. Esto tiene esencialmente dos consecuencias para la cola de un cometa en su aproximación al Sol: la primera es un aumento de sus dimensiones y, en segundo lugar, una mayor evidencia de la curvatura de la cola de polvo. A partir de la mitad del siglo XX se ha intentado aplicar el mismo mecanismo para la cola de plasma. Sin embargo, en comparación con la radiación, las moléculas no tienen el comportamiento puramente mecánico del polvo, sino que sufren procesos de absorción y reemisión de la radiación, que solamente el desarrollo de la mecánica cuántica ha podido definir.

La solución del problema, juzgada válida hasta hoy, fue formulada en los años 1950 por L.F. Biermann, quien identificó al viento solar (fundamentalmente compuesto por protones y electrones emitidos por el Sol a una velocidad de 500 km/s) como responsable del origen de la cola de plasma del cometa. Fueron estos fenómenos observados en la cola los que dieron indicación y proveyeron prueba de la existencia de una radiación solar de tipo corpuscular. Bajo esta óptica tuvieron éxito en explicar las repentinas desconexiones y sucesivas reconexiones de la cola de plasma del núcleo, observadas en repetidas ocasiones. Estando constituido por nubes no homogéneas de cargas eléctricas en movimiento, el viento solar genera campos magnéticos de gran variación en el tiempo, en los cuales las partículas constituyentes de la cola se mueven siguiendo trayectorias no siempre lineales.

Se han recogido datos que han hecho posible estudiar la estructura de la cola cometaria, en concreto con el International Cometary Explorer (ICE), sonda espacial destinada al estudio del cometa Giacobini-Zinner durante su pasaje de 1985. La cola del mismo estaba formada por dos lóbulos distintos, cada uno de ellos compuesto por

las líneas de campo magnético que se extendían desde la coma. Como puede verse en la figura 5, cada lóbulo estaba dotado de polaridad magnética opuesta y entre ellos había una división de corriente eléctrica.



DONALD K. YEOMANS, "THE GIACOBINI-ZINNER HANDBOOK" PAG. 1-8 FIG. 1-4; 1985

Esta estructura tenía su origen en la interacción del de la ionósfera del cometa con las líneas del campo magnético interplanetario. La acción del viento solar sobre la superficie externa generaba entonces una estructura compleja, un arrollamiento de las líneas del campo magnético en torno al núcleo "como spaghetti en un tenedor" (Von Roseninge et al., 1986).

Las observaciones llevadas a cabo con ocasión del paso de los dos últimos cometas espectaculares (el Hyakutake y el Hale-Bopp) han aportado nuevos e importantes conocimientos sobre las colas cometarias. Gracias a las campañas internacionales de observación fue posible descubrir una tercera cola formada por iones pesados. Mediante el empleo de filtros particulares en las observaciones del cometa Hale-Bopp se puso en evidencia una cola constituida por átomos de Na neutro que hasta entonces había escapado las observaciones (IAUC 6631). Esta última cola ha resultado 50 millones de km de largo y 500 mil km de ancho, muy distinta de las otras dos colas y situada angularmente a algunas decenas de grado respecto a ellas. Observaciones concretas, posteriores, han permitido demostrar que tal cola no tiene nada que ver con la tradicional cola de plasma. En el estado actual, todavía no está claro el mecanismo que está en el origen de esta cola. La mayor sorpresa está en el hecho de que el Na se encuentra a gran distancia del núcleo, pero en ese punto, según el modelo estándar, se debe hallar ionizado y por lo tanto no debería dejar traza.

Un segundo aspecto problemático es la enorme aceleración a la que están sometidos los átomos de Na, que no es explicable recurriendo únicamente a la acción del viento solar. La velocidad de los átomos de Na es de 58 Km./seg a una distancia de 5 millones de Km. del núcleo y de 95 Km./seg al doble de distancia.

Terminamos así la sección del curso relativa a la morfología de los cometas, subrayando que todavía hay muchos puntos oscuros en su comprensión. No obstante, gracias a los permanentes avances de la astronomía cometaria, nos acercamos al día, no muy lejano, en el que los últimos secretos de estos cuerpos sean develados.

BIBLIOGRAFIA:

Whipple F. - A Comet model - Astrophysical Journal, 111, 375; 1950

Dr. Claudio Elidoro - Morfología delle Comete (<http://www.geocities.com/elidoro/> Traducción de Juan Lacruz)