

COMETAS: UN ACERCAMIENTO PANORÁMICO A ESTOS VIAJEROS CÓSMICOS

Palabras clave: Cometas, Reservorios, Estructura cometaria, Actividad cometaria, C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS).

Key words: Comets, Reservoirs, Cometary structure, Cometary activity, C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS).

Los cometas han fascinado a la humanidad desde la antigüedad, siendo observados y estudiados por las principales civilizaciones a lo largo de milenios. Aunque inicialmente se les atribuyeron significados supersticiosos, el desarrollo de la astronomía permitió comprender que los cometas son cuerpos celestes que orbitan alrededor del Sol. Actualmente, el estudio de los cometas, facilitado por los avances tecnológicos y las diferentes misiones espaciales, es relevante porque podrían aportar información clave sobre el origen de la vida en la Tierra y la formación del sistema solar. Se cree que los cometas podrían haber traído agua y compuestos orgánicos durante el intenso bombardeo que ocurrió en los primeros estadios del sistema solar, contribuyendo a las condiciones necesarias para el surgimiento de la vida.

Los cometas se clasifican en dos grupos principales según sus períodos orbitales: cometas de corto y largo período. Esta clasificación refleja sus orígenes, siendo los cometas de largo período provenientes de la Nube de Oort, mientras que los de corto período se originan en el cinturón de Kuiper.

Estructuralmente, un cometa se compone de un núcleo helado, una coma de gas y polvo, y colas que se forman a medida que se acerca al Sol. El núcleo, que tiene entre 1 y 20 km de diámetro, expulsa material al sublimarse el hielo que lo compone, creando la coma y las colas. Un ejemplo notable es el cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS), que tiene una distancia perihélica de 0,39 unidades astronómicas.

Comets: A Panoramic Approach to These Cosmic Travelers

Comets have fascinated humanity since ancient times, being observed and studied by major civilizations over millennia. Although initially attributed with superstitious meanings, the development of astronomy allowed us to understand that comets are celestial bodies that orbit the Sun.

Today, the study of comets—facilitated by technological advancements and various space missions—is important because they may provide key information about the origin of life on Earth and the formation of the solar system. It is believed that comets might have brought water and organic compounds during the intense bombardment that occurred in the early days of the solar system, contributing to the conditions necessary for the emergence of life.

Comets are classified into two main groups based on their orbital periods: short-period and long-period comets. This classification reflects their origins, with long-period comets coming from the Oort Cloud, while short-period comets originate from the Kuiper Belt.

Structurally, a comet consists of a frozen nucleus, a coma of gas and dust, and tails that form as it approaches the Sun. The nucleus, which ranges from 1 to 20 km in diameter, releases material as its ices sublimate, creating the coma and tails. A notable example is the comet C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS), which has a perihelion distance of 0.39 astronomical units.

■ LOS COMETAS EN LA HISTORIA

Debido a sus apariciones inesperadas y, a veces, espectaculares, los cometas han despertado la atención de sus observadores desde tiempos inmemoriales. Muy a menudo, las personas miraban a los cometas con miedo, creyendo que estos visitantes

cósmicos eran presagios de plagas, desastres naturales y muerte. Aunque su estructura, composición e incluso su catalogación dentro de la esfera celeste han sido objeto de análisis y controversia, los cometas fueron observados y estudiados por las civilizaciones más importantes desde hace milenios.

Romina S. Garcia

Grupo de Ciencias Planetarias, Dpto. de Geofísica y Astronomía,
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Universidad Nacional de San Juan - CONICET
Av. J. I. de la Roza 590 oeste, Rivadavia,
J5402DCS, San Juan, Argentina

E-mail: garcia.romina.222@gmail.com

La palabra “cometa” proviene del griego antiguo y significa “estrella con cabello”, aunque también existen registros en el Antiguo Egipto, Mesopotamia y la Antigua China (figura 1).



Figura 1: Detalle de un manuscrito astrológico en tinta sobre seda, siglo II a. C., perteneciente a la dinastía Han. Desenterrado de la tercera tumba de Mawangdui en Changsha, provincia de Hunan, China. Museo de la provincia de Hunan. Crédito: dominio público, a través de Wikimedia Commons.

Gilgamesh, rey sumerio que vivió alrededor de 2600 a.C., definió los cometas como estrellas que caen. Tiempo después, alrededor del 330 a.C., Aristóteles opinó que los cometas eran nada menos que vapores exhalados de la Tierra que se elevaban a la atmósfera superior, relegándolos a un simple fenómeno meteorológico. Una razón para esta creencia es que los cometas brillantes, observables a simple vista, están generalmente cerca del Sol, por lo que sólo se pueden observar en la mañana temprano o al anochecer, cerca del horizonte. Las colas cometarias, apuntando lejos del Sol, aparecen en este caso más bien perpendiculares al horizonte, dando así la impresión al observador de que los cometas están subiendo desde la Tierra.

El filósofo Séneca, alrededor del 30 d.C., comprobó que los cometas no se veían afectados por la dirección del viento; esto es, tenían un

comportamiento típico de un cuerpo celeste. Sin embargo, el pensamiento aristotélico era muy fuerte y quedó arraigado por muchos siglos.

En el Imperio Romano, y siglos después en la época medieval, la superstición creada alrededor de estos cuerpos llevó a pensar, por poner algunos ejemplos, que un cometa tuvo una influencia maligna sobre las decisiones tomadas por Nerón (alrededor del 50 d.C.) o la muerte de Carlomagno o de Luis I de Francia (en la primera mitad del siglo IX).

La asociación de cometas con fenómenos atmosféricos prevaleció durante toda la Edad Media y, por lo tanto, no es sorprendente encontrar una falta de registros científicos de estos objetos en el mundo occidental durante ese tiempo.

Johannes Kepler, a principios del siglo XVII, fundamentalmente conocido por sus leyes sobre el movi-

miento de los planetas en su órbita alrededor del Sol, paradójicamente dijo que los cometas eran emanaciones de la Tierra, volviendo a colocarlos como parte de la meteorología.

La aparición de un cometa muy brillante en 1577 dio a Tycho Brahe la oportunidad de observarlo con el mejor instrumento astronómico disponible en ese momento. Al comparar las observaciones hechas desde dos lugares diferentes, no pudo encontrar ningún cambio de paralaje perceptible, por lo que infirió que el cometa debería encontrarse a mucha más distancia que la Luna. Este descubrimiento colocó a los cometas dentro de la categoría de los cuerpos celestes y fue, sin duda, un punto de inflexión en la historia de la ciencia, sentando las bases para el estudio moderno de estos viajeros cósmicos.

Más allá del espectacular fenómeno que supone la observación

de cometas desde la Tierra, estos objetos también merecen atención porque podrían responder preguntas claves y proporcionar información importante sobre cuestiones tan trascendentales como el origen de la vida en la Tierra o la formación y evolución del sistema planetario. La vida en la Tierra solo pudo haber comenzado después de un evento que habría sucedido al finalizar la etapa de formación del Sistema Solar, hace aproximadamente 3,8 mil millones de años. Durante este proceso dinámicamente caótico, denominado “late heavy bombardment” en inglés, caracterizado por un intenso bombardeo de planetesimales hacia el Sistema Solar interior, la temperatura era extrema para la presencia de material orgánico o de agua. Además, los fósiles más primitivos que se han encontrado en el planeta tienen un registro de antigüedad de alrededor de unos 3,5 mil millones de años. Entonces surge la pregunta: ¿De dónde salió el agua y el carbono necesarios para la vida, si en la Tierra no se daban las condiciones para la presencia de estos ele-

mentos? La respuesta a esta pregunta podría ser una colisión entre la Tierra y uno o varios cometas, ya que los recorridos orbitales de ambos pueden circunstancialmente cruzarse y, además, en muchos de ellos se ha observado la presencia de agua y moléculas basadas en carbono. La misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea, que estudió el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, proporcionó evidencia de aminoácidos y otros materiales orgánicos, lo que refuerza la teoría de que los cometas podrían haber traído los elementos necesarios para la vida en la Tierra.

Por otro lado, los cometas también podrían brindarnos información sobre la formación y evolución del Sistema Solar. Si los consideramos como residuos o remanentes de la formación planetaria, es decir, “planetesimales” que no fueron incorporados a los planetas ni expulsados del Sistema Solar por las fuerzas gravitatorias existentes, entonces podrían dar pistas sobre la composición química de los planetas.

■ RESERVORIOS Y TIPOS DE COMETAS

Dadas las diversas características orbitales de los cometas observados a lo largo del tiempo, tanto en forma, como en posición y orientación, es natural suponer que no todos ellos provienen de la misma región. En el Sistema Solar existen dos reservorios de estos cuerpos helados (Figura 2).

La Nube de Oort, propuesta por Oort en 1950, es una nube esférica teórica compuesta por pequeños cuerpos helados que rodean el Sistema Solar, con un radio de ~100 a 200 mil unidades astronómicas (ua) (Smoluchowski & Torbett, 1984), y con una densidad de objetos que disminuye a medida que aumenta la distancia heliocéntrica -o distancia al Sol- (Fernandez & Brunini, 2000). Aunque la existencia de la Nube de Oort aún no ha sido probada por observación directa, es ampliamente aceptada por la comunidad científica debido a la observación de cometas que parecen provenir de esa región. Para que los objetos de

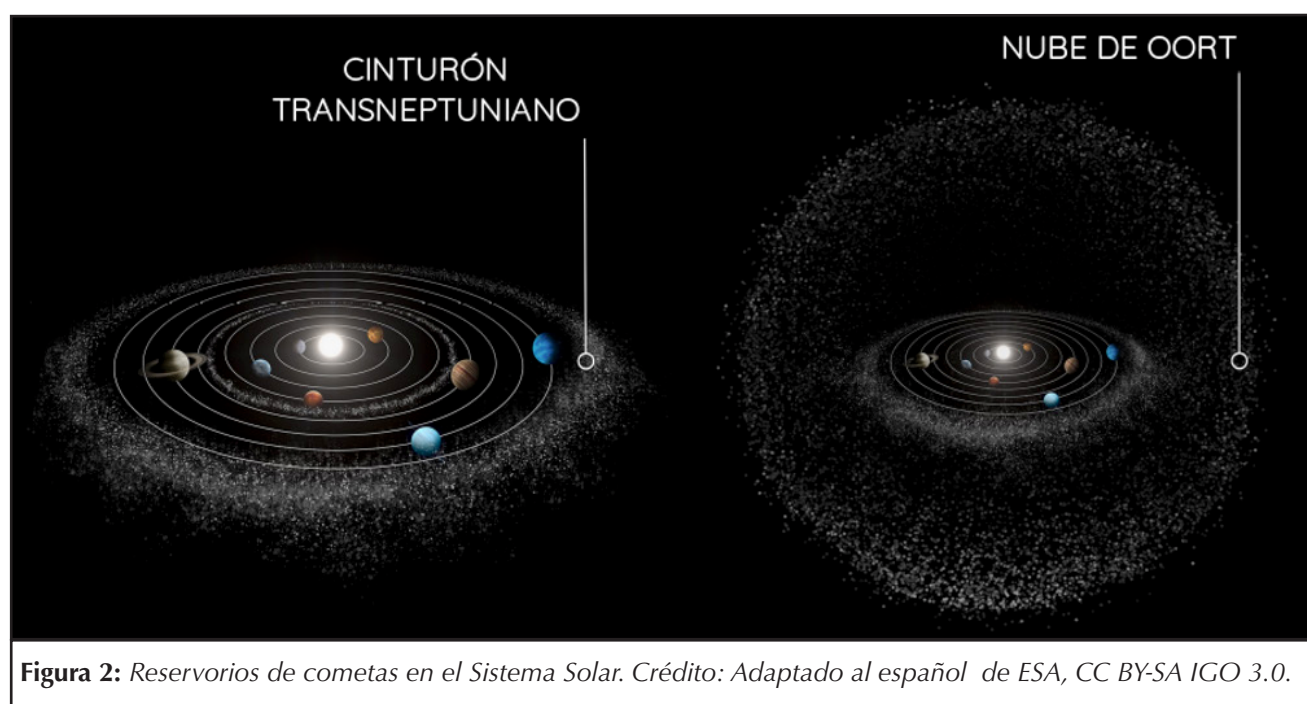


Figura 2: Reservorios de cometas en el Sistema Solar. Crédito: Adaptado al español de ESA, CC BY-SA IGO 3.0.

la Nube de Oort ingresen en la región interna del Sistema Solar, es necesario algún tipo de perturbación; siendo los posibles perturbadores el disco galáctico, las estrellas que pasan cerca del Sol, o incluso las nubes moleculares.

Existe otro grupo de cometas que tiene una baja inclinación orbital, lo cual indicaba que la fuente de estos objetos debía ser distinta a la Nube de Oort y estar próxima al plano eclíptico. Aunque Edgeworth en 1949 y Kuiper en 1951 postularon la existencia de un disco más allá de la órbita de Neptuno, fue Fernández en 1980 quien demostró su existencia estudiando el flujo de cometas. La confirmación observacional de la existencia del cinturón transneptuniano -también llamado cinturón de Kuiper- llegó con la detección del objeto (15760) 1992 QB1 Albion (Jewitt & Luu, 1993), el primer objeto observado más allá de la órbita de Neptuno, además de Plutón y Caronte. A medida que se fueron descubriendo más objetos en la región transneptuniana, se identificaron distintos comportamientos dinámicos, lo que permitió caracterizar diversas poblaciones en la región.

Los cometas han sido clasificados usualmente en dos grupos según sus períodos orbitales, los cuales están estrechamente relacionados con su ubicación en el Sistema Solar.

Los cometas de largo período (LPC, por sus siglas en inglés) son aquellos con ciclos orbitales mayores a 200 años, y los cometas de corto período (abreviado en inglés como SPC) son los que poseen ciclos menores a 200 años. Este criterio surgió en una época en la que la capacidad de cálculo era más limitada, y 200 años era el período orbital máximo para el que era relativamente fiable determinar si el objeto ya había sido avistado con

anterioridad, estableciendo así su periodicidad. Por lo tanto, esta clasificación no responde a cuestiones físicas o dinámicas, sino más bien históricas. Los LPC pueden ser cometas dinámicamente nuevos si los objetos ingresan a la región planetaria por primera vez, o cometas que regresan ("returning comets" en inglés) si en algún momento de su vida dinámica ya han ingresado al sistema solar interior.

Los SPC, por otro lado, pueden dividirse en dos grupos: los cometas de la familia de Júpiter, con períodos menores a 20 años, y los cometas tipo Halley, con períodos mayores a 20 años. La dinámica de los primeros está fuertemente dominada por Júpiter (de ahí su denominación), y el plano de sus órbitas no se aleja mucho del plano eclíptico. Por otro lado, los cometas tipo Halley tienen una distribución de inclinaciones

más heterogénea, con una media de 41° , e incluso algunos tienen órbitas retrógradas. Aunque estos grupos de cometas se encuentran dentro del grupo de los SPC, tienen poco en común y, muy probablemente, tienen orígenes distintos. Este tipo de disyuntivas, ha llevado a algunos investigadores a buscar una clasificación basada en propiedades dinámicas más rigurosas (Levison, 1996; Tancredi, 2014), pero eso va más allá de lo que se pretende abordar en este artículo.

■ ESTRUCTURA COMETARIA

La estructura típica de un cometa se compone de cuatro partes básicas, como se muestra en la Figura 3.

El núcleo cometario es la parte central del cometa. Desde este aglomerado de hielo y polvo se expulsan los componentes que forman las de-

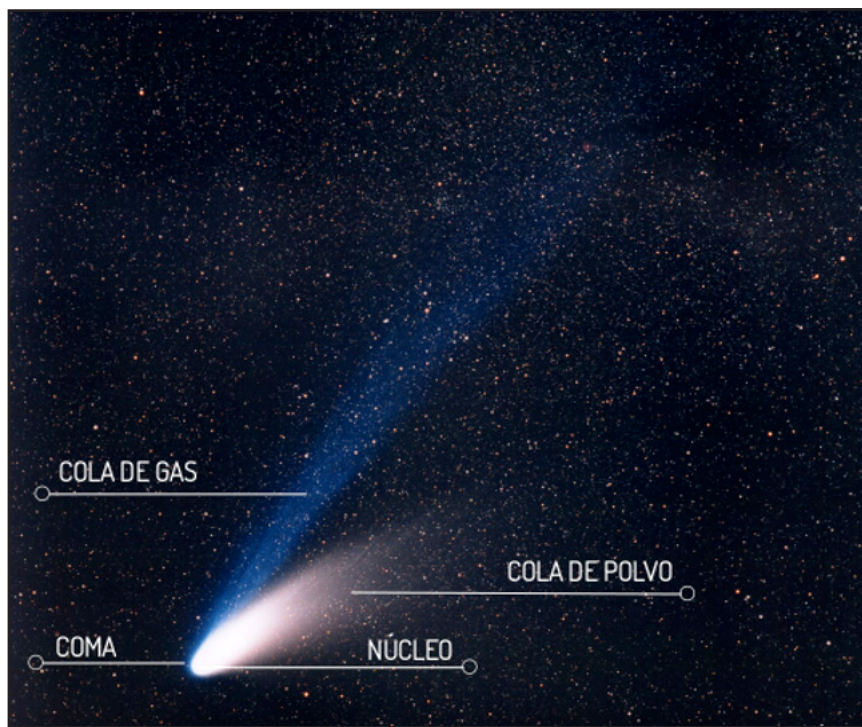


Figura 3: Estructura básica de cuatro partes de un cometa. Cometa C/1995 O1 Hale-Bopp, 14 de marzo de 1997. Crédito: Adaptado de ESO/E. Slawik, CC-BY 4.

más estructuras cuando el cometa se activa, es decir, cuando se acerca lo suficiente al Sol para que comience la sublimación de los hielos que lo componen, arrastrando en su movimiento a las partículas de polvo.

La teoría más aceptada y extendida sobre el origen de estos objetos fue propuesta por Weidenschilling (2004). Esta teoría sugiere que los núcleos cometarios se formaron en el disco protoplanetario mediante una coagulación lenta de material orgánico, hielos y silicatos, asentados en el plano de dicho disco. Esta aglomeración inicial dio lugar a cuerpos de tamaños kilométricos. Se cree que dichos núcleos se formaron en la zona de los planetas gigantes y luego fueron dispersados hacia los diferentes reservorios, donde han conservado su estado original. Por esta razón, se supone que los núcleos cometarios proveen información sobre las condiciones termofísicas del disco protoplanetario y sobre el mecanismo de formación de los planetesimales helados que dieron origen a los núcleos de los planetas exteriores.

Dado este escenario de formación, los núcleos cometarios están compuestos tanto por materiales refractarios como por hielos. Si bien el hielo de agua (H_2O) es el componente más abundante observado, también se han detectado otros tipos de hielos como CO , CO_2 , y CH_4 . En el caso del hielo de agua, el proceso de sublimación se vuelve importante a distancias heliocéntricas menores de ~ 3 ua (Biver et al., 2002), aunque se han observado cometas activos a distancias mucho mayores, lo que confirmaría que algunos núcleos contienen hielos más volátiles en su composición.

Históricamente, ha habido mucha controversia sobre la naturaleza de los núcleos cometarios, ya que

estos están ocultos tras una “nube” de gas y polvo cuando el cometa está activo, y además son objetos muy oscuros y tenues, lo que dificulta su observación. Debido a esto, el tamaño del núcleo ha sido una variable difícil de determinar, pero algunos estudios estiman tamaños típicos que oscilan entre 1 y 20 km.

Dadas estas dificultades, la mejor manera de estudiar estos objetos es proponiendo diversos modelos que puedan ajustarse a las mediciones indirectas tomadas por telescopios terrestres. También se han obtenido datos importantes acerca de los núcleos cometarios con el uso de grandes telescopios que permiten observarlos cuando se alejan del Sol y tienen baja o nula actividad. De esta manera, se evita que el polvo y gas que los rodea interfiera en su observación, aunque esto presenta grandes desafíos en cuanto a las técnicas observacionales.

Otro método es observar cometas con muy poca actividad cuando se acercan mucho a la Tierra; esto puede dar buenos resultados, pero solo es aplicable a unos pocos objetos.

Los núcleos cometarios han podido ser estudiados en detalle con la llegada de sondas espaciales a algunos cometas, desde las visitas de las sondas Giotto y Vega al cometa 1P/Halley, hasta la misión Rosetta y su encuentro con el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (Figura 4). Esta es la mejor manera de obtener información detallada, pero está necesariamente limitada a un número muy pequeño de objetos y no puede ser utilizada para determinar las propiedades de los núcleos cometarios como una población.

Dicho esto, cuando observamos un cometa activo desde la Tierra, lo que realmente estamos viendo es el halo de gas y polvo que se genera al-

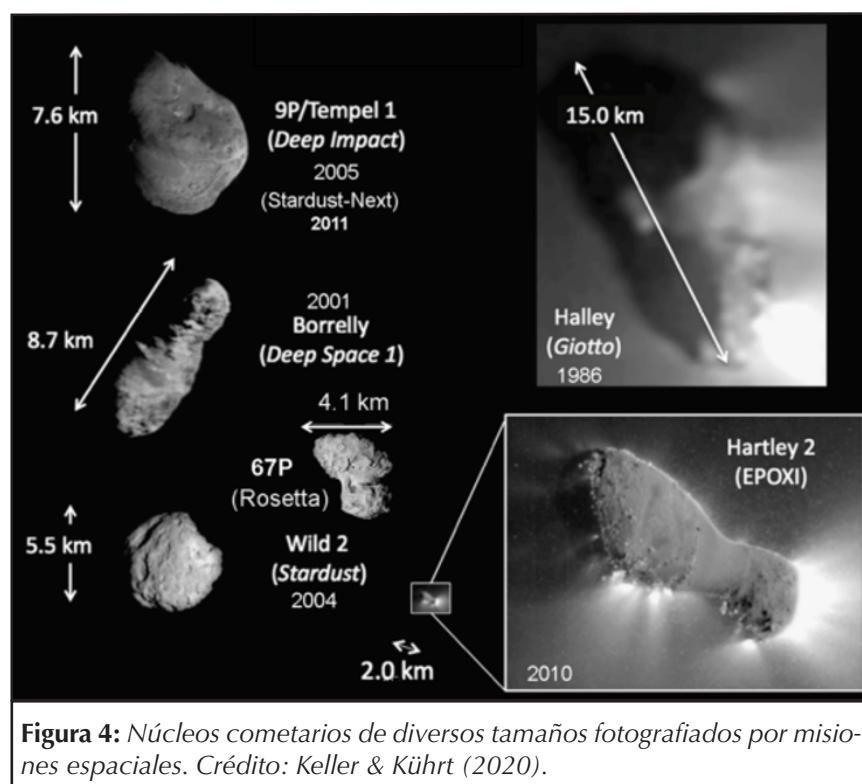


Figura 4: Núcleos cometarios de diversos tamaños fotografiados por misiones espaciales. Crédito: Keller & Kührt (2020).

rededor del núcleo, llamado coma. Por esta razón, los estudios sobre la composición de los cometas suelen referirse a mediciones realizadas sobre la coma y no sobre el núcleo.

La coma no está unida gravitacionalmente al núcleo; más bien, es un fenómeno de transición. Se forma aproximadamente cuando el cometa está a una distancia del Sol menor de 3 ua, y su tamaño y brillo se incrementan al aumentar la radiación térmica a medida que el cometa se acerca a su perihelio.

Debido al proceso de sublimación que ocurre en la superficie del núcleo, se producen eyecciones de gas a gran velocidad que arrastran el polvo depositado en la superficie, el cual se desacopla del gas a unos pocos radios de distancia.

La coma generalmente puede parecer esférica y estable, pero los cambios repentinos en su brillo y estructura son bastante comunes, con rasgos que cambian rápidamente en cuestión de horas o con estructuras espaciales que pueden aparecer tanto en la coma de gas como en la de polvo.

Las especies de iones expulsados por el núcleo hacia la coma son posteriormente acelerados por el viento solar en una dirección que difiere muy poco de la dirección antisolar, formando la cola iónica (o cola de gas) del cometa. Estas estructuras pueden extenderse millones de kilómetros y están presentes en todos los cometas, aunque a veces son demasiado débiles para ser observadas fácilmente.

Alfvén (1957) sugirió que el espacio interplanetario está inmerso en un campo magnético creado por el Sol. Bajo esta hipótesis, cuando un cometa se mueve a través del medio interplanetario, su ionosfera

barre las líneas del campo magnético. Debido a este arrastre, los iones cometarios son encauzados en la dirección radial, facilitando así una transferencia eficiente de momento entre el plasma del viento solar y los iones cometarios.

Por otro lado, las partículas de polvo que fueron arrastradas hacia afuera por el gas en expansión seguirán una trayectoria diferente a la de las especies iónicas. Más allá de unos pocos radios de distancia del núcleo, la presión de radiación del Sol y la fuerza gravitatoria solar colocarán las partículas en distintas zonas del espacio, dependiendo principalmente de su masa y tamaño. Esto forma la llamada cola de polvo, una estructura extensa que puede alcanzar longitudes del orden de 10.000 km en la mayoría de los casos, e incluso más en algunas experiencias espectaculares. Todas las colas de polvo residen en un sector del espacio detrás de la región nuclear, aunque debido a su proyección en el plano del cielo, pueden verse fuertemente deformadas por la perspectiva de visión. En general, estas estructuras siguen la dirección antisolar debido a que el polvo que las compone se ve afectado por la presión de radiación solar y se curvan siguiendo la dirección del movimiento del núcleo en su órbita alrededor del Sol, a diferencia de lo que sucede con la cola de gas.

■ COMA DE POLVO: ALGUNAS PERSPECTIVAS DE ESTUDIO

Los diferentes escenarios de formación para los cometas de largo y corto período tienen fuertes consecuencias en las abundancias y composición del gas y el polvo, y por lo tanto, en su actividad cometaria (Meech et al., 2009).

Uno de los métodos para estudiar la actividad de los cometas es

mediante el análisis fotométrico de su coma. Enfocándonos en el estudio del polvo, también conocido como material refractario, se utiliza particularmente el filtro fotométrico R para esta técnica de análisis. Este filtro está caracterizado por una longitud de onda efectiva de $\lambda_{ef} = 6407 \text{ \AA}$ y un ancho de $\Delta\lambda = 1580 \text{ \AA}$, lo que le permite abarcar menos características de emisión de gases y ser más sensible al polvo (Schleicher y Farnham, 2004). En ausencia de esta alternativa, como ocurre en algunos casos, también se puede utilizar el filtro fotométrico V, ya que las diferencias entre ambos filtros son menores.

Mediante esta técnica, se pueden obtener las magnitudes totales de los cometas, que representan el brillo combinado del núcleo y la coma, y que se calculan para determinar cuán brillante es un cometa. Esta cantidad, además, está estrechamente relacionada con un parámetro denominado Af_p, introducido por A'Hearn et al. (1984), que se utiliza para medir la actividad cometaria. A menudo se emplea para comparar la tasa de producción de polvo entre cometas, pero es importante tener en cuenta que implica parámetros de observación y físicos que pueden variar en los diferentes casos. Aunque no entraremos en el detalle de la matemática que implica el cálculo de este valor, como regla general, se asume que un valor grande de Af_p indica una alta actividad de polvo (Mazzotta Epifani et al., 2014b).

En la literatura se concluye que, dado que los cometas de largo período son objetos que nunca o rara vez han pasado por el Sistema Solar interior, suelen ser intrínsecamente más activos (valores de Af_p mayores) que los cometas de corto período (García et al., 2020; García et al., 2021). Los SPC, que han experimen-

tado varios pasajes por el Sistema Solar interior, tienen menos material disponible para sublimar debido a que este se ha ido agotando en acercamientos previos.

Debido a su menor actividad, la observación de los cometas de corto período fue históricamente menos interesante que la de los LPC: son más débiles, y las observaciones a simple vista solo podían revelar comas circulares, simples y colas cortas sin estructuras. Sin embargo, esto ha cambiado en la última década con la mejora de las técnicas observacionales y el instrumental disponible.

Las estructuras usualmente existentes en la coma cometaria están a menudo ocultas detrás de su distribución de brillo. En general, su presencia, ausencia, o incluso un cambio en su morfología, es el resultado de procesos físicos que actúan en el núcleo y de la interacción del cometa con su ambiente. Esta estrecha relación entre las estructuras vistas en la coma y el núcleo, cuyo análisis

conforma en sí mismo uno de los métodos de estudio de estos cuerpos celestes, puede ayudarnos a revelar propiedades del núcleo que no son fáciles de conocer al estar oculto, como el estado de rotación, su nivel de actividad, las propiedades del polvo y el gas, y otras características fundamentales acerca del cometa (Farnham, 2009).

Estas estructuras no son fácilmente distinguibles en las imágenes sin procesos de realce y mejora. Por ello, existen varias técnicas de procesamiento disponibles para este tipo de trabajo (por ejemplo, Samarasinha et al., 2006 y sus referencias). Sin embargo, dado que las estructuras presentes en las imágenes de cometas son de diversas clases, un mismo método de filtrado no siempre da el mismo resultado cuando se aplica a distintos objetos.

Un ejemplo del efecto del filtrado de imágenes de cometas puede verse en la Figura 5. En este caso, la imagen ha sido procesada con un filtro de renormalización azimutal

que, como su nombre lo indica, renormaliza el brillo de la imagen en cualquier punto con el valor medio de un anillo centrado en el núcleo del cometa. La imagen resultante tiene un contraste mejorado y permite detectar estructuras teniendo en cuenta el cambio general de brillo a medida que aumenta la distancia al núcleo cometario.

La imagen procesada del cometa C/2013 US10 muestra una estructura en forma de abanico (fan) producida por una amplia extensión de la coma proyectada radialmente hacia afuera desde el núcleo en una dirección aproximadamente opuesta al Sol. Según Sekanina (1991), estas estructuras están asociadas a un núcleo cuya oblicuidad es cercana a los 90° , lo que significa que el eje de giro está cerca del plano orbital del cometa. Debido a esto, su actividad se restringe a áreas de distancias angulares de no más de $\sim 45^\circ$ desde el polo iluminado por el Sol. La amplitud de dicha estructura podría estar relacionada con el tamaño del área activa en el núcleo y la distancia en-

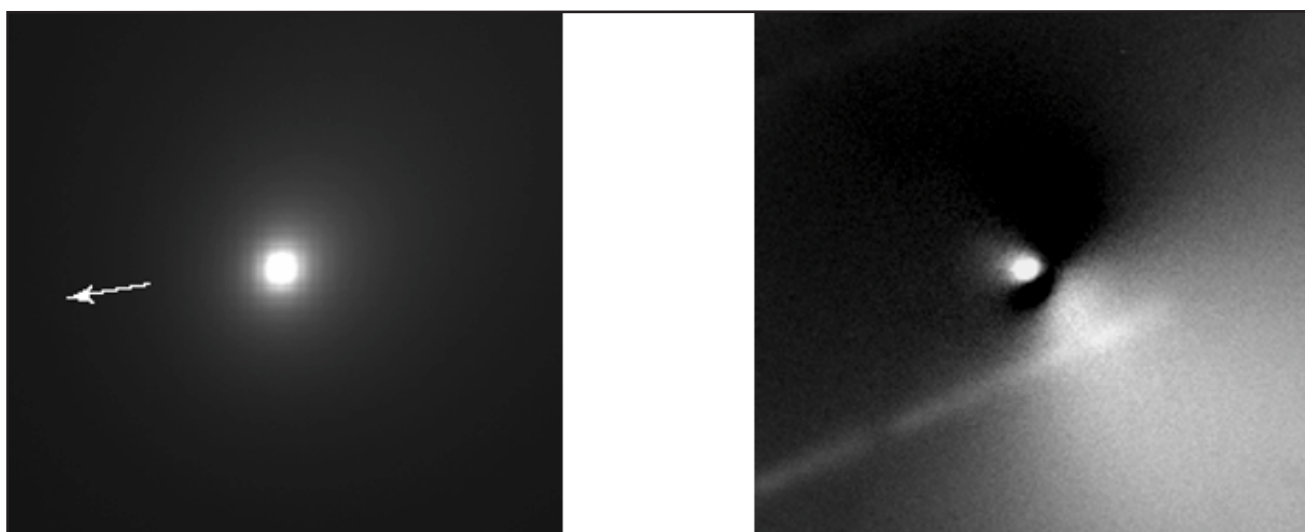


Figura 5: C/2013 US10 Catalina. Izquierda: imagen del cometa tras el proceso de reducción básica, que elimina defectos instrumentales. El Norte está hacia arriba y el Este a la izquierda. La flecha indica la dirección hacia el Sol. Derecha: imagen obtenida tras el proceso de filtrado para realzar el contraste de las estructuras de polvo ocultas. Se distingue una estructura en forma de abanico en dirección aproximadamente opuesta al Sol, además de una eyección colimada de material hacia abajo.

tre la fuente y el eje rotacional. Además, es posible distinguir también una eyección colimada de material (*jet*) hacia abajo.

Con el análisis morfológico, se obtiene entonces una idea de lo que podría estar sucediendo en el núcleo cometario, pero hasta este punto no es más que un análisis descriptivo. Es por ello que la información recaudada de este proceso de análisis de la actividad cometaria puede ser utilizada para obtener resultados más cuantitativos mediante lo que se denomina un modelado numérico. A continuación, se detallará a grandes rasgos qué implica este método de estudio de los cometas.

Como se mencionó anteriormente, las partículas de polvo son emitidas por el núcleo del cometa con una cierta distribución de tamaños y se ven afectadas por una gravedad efectiva reducida como resultado de la presión de radiación, siguiendo cierta ecuación de movimiento. Conociendo cómo se mueven las partículas de polvo, fue posible desarrollar un modelo que permita determinar la posición teórica de estas en el espacio, con el objetivo de simular numéricamente su comportamiento para obtener información valiosa sobre el núcleo cometario y su actividad a partir de una imagen generada sintéticamente.

A grandes rasgos, el modelo desarrollado permite calcular la posición y la intensidad de la luz dispersada por un conjunto de partículas eyectadas del núcleo del cometa para finalmente situarlas en una imagen simulada que se comparará con imágenes astronómicas reales.

Si bien es cierto que varios autores, como Fulle (2004) y Moreno et al. (2003) por mencionar algunos, han realizado con anterioridad códigos de simulación similares al que

se describirá a continuación -detallado en García et al. (2024a)-, la importancia de este modelo numérico para el modelado de comas y colas de polvo cometarias radica en que es el primero, y hasta ahora el único, elaborado en América Latina.

Para reproducir la imagen real del cometa es necesario tener en cuenta una gran variedad de parámetros. A varios de ellos se les asignan valores fijos al inicio del proceso de integración, pero otros tantos deben ajustarse adecuadamente para poder reproducir la imagen real.

Teniendo en cuenta esto, el modelo es capaz de calcular la geometría orbital del sistema cometa-Sol-Tierra. Se emiten partículas desde las regiones activas y se proyectan sus posiciones en un plano del cielo simulado. Las posiciones de las partículas se convierten luego en intensidad a través de un modelo de dispersión de Mie simple, que consi-

dera a los granos de polvo como esferas perfectas. La imagen simulada se produce finalmente de acuerdo con los parámetros de observación (tamaño, campo de visión, resolución) de la imagen real tomada desde Tierra utilizada como referencia.

A modo de ejemplo, en la Figura 6 se muestra el mejor modelo numérico logrado para el cometa C/2013 US10 (Catalina). Lo que se observa son las isofotas observadas (negro) y modeladas (rojo) del cometa.

A grandes rasgos, el resultado de la Figura 6 se logró al considerar un tiempo de integración (lapso de tiempo transcurrido desde la emisión de las partículas por el núcleo cometario hasta su posición en la imagen) de 64 días, con una velocidad de eyección de 200 m/s. El polvo se consideró que provenía mayormente de una emisión isotrópica, más la contribución de dos áreas activas con coordenadas (-60°, 160°) y

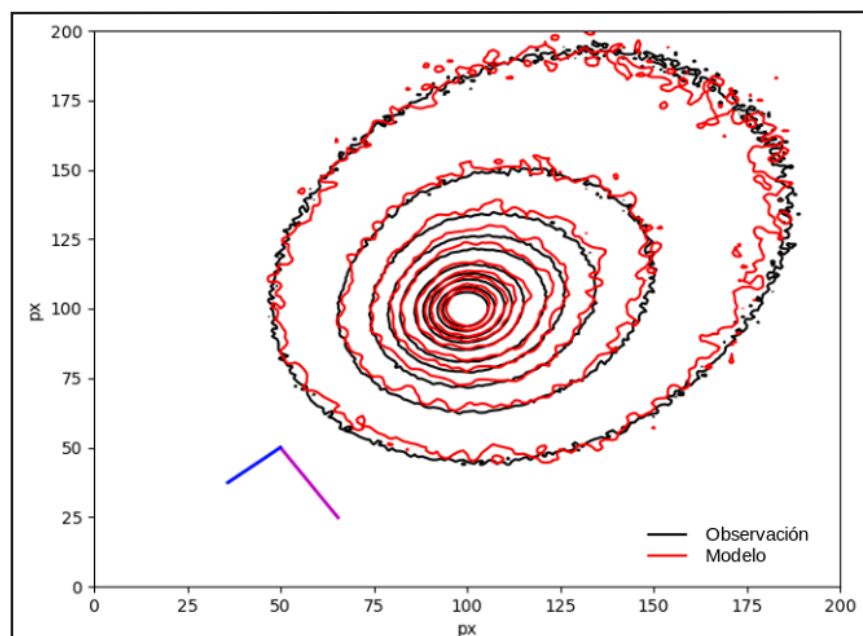


Figura 6: Modelado de la coma del cometa C/2013 US10 (Catalina). En color negro se muestra lo observado y en rojo el modelo calculado. La línea azul corresponde a la dirección al sol y la magenta es la dirección de movimiento.

(80°, 340°), correspondientes a las regiones observadas en la Figura 5.

Otro trabajo del mismo estilo fue realizado para el cometa C/2017 K2 (PanStarrs) y publicado recientemente por García et al. (2024b). En este caso, se pudo determinar el período de rotación del cometa, algo que resulta de gran complejidad para un cometa activo, y que además es un parámetro físico muy poco conocido para esta población de objetos del Sistema Solar.

■ EL PARTICULAR CASO DEL COMETA C/2023 A3 (TSUCHINSHAN-ATLAS)

C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) (Figura 7) es un cometa descubierto el 9 de enero de 2023 en el Obser-

vatorio de la Montaña Púrpura, en Nankín, al este de China. El nombre “Tsuchinshan” es la transcripción del chino mandarín para “Montaña Púrpura”. Sin embargo, 13 días más tarde, el programa de vigilancia ATLAS (las siglas en inglés de “Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System”) con su telescopio ubicado en Sutherland, Sudáfrica, lo “redescubrió” sin saber que ya había sido observado por los astrónomos chinos. Es por esto que el cometa también lleva las siglas “ATLAS” en su nombre. Su denominación completa incluye la letra “C”, que indica que es un cometa, y el año en que se observó por primera vez. “A3” hace referencia al orden de descubrimiento dentro de ese año: “A” por la primera quincena de enero y “3” por ser el tercer objeto observado en esa quincena.

C/2023 A3 es originario de la Nube de Oort y es un cometa hiperbólico, lo que significa que la excentricidad de su órbita es mayor a 1, por lo que su trayectoria es abierta. Esta es la primera y única vez que visita la región planetaria. Además, la inclinación de su órbita es de 139°, lo que lo convierte en un cometa retrógrado: su trayectoria alrededor del Sol es en sentido contrario al de los planetas. Un diagrama de su órbita puede verse en la Figura 8.

Este cometa, de aproximadamente 10 kilómetros de tamaño, ha sido apodado “el cometa del siglo” porque se cree que podría ser el más brillante del siglo XXI. La razón de esto es que su perihelio será a tan solo 0,39 (ua) del Sol. Además, el cometa realizará su máxima aproxi-



Figura 7: Cometa C/2023 A3 /Tsuchinshan-ATLAS) el 1 de Agosto de 2024 Credito: Con permiso de Pepe Cham-bó (<https://cometografia.es>).

mación a la Tierra, pasando a solo 0,56 (ua) de nuestro planeta, lo que significa que pasará a casi la mitad de la distancia que separa la Tierra del Sol.

Las predicciones sobre su brillo máximo varían considerablemente. Algunos modelos sugieren que podría llegar a ser 100 veces más brillante que el famoso cometa Hale-Bopp de 1997 (mostrado en la figura 3). Incluso las estimaciones más conservadoras consideran que podría superar el brillo de la mayoría de las estrellas del cielo nocturno.

■ COMETAS EN LA EXPLORACIÓN ESPACIAL

Antes de la era de las misiones espaciales, el estudio de los cometas se basaba principalmente en observaciones telescópicas desde la Tierra y en el análisis de sus efectos visibles en el cielo nocturno. Durante este período, el proceso de acumulación de observaciones y teorías permitió a los astrónomos comprender mejor las órbitas, la composición y las características de estos cuerpos celestes.

En el siglo XVIII, el matemático y astrónomo Pierre-Simon Laplace y el matemático Joseph-Louis Lagrange realizaron importantes contribuciones a la predicción de las órbitas de los cometas, utilizando las ecuaciones de movimiento de Newton para prever sus trayectorias. A medida que la tecnología de los telescopios mejoró en el siglo XIX, los astrónomos comenzaron a identificar cometas que regresaban con regularidad. Uno de los cometas más famosos, el cometa Halley, fue identificado por Edmond Halley en 1705. Halley notó que el cometa observado en 1682 tenía una órbita que se repetía cada 76 años, y su predicción de la próxima aparición del cometa en 1758 fue confirmada,

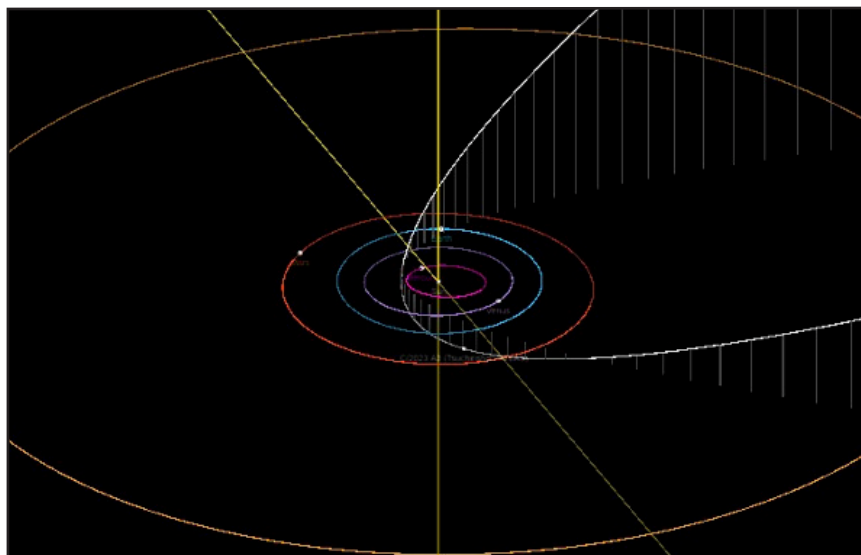


Figura 8: Órbita del cometa C/2023 A3 (en blanco) seguida en su paso por el Sistema Solar Interior. Los círculos de colores representan las órbitas de los planetas Mercurio, Venus, Tierra, Marte y Júpiter desde el centro hacia afuera. Fuente: JPL-Horizons - NASA.

estableciendo el primer caso conocido de un cometa periódico.

No fue sino hasta finales del siglo XX, que el comienzo de la era de las misiones espaciales transformó nuestra comprensión de los cometas, revelando detalles sobre su estructura, composición y comportamiento que antes eran inalcanzables. La misión Giotto de la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzada en 1985, marcó un hito al ser la primera en estudiar directamente un cometa. Su objetivo principal, el cometa Halley, fue sobrevolado por la sonda el 13 de marzo de 1986, a una distancia de aproximadamente 596 kilómetros. Este acercamiento proporcionó las primeras imágenes de alta resolución del núcleo del cometa, revelando una superficie irregular y activa con géiseres de gas y polvo, lo que revolucionó la comprensión de estos cuerpos celestes al demostrar que son más complejos de lo que se pensaba.

Continuando con la exploración

de los cometas, la misión Stardust de la NASA, lanzada en 1999, se enfocó en el estudio del cometa Wild 2. En enero de 2004, Stardust realizó un sobrevuelo cercano, recogiendo muestras de polvo cometario y partículas del entorno interplanetario, que luego fueron traídas de vuelta a la Tierra en 2006. Este retorno de material permitió a los científicos analizar directamente los componentes de un cometa en laboratorio, ofreciendo información crucial sobre la composición de estos cuerpos y el origen de los compuestos orgánicos que podrían haber influido en la formación del Sistema Solar.

Una de las misiones más ambiciosas en la exploración de cometas fue la Rosetta de la ESA, lanzada en 2004. Tras un extenso viaje de 10 años, Rosetta llegó al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014. La misión no solo orbitó este cometa, sino que también desplegó un módulo de aterrizaje, Philae, que logró posarse en su superficie en noviembre de 2014. A pesar de

las complicaciones del aterrizaje, Rosetta proporcionó una enorme cantidad de datos valiosos, desde imágenes detalladas de la superficie hasta información sobre las emisiones y la actividad del cometa. Además, permitió estudiar la evolución del cometa mientras se acercaba al Sol, ofreciendo una visión sin precedentes de los procesos cometarios.

En 2005, la NASA lanzó la misión Deep Impact con el propósito de estudiar el cometa Tempel 1. Esta misión innovó al lanzar una sonda de impacto que colisionó con el núcleo del cometa, creando un cráter y liberando material del interior. El análisis de este material proporcionó nueva información sobre la estructura interna y la composición del cometa, ayudando a los científicos a entender mejor cómo se formaron y evolucionaron estos cuerpos celestes.

Finalmente, la misión NEOWISE de la NASA, lanzada en 2009, aunque originalmente diseñada para buscar asteroides y cometas cercanos a la Tierra, ha realizado observaciones significativas de numerosos cometas a lo largo del proyecto. Esta misión ha sido crucial en la identificación y seguimiento de cometas que se acercan a la Tierra, contribuyendo a la vigilancia de objetos potencialmente peligrosos y proporcionando datos valiosos sobre las características y comportamientos de estos viajeros cósmicos.

Si algo está claro, es que aún nos falta mucho por conocer de estos misteriosos objetos del sistema solar. A medida que la tecnología avanza, se espera que futuras misiones continúen explorando estos fascinantes cuerpos celestes, desvelando aún más secretos del cosmos.

Å (Angstrom): Unidad de medida de longitud igual a 10^{-10} metros, utilizada para medir longitudes de onda de radiación electromagnética y el tamaño de átomos y moléculas.

Campo de Visión: El área del espacio que un telescopio o instrumento de observación puede capturar en una sola imagen.

CH₄ (Metano): Un hidrocarburo simple compuesto por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno. Es un gas importante en la química atmosférica de algunos planetas y lunas.

CO (Monóxido de Carbono): Una molécula compuesta por un átomo de carbono y uno de oxígeno, común en el medio interestelar y en atmósferas planetarias.

CO₂ (Dióxido de Carbono): Un gas compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno, importante en procesos como el efecto invernadero en planetas con atmósfera.

Disco Protoplanetario: Un disco de gas y polvo que rodea a una estrella joven, donde se forman los planetas y otros cuerpos del sistema solar.

Dispersión de Mie: Un tipo de dispersión de luz que ocurre cuando el tamaño de las partículas en un medio es comparable a la longitud de onda de la luz que atraviesa ese medio.

Excentricidad: Un parámetro que describe la desviación de una órbita respecto a un círculo. Una excentricidad de 0 indica una órbita circular, mientras que valores más altos indican órbitas más elongadas.

Filtro fotométrico: Dispositivo óptico utilizado en astronomía para se-

leccionar y medir la intensidad de la luz en un rango específico de longitudes de onda del espectro electromagnético. Los filtros fotométricos permiten a los astrónomos observar y analizar la luz emitida por los objetos celestes en diferentes bandas de color, lo que ayuda a obtener información detallada sobre sus propiedades físicas, composición y estructura.

Fuerza Gravitatoria Solar: La atracción gravitacional ejercida por el Sol sobre los cuerpos del sistema solar, que mantiene sus órbitas.

Iones: Átomos o moléculas que han perdido o ganado uno o más electrones, adquiriendo una carga eléctrica. Son comunes en plasmas y en las atmósferas de cuerpos celestes.

Inclinación Orbital: El ángulo entre el plano de la órbita de un cuerpo celeste y el plano de referencia, como el plano eclíptico en el caso de los planetas en el sistema solar.

Ionosfera: La capa de la atmósfera de un planeta que contiene una alta concentración de iones y electrones libres, afectada por la radiación solar.

Isofota: Línea en una imagen que conecta puntos de igual brillo o intensidad luminosa. Las isofotas se utilizan para analizar y representar la distribución de luz en objetos astronómicos, como galaxias, estrellas y cometas. Al trazar estas líneas en una imagen, es posible visualizar cómo varía el brillo en diferentes regiones del objeto, lo cual es útil para estudiar su estructura, morfología y características físicas. Las isofotas son análogas a las líneas de contorno en un mapa topográfico, pero en lugar de representar altura, representan niveles de brillo constante.

Longitud de Onda: La distancia entre dos puntos equivalentes en ciclos sucesivos de una onda, como de cresta a cresta o de valle a valle. Se utiliza para describir la naturaleza de las ondas electromagnéticas, sonoras y de otros tipos. Se mide generalmente en metros (m), aunque para ondas de luz, es común usar nanómetros (nm) o angstroms (Å).

Longitud de Onda Efectiva: La longitud de onda específica a la que un instrumento o detector es más sensible, utilizada para caracterizar la radiación electromagnética.

Materiales Refractarios: Sustancias que resisten temperaturas extremadamente altas sin descomponerse. En el contexto espacial, se refiere a los componentes que no se evaporan fácilmente en las condiciones del sistema solar primitivo.

Momento: Magnitud vectorial que describe el efecto de una fuerza aplicada a un objeto en términos de su capacidad para causar rotación o movimiento alrededor de un punto o eje.

Nubes Moleculares: Regiones del espacio donde el gas y el polvo se agrupan en densas concentraciones, permitiendo la formación de estrellas y planetas. Están compuestas principalmente de hidrógeno molecular (H₂).

Órbitas Retrógradas: Órbitas en las que un cuerpo celeste se mueve en dirección opuesta a la rotación principal del sistema, como ocurre con algunos satélites o cometas.

Paralaje: Desplazamiento aparente en la posición de un objeto cuando se observa desde dos puntos diferentes. En astronomía, se refiere al cambio aparente en la posición de una estrella u otro objeto celeste debido

al movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Este efecto se utiliza para medir distancias a estrellas cercanas, basado en el ángulo de desplazamiento observado.

Perihelio: El punto en la órbita de un cuerpo celeste en el que está más cerca del Sol. Es opuesto al afelio, el punto más alejado.

Planetesimales: Pequeños cuerpos sólidos que se formaron en el disco protoplanetario alrededor de una estrella joven. Son los bloques de construcción de los planetas, ya que, a través de colisiones y acreción, estos planetesimales se agrupan y forman protoplanetas y, eventualmente, planetas completos. Su tamaño varía desde unos pocos metros hasta varios kilómetros de diámetro.

Plano Eclíptico: El plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Sirve como referencia para medir las inclinaciones orbitales de otros cuerpos del sistema solar.

Presión de Radiación del Sol: La fuerza ejercida por la radiación solar sobre los cuerpos en el espacio, que puede afectar la trayectoria de partículas y cometas.

Radiación Térmica: La energía emitida por un cuerpo debido a su temperatura, en forma de ondas electromagnéticas. Es fundamental en el estudio de la temperatura y composición de cuerpos celestes.

Resolución: La capacidad de un sistema óptico para distinguir detalles finos y separar objetos cercanos en una imagen.

Silicato: Un tipo de mineral compuesto de silicio y oxígeno, comúnmente encontrado en la corteza terrestre y en cuerpos rocosos del sistema solar.

Unidades Astronómicas (ua): Unidad de medida que equivale a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, aproximadamente 149,6 millones de kilómetros. Se utiliza para expresar distancias dentro del sistema solar.

Viento Solar: Un flujo continuo de partículas cargadas, principalmente protones y electrones, emitido por la corona solar. Influye en la magnetosfera de la Tierra y en la formación de colas cometarias.

■ REFERENCIAS

- A'Hearn, M.F., Schleicher, D.G., Millis, R.L., Feldman, P.D., Thompson, D.T., 1984. Comet Bowell 1980b. *Astronomical Journal* 89, 579–591.
- Alfvén, H., 1957. On the theory of comet tails. *Tellus* 9, 92.
- Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Henry, F., Lellouch, E., Winnberg, A., Johansson, L.E.B., Gunnarsson, M., Rickman, H., Rantakyö, F., Davies, J.K., Dent, W.R.F., Paubert, G., Moreno, R., Wink, J., Despois, D., Benford, D.J., Gardner, M., Lis, D.C., Mehringer, D., Phillips, T.G., Rauer, H., 2002. The 1995 2002 Long-Term Monitoring of Comet C/1995 O1 (HALE BOPP) at Radio Wavelength. *Earth Moon and Planets* 90, 5–14.
- Edgeworth, K.E., 1949. The origin and evolution of the Solar System. *Monthly Notices of the RAS* 109, 600–609.
- Farnham, T.L., 2009. Coma morphology of Jupiter-family comets. *Planetary Space Science* 57, 1192–1217.
- Fernandez, J.A., 1980. On the exis-

- tence of a comet belt beyond Neptune. *Monthly Notices of the RAS* 192, 481–491.
- Fernández, J.A., Brunini, A., 2000. The Buildup of a Tightly Bound Comet Cloud around an Early Sun Immersed in a Dense Galactic Environment: Numerical Experiments. *Icarus* 145, 580–590.
- García, R.S., Gil-Hutton, R., García-Migani, E., 2020. Observational results for five short-period and five long-period comets. *Planetary Space Science* 180, 104779.
- García, R.S., Gil-Hutton, R., 2021. Photometry of four long-period comets. *Planetary Space Science* 206, 105308.
- García, R.S., Fernández-Lajús, E., Di Sisto, R.P., Gil-Hutton, R.A., 2024a. Photometric and numerical study of comet C/2021 A1 (Leonard) near its estimated disruption date. *Icarus* 420, 116206.
- García, R.S., Fernández-Lajús, E., Di Sisto, R.P., Gil-Hutton, R.A., 2024b. Photometry, rotation period determination and dust coma numerical study of comet C/2017 K2 (PanStarrs). *Icarus* 422, 116267.
- Jewitt, D., Luu, J., 1993. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB 1. *Nature* 362, 730–732.
- Keller, H.U., Kührt, E., 2020. Cometary Nuclei—From Giotto to Rosetta. *Space Sci Rev* 216, 14.
- Levison, H.F., 1996. Comet Taxonomy, in: Rettig, T., Hahn, J.M. (Eds.), *Completing the Inventory of the Solar System*, pp. 173–191.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Di Fabrizio, L., Dall’Ora, M., Palumbo, P., Snodgrass, C., Licandro, J., Della Corte, V., Tozzi, G.P., 2014b. Observational results for eight long-period comets observed far from the Sun. *Astronomy and Astrophysics* 561, A6. Doi:10.1051/0004-6361/201321290.
- Meech, K.J., Pittichová, J., Bar-Nun, A., Notesco, G., Laufer, D., Hainaut, O.R., Lowry, S.C., Yeomans, D.K., Pitts, M., 2009. Activity of comets at large heliocentric distances pre-perihelion. *Icarus* 201, 719–739.
- Oort, J.H., 1950. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bulletin Astronomical Institute of the Netherlands* 11, 91–110.
- Samarasinha, N.H., Larson, S., Besohre, E., 2006. Application of Image Enhancement Techniques to Comets: A Critical Analysis, in: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38*, p. 537.
- Schleicher, D.G., Farnham, T.L., 2004. Photometry and imaging of the coma with narrowband filters. pp. 449–469.
- Sekanina, Z., 1991. Randomization of Dust-Ejecta Motions and the Observed Morphology of Cometary Heads. *Astronomical Journal* 102, 1870.
- Smoluchowski, R., Torbett, M., 1984. doi:10.1038/311038a0.
- Tancredi, G., 2014. A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus* 234, 66–80. doi:10.1016/j.icarus.2014.02.013.
- Weidenschilling, A.H., 2004. Collisional and Dynamical Evolution of Planetary Systems. NASA STI/Recon Technical Report N.