

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1997. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

HYAKUTAKE, LA QUIMICA DE LOS COMETAS Y EL ORIGEN DE LA VIDA

Rafael Bachiller

Observatorio Astronómico Nacional (IGN)

Apartado 1143. 28800 Alcalá de Henares

Cometas, cometas,...

El espectacular cometa Hyakutake en el cielo impecable de las noches españolas de marzo de 1996 nos recordaba que dichos objetos merecen ser estudiados aunque sólo sea para comprender su apariencia cargada de magia y poesía. Los cometas despiertan nuestra imaginación aludiendo al lado más misterioso de la naturaleza, y es por ello que han apasionado a los científicos a través de los siglos. También los artistas, como tan bellamente ilustró Giotto en su fresco "La adoración de los magos", representando al cometa Halley en su paso de 1301, han experimentado una enorme fascinación. Y es que la aparición repentina de un objeto brillante que en algunas ocasiones puede cubrir el cielo de parte a parte ha sido un desafío para la mente humana a lo largo de la Historia. Este aspecto ha llevado a relacionar los cometas repetidamente con supersticiones e interpretaciones equívocas. Este mismo aspecto, tamaño y evolución llevaron a Aristóteles a asignarles una relación estrecha con la atmósfera terrestre. Sin embargo, las observaciones de cometas en la Europa medieval, que culminarían con la determinación de paralajes por Tycho Brahe y Kepler a finales del siglo XVI, indicarían la naturaleza interplanetaria de los cometas. Aunque habría que esperar al XVIII para que, con la predicción de Edmund Halley de que los cometas que habían pasado en 1531, 1607 y 1682 eran el mismo objeto que regresaría en 1758, se estableciese de forma elegante y rotunda que los cometas forman parte del Sistema Solar.

Hoy en día los cometas siguen siendo estudiados sin escatimar medios ni esfuerzos. En parte por que los cometas son laboratorios únicos en los que es posible estudiar el desarrollo de procesos químicos que son difícilmente reproducibles en los laboratorios terrestres. Además, por que los cometas guardan la composición del Sistema Solar primitivo, y con ella claves fundamentales para llegar a comprender la formación de nuestro sistema planetario.

El Sr. Hyakutake y su cometa

Como veremos, el año 1996 ha sido clave en el estudio de los cometas. La historia comenzó el 30 de enero, cuando Yuji Hyakutake, un astrónomo aficionado de 45 años de edad, fotógrafo de profesión, observando en su pueblo, Hayato, a unos 950 km al suroeste de Tokio, con sus binoculares gigantes de 25×150 montados sobre pedestal, descubrió un pequeño astro de magnitud 11. El Sr. Hyakutake se había aficionado a la astronomía y a los cometas en particular, a los 15 años de edad, cuando había contemplado el paso del cometa Ikeya-Seki en 1965. En la Navidad de 1995 había descubierto su primer cometa, C/1995 Y1, y desde entonces lo venía supervisando noche a noche. Fue precisamente explorando el campo en torno a C/1995 Y1 como dio con el nuevo astro más débil y pequeño (unos 2 minutos de arco frente a los 8 minutos del primero). El Sr. Hyakutake informó rápidamente al Observatorio Astronómico Nacional en Tokio de sus observaciones. La noche siguiente astrónomos profesionales le confirmaron que el objeto descubierto era un auténtico cometa que parecía dirigirse hacia la Tierra. En pocos días este cometa, que recibió naturalmente el nombre de su descubridor, se revelaría como uno de los más importantes de los últimos años. Yuji Hyakutake es ahora famoso. Es invitado a dar conferencias en Planetarios y en muchas Asociaciones de Astronomía. En otros tiempos, habría quizás recibido una medalla de oro, como las que otorgaba el rey de Dinamarca en el siglo XIX para premiar los descubrimientos de cometas.

El prodigioso Hyakutake

Durante el mes de febrero, el cometa Hyakutake aumentó su brillo hasta alcanzar magnitud 2,5 a mediados de marzo y fue desarrollando una cola que alcanzó pronto varios grados en el cielo. Pero fue a partir del 20 de marzo cuando realmente se desató la fiebre del cometa. Numerosos informes de astrónomos aficionados y profesionales anunciaban en periódicos y todo tipo de publicaciones lo prodigioso del cometa, cuya cola poseía ya una longitud de unos 45 grados, y de cuyas regiones nucleares surgían violentos chorros de materia. El telescopio espacial Hubble observó además unas eyecciones que parecían trozos sólidos expulsados directamente desde el núcleo. Hacia el 25 de marzo el cometa se encontraba tan sólo a unos 15 millones de kilómetros de la Tierra y alcanzó entonces un brillo de 0 magnitudes. El cometa estaba situado cerca de la Estrella Polar y se desplazaba a la velocidad pasmosa de 1 grado por hora. En muchos lugares del mundo, observatorios, planetarios, asociaciones diversas, esas noches fueron de

gran fiesta debido a las campañas de observación que se organizaron. Las páginas astronómicas de Internet estaban llenas de impresiones, descripciones, informes detallados procedentes de todos los rincones del globo.



Figura 1: El cometa Hyakutake a su paso en 1996.

A partir del 25 de marzo, el cometa comenzó a alejarse de la Tierra en dirección al Sol y la Luna creciente también dificultó la observación del cometa. Pero aún quedaba la noche, que resultaría inolvidable para muchos de nosotros, del 3 de abril, en el que un propicio eclipse total de Luna haría posible la observación del cometa, entonces con magnitud 2 y cercano de α Per. Mientras tanto Venus era visible en todo su esplendor cerca de las Pléyades. Esa noche de Miércoles Santo, no sólo se mantuvieron despiertos los gitanos que encendían hogueras en el Albaicín y en el Sacromonte granadinos para iluminar su procesión con luz irreal, sino que en muchos observatorios, incluyendo los españoles, se organizaron concurridas concentraciones para observar el espectáculo que discurrió parsimoniosamente en el cielo.

En la primera quincena de abril el cometa empezó a perder brillo rápidamente. Pasado el perihelio, el primero de mayo, el cometa fue observable en los amaneceres de ese mes desde el hemisferio sur. Pero la pérdida de brillo se acentuaba según el cometa se alejaba tanto del Sol como de la Tierra. A principios de junio ya no era visible a simple vista. Su ausencia durará unos 14000 años.

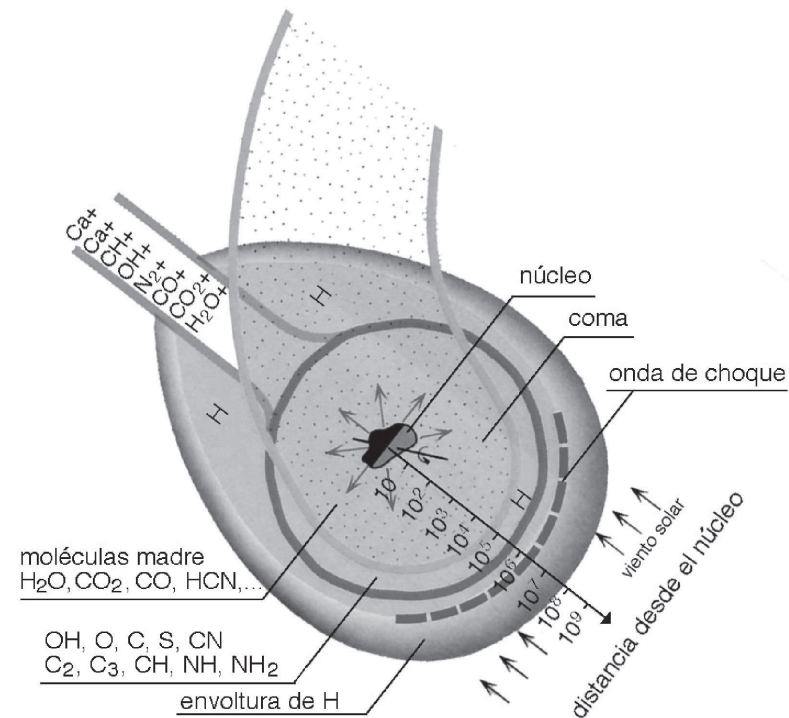
El Hyakutake en la astronomía profesional

Naturalmente, desde su descubrimiento el cometa Hyakutake despertó el interés de la astronomía profesional, y aunque no hubo tiempo de organizar una campaña internacional coordinada como en el caso del International Watching Group (Grupo de Vigilancia Internacional) del cometa Halley, en todos los observatorios se realizaron campañas de observación con lo mejor de su instrumentación. Otros proyectos de observación que habían sido preparados cuidadosamente durante meses o años anteriores debieron ceder los telescopios –tanto los terrestres como los espaciales– para que se realizasen las observaciones del cometa. En todos los casos mereció la pena, pues Hyakutake era espectacular a todas las longitudes de onda.

En rayos X, según se observó con el telescopio espacial ROSAT, Hyakutake era 100 veces más brillante que lo habitual en cometas de su tipo. La emisión, localizada en la parte de la coma que miraba al Sol, podría ser ocasionada por fluorescencia de las moléculas de agua (tras absorción de rayos X solares) producida en la zona sometida a la onda de choque que ocasiona el viento solar en esa parte delantera de la coma. En el ultravioleta, el óptico y el infrarrojo se obtuvieron espectros de alta sensibilidad que mostraron una gran riqueza de líneas atómicas y moleculares. Con el telescopio espacial ultravioleta, IUE, se detectaron líneas de C, O, S, C₂, CO₂⁺, CS y CO. El telescopio Hubble detectó intensas líneas de S₂. La zona del espectro en torno a los 5000 Å resultó estar dominada por las bandas de Swan del C₂. En el infrarrojo se detectaron un gran número de moléculas: H₂O, HDO, CO, CH₄ (metano), CH₃OH (metanol), C₂H₆ (etano), HCN, NH₃ (amoníaco) y C₂H₂ (acetileno).

Finalmente, también los radiotelescopios más potentes del mundo fueron apuntados en la dirección del cometa. En un experimento de radar, el radiotelescopio de 70 m de Goldstone pudo medir que el tamaño del núcleo del cometa era de tan sólo unos 2 km (a comparar con los 11 km del núcleo del Halley), lo que indicaba una altísima capacidad de producción gaseosa por unidad de área del cometa. Radiotelescopios trabajando a longitudes de onda milimétricas (los del IRAM en Sierra Nevada y en los Alpes, el JCMT en Hawaii, el NRO en Nobeyama) acreditaron la riqueza del espectro de Hyakutake en estas longitudes de onda. CO, HDO, CH₃OH, H₂CO (formaldehído), HCN, HNC, CH₃CN, H₂S y OCS fueron claramente detectados. A esta lista hay que añadir el NH₃ (amoníaco) detectado a longitudes de onda centimétricas. Muchas de estas especies no habían sido vistas en cometas antes, y es por eso que las observaciones del Hyakutake proporcionan una información valiosísima, sin precedentes, sobre la química que

tiene lugar en los cometas. Pero, ¿de dónde proceden todas estas moléculas? y, ¿cuál es su relevancia en el estudio del origen del Sistema Solar y de la vida en la Tierra?



Origen y estructura de los cometas

Parece ser que los cometas vienen de los confines del Sistema Solar, donde se encontraría un anillo polvoriento que contiene trozos de roca y masas de gases helados mezclados con partículas sólidas ("bolas de nieve sucia"). Ese anillo, que podría ser similar al anillo de asteroides que existe entre Marte y Júpiter, se llama "nube de Oort". Cuando en ese anillo se producen colisiones entre dos fragmentos, una de esas bolas de nieve sucia puede caer hacia el Sol. Al acercarse al Sol, una parte importante de los hielos que se encuentran mezclados con la materia rocosa se evapora a causa del calor solar: se trata de un cometa. La velocidad de escape típica

en un cometa es del orden de 1 m/s, por lo que la materia evaporada se escapa del cometa sin dificultad. Los gases son ionizados por la radiación solar y los iones negativos sufren una fuerza electromagnética ocasionada por el campo magnético solar. Se forma así una cola iónica que brilla por fluorescencia. Por otro lado, también hay partículas sólidas (granos de polvo) que son empujadas por la presión de radiación solar e iluminadas por la luz del Sol, formando una cola de polvo. Ambas colas son ocasionadas por fenómenos diferentes y no coinciden en el espacio.

La zona gaseosa en torno del núcleo (la "coma") posee moléculas en fase gaseosa en abundancia, que proceden de la sublimación de los gases que se encontraban helados originalmente. Es muy difícil estudiar la composición química del núcleo de un cometa. Sin embargo, mediante medidas espectroscópicas es posible estudiar la composición de los gases en la coma y se puede tratar de reconstruir después cuál era la composición química del núcleo. Hay que tener en cuenta que la sublimación de gases va acompañada de otros procesos, como fotodisociación y reacciones químicas endotérmicas, que pueden modificar potencialmente la composición química de los gases cometarios (las abundancias de las llamadas moléculas "madre"). Los cometas probablemente acaban muriendo por completa evaporación o convirtiéndose en un cuerpo inerte similar a un asteroide.

El hecho de que se encuentren muy pocos cometas describiendo órbitas hiperbólicas implica que los cometas se formaron junto con el Sistema Solar (no se trata de objetos capturados más tarde). Además, la similitud de la composición química de los cometas con la del medio interestelar (ver discusión más abajo) indica que los cometas fueron formados en el mismo proceso de colapso de una nube interestelar por el que se formó el Sol. De hecho, la composición de los núcleos cometarios es bastante similar a la de los planetas exteriores Urano y Neptuno, sugiriendo que los cometas se formaron concretamente en las regiones más externas y frías del Sistema Solar. Es por todo esto que los cometas son portadores de una información preciosa sobre la nube interestelar a partir de la que se formó el Sol. Esto ha sido muy bien ilustrado por las observaciones del Hyakutake. Estudiar la composición química de los cometas no sólo es interesante para comprender la formación de nuestro Sol, sino para avanzar en el estudio de los procesos de formación estelar en general.

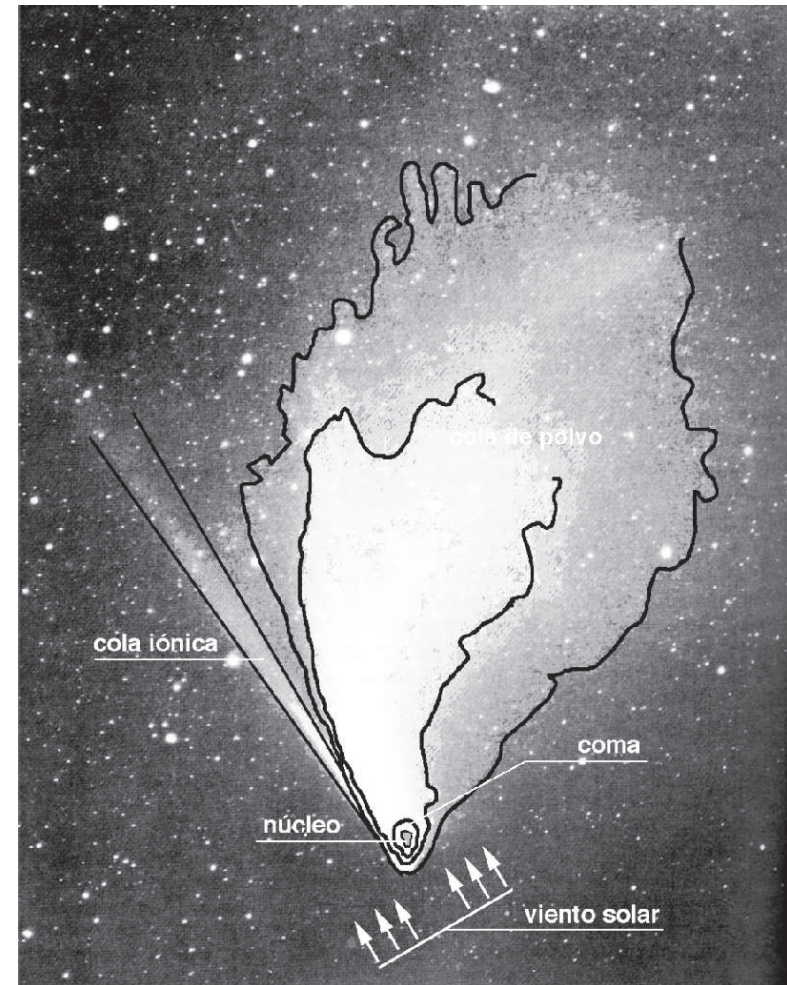


Figura 3: Esquema de las colas de un cometa superpuesto a una imagen del Mrkos obtenida en 1957.

Sublimación de hielos

La sublimación de hielos, además de en los cometas, tiene lugar en otros contextos astrofísicos. En su proceso de formación, una estrella eyecta unos energéticos chorros de gas a alta velocidad que se propagan en el medio circundante formando ondas de choque. Estas ondas comprimen y calientan las zonas por las que pasan y ocasionan la sublimación de los hielos que se encontraban en las superficies de los granos de polvo interestelar. Los procesos físico-químicos que tienen lugar en estos ambientes son, en gran medida, similares a los que tienen lugar en los cometas. Junto con el Dr. D. Despois del Observatorio de Burdeos, astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional hemos comparado las abundancias moleculares medidas en el cometa Hyakutake con las que se encuentran en las zonas de choque producidas por la protoestrella L1157-mm. Esta comparación tan detallada revela similitudes muy notables, confirmando que la composición del polvo contenido en los cometas es muy similar a la del polvo interestelar. Los cometas, por tanto, han guardado las propiedades de la nube interestelar a partir de la que se formó el Sol y sus materiales no han sido alterados considerablemente durante los procesos de colapso.

Los cometas y el origen de la vida

La vida en la Tierra data de hace por lo menos 3,5 gigaaños (3.500 millones de años). De acuerdo con la teoría clásica desarrollada por Oparin, la vida se produce mediante reacciones puramente químicas (abiológicas) entre moléculas orgánicas. Dicha teoría recibió el espaldarazo de los experimentos de Miller, en los que se produjeron aminoácidos a partir de una mezcla de CH_4 , NH_3 y H_2O sometida a descargas eléctricas.

Parece, por tanto, que la formación de la vida en la Tierra necesitó de la presencia de compuestos orgánicos y de compuestos volátiles (como el agua). Sin embargo, hay muchas razones para pensar que la Tierra era muy pobre en ambos tipos de compuestos. Se sabe que la atmósfera terrestre de hace 3,5 gigaaños era diferente de la actual. Que la atmósfera actual es "secundaria" (es decir, adquirida tras la formación del planeta) lo sugiere su escasez en ciertos elementos y, en particular, en gases nobles pesados (xenón y criptón) que deberían ser mucho más abundantes si la atmósfera hubiese sido tomada de la nebulosa protosolar. Sigue siendo un misterio cómo se formó esta atmósfera secundaria. Si, como se menciona a veces, la atmósfera se generó mediante la liberación de gases que quedaron atrapados en el interior del planeta durante su formación, no se comprende

por qué hay tales diferencias con las atmósferas de los otros planetas de tipo terrestre (Marte y Venus).

Actualmente, excepto en la Tierra, los compuestos orgánicos parecen muy escasos en el Sistema Solar interno. Sin embargo, el material orgánico es mucho más abundante en el anillo de asteroides y en los satélites de los planetas gigantes. Se podría pensar que las moléculas orgánicas eran más abundantes en la atmósfera terrestre primitiva. Pero si esas moléculas fueron abundantes, deberían haberse destruido muy rápidamente, como probablemente sucedió en Venus y Marte. En resumen, aunque el Sistema Solar interno poseyese el agua que es necesaria para el crecimiento de la vida, el material orgánico era posiblemente mucho más abundante en las regiones externas de nuestro sistema planetario. Un investigador español, Juan Oró, fue el primero en sugerir en un artículo muy influyente, publicado en la revista "Nature" en 1961, que los cometas podrían haber jugado un papel importante transportando compuestos orgánicos desde la periferia del Sistema Solar a los planetas interiores.

Pero todavía más, hoy en día no se excluye que los cometas hayan jugado un papel importante incluso en el transporte de compuestos volátiles hacia los planetas terrestres. Dado que dichos planetas fueron formados en las regiones más calientes de la nebulosa protosolar, son pobres en dichos compuestos volátiles (la razón C/Si en la Tierra es diez mil veces menor que el promedio solar). Hay estimaciones que muestran que el agua contenida en un océano terrestre podría haber sido transportada a la Tierra por cometas hace entre 4,5 y 3,8 gigaaños. La cantidad de material orgánico transportado simultáneamente sería enorme (un diez por ciento del agua). Sin duda, una parte de este material orgánico se destruiría en la onda de choque que se produce al entrar en la atmósfera, pero otros compuestos también orgánicos se sintetizarían en la misma zona de choque.

Naturalmente los pequeños cometas, como Hyakutake, que además no caen directamente sobre la Tierra, no depositan una cantidad significativa de su material en nuestro planeta. Sin embargo, con aviones volando a gran altitud, se pueden recoger partículas de polvo que han sido expelidas por cometas y que han entrado en la atmósfera sin destruirse.

El hecho de que los cometas contengan todos los ingredientes necesarios para la vida llevó a dos célebres astrónomos de Cardiff, Hoyle y Wickramasinghe, a especular en los años 70 que la vida podría surgir en los cometas mismos y que podría ser dispersada en el Universo por ellos. Se llegó a especular incluso que los cometas podrían ser causa de epidemias víricas. Sin embargo, estas teorías no son consideradas muy seriamente hoy

en día. Los experimentos de Miller mostraron que la síntesis de aminoácidos requería que la mezcla de material orgánico fuese sometida a descargas eléctricas. Un efecto similar se obtendría calentando la mezcla e irradiándola. En un cometa, la radioactividad interna del núcleo es una fuente de calor, pero la zona calentada por ese mecanismo parece estar muy escondida de la luz solar. Además se necesita agua en estado líquido, difícil de formar de forma duradera en los cometas. Parece por tanto improbable que se origine vida en los cometas directamente.

Sin embargo, como hemos discutido antes, sí que resulta muy plausible que los cometas hayan ayudado de forma decisiva a crear en la Tierra las condiciones necesarias para el cultivo de vida mediante el transporte de material orgánico y de compuestos volátiles. Este proceso es tanto más probable como que el flujo de cometas en el entorno terrestre era posiblemente mucho mayor hace 3,5 gigaños que en nuestros días. Tanto la superficie de la Tierra como la de Venus han cambiado notablemente desde aquella época hasta ahora. Pero, afortunadamente, una buena parte de la superficie de Marte no ha sido muy alterada durante este período. Es por esto que el estudio de Marte y de los cuerpos de su entorno pueden aportar informaciones clave que podrían datar de la época en que surgió la vida. El descubrimiento de indicios de algún tipo de actividad biológica en una roca marciana, tal y como lo anunció la NASA en agosto de este mismo año (1996), será sin duda de gran trascendencia a la hora de poner a prueba las teorías vigentes sobre el origen de la vida y el papel que pudieron jugar los cometas en ese proceso.

Una discusión más amplia sobre el origen de la vida en la Tierra puede encontrarse en el artículo de Jesús Martín-Pintado en este mismo ANUARIO.

La aventura continúa

A pesar del flujo enorme de datos proporcionado por el cometa Hyakutake, el estudio de la química cometaria dará aún mucho que hablar en el futuro. En septiembre de 1995, mediante observaciones con el radiotelescopio del IRAM en Sierra Nevada, ya se había detectado la presencia de monóxido de carbono en el cometa C/1995 O1, el Hale-Bopp. A medida que este cometa se va aproximando a la Tierra se van detectando más y más especies volátiles y orgánicas. Por ejemplo, CS, H₂CO, H₂S, CH₃OH y HCN han sido detectados en el primer semestre del 96, cuando el cometa se encontraba aún a una gran distancia del Sol. Hale-Bopp también está siendo observado con los telescopios en órbita. El telescopio espacial in-

frarrojo ISO ya ha detectado las bandas a 4,3 micras del dióxido de carbono (CO₂). Hale-Bopp parece tener una capacidad de liberación de gases realmente extraordinaria, lo que podría conducir a la detección de especies menores que permanecen sin detectar en cometas. Se espera que Hale-Bopp será el gran cometa de 1997. Se estima que su brillo intrínseco será unas 100 veces mayor que el de Hyakutake. Pero dado que en el punto de mayor proximidad con la Tierra se encontrará unas 10 veces más lejos de lo que estuvo Hyakutake, se espera que ambos tendrán un brillo aparente comparable.

Las misiones espaciales serán particularmente importantes en el estudio de los cometas. Además de las observaciones a realizar por los telescopios actualmente en plataformas espaciales, debemos mencionar la misión Roseta en la que se planea que una nave espacial se desplace hasta un cometa para tomar una muestra. El análisis de esa muestra podrá ser extremadamente detallado, revelándose así la composición química hasta niveles ínfimos. El conocimiento de esa composición y, en particular, de las razones isotópicas de los diferentes elementos, resolverá sin duda una buena parte de los enigmas planteados hoy en día.



Figura 4: El cometa Mrkos a su paso en 1957, en el que se aprecian la cola (recta) de iones y la cola (curvada) de polvo.