

Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial:

Un Método Para El Estudio De La Actividad Cometaria

Pedro Ignacio Deaza Rincón

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

Índice general

Dedicatoria	v
Prefacio	vii
Agradecimientos	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
BREVE HISTORIA	1
IMPORTANCIA DE LA FÍSICA DE LOS COMETAS	4
LA CIENCIA COMETARIA ACTUAL	5
INTERROGANTES EN LA FÍSICA DE LOS COMETAS	8
ACERCA DE ESTE TRABAJO	10
2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS COMETAS	13
INTRODUCCIÓN	13
EL NÚCLEO COMETARIO	14
LA COMA DE UN COMETA	17
LA COLA DE UN COMETA	18
ÓRBITAS COMETARIAS	20
METEOROS	21
LUZ ZODIACAL	22
3. LA CURVA DE LUZ DE UN COMETA	23
INTRODUCCIÓN	23
EL BRILLO Y LA MAGNITUD DE UN COMETA	24
MAGNITUD OBSERVADA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	25
MAGNITUD HELIOCÉNTRICA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	28

MAGNITUD HELIOCÉNTRICA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA AL SOL	30
4. LA ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA	41
INTRODUCCIÓN	41
MODELOS FÍSICOS DE ACTIVIDAD DEL NÚCLEO COMETARIO	42
ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA	43
5. ACTIVIDAD DEL NÚCLEO COMETARIO	49
INTRODUCCIÓN	49
LA MAGNITUD HELIOCÉNTRICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL	49
TEMPERATURA SUPERFICIAL MÁXIMA	54
CONCLUSIONES	59
PERSPECTIVAS	61
Apéndice A	62
A. CONSTANTES FÍSICAS	63
Apéndice B	64
B. GRANDES TELESCOPIOS	65
Apéndice C	66
C. COMETAS	67
Apéndice D	69
D. MISIONES A COMETAS	69

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
Apéndice E	71
E. ECUACIÓN DE POGSÓN	71
Apéndice F	73
F. ECUACIÓN DE CLAUSIUS CLAPEYRON	73
Bibliografía	77

Dedicatoria

Dedicado a los más minúsculos productos de la gravitación, a los extraños mensajeros de los más recónditos secretos y misterios de nuestro sistema planetario, a quienes cuál dioses de la mitología albergán la posibilidad de originar la vida o aniquilarla también. Como un homenaje a los objetos que espectacularmente adornán y embellecén el cielo de nuestro planeta con obras de arte en las que se ocultan de manera delicada las leyes fundamentales de la física.

Prefacio

En este trabajo se presenta un Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial para los cometas, que se deriva del estudio y posterior combinación de la curva de luz de un cometa con la ecuación de balance de energía aplicada a la superficie del núcleo cometario.

El estudio de la evolución cometaria es complejo y en el prevalecen muchos problemas sin resolver. Cuando se aborda el estudio de la evolución de estos objetos se utilizan varias herramientas entre ellas la curva de luz, la ecuación de balance de energía, la espectroscopía, la fotometría visible e infra-roja.

La curva de luz permite deducir propiedades físicas tales como su magnitud absoluta, posición orbital del inicio y final de los procesos de sublimación, estimaciones que permiten comparar estados térmicos antes y después de su paso por el perihelio, aproximaciones a la pérdida de masa por unidad de tiempo en la zona de actividad del núcleo.

La ecuación de balance de energía ha permitido generar modelos de evolución cometaria sobre todo de la actividad del núcleo a su paso por el sistema solar interior.

El Diagrama Magnitud Reducida-Temperatura Superficial que se propone, es el resultado de combinar de modo simple los resultados de la curva de luz con la ecuación de balance de energía.

Se aplica el diagrama a los cometas Halley, Hale Bopp, Hyakutake, Muller, Tempel 1, Schaumasse, Takamizawa-Levy, Nakamura-Nishimura-Machholz y a los fragmentos B, C y G, R del cometa 73P/Schwassmann-Wachmann - 2006 y se realiza un análisis cualitativo general y a la vez comparativo.

Finalmente, utilizando el Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial, se desarrolla un método para la determinación de la Temperatura Superficial Máxima del núcleo cometario. El método se aplica a los cometas C/1995 O1 (Hale-Bopp), 19P/Borrelly - 2001/02, 21P/Giacobini-Zinner - 1998, C/2002 C1 (Ikeya-Zhang), C/2006 A1 (Pojmanski).

Agradecimientos

Mis mas sinceros agradecimientos.....

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

BREVE HISTORIA

Lucio Anneo Séneca, el brillante filósofo, hijo de un famoso maestro de retórica, Marco Anneo Séneca, (Comellas J. L., Cruz M. [6]. Sagan C., Druyan A. [27]) fue indudablemente de los sabios de la antigüedad quien mejor explicó la naturaleza de los cometas, se opuso a la tesis de Aristóteles que los imaginaba exhalaciones de gases terrestres que se incendiaban al llegar a las alturas, Séneca veía en ellos objetos siderales, así escribió sobre los cometas: "estos astros se hacen visibles cuando se acercan a nosotros y desaparecen cuando se adentran en las profundidades del espacio como los peces en lo hondo del mar". "Aun no es posible debido a su rareza conocer su órbita ni saber si su regreso es periódico...pero llegará un día en que se conoceran las leyes que rigen el movimiento de los cometas". Séneca descubrió incluso una ley que solo sería explicada debidamente por la física y la astronomía del siglo XX **Comae radios solis effugiunt** Las colas de los cometas se extienden opuestas a los rayos del sol.

Una observación más detallada y sistemática en 1531 condujo a Peter Apian a la misma conclusión de Séneca: la cola de los cometas apunta siempre en dirección opuesta al sol.

Un cometa diferente al Halley fue observado en 1577 y el astrónomo Tycho Brahe dedujo que el objeto se movía en el espacio a una distancia mayor que la de la luna y que no era una "exhalación furiosa" en la atmósfera como creían Aristóteles y sus contemporáneos. (Gibilisco S. [16]), (Calder N. [5]).



Figura 1.1. De izquierda a derecha: Lucio Anneo Séneca, Peter Apian, Tycho Brahe.

Johannes Kepler observó el cometa Halley en 1607 y sus observaciones y cálculos del movimiento lo condujeron a creer que el Halley se movía en línea recta.

A finales del siglo XVII el físico Isaac Newton mediante su elegante teoría de la gravitación universal dedujo que muchos cometas de baja velocidad deberían describir una órbita cerrada, elíptica, aunque de mayor excentricidad que la de los planetas.



Figura 1.2. De izquierda a derecha: Johannes Kepler, Isaac Newton, Edmund Halley.

En 1705, el astrónomo británico Edmund Halley escribía: "Muchos motivos me inducen a pensar que el cometa del año 1531, observado por Apiano, es el

mismo que fue descrito en 1607 por Kepler y Longomontanus y que he visto y observado yo personalmente en su paso de 1682... puedo así con fiadamente predecir su retorno para 1758. Si esta predicción se cumple, no habrá razón para dudar que regresan otros cometas”.

Edmund Halley murio en 1742, y su predicción acerca del retorno del cometa, fue confirmada en la navidad de 1758, cuando fue observado por el astrónomo aficionado Johan Palitzsch en las cercanias de Dresden. El cometa fue recordado un mes mas tarde por el astrónomo profesional Charles Messier y en adelante se denomino Cometa Halley.

Las técnicas fotograficas fueron empleadas por primera vez en 1858 con el Cometa Donati. Con el Cometa Tebbutt en 1881 y con el gran cometa de 1882 se consolido la fotografía como una técnica para el estudio de los cometas y la investigación astronomica en general. Con el cometa Tebbutt se inicio tambien la espectroscopía cometaria por parte de William Huggins y la fotometría con J Janssen.

En septiembre de 1909 el Cometa Halley fue fotografiado por Max Wolf, el 19 de mayo de 1910 el Halley paso a solo 18 millones de kilómetros y parte de su cola envolvió durante unas horas nuestro planeta. (Fig. 1.3)



Figura 1.3. Cometa Halley, mayo de 1910, Observatorio Lick (izquierda).
Cometa Halley, Marzo de 1986, Pedro I. Deaza R. Colombia (derecha).

El 9 de febrero de 1986 en su paso por el perihelio a 88 millones de kilómetros del sol su distancia a la tierra fue de 237 millones de kilometros aproximadamente (fig. 1.2).

IMPORTANCIA DE LA FÍSICA DE LOS COMETAS

El estudio de los cometas en la antigüedad se caracterizó fundamentalmente por la superstición. La importancia del estudio de los cometas residía en asociar la aparición de estos con grandes catástrofes, terribles tragedias y espantosas guerras con el fin último de predecir lo que ocurriría. Un gran cometa irrumpió en el cielo el año 11 antes de nuestra era haciéndose visible en todo el Imperio Romano. Se atribuyó a aquel gran cometa la muerte del general Agripa. En el verano del año 451 un cometa de gran cola se hizo visible en el cielo de occidente, Atila iniciaba la invasión del decadente Imperio Romano. Si el cometa presagiaba un triste final, lo fue para los invasores. En el año 837 apareció un terrible cometa con el que se anunciaron grandes tragedias y la muerte del emperador Ludovico Pio. (Comellas J. L., Cruz M. [6]). No ocurrió ninguna tragedia, ni Ludovico murió. Independientemente del desarrollo de la ciencia la herencia de la superstición ha sobrevivido incluso a nuestro tiempo, en 1910 se anunció que la tierra chocaría con la cola de un cometa la noche del 18 al 19 de mayo, el pánico se hizo patético y mientras varios se preparaban para la muerte otros se suicidaron en París y Nueva York para no presenciar el fin del mundo. El fin del mundo no ocurrió. Las anteriores historias de apariciones del Halley asociadas a catástrofes precedieron a la aparición del gran cometa de 1997, el Hale-Bopp al que se le asoció con la predicción de la última gran guerra mundial que acabaría con la humanidad.

Desde el siglo XVII y hasta el apareamiento de la tecnología aeroespacial y los grandes complejos astronómicos de la década de 1960, la ciencia cometaria se centró fundamentalmente en el cálculo y la determinación de las órbitas de los cometas. A partir del estudio orbital de los cometas se intentaba explorar el lugar de procedencia de estos singulares objetos y también su origen. La importancia de la ciencia cometaria en este periodo se acentó en la posibilidad de alcanzar un mayor entendimiento de la mecánica planetaria y la teoría de las perturbaciones planetarias. (Festou M. C., Keller H. U. Weaver

H. A. [14]), (A'Hearn M. F. [1]).

Con el desarrollo de la tecnología aeroespacial, la construcción de grandes complejos astronómicos y el emplazamiento de telescopios orbitales, la física cometaria enfoca toda su atención al estudio del núcleo cometario, su estructura interna, su composición química y su evolución termodinámica. En la actualidad la física de los cometas ha adquirido una enorme importancia para el desarrollo y avance de los siguientes tópicos: *Origen del sistema solar y evolución de la nebulosa primordial, extinción repentina de especies a causa de la colisión de la tierra con un cometa, origen de la vida y del agua en la tierra, prevención contra futuras colisiones de la tierra con cometas o asteroides.*

LA CIENCIA COMETARIA ACTUAL

La ciencia cometaria actual es el resultado de la combinación de tres poderosos y robustos ingredientes:

La observación sistemática con grandes telescopios en tierra, telescopios orbitales y una red global de pequeños telescopios compartidos con profesionales y aficionados.

Observación y exploración in situ mediante misiones aeroespaciales enviadas a cometas.

Los modelos teóricos apoyados en la simulación computacional utilizando grandes y complejos arreglos de procesadores en paralelo.



Figura 1.4. El gran arreglo de telescopios, Chile. (izquierda). Mauna Kea Hawaii. (centro). Islas Canarias. (derecha).

Los complejos astronómicos construidos por Europa y Estados Unidos en el sur del continente americano, en Chile, las instalaciones estadounidenses de

Hawaii, el consorcio de observatorios de las Islas Canarias, constituyen un conjunto de grandes y sofisticados telescopios en tierra.

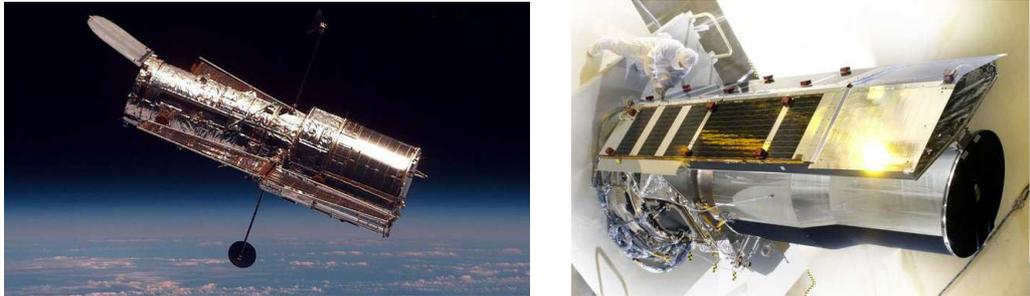


Figura 1.5. Telescopio espacial Hubble. (izquierda). Telescopio espacial Spitzer. (derecha).

Los telescopios espaciales, entre los que se destacan el Hubble y el Spitzer, dos instrumentos de elevada calidad y que han generado extraordinarios avances en la investigación astronómica y astrofísica.

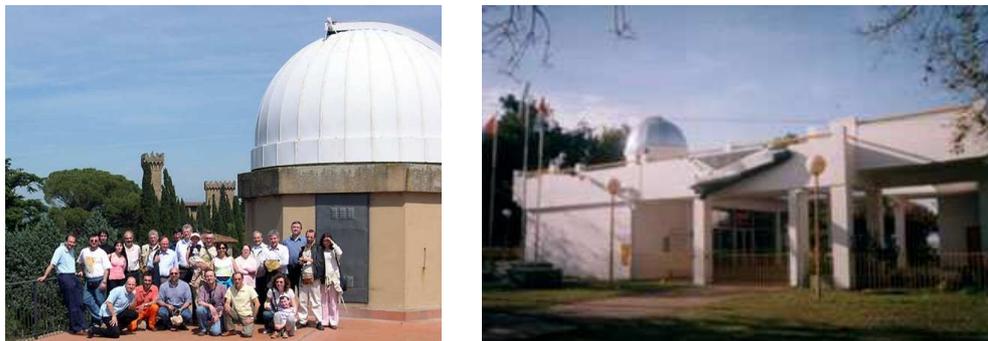


Figura 1.6. Astrónomos profesionales y aficionados, Arcetri, Italia. (izquierda). Centro De Observadores Del Espacio CODE, Sede de la LIADA, Santa Fe, Argentina. (derecha).

Como complemento vital están las redes de pequeños telescopios y observadores de cometas entre los que se destacan los grupos italianos y la red de observadores de cometas de la Liga Iberoamericana de Astronomía Liada. El primer cometa observado in situ fue el 21/Giacobini-Zinner, el 11 de septiembre de 1985 por la sonda espacial ICE. Esta sonda espacial en principio

fue denominada Third International Sun-Earth Explorer (ISEE-3) lanzada en 1978 con el propósito de estudiar la interacción del viento solar con la magnetósfera terrestre.

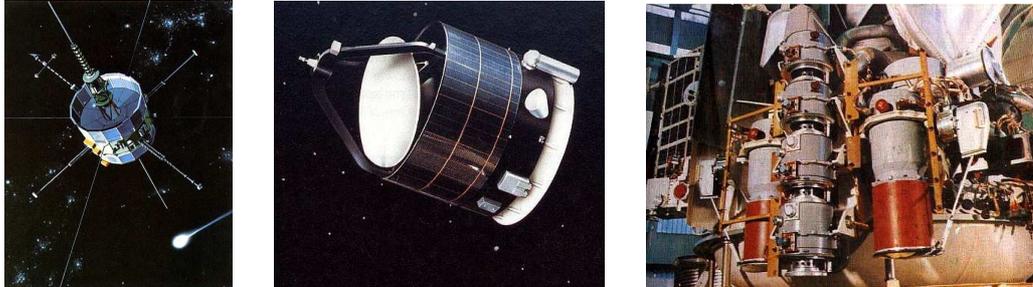


Figura 1.7. International Cometary Explorer ICE. (izquierda). Giotto. (centro). Proyecto Vega. (derecha).

Para 1985 se le cambió el nombre por el de International Cometary Explorer (ICE) y se utilizó para que atravesara la cola de plasma del cometa Giacobini-Zinner. En marzo de 1986 seis sondas espaciales de diferentes agencias aeroespaciales realizaron extensivas y detalladas mediciones de propiedades físicas de la coma y la cola del cometa Halley. La nave Giotto de la European Space Agency's tomó mediciones a una distancia aproximada de 600 km del núcleo. Las naves rusas Vega 1 y Vega 2 realizaron su exploración a una distancia de 8000 km del núcleo. Las sondas espaciales japonesas Suisei y Sakigake exploraron a una distancia aproximada de 150000 km y 7600000 km respectivamente. La sonda ICE pasó a una distancia de 0.2 U.A. En julio de 1990 la nave Giotto fue redireccionada para acercarse en una misión exploratoria al cometa 26P/Grigg-Skjellerup el 10 de julio de 1992. En septiembre de 2001 la misión Deep-Space-1 permitió realizar observaciones del cometa 19P/Borrelly.



Figura 1.8. Suisei. (izquierda). Rosetta. (centro). Deep Impact. (derecha).

Rosetta fue la primera misión espacial que acompañó un cometa a lo largo de un intervalo de su trayectoria orbital para estudiar la evolución de las propiedades físicas de la coma y de la cola, así como la actividad del núcleo en función de la variación de la distancia heliocéntrica; El cometa elegido fue el 67P/Churyumov-Gerasimenko. El cometa 81P/Wild-2 fue observado sistemáticamente con la nave Stardust. El más reciente y espectacular experimento de observación, exploración y medición de las características físicas de un cometa se realizó en julio de 2005 cuando la misión Deep Impact se acercó al cometa 9P/Tempel-1 para estudiarlo y analizar la superficie utilizando un impactor que colisionó con su superficie. (Huebner W. F., Benkhoff J., Capria M. T., Coradini A., De Sanctis, C., Orosei R., Prialnik D. [19]). Los modelos teóricos desarrollados se fundamentan en alguno de los cuatro modelos existentes del núcleo cometario:

Bola de nieve sucia (Dirty snow ball) [Whipple, 1950].

Apilado primordial de piedras (Primordial rubble pile) [Weissman, 1986].

Goma de hielo (Icy-glue) [Gombosi and Houppis, 1986].

Agregado esponjoso (Fluffy aggregate) [Donn, 1991].

a partir de ellos se asumen características topográficas de la superficie, densidad, composición química y nivel de porosidad de la estructura. Una vez asumidas estas condiciones se procede a realizar un balance de energía en la superficie del núcleo cometario teniendo en cuenta su interacción con el viento solar. El resultado del modelo se lleva a una simulación computacional y se compara y ajusta con los datos de la observación.

INTERROGANTES EN LA FÍSICA DE LOS COMETAS

La física de los cometas es una activa línea de investigación y dada la importancia adquirida en las últimas décadas se dispone de tecnología, foros de discusión y eventos que permiten el estudio y profundización de los diversos tópicos.

El estudio del origen y formación de estos singulares objetos esta rodeado de complejos interrogantes que se hallan estrechamente relacionados con el origen del sistema solar, la evolución de la nebulosa primordial e incluso con la

evolución galáctica. Es notorio que existan cuatro modelos de la estructura del núcleo cometario, este hecho revela que no obstante la tecnología existente y los grandes esfuerzos aun no se dispone de un cuadro físico completo de la estructura del núcleo de un cometa. Con la moderna instrumentación y las sofisticadas herramientas contemporaneas, ha sido posible desde la década de 1990 observar con mayor detalle los procesos de fragmentación cometaria tan fundamentales en la búsqueda de respuestas a interrogantes claves de la física de los cometas.

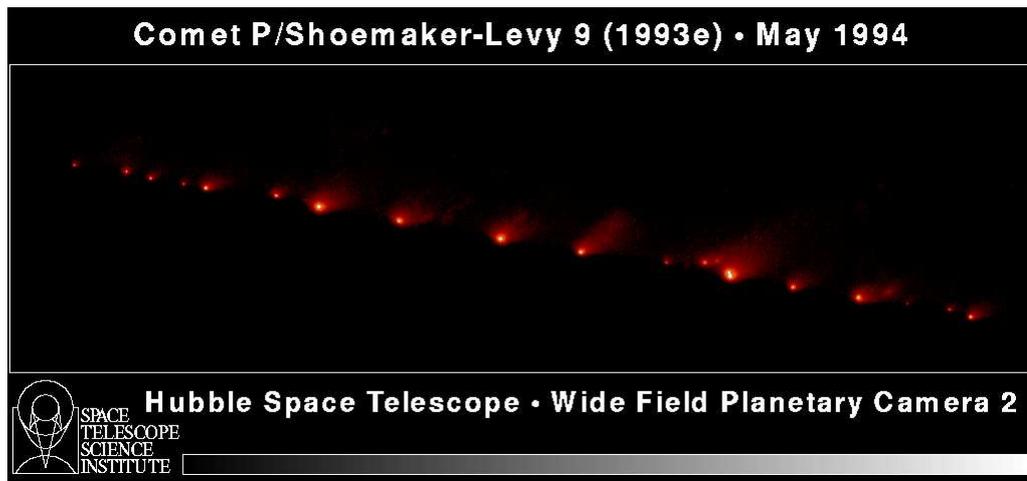


Figura 1.9. Fragmentos del Cometa P/Shoemaker-Levy 9 1993e.

En 1994, se observó la fragmentación del cometa Shoemaker-Levy 9 y su posterior colisión con el planeta Júpiter. En esta ocasión, se puso a prueba la elevada precisión de los instrumentos de observación y la potencia de la mecánica analítica aplicada al estudio del movimiento planetario.



Figura 1.10. Cometa Hyakutake C/1996 B 2. Desconexión de la cola iónica. (izquierda). Imagen ampliada de la desconexión (derecha). Alberto Sommi, Luigi Di Meco, marzo 25 1996, Champorcher, Italia.

Otro interesante problema surge de la interacción del cometa con el viento solar, en particular con la cola iónica. Cuando el cometa ingresa a una nueva región del campo magnético solar, su cola iónica se rompe y se desconecta de éste alejándose inmersa en el viento solar. Una de las herramientas utilizada desde hace varias décadas para el estudio de los cometas es la curva de luz, no obstante en la actualidad se discuten muchos problemas asociados con esta técnica.

Hemos mencionado algunos interrogantes planteados en el contexto de la física de los cometas. Desde luego que existen una gran cantidad de problemas igualmente interesantes. Basta con asomarnos aunque sea timidamente al mundo de la física de los cometas, para percibir que ella es tan compleja como atractiva.

ACERCA DE ESTE TRABAJO

Los primeros estudios fotométricos de los cometas utilizando técnicas fotográficas y telescopios modernos se remontan a la aparición del Cometa Halley en 1910. Hasta 1960 podríamos afirmar que no hubo una observación sistemática y secuencial de los cometas y en particular de su conducta fotométrica. En la década de lo 70 con la construcción de los grandes complejos destinados a la observación astronómica no solo fue posible la asignación sistemática de horas dedicadas a la observación de cometas, sino también cúpulas especializadas para la astrofísica cometaria. Con lo anterior se perfeccionaron los métodos fotométricos y se consolidó la técnica observacional de las curvas de luz como herramienta para analizar la radiación electromagnética proveniente de los cometas, demostrándose posteriormente que la mayor parte de la radiación proveniente del cometa es radiación reflejada que éste recibe del sol. No obstante se pudo descubrir que a pesar de que el mayor porcentaje es radiación del sol reflejada por el cometa, ésta trae consigo información valiosa acerca de la manera como la superficie del núcleo cometario interactúa con el viento solar. En los años 1980 la curva de luz se convirtió en la herramienta fundamental a través de la cual los astrofísicos pudieron deducir propiedades físicas de la actividad del núcleo cometario tales como el inicio y final de los procesos de sublimación, la masa perdida por unidad de tiempo cuando éste interactúa con el viento solar, estimaciones de su temperatura superficial y algunas ideas acerca de su composición química. A partir de los años 80 aparecen los primeros artículos en los que se desarro-

llan modelos de la termodinámica del núcleo cometario y en los años 1990 se comienza a pensar en la confrontación de estos modelos con la observación. En el Congreso Nacional de Astronomía, realizado en 1999 en la Universidad Tecnológica de Pereira representando a la Universidad Distrital expuse una ponencia oral en la que se proponía fundir el método de la curva de luz con el modelo termodinámico para el núcleo cometario y así poder tener una herramienta alternativa para analizar cualitativamente la conducta termodinámica del núcleo cometario. El intento no prosperó dadas las dificultades matemáticas y también el escaso intercambio con la comunidad académica internacional. Posteriormente en el año 2004 un intercambio con Ferrin I. de la Universidad de los Andes de Mérida, Venezuela, proporcionó algunas pistas. Finalmente los preparativos para el III Taller de Ciencias Planetarias realizado en marzo de 2006 en Colonia del Sacramento en Uruguay, permitió obtener los primeros resultados satisfactorios. Una puesta a prueba del método con las observaciones de los fragmentos del Cometa Schwassmann-Wachmann, nos informará acerca de la viabilidad del método, su validez y fiabilidad.

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS COMETAS

INTRODUCCIÓN

Las características físicas de los cometas se originan, desarrollan y se constituyen en fenómenos observables cuando el núcleo cometario ingresa al interior del sistema solar e interactúa con el viento solar. A distancias aproximadas de 6 U.A. o menos, la energía adquirida por el núcleo en el intercambio con el viento solar, es suficiente para sublimar los hielos de la envoltura y con ello generar una atmósfera o coma que puede alcanzar dimensiones que van desde los $10^4 km$ a $10^6 km$ de diámetro. Una segunda coma más externa y gigantesca que la visible se genera formada por hidrógeno atómico y que emite radiación ultravioleta, esta coma exterior puede alcanzar los $10^7 km$ de diámetro. La interacción con el viento solar también contribuye a la formación de la cola de polvo y de la cola iónica, esta última adquiere muchos de sus rasgos físicos a causa del campo magnético solar. Como un cometa pierde material en su paso por el sistema solar interior, una gran cantidad de partículas de polvo micrométricas quedarán como testimonio del paso del cometa. Estas partículas se manifiestan físicamente a través de las lluvias de meteoros y de la luz zodiacal. (Deaza P. [8]).

EL NÚCLEO COMETARIO

Las mejores imágenes obtenidas con telescopios de alta resolución emplazados en tierra, conducen a la siguiente descripción del núcleo cometario: El núcleo de un cometa es de forma irregular, la superficie es muy oscura, con un albedo de bond promedio entre 0.01 a 0.04, esta oscuridad superficial podría ser causada por componentes orgánicos y silicatos como propuso Thompson en 1987. La superficie varía en topografía, rugosidad, estructura y albedo. Se observan muy pocos cráteres en comparación con imágenes asteroidales, lo que sugiere una joven y activa superficie. Su densidad estimada es baja, del orden de $100 \frac{kg}{m^3}$ a $1500 \frac{kg}{m^3}$, indicando una elevada porosidad dominando su estructura.

La determinación del tamaño del núcleo cometario a partir de observaciones en tierra, es difícil. Cuando el cometa ingresa al sistema solar interior el polvo y el gas de la coma ocultan el núcleo. A grandes distancias heliocéntricas que corresponden también a grandes distancias geocéntricas, es imposible resolver el núcleo incluso con sofisticados telescopios. No obstante, mediciones separadas de la sección recta del núcleo y del albedo superficial, conducen a estimaciones del tamaño del núcleo.



Figura 2.1. Cometa 46P/Wirtanen. Max Planck, Instituto de Astronomía. Observatorio Pik Terskol. 03-11-1997. K. Jockers, T. Credner, T Bonev. Cometa Hale-Bopp C/1995 O1. Tim Jensen. 09-03-1997. Roosevelt Lake, Arizona.

El tamaño del núcleo del cometa 46P/Wirtanen fue estimado en 800 m. El núcleo del cometa Hale-Bopp C/1995 O1 en 40 km.

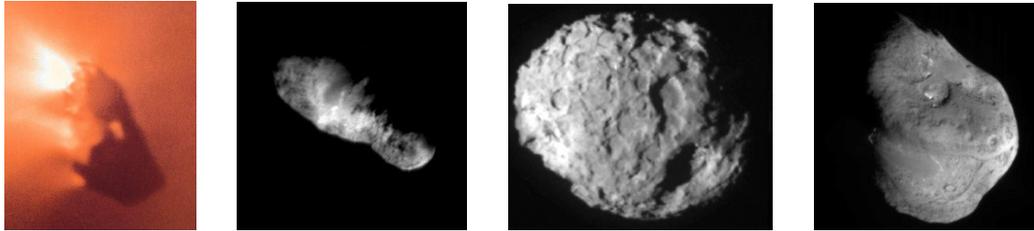


Figura 2.2. De izquierda a derecha los cometas 1P/Halley, 19P/Borrelly, 81P/Wild, 9P/Tempel 1. Imágenes obtenidas respectivamente por las sondas Giotto, Deep Space 1, Stardust, Deep Impact.

Únicamente los núcleos correspondientes a los cometas 1P/Halley, 19P/Borrelly, 81P/Wild 2 y 9P/Tempel 1 fueron medidos con relativa precisión desde las naves espaciales Giotto, Vega 1 y 2, Deep Space 1, Stardust y Deep Impact. Los resultados de esas mediciones se observan en la tabla 2.1

Cometa	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1P/Halley	15.5 kilómetros	8.5 kilómetros	8 kilómetros
19P/Borrelly	8 kilómetros	4 kilómetros	4 kilómetros
81P/Wild 2	5.5 kilómetros	4 kilómetros	3.3 kilómetros
9P/Tempel 1	5.04 kilómetros	6.14 kilómetros	4.8 kilómetros

Tabla 2.1. Dimensiones observadas de los cometas 1P/Halley, 19P/Borrelly, 81P/Wild 2 y 9P/Tempel 1

Los detalles de la estructura interna de un núcleo cometario son aún desconocidos. Ya se había mencionado la existencia básicamente de cuatro modelos de la estructura de un núcleo cometario. El más popular y conocido es el propuesto por Fred Whipple, en 1950, en el que se asume el núcleo cometario como una bola de nieve sucia (dirty snowball). En 1986, y sin haber avanzado significativamente en el análisis de las primeras observaciones directas de un núcleo cometario, se proponen dos modelos más, uno propuesto por Weissman, quien afirma que el núcleo de un cometa es un apilado primordial de piedras (primordial rubble pile), en el otro Gombosi y Houppis plantean un modelo de goma de hielo (icy-glue model). El más reciente, es el denominado agregado esponjoso (fluffy aggregate), propuesto en 1991 por Donn.

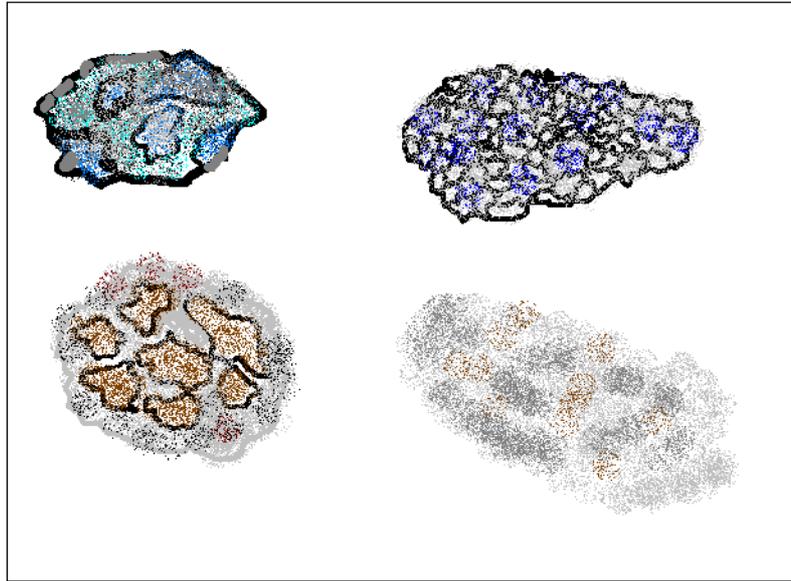


Figura 2.3. Bola de nieve sucia. (Dirty snow ball). [Whipple, 1950].
 (Superior izquierda). Agregado esponjoso. (Fluffy aggregate). [Donn, 1991].
 (Superior derecha). Apilado primordial de piedras. (Primordial rubble pile).
 [Weissman, 1986]. (Inferior izquierda). Goma de hielo (Icy-glue) [Gombosi
 and Houppis, 1986]. (Inferior derecha).

La superficie del núcleo de un cometa nunca ha sido explorada directamente. Entonces, únicamente métodos indirectos pueden ser usados para determinar la composición del núcleo de un cometa. El análisis espectral y la exploración in situ desde naves espaciales del polvo, el gas y el plasma en el ambiente cometario proporcionan las mejores pistas para determinar la naturaleza del material del núcleo cometario. El polvo que es arrastrado desde la superficie por el gas, refleja la radiación solar, entonces, las líneas de absorción que aparecen en el espectro de la radiación reflejada pueden ser analizadas para determinar la naturaleza y composición del polvo. El gas puede ser producido directamente en la superficie por sublimación, por difusión a través de los poros del gas sublimado desde el interior del núcleo o por sublimación del material volátil que cubre los granos de polvo en la coma y la cola. Las especies originales son fotodisociadas y posteriormente ionizadas. Principalmente los productos derivados de las moléculas originales pueden ser observados y analizados. Ellos absorben y reemiten radiación electromagnética generando

líneas de emisión en su espectro que pueden ser analizadas. Estos espectros presentan rasgos aproximadamente similares, lo que sugiere una composición química común. La composición del gas y el plasma en el entorno del cometa 1P/Halley fue explorada y analizada directamente utilizando el espectrómetro de masa neutra (neutral mass spectrometer NMS) de la nave espacial Giotto. Los resultados de esta medición mostraron que los vapores de agua y sus productos derivados, dominan el interior de la coma del cometa. Además del agua están presentes también el Monóxido de Carbono CO, Dióxido de Carbono CO_2 , Metanol CH_3OH , Metano CH_4 , Amoníaco NH_3 , Nitrógeno molecular N_2 , formaldehído H_2CO , Cianuro de Hidrógeno HCN y Acetonitrilo CH_3CN . En una baja proporción existen otros componentes como H_2S , C_2H_2 , SO_2 , H_2CS , C_2H_6 . (Huebner W. F., Benkhoff J., Capria M. T., Coradini A., De Sanctis, C., Orosei R., Prialnik D. [19], Keller H. U., Britt D., Buratti B. J., Thomas N. [20], Lamy P. L., Toth I., Fernandez Y. R., Weaver H. A. [24]).

LA COMA DE UN COMETA

La coma o atmósfera cometaria es el halo de partículas de polvo, gas y plasma de forma aproximadamente esférica que rodea al núcleo.

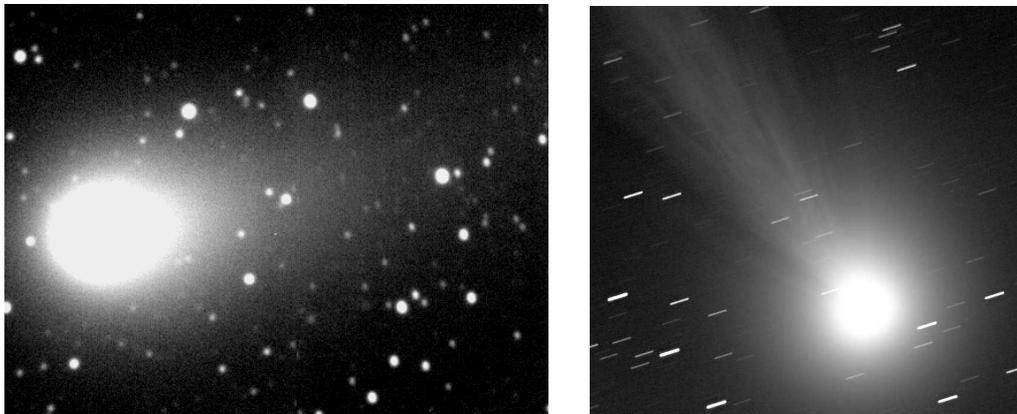


Figura 2.4. Cometa Hyakutake, 1996-03-01.17 T. U. Observatorio Col Druscié, Italia. Cometa Swan, 2006-10-25.74 T. U. Rolando Ligustri, Italia

La coma se genera a una distancia menor o igual a 6 U.A. dependiendo de la composición química del núcleo cometario, fundamentalmente de la composición de la envoltura que mantiene unidos los fragmentos más rocosos.

Cometas que al parecer han agotado significativamente gran parte de los componentes volátiles de su envoltura, o que en su formación misma no los acumularon, generan débiles comas de apariencia suave. De otro lado cometas que preservan gran cantidad de componentes volátiles, o que en su formación acumularon una gran cantidad de volátiles en su envoltura, exhiben una gran actividad, generando comas de mayor densidad y muy dinámicas, caracterizadas por enormes chorros y rafagas de gas, también denominados jets cometarios.

La coma puede alcanzar un tamaño entre $10^4 km$ y $10^5 km$ de diámetro. Paradójicamente la coma de un cometa disminuye de tamaño gradualmente cuando se esta acercando al sol y esta disminución ocurre de acuerdo a la siguiente expresión:

$$D = D_o R^{\frac{7}{4}} \quad (2.1)$$

D es el diámetro, D_o es el diámetro a 1 U.A. del sol, R es la distancia sol-cometa. Una coma de mayor tamaño rodea al cometa se trata de la coma de hidrógeno que alcanza los $10^7 km$ de diámetro. Un análisis sistematico de la dinámica de la coma permite deducir el periodo y el eje de rotación del núcleo cometario.

LA COLA DE UN COMETA



Figura 2.5. Cometa Hale-Bopp, 1997-03-9.5 T. U. Alex Wurden, Glen Wurden, Los Alamos, New Mexico

Las colas de polvo y de plasma se originan y desarrollan como resultado de la interacción entre la recién formada coma y el viento solar. Las colas de plasma se separan del cometa cuando este último en su movimiento ingresa a una

región de campo magnético cuya polaridad es opuesta a la de la región donde antes se movía. Las colas de polvo, están formadas por partículas de polvo de tamaño micrométrico, arrastradas desde la coma por fuerzas asociadas con la presión del viento solar y que actúan sobre los granos de polvo. Las colas de polvo, son curvas y borrosas y en general es difícil apreciar una estructura interna. Las colas de plasma están constituidas por átomos y moléculas ionizadas por la acción del viento solar y que atrapadas en el campo magnético solar se mueven alrededor de las líneas del campo magnético en trayectorias helicoidales. Estos iones entonces originan una gran estructura que presenta formas filamentosas. En conjunto, las colas constituyen un fenómeno observable, que alcanza entre 50 y 100 millones de kilómetros de longitud.

En 1957, Hannes Alfvén del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, expuso la idea de que el viento solar transportaría probablemente el campo magnético solar al espacio interplanetario. Él demostró, que el campo magnético solar acoplaba el viento solar con los iones cometarios para formar colas de plasma. El viento solar y su campo magnético fluyen hacia el cometa a una velocidad promedio de $400 \frac{km}{s}$. En contraste, los recién creados iones cometarios avanzan hacia el sol tal vez a $1 \frac{km}{s}$. Los iones no pueden moverse libremente a través de un campo magnético, deben describir trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de campo magnético. Una vez capturados los iones por el campo magnético, se moverán hacia el cometa en la misma dirección del viento solar. El viento solar que ahora experimenta un aumento en su masa al haber recibido los iones cometarios, debe retardarse para conservar la cantidad de movimiento. Con el tiempo, se han integrado tantos iones al viento solar y el movimiento se ha decelerado tanto, que se alcanza un régimen de equilibrio entre la presión de los iones y el resto del gas cometario y la presión del viento solar. El movimiento se detiene, los campos magnéticos comprimidos sin solución de continuidad forman una barrera magnética. Los campos magnéticos ligados a los campos de barrera, se arrollan por detrás del cometa, formando dos lóbulos de polaridad opuesta.

Esta cola puede observarse porque el campo magnético captura iones cometarios fluorescentes, tales como los de vapor de agua y monóxido de carbono. John C. Brandt y Malcom B. Niedner de California, descubrieron estudiando el cometa Kohoutek, que la cola iónica de los cometas se desconecta cuando el cometa atraviesa la frontera de un sector magnético, ya que esta separa dos regiones de campo magnético de polaridad opuesta. También observaron que el sol durante su período de rotación de 25 días genera cuatro sectores de campo magnético de polaridades alternadas. Según este modelo, un

cometa en su paso por el sistema solar interior, experimenta varios sucesos de desconexión de la cola ionica. (Brandt J. C., Niedner M. B. [4]).

ÓRBITAS COMETARIAS

De acuerdo a las características orbitales los cometas pueden clasificarse en dos grandes grupos: los cometas de periodo largo que emplean más de 200 años en completar una órbita alrededor del sol y los cometas de periodo corto que emplean menos de 200 años para completar una órbita alrededor del sol. Los cometas de periodo largo pueden a su vez ser divididos en subgrupos de acuerdo a su energía, la cual es medida en terminos del parámetro $\frac{1}{a}$ donde a es el semieje mayor de su órbita. A un periodo orbital de 200 años corresponde un parámetro $\frac{1}{a} \approx 0,03 UA^{-1}$. Un cometa dinámicamente nuevo, que probablemente ingresa por primera vez desde la nube de Oort al sistema solar interior, tiene un parámetro $\frac{1}{a} \approx 3 \times 10^{-5} UA^{-1}$; su periodo es del orden de 2×10^6 años. Cometas de largo periodo, dinámicamente juvenes, que ingresan al sistema solar interior en pocas ocasiones, tienen un parametro $\frac{1}{a} \approx 3 \times 10^{-4} UA^{-1}$. Uno de los cometas mas espectaculares de la década de 1990, fue el cometa Hyakutake. Este es un cometa de largo periodo, dinámicamente joven. Como ejemplo de un cometa de largo periodo, dinámicamente viejo, podemos citar un cometa también observado en la década de 1990, talvéz más espectacular que Hyakutake, vistoso y que alcanza una gran magnitud, se trata del Hale Bopp con un parámetro $\frac{1}{a} \approx 3 \times 10^{-3} UA^{-1}$. Los cometas de corto periodo se clasificán en dos subgrupos de acuerdo al parámetro de Tisserand:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + (1 - e) \left(\frac{a}{a_J} \right)^{\frac{1}{2}} \cos i_{orbital} \quad (2.2)$$

donde a_J es el semieje mayor de la órbita de Jupiter, a el semieje mayor de la órbita del cometa, e la excentricidad de la órbita, i la inclinación orbital del cometa respecto a la eclíptica. Este tipo de clasificación fue propuesta por Carusi y Valsecchi en 1987 y adoptada por Levison y Duncan en 1987. Así los cometas de la familia de Jupiter estan caracterizados por $T_J > 2$ y los cometas de la familia de Halley por $T_J < 2$.

METEOROS

Los cometas a su paso por el sistema solar interior dejan como huella una estela de partículas de polvo a lo largo de su trayectoria. Estas partículas se ven afectadas por la gravitación del sol, por la presión del viento solar y por las perturbaciones planetarias. Las partículas más pequeñas, de 1 a 20 micrones de tamaño, son expulsadas del sistema solar. Las partículas mayores que 30 micrones son capturadas en la gravitación solar y se les llama *meteoroides*. Un porcentaje de ellas choca con la tierra ingresando a la atmósfera y quemándose con lo que produce un fenómeno observable denominado *meteoro*. La estela luminosa al quemarse la partícula ocurre a unos 80km a 100km de altura y su desaparición a unos 50km de altura. Las partículas más grandes pueden alcanzar la superficie terrestre y se les denomina *meteoritos*.



Figura 2.6. Lluvia de las perseidas. Estela luminosa. 1993-12-13.8 T. U. Vulkaneifel, Alemania. S. Kohle, B. Koch.

No obstante los meteoros cometarios tienen una estructura interna porosa, son poco compactos y de baja densidad, lo que implica que ellos se queman en la atmósfera completamente sin alcanzar la superficie. La mayor parte de los meteoritos que han sido recobrados tienen un origen asteroidal.

Un estudio detallado de la trayectoria y dinámica de las nubes de partículas conocidas, ha permitido asociar las lluvias de meteoros con algún cometa específico. (Trigo I R. J. M. [31]).

Lluvias de Meteoros	Cometa Asociado
Dracónidas	21P/Giacobini-Zinner
Biélicas	P/Biela
Leónidas	P/Tempel-Tuttle
Táuridas	P/Encke
η Acuáridas	P/Halley
Perseidas	P/Swift-Tuttle
Líridas	P/Thatcher

Tabla 2.2. Principales lluvias de meteoros asociadas a cometas.

LUZ ZODIACAL

Las partículas más pesadas que han sido abandonadas por los cometas a su paso por el sistema solar interior, se quedan dentro del sistema solar dispersando la radiación visible muy tenuemente en diferentes direcciones y con variada intensidad dependiendo del tamaño, forma y estructura superficial de dichas partículas. Billones de partículas dispersando la radiación visible originan la *Pirámide de Luz Zodiacal* que se observa al amanecer o al atardecer.

La luz zodiacal se extiende sobre todo el cielo, siendo sus regiones más brillantes las Pirámides de Luz Zodiacal que se observan cuando el sol está a menos de 18° por debajo del horizonte antes de su salida o después de su puesta.

En el extremo opuesto al sol se observa una región menos intensa que se denomina el *Antisol* o *Gegenschein*.

Una banda de muy débil intensidad conecta a la Pirámide de Luz Zodiacal con el Antisol: la *Banda Zodiacal*.

Capítulo 3

LA CURVA DE LUZ DE UN COMETA

INTRODUCCIÓN

La manera de estudiar las características físicas de un objeto celeste, es detectando, analizando e interpretando la radiación electromagnética proveniente de éste. En una estrella esta radiación se origina en su parte central a causa de los procesos de fusión nuclear que ocurren allí. Existen estrellas cuya luz varía en el tiempo y se denominan estrellas variables. Usualmente la manera más simple de estudiarlas es graficando la magnitud observada de la estrella en función del tiempo. A esta gráfica se le denomina Curva de Luz y a través de ella podemos obtener estimaciones de su tamaño, de su distancia, de su brillo, de la existencia de otra componente, como también de las dimensiones y características orbitales del sistema estelar. Los Planetas no poseen mecanismos para producir radiación electromagnética a gran escala, la radiación proveniente de ellos es fundamentalmente radiación solar reflejada por sus respectivas atmósferas, por sus superficies o por ambas a la vez. Las Curvas de Luz planetarias han permitido deducir características de la superficie o de la atmósfera, descubrir la existencia de anillos y satélites naturales orbitando alrededor de éstos. En el caso de los asteroides, la Curva de Luz ha permitido deducir rasgos de la superficie, aspectos morfológicos y dinámicos como el periodo de rotación. La ocultación de estrellas por asteroides es un evento en el que se utiliza la Curva de luz para estudiar simultáneamente propiedades físicas de ambos objetos.

La Curva de Luz de un Cometa permite deducir su magnitud absoluta, el inicio y final de los procesos de sublimación, los estados térmicos antes y después del perihelio, aspectos cualitativos del nivel de actividad del cometa y de su composición química.

EL BRILLO Y LA MAGNITUD DE UN COMETA

El brillo de un cometa es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la tierra y a la n potencia de su distancia al sol:

$$B = B_o \frac{1}{\Delta^2 R^n} \quad (3.1)$$

si $\Delta = 1 U.A.$ y $R = 1 U.A.$ entonces $B = B_o$. B_o es el brillo absoluto, es decir es el brillo que tendría el cometa en una posición a 1 unidad astronómica del sol y de la tierra en un mismo instante.

La dependencia funcional de B con Δ nos dice que respecto de la tierra el cometa se comporta como un objeto sólido. La situación física respecto al sol es diferente; la envoltura que rodea a la parte central, se sublima a causa de su compleja interacción con el viento solar. n puede adoptar valores entre 0 y 25 e incluso negativos. El valor más frecuente de n es entre 3 y 5.

n es una función complicada que depende de la reflectividad del núcleo, la composición química, la proporción de polvo y también al parecer de la mecánica de rotación. Por ello, no ha podido establecerse en un modelo físico, ni relacionarla con algún parámetro físico conocido del cometa.

El brillo de un cometa varía drásticamente, o al menos, lo hace más rápidamente que su magnitud, motivo por el cual es usual transformar la expresión para el brillo en términos de magnitudes, lo que se logra utilizando la ecuación de Pogson:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \text{Log} \frac{B_1}{B_2} \quad (3.2)$$

Es decir, si comparamos dos estrellas, la diferencia entre sus magnitudes m_1 y m_2 es proporcional al logaritmo del cociente de sus brillos respectivos B_1 y B_2 . Recordemos que una magnitud 1 corresponde a un objeto muy brillante mientras que una magnitud 6 corresponde a un débil brillo.

Si remplazamos en esta ecuación la relación entre brillos para un cometa tenemos:

$$m - m_o = -2,5 \text{Log} \frac{1}{\Delta^2 R^n} \quad (3.3)$$

y transformando mediante las propiedades de la función logarítmica:

$$m - m_o = 5 \text{Log} \Delta + 2,5n \text{Log} R \quad (3.4)$$

las distancias se expresan en unidades astronómicas. Si $\Delta = 1 \text{ U.A.}$ y $R = 1 \text{ U.A.}$ entonces $m = m_o$ es la magnitud absoluta. Si restamos el efecto geométrico de la magnitud observada tenemos:

$$m_\Delta = m - 5 \text{Log} \Delta \quad (3.5)$$

y a este resultado se le denomina magnitud heliocéntrica o magnitud reducida del cometa.

Finalmente la curva de luz es:

$$m_\Delta = 2,5n \text{Log} R + m_o \quad (3.6)$$

Para el núcleo de un cometa activo como Halley, Hale Boop, Giacobini Zenner, Hyakutake, Ikeya Zhang, una gráfica de la magnitud reducida en función del logaritmo de la distancia sol-cometa, es lineal de pendiente $2.5n$ y su valor en $R = 1 \text{ U.A.}$ es m_o . (Edberg S. , Ferrin I. [12]).

MAGNITUD OBSERVADA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Una gráfica de la magnitud observada en función del tiempo centrado en el perihelio para el cometa 122P/de Vico es mostrada en la figura 3.1, en la cual se observa un aumento en la magnitud del cometa cuando éste se aproxima al sol y una disminución de la magnitud cuando se aleja del él. También se puede apreciar una aproximada simetría de la curva de luz en el tiempo respecto del perihelio, pero este hecho es excepcional, pues la mayoría de los cometas presentan asimetría respecto del perihelio. Una hipótesis para interpretar este tipo de curvas de luz propone que el cometa posee aproximadamente una simetría esférica, una distribución cuasi-homogénea de volátiles en su

envoltura, un eje de rotación perpendicular a su plano orbital y con estas características expondría frente al sol hemisferios similares.

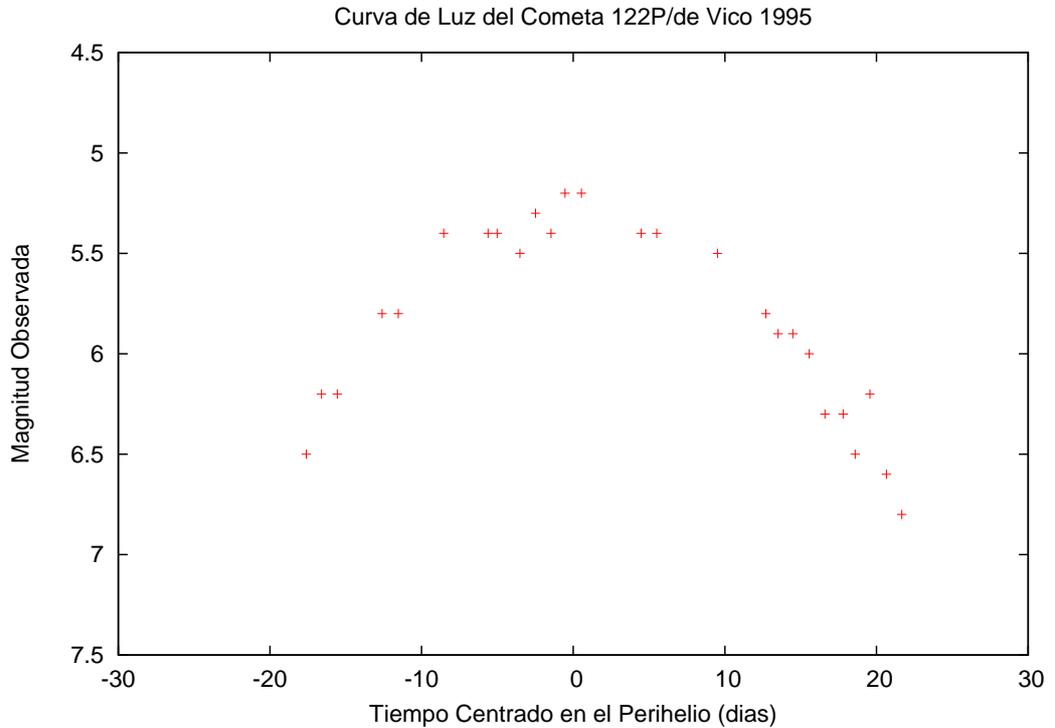


Figura 3.1. Curva de Luz del Cometa 122P/de Vico. Gráfica elaborada por el autor utilizando observaciones realizadas por C. S. Morris del Jet Propulsion Laboratory, California, Institute of Technology.

En la figura 3.2, se observa la curva de luz del cometa Takamizawa-Levy 1994f. A pesar de que los datos antes del perihelio son escasos, se puede inferir un aumento de la magnitud del cometa en la medida que éste se acerca al sol. Después del perihelio, es evidente la disminución de la magnitud cuando el cometa en su trayectoria orbital se aleja del sol. Como la mayoría de los cometas presentan una asimetría de la curva de luz en el tiempo respecto del perihelio, en esta gráfica se puede observar dicha asimetría. La magnitud máxima alcanzada no corresponde exactamente con el eje del perihelio. Cuando se comparan el conjunto de datos correspondientes al intervalo entre los 5 días y 10 días antes del perihelio con los datos correspondientes a los 20

días después del perihelio, se puede deducir cualitativamente que el cometa era más brillante después del perihelio que antes.

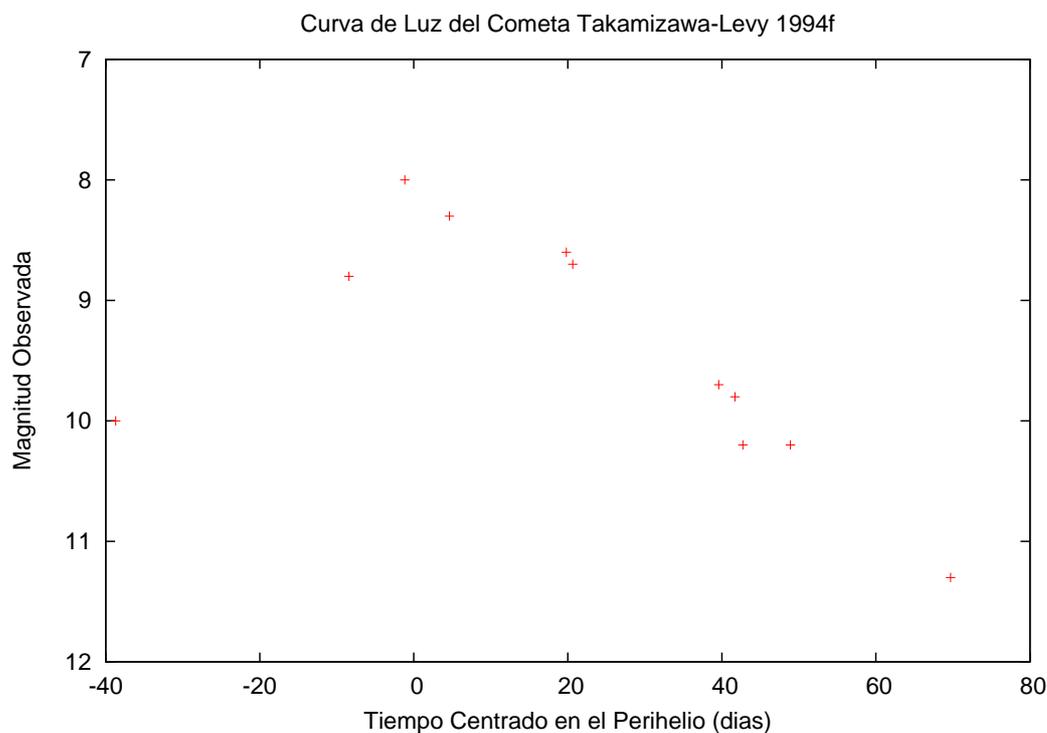


Figura 3.2. Curva de Luz del Cometa Takamizawa-Levy 1994f. Gráfica elaborada por el autor utilizando observaciones realizadas por C. S. Morris del Jet Propulsion Laboratory, California, Institute of Technology.

Ahora la hipótesis con la que se pretende explicar estos hechos es la siguiente: El cometa no posee simetría esférica y su forma es irregular, su superficie es accidentada y la distribución del material volátil en la envoltura varía de una región a otra, el eje de rotación está inclinado respecto del plano orbital del cometa. Con estas características físicas el cometa exhibiría hemisferios de estructura y composición diferentes frente al sol y también a causa de su rotación la exposición de sus hemisferios al sol ocurriría en intervalos temporales diferentes. Todo ello conduce inevitablemente a una curva de luz asimétrica.

MAGNITUD HELIOCÉNTRICA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

La gráfica de la magnitud heliocéntrica en función del tiempo contribuye de modo complementario al esclarecimiento de las características físicas de un cometa y al descubrimiento de eventos como explosiones, gigantescos chorros, rafagas o eyecciones súbitas de material cometario y a fragmentaciones del núcleo cometario que se manifiestan en la curva de luz con aumentos repentinos y significativos de la magnitud del cometa.

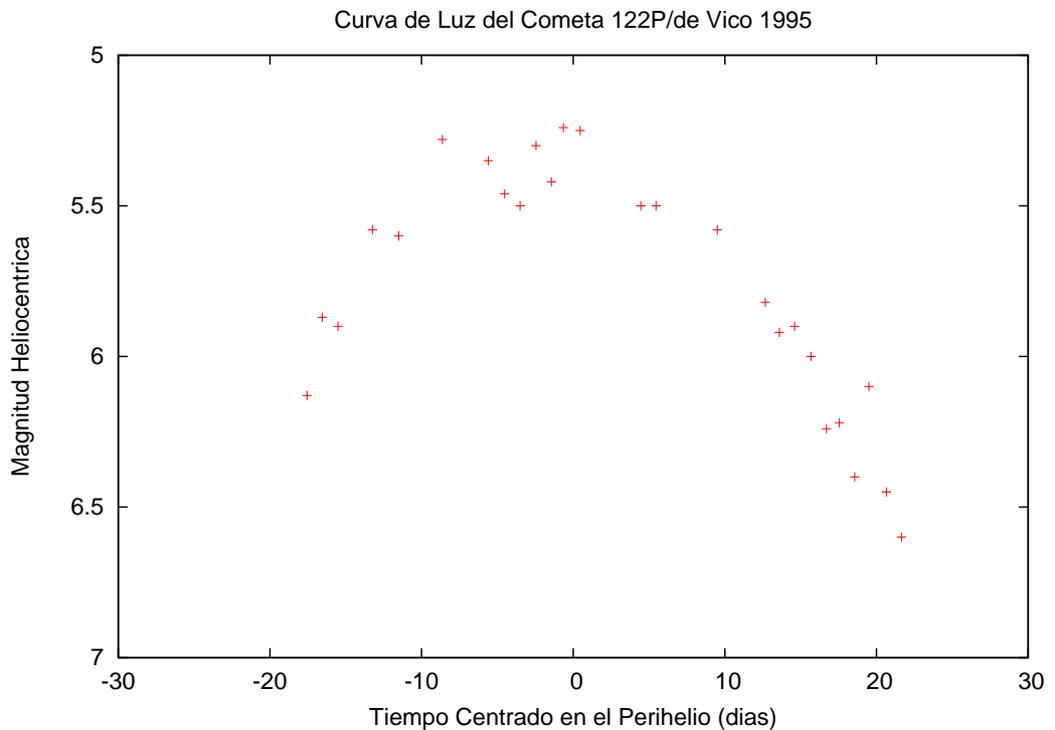


Figura 3.3. Curva de Luz del Cometa 122P/de Vico. Gráfica elaborada por el autor utilizando observaciones realizadas por C. S. Morris del Jet Propulsion Laboratory, California, Institute of Technology.

Cuando el cometa se acerca o se aleja de la tierra se produce un efecto típicamente geométrico y que en la ecuación de brillo esta representado por

el término $\frac{1}{\Delta^2}$ que en últimas de modo concreto en la curva de luz se traduce en $5\log\Delta$. Si se resta este efecto geométrico a la magnitud observada se tiene la magnitud heliocéntrica.

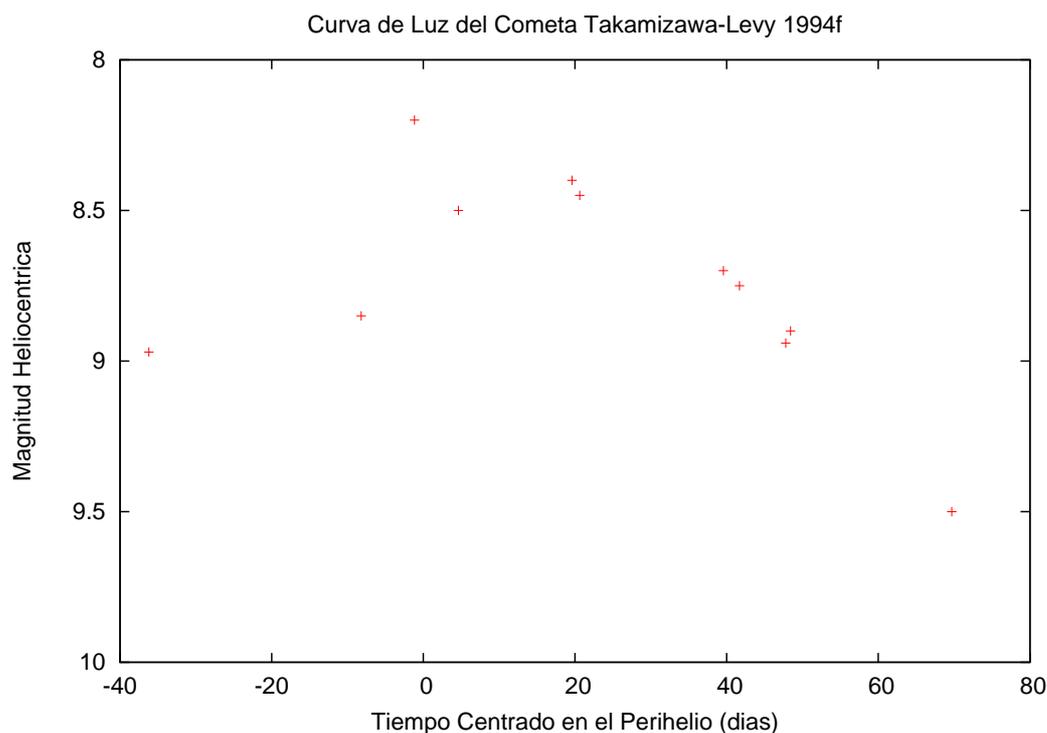


Figura 3.4. Curva de Luz del Cometa Takamizawa-Levy 1994f. Gráfica elaborada por el autor utilizando observaciones realizadas por C. S. Morris del Jet Propulsion Laboratory, California, Institute of Technology.

Esta gráfica entonces tiene la virtud de proporcionar información libre de los efectos que se derivan del movimiento del cometa respecto de la tierra. En ocasiones no es posible observar diferencia alguna entre las gráficas de la magnitud observada en función del tiempo y de la magnitud heliocéntrica en función del tiempo como es el caso para el cometa 122P/de Vico. En las gráficas correspondientes al cometa Takamizawa-Levy 1994f se aprecia una diferencia entre la magnitud observada y la magnitud heliocéntrica en los mismos intervalos temporales.

MAGNITUD HELIOCÉNTRICA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA AL SOL

La gráfica de la magnitud heliocéntrica en función del logaritmo de la distancia al sol, es al parecer la más útil y fundamental para estudiar, analizar e interpretar la conducta fotométrica de un cometa y derivar de esta conducta características físicas relevantes.

La figura 3.5 muestra un esquema ilustrativo de este tipo de curva de luz en el que se observa que el núcleo y la coma tienen diferentes conductas fotométricas.

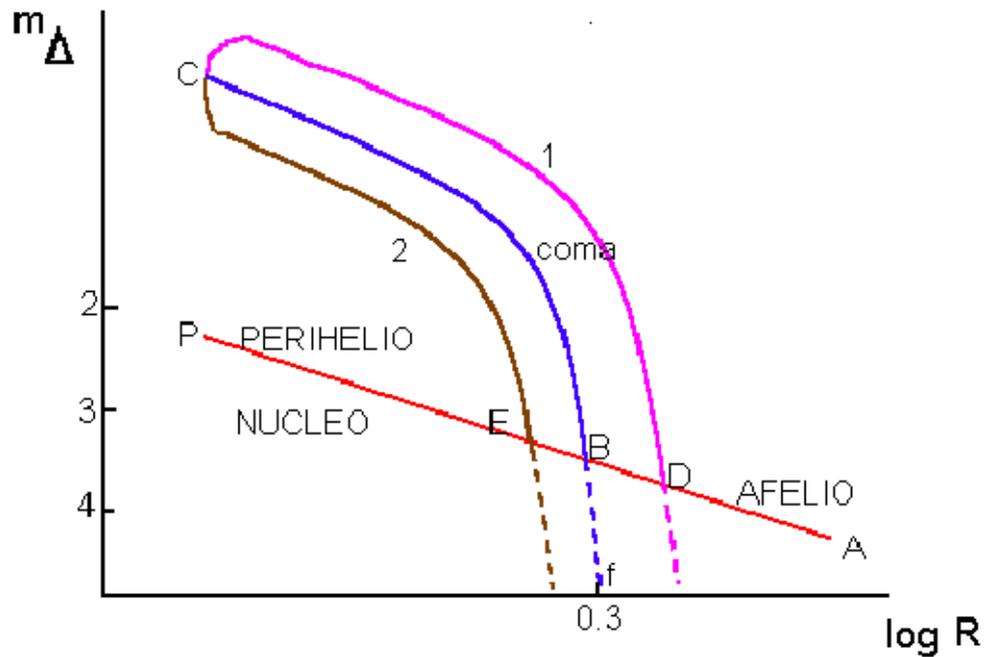


Figura 3.5. Gráfica ilustrativa de la Curva de Luz de un Cometa.

Cuando un cometa se halla a su máxima distancia al sol, es decir en su afelio, su temperatura es mínima y por tanto sus procesos de sublimación también lo son. No posee coma o atmósfera. En la medida en que orbitalmente

se acerca al sol su curva de luz será una función lineal hasta tanto no ingrese a la zona de temperatura crítica en B. f corresponde a la posición orbital en la cual se desarrollan y adquieren estructura la coma y la cola en un proceso rápido y violento. Es evidente en la gráfica, que a partir del punto B tanto el núcleo como la coma siguen conductas físicas diferentes. El núcleo sigue la línea A-P, y la coma la línea B-C, al llegar al perihelio ambos alcanzan su máxima magnitud. El retorno funcional no necesariamente es el mismo, si el cometa esta a mayor temperatura después del perihelio entonces su regreso funcional será por el camino 1 y en el caso contrario por el camino 2. Si las condiciones son aproximadamente iguales el retorno funcional será el mismo. Por tanto la distancia cometa sol a la cual se origina la coma, no necesariamente es igual a la de su extinción.

Cuando el cometa se halla en la zona orbital del perihelio, el núcleo y la coma no sólo alcanzan cada uno su máxima magnitud, sino que la diferencia entre sus magnitudes puede ser muy significativa.

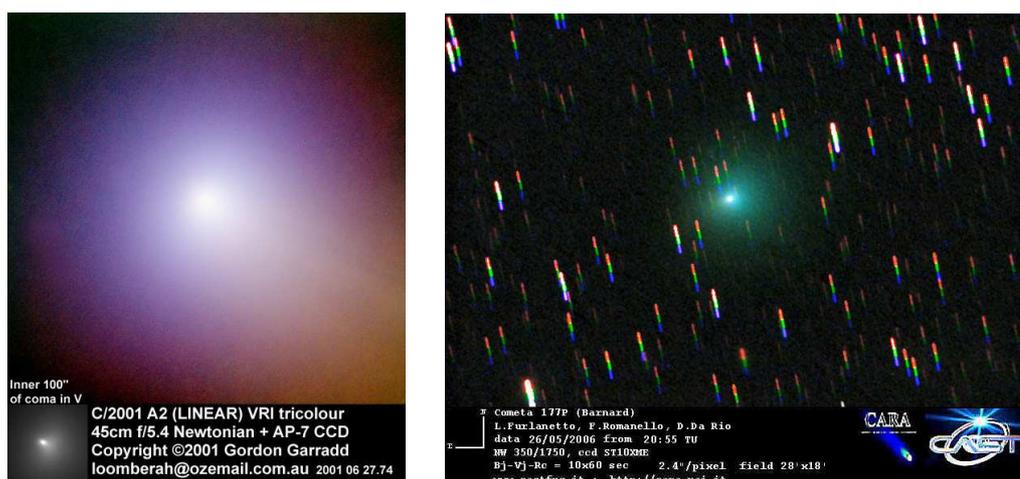


Figura 3.6. Cometa C/2001 A2 Linear (Izquierda). Imagen tomada por Gordon Garrard, Australia. Cometa 177P/Barnard (Derecha). Imagen tomada por L. Furlanetto, F. Romanello, D. Da Rio, Italia.

Como el núcleo es inobservable por hallarse oculto por una coma que generalmente es más brillante, la magnitud nuclear m_N a la que se refieren los observadores de cometas y la literatura en general, corresponde a la medida de la región central, casi puntual y la magnitud total m_T a la medida de la totalidad. Este hecho se ilustra en las imágenes de la figura 3.6.

En la figura 3.6 las imágenes de los cometas C/2001 A2 Linear y 177P/Barnard sugieren que dicha diferencia puede ser del orden de varias magnitudes. Si la diferencia entre sus magnitudes es de 5 sus intensidades difieren en un factor de 10^2 , si la diferencia entre sus magnitudes es de 6 sus intensidades difieren en un factor de $2,5 \times 10^2$, como se observa en la Curva de Luz del Cometa Encke en la figura 3.7. (Edberg S. , Ferrin I. [12], Ferrin I. [13]).

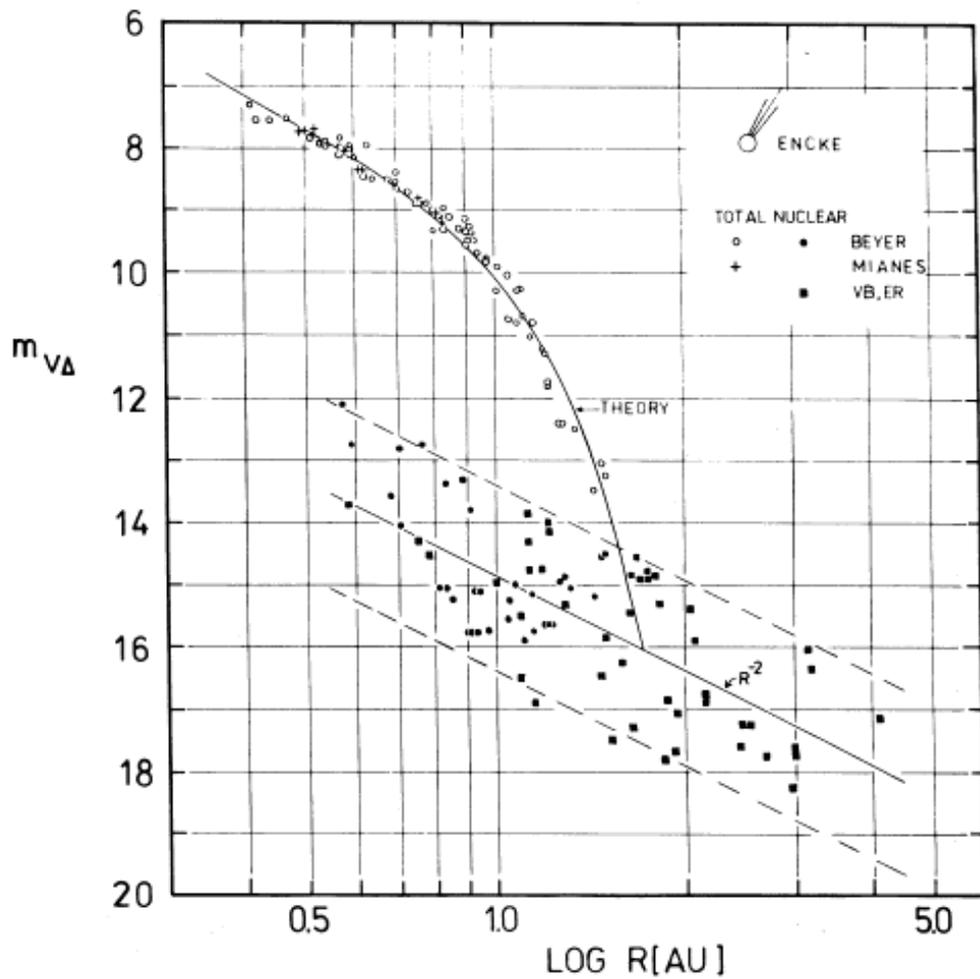


Figura 3.7 Curva de Luz del Cometa Encke. Elaborada por Ferrin I. y Naranjo [1980] utilizando observaciones visuales de Max Beyer y mediciones fotoeléctricas de Mianes.

La elevada dispersión de los datos correspondientes al núcleo, es una evidencia de la dificultad para observarlo y para obtener mediciones y estimaciones de la magnitud nuclear m_N .

Esta curva de luz del cometa Encke, es un ejemplo claro del modo como se determinan la magnitud absoluta de la coma y del núcleo, el punto de formación de la coma y el parámetro n en la curva de luz del núcleo.

Los datos de la curva de luz correspondientes a la coma, no siempre se ajustan a una curva, también pueden resultar ajustándose a una línea recta. En la figura 3.8 se observan los dos casos. El Cometa Ikeya Zhang cuyos datos se ajustan a una curva y el Cometa Hale Bopp cuyo ajuste corresponde a una recta.

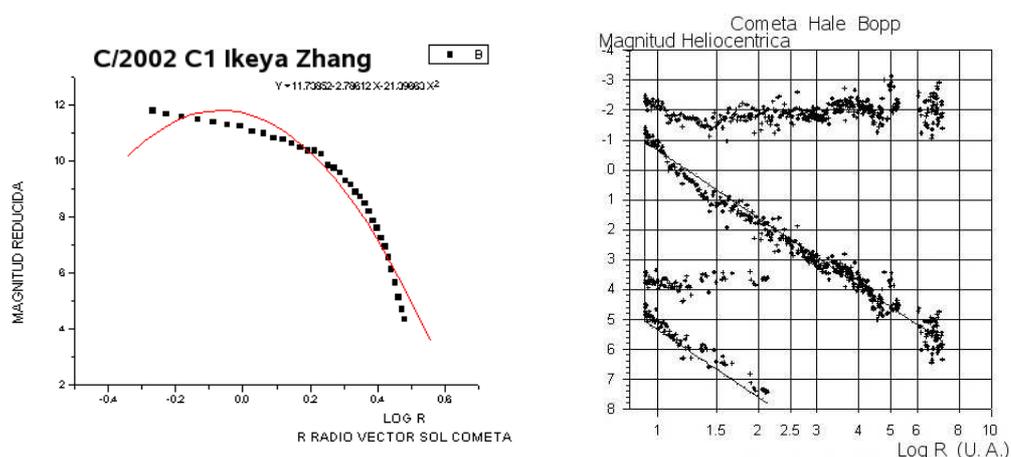


Figura 3.8 Curva de Luz del Cometa Ikeya Zhang obtenida por el autor con datos de la LIADA (Izquierda). Curva de Luz del Cometa Hale Bopp obtenida por miembros de la LIADA (Derecha).

Esta conducta funcional se halla estrechamente relacionada con la composición química del núcleo y con el material que controla la sublimación. Los modelos del núcleo cometario denominados modelos de agua pura permiten construir curvas de luz teóricas para diferentes reflectividades del núcleo. En la figura 3.9 se observa la gráfica de una familia de curvas de luz. Cada curva corresponde a un valor diferente de un parámetro denominado el Albedo de Bond A_B que es una medida de la reflectividad del núcleo cometario. $A_B = 0$ corresponde a una superficie no reflectante o una superficie negra y

$A_B = 1$ corresponde a una superficie completamente reflectante o una superficie blanca. Se deduce entonces que si el agua es abundante, ella controlara la sublimación, y si el agua controla la sublimación, la curva de luz de la coma o totalidad presentara curvatura. (Krishna s. K. S. [23]).

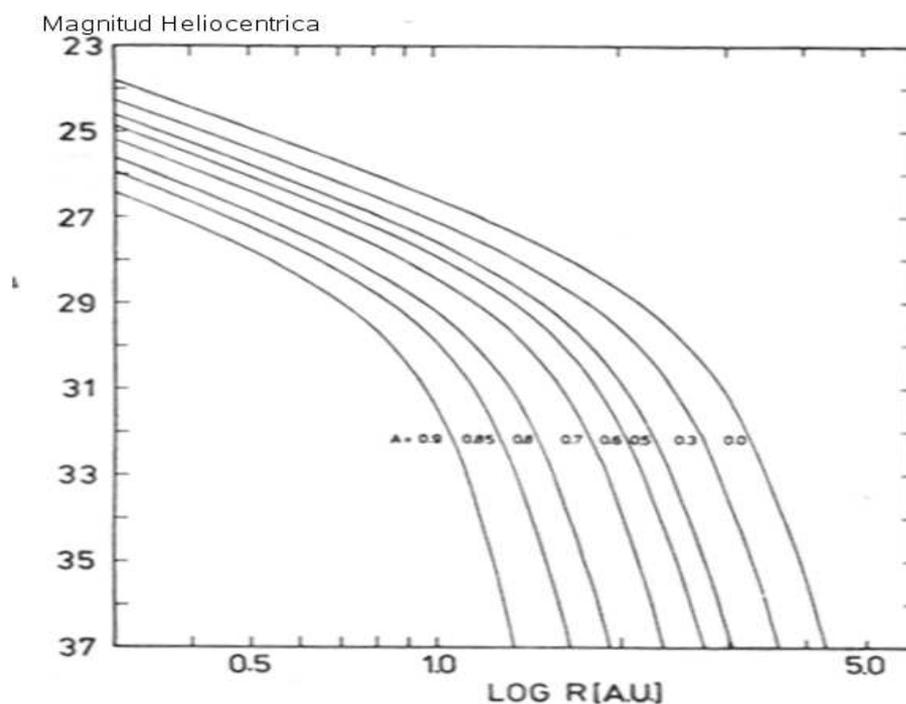


Figura 3.9 Curvas de luz teóricas derivadas de los modelos de agua pura. A_B varia entre 0 y 0.9 Edberg S. J., Ferrin I. 1985.

Cuando los datos se ajustan a una función lineal, entonces un componente más volátil que el agua controla la sublimación. Pero aún no se ha podido establecer cuál de esos materiales volátiles es quien controla la sublimación, ya que en una gráfica de curvas de luz teóricas para cada material volátil se observa una funcionalidad lineal para cada uno de ellos en la zona del perihelio. (Deaza P. [9]).

La figura 3.10 exhibe curvas de luz teóricas para modelos de un núcleo de diferentes composiciones químicas incluida el agua. Se observa que a distancias menores de 10 unidades astronómicas del sol, los modelos diferentes al de agua son funciones lineales. Sólo el modelo de agua presenta curvatura

significativa a menos de 10 unidades astronómicas. De modo que los cometas que presentán para la coma o la totalidad una curva de luz proporcional en la región del perihelio, se constituyén en un problema abierto, en un desafío para la astrofísica cometaria de nuestro tiempo.

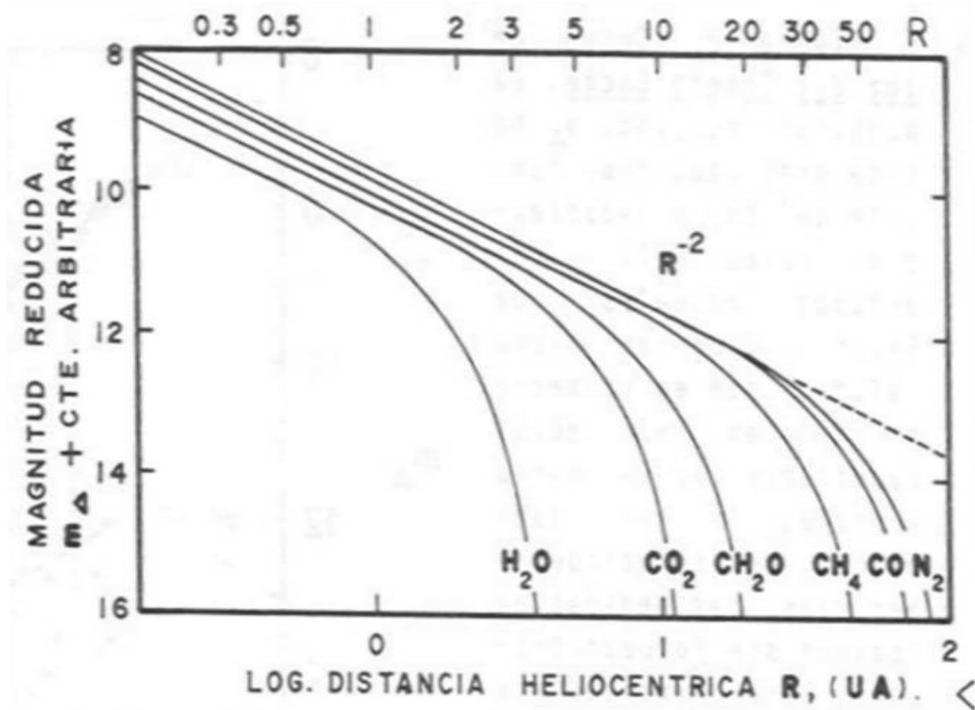


Figura 3.10 Curvas de luz teóricas para composiciones químicas diferentes del núcleo cometario. Edberg S. J., Ferrin I. 1985.

En su paso por el sistema solar interior, el proceso de sublimación de los hielos de agua, comienza a desempeñar un rol importante en la evolución de la magnitud visual del cometa, a partir de una distancia heliocéntrica aproximada de 2.8 U. A. y va aumentando gradualmente su importancia hasta convertirse en dominante.

En el rango visible también es importante el carbono diatómico C_2 que es el causante de las denominadas bandas de Swan en el espectro de emisión del cometa, dos de ellas aportan un color verde-azulado a la coma.

La disociación del agua origina el radical OH , cuya presencia es detectable por métodos radioastronómicos. Las rayas de radio en 18 cm del hidroxilo OH se producen en las transiciones entre la estructura hiperfina de los

dos niveles correspondientes al doblete Λ de los estados de mínima energía electrónica, rotatoria y vibratoria de la molécula de OH . El estado fundamental de la molécula de hidroxilo es el estado rotatorio $J = \frac{3}{2}$ del estado electrónico ${}^2\Pi_{\frac{3}{2}}$. En este estado son posibles dos orientaciones distintas de la distribución de electrones respecto al eje de rotación molecular: una a lo largo del eje de rotación y la otra en el plano de la rotación. Por lo tanto el estado rotatorio $J = \frac{3}{2}$ del ${}^2\Pi_{\frac{3}{2}}$ se desdobra en dos niveles. Este fenómeno se denomina doblete Λ . Las transiciones entre estos dos niveles originan la raya de 18 cm. El análisis de la raya de 18 cm del OH , permite calcular su abundancia, para posteriormente determinar la tasa de producción de agua. En Francia, utilizando el radiotelescopio de Nancay, se está llevando a cabo un sistemático estudio de la mencionada tasa en una muestra considerable de cometas. Correlacionando los resultados de Nancay con la base de datos de magnitudes visuales de International Comet Quarterly, se ha deducido una expresión empírica para la tasa de producción de agua (Van Dishoeck E. F., Dalgarno A. [32]).

$$\text{Log}Q_{[H_2O]} = 30,78 - 0,265m_{\Delta} \quad (3.7)$$

Donde $Q_{[H_2O]}$ es la tasa de producción de agua en moléculas por segundo y m_{Δ} la curva de luz. Remplazando m_{Δ} en la ecuación 3.7 tenemos:

$$\text{Log}Q_{[H_2O]} = 30,78 - 0,265[m_o + 2,5n\text{Log}R] \quad (3.8)$$

La tasa de producción de agua puede obtenerse de modo aproximado de la curva de luz del cometa. (González J. J. [17])

La ecuación 3.8 implica que los datos deben ajustarse de acuerdo a una expresión de tipo potencial como la siguiente:

$$Q_{[H_2O]} = aR^{-b} \quad (3.9)$$

Los parámetros a y b dependen de la magnitud absoluta m_o y de n , estos últimos relacionados estrechamente con la actividad del cometa. La tasa de producción de agua $Q_{[H_2O]}$ puede expresarse también en kilogramos por segundo.

La figura 3.11 muestra una gráfica de la tasa de producción de agua $Q_{[H_2O]}$ en función de la distancia heliocéntrica R para el cometa C/2002 T7 Linear, de acuerdo con J. J. González las observaciones se ajustan a la función:

$$Q_{[H_2O]} = 16800R^{-2,63} \quad (3.10)$$

No obstante un segundo ajuste fue realizado a partir de la distancia heliocéntrica $R = 2,0 \text{ U.A.}$ dado el esporádico aumento de magnitud alrededor de esta posición orbital.

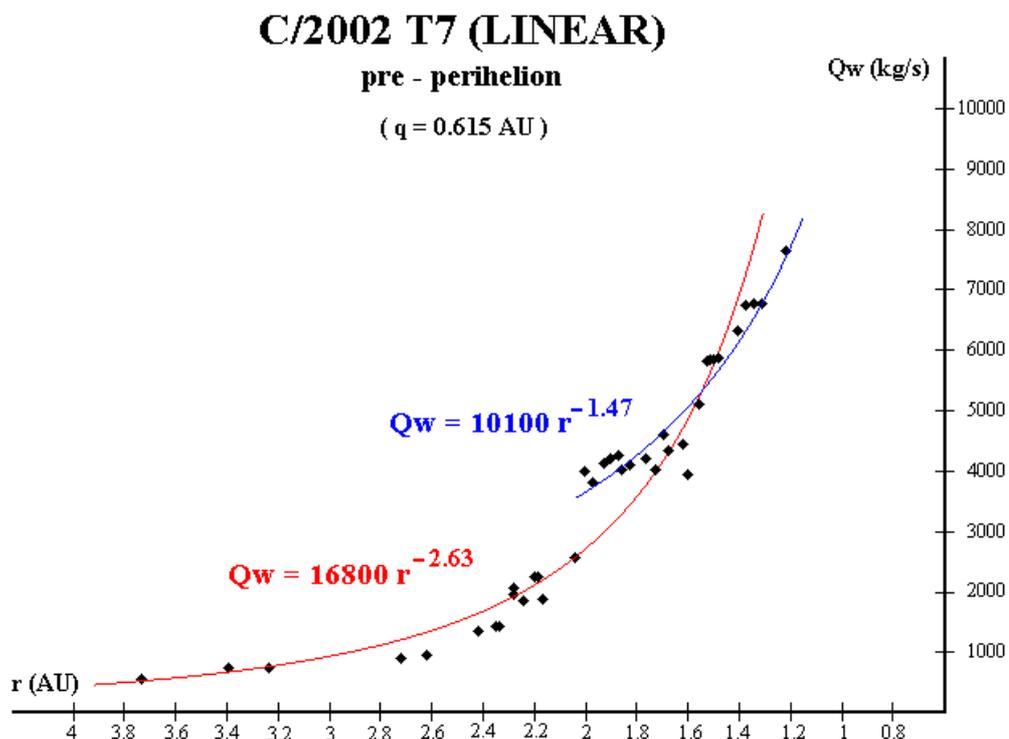


Figura 3.11 Tasa de producción de agua en función de la distancia heliocéntrica para el cometa C/2002 T7 Linear. J. J. González.

A partir de $R = 2,0 \text{ U.A.}$ el ajuste corresponde a la siguiente función:

$$Q_{[H_2O]} = 10100R^{-1,47} \tag{3.11}$$

De acuerdo al análisis y los resultados de J. J. Gonzalez el valor aproximado de la tasa de producción de agua $Q_{[H_2O]}$ en el perihelio es de $21000 \frac{kg}{s}$. La figura 3.12 también muestra una gráfica de la tasa de producción de agua en función de la distancia heliocéntrica para el cometa C/2004 F4 Bradfield realizada por J. J. Gonzalez en la cual las observaciones se ajustan bastante bien a la expresión:

$$Q_{[H_2O]} = 1280R^{-2.33} \quad (3.12)$$

Del anterior resultado se extrapola en el perihelio $Q_{[H_2O]} = 80000 \frac{kg}{s}$.

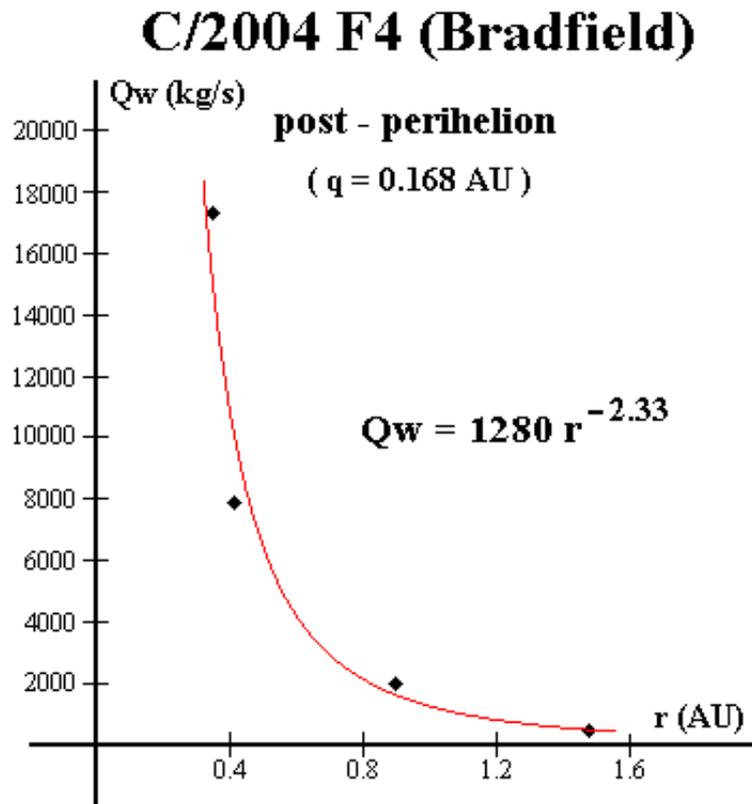


Figura 3.12 Tasa de producción de agua en función de la distancia heliocéntrica para el cometa C/2004 F4 Bradfield. J. J. González.

La curva de luz de un cometa permite determinar la magnitud absoluta de la coma o totalidad, la magnitud absoluta del núcleo, el parámetro n , el punto orbital o la distancia heliocéntrica de formación de la coma y de su extinción, estimar comparativamente los estados térmicos de la superficie del núcleo antes y después del perihelio, inferir probables explosiones, estimar el periodo de rotación del núcleo, construir modelos hipotéticos de la mecánica rotacional del núcleo, diferenciar los cometas con abundancias dominantes de agua de cometas con abundancias de otras composiciones químicas más

volátiles que el agua, determinar el Albedo de Bond, determinar indirectamente y de modo aproximado la tasa de producción de agua.

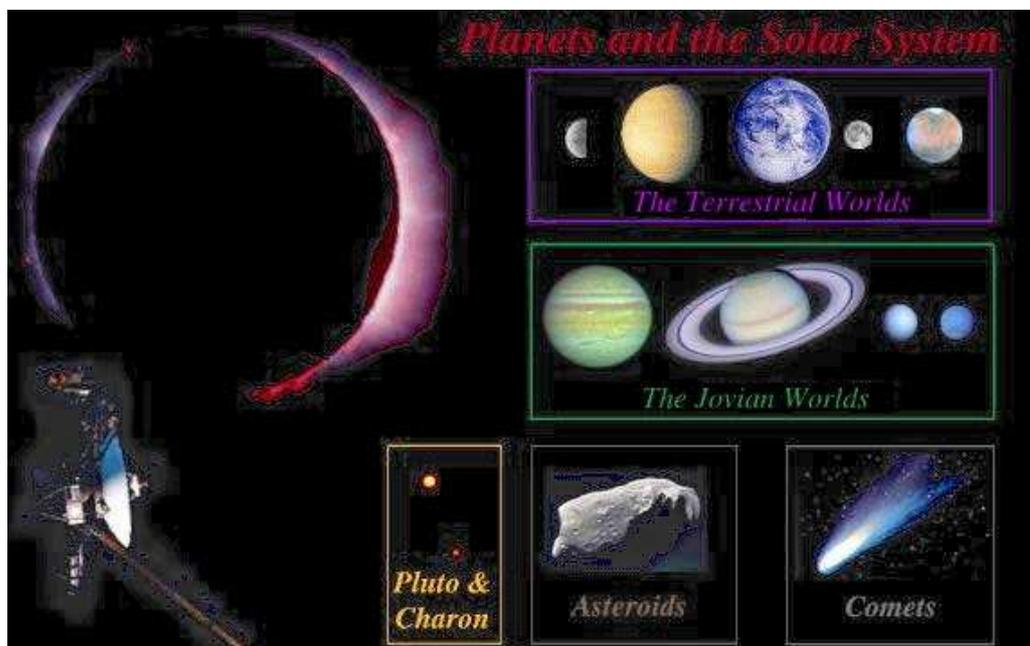


Figura 3.13 Mosaico del Sistema Planetario. Imagen pública JPL-NASA.

En síntesis, la curva de luz de un cometa es una herramienta fundamental de la astrofísica cometaria, poderosa y robusta para estudiar, analizar e interpretar la conducta física y deducir los parámetros más importantes de estos minúsculos pero primordiales objetos que albergan la materia prima con la que se formó nuestro sistema planetario.

Capítulo 4

LA ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA

INTRODUCCIÓN

El inicio y fin de la actividad del núcleo cometario depende fundamentalmente de su tamaño, estructura, composición química, distribución de componentes volátiles, cantidad de polvo, porosidad, de la forma, número y disposición de los fragmentos rocosos y de la dinámica rotacional. En consecuencia, el estudio de la actividad del núcleo de un cometa y su modelamiento físico es un problema de elevada complejidad, ya que no es fácil ajustar una ecuación de balance de energía, que incluya tantos parámetros y aspectos físicos del cometa.



Figura 4.1 Imagen pictórica de la actividad en la superficie del núcleo cometario (Izquierda).Cometa Hale Bopp. IAC. (Centro).Imagen en falsos colores del cometa Hale Bopp. IAC(Derecha).

La figura 4.1 muestra tres imágenes que proporcionan una idea básica de la actividad del núcleo de un cometa. A la izquierda una imagen pictórica de la actividad en la superficie del núcleo cometario y de los chorros o jets cometarios. En el centro una imagen del cometa Hale Bopp en la que se aprecia la actividad y se observan los chorros o jets cometarios. A la derecha una imagen similar del cometa Hale Bopp pero digitalizada y convertida a falsos colores permite evidenciar con mayor claridad la acción de los chorros o jets cometarios.

MODELOS FÍSICOS DE ACTIVIDAD DEL NÚCLEO COMETARIO

Los primeros modelos físicos sobre la actividad del núcleo cometario fueron básicos y simples. Explicaban la producción de gas y polvo desde el núcleo de un cometa asumiendo sublimación de los hielos desde la superficie de un objeto con simetría esférica y despreciando la difusión de calor al interior del núcleo cometario. Levin [1943] propuso que la producción de gas y polvo en un cometa es causada por la expulsión de gas desde la superficie polvorosa del núcleo. Whipple [1950, 1951] propuso el modelo de bola de nieve sucia para el núcleo cometario y a partir de este modelo explicó cualitativamente la actividad cometaria. La primera discusión cuantitativa de la producción de gas desde los hielos cometarios en el núcleo fue desarrollada por Squires y Beard [1961]. Su principal objetivo fue calcular las fuerzas no gravitacionales sobre el núcleo cometario a causa de la eyección de gases en la dirección del sol únicamente. Squires y Beard asumieron el núcleo del cometa como un disco bidimensional normal a la dirección del sol e igualaron la radiación solar incidente instantánea sobre el núcleo con la radiación reflejada por la superficie y la sublimación de los hielos cometarios. Whipple [1963], propuso la producción de gas a partir de polvo impregnado de hielos para poder explicar la razón gas a polvo observada. Huebner [1965], realizó el primer cálculo asumiendo que la radiación solar incidente se distribuía uniformemente sobre la superficie de un núcleo esférico compuesto por una mezcla de hielos con un apropiado cambio efectivo en la entalpía por sublimación y comparó los resultados con veinte cometas observados. El mejoramiento de los anteriores modelos fue hecho por Delsemme y Miller [1971], ellos introdujeron una

temperatura dependiente del cambio en la entalpía de sublimación. Posteriormente corrigieron el cambio en la entalpía de sublimación considerando las condiciones del vacío, pues estas son más apropiadas para el caso de los cometas. Cowan y A'Hearn [1979], agregaron a las consideraciones la dependencia angular específica de los elementos superficiales con respecto al sol. Los primeros estudios sobre la evolución térmica del núcleo cometario consideraron la conducción del calor al interior del núcleo solo como un mecanismo de transporte de energía Smoluchowski [1981], Weissman y Kieffer [1981], Klinger [1983], Podolak y Herman [1985], Herman y Weissman [1987]. Posteriormente se implementó un transporte de energía adicional debido a la difusión de gas dentro del núcleo Smoluchowski [1982], y Squires [1985].

ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA

Cuando la radiación electromagnética solar incide sobre la superficie del núcleo cometario, una parte de la energía es absorbida y la otra es reflejada. La parte reflejada, depende del albedo del núcleo. La energía absorbida conduce al núcleo a alcanzar la temperatura a la cual se produce la sublimación de los componentes volátiles y a provocar emisión térmica. La energía absorbida depende del ángulo entre la radiación electromagnética incidente y la normal a la superficie. (Grun E., Muller M. [15]).

La cantidad de energía radiada desde la superficie depende de la temperatura, la que a su vez está relacionada con la composición química y las propiedades estructurales del núcleo. La sublimación de los componentes volátiles depende del calor latente y este varía con la temperatura. La penetración del flujo de calor dentro del núcleo depende de la conductividad del calor del material. La eyección de polvo y su posterior presencia en la coma incide en la sublimación de los componentes volátiles. (Herman G., Podolak M. [18]). Asumiendo un núcleo cometario con simetría esférica, uniformemente iluminado por el sol y despreciando el transporte de calor al interior, el balance de energía instantánea en la superficie es:

$$\frac{(1 - A_v)S}{R^2} \langle \cos\phi \rangle = (1 - A_{IR})\sigma T_S^4 + Z(T_S)L(T_S) \quad (4.1)$$

Donde S es la potencia por unidad de área de la radiación electromagnética solar a una distancia de 1 *U.A.*, es decir, el flujo de energía solar que recibe la tierra, un cometa, un asteroide o cualquier objeto situado a una distancia

de 1 *U.A.* del sol; se denomina constante solar y su valor es $S = 1370 \frac{W}{m^2}$. A_v es el albedo para la región visible del espectro electromagnético y que corresponde a la eficiencia con la que la superficie del núcleo cometario refleja radiación electromagnética visible. Para la mayoría de cometas en promedio $A_v = 0,04$. R es la magnitud del radio-vector Sol-Cometa denominada distancia heliocéntrica. ϕ el ángulo cenital solar. Para un cometa de rotación rápida $\langle \cos\phi \rangle = \frac{1}{4}$ ya que se asume que la radiación solar incidente se distribuye sobre toda la superficie esférica del núcleo, pues un cometa de rotación rápida alcanza varias decenas de rotaciones en su zona de sublimación. Así $\langle \cos\phi \rangle = \frac{\pi r^2}{4\pi r^2} = \frac{1}{4}$. Para un cometa de rotación lenta se asume que la radiación solar se distribuye sobre un hemisferio, entonces $\langle \cos\phi \rangle = \frac{\pi r^2}{2\pi r^2} = \frac{1}{2}$. A_{IR} es el albedo para la región infraroja del espectro electromagnético y que corresponde a la eficiencia con la que la superficie del núcleo cometario refleja radiación electromagnética infraroja. Generalmente se asume $A_{IR} < A_v$. $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \circ K^4}$ es la constante de Stefan Boltzmann. T_S es la temperatura superficial. $Z(T_S)$ la tasa de sublimación de los hielos volátiles de la superficie del núcleo del cometa. $L(T_S)$ es el calor latente de sublimación. La tasa de sublimación $Z(T_S)$ puede ser deducida asumiendo condiciones de equilibrio en el proceso de sublimación, es decir, igualando el número de moléculas eyectadas desde la superficie del núcleo cometario con el número de moléculas impactando la superficie. El número de moléculas impactando la superficie es $\frac{1}{4}N\bar{v}$. Entonces:

$$Z(T_S) = \frac{1}{4}N\bar{v} \quad (4.2)$$

N es la densidad del gas y \bar{v} es la rapidez media de la función de distribución de velocidades de Maxwell, la cual esta dada por:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (4.3)$$

$k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{\circ K}$ es la constante de Boltzmann, m es la masa de una molécula de gas, por ejemplo $m_{H_2O} = 3 \times 10^{-26} kg$, $m_{CO} = 6 \times 10^{-26} kg$. Como la ecuación de estado de los gases es $P = NkT$, la tasa de sublimación de los hielos cometarios es:

$$Z(T_S) = \frac{P(T_S)}{\sqrt{2\pi mkT_S}} \quad (4.4)$$

La presión $P(T_S)$ se determina a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron

$$\frac{1}{P(T_S)} \frac{\partial P(T_S)}{\partial T_S} = \frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}} \frac{1}{T_S^2} \quad (4.5)$$

donde μ es la masa molecular del gas correspondiente, por ejemplo $\mu_{H_2O} = 18 \frac{gr}{mol}$, $\mu_{CO} = 28 \frac{gr}{mol}$. $R_{gases} = 8,3143 \frac{J}{oKmol}$ es la constante universal de los gases. La integral conduce a la expresión

$$LnP(T_S) = -\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}} \frac{1}{T_S} + LnP_o \quad (4.6)$$

Los parámetros P_o y $\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}}$ son determinados en experimentos de laboratorio en los que se reproducen de manera aproximada eventos físicos cometarios. Los datos experimentales se ajustan a una función lineal con pendiente negativa $\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}}$ y punto de corte LnP_o . La tabla 4.1 contiene valores obtenidos de los mencionados parámetros para diferentes componentes volatiles congelados del núcleo cometario. (Prialnik D., Benkhoff J., Podolak M. [26]).

Componentes de hielo	Símbolo	P_o ($10^{10} Nm^{-2}$)	$\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}}$ (oK)
Agua	H_2O	356	6141.667
Monoxido de Carbono	CO	0.12631	764.16
Dioxido de Carbono	CO_2	107.9	3148
Metano	CH_4	0.597	1190.2
Propano	C_3H_4	3.417	3000
Etanol	C_2H_6	0.459	19.38
Metanol	CH_3OH	8.883	4632
Cianido de Hidrogeno	HCN	3.8665	4024.66
Sulfido de Hidrogeno	H_2S	1.2631	2648.42
Amoniaco	NH_3	61.412	3603.6
Acetileno	C_2H_2	9.831	2613.6

Tabla 4.1 Parámetros P_o y $\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}}$ para diversos componentes que constituyen el núcleo cometario.

Entonces, el calor latente de sublimación $L(T_S)$ puede ser determinado para cada componente utilizando los resultados de la tabla 4.1. Asi para los

hielos de H_2O $\mu L(T_S) = 6141,667^\circ K \times 8,3143 \frac{J}{oKmol} = 5,1 \times 10^4 \frac{J}{mol}$, es el calor latente por mol. También es usual $L(T_S) = \frac{5,1 \times 10^4 \frac{J}{mol}}{18 \frac{gr}{mol}} = 2,8 \times 10^6 \frac{J}{kg}$, es el calor latente por kilogramo. En la tabla 4.2 se observan los valores obtenidos del calor latente de sublimación para cada uno de los componentes que constituyen el núcleo cometario.

Componentes de hielo	Simbolo	$\mu L(T_S) \frac{J}{mol}$	$L(T_S) \frac{J}{kg}$
Agua	H_2O	$5,1 \times 10^4$	$2,8 \times 10^6$
Monoxido de Carbono	CO	$6,3 \times 10^3$	$2,2 \times 10^5$
Dioxido de Carbono	CO_2	$2,6 \times 10^4$	$5,9 \times 10^5$
Metano	CH_4	$9,9 \times 10^3$	$6,1 \times 10^5$
Propano	C_3H_4	$2,5 \times 10^4$	$6,2 \times 10^5$
Etanol	C_2H_6	$1,6 \times 10^4$	$5,3 \times 10^5$
Metanol	CH_3OH	$3,8 \times 10^4$	$1,2 \times 10^6$
Cianido de Hidrogeno	HCN	$3,3 \times 10^4$	$1,2 \times 10^6$
Sulfido de Hidrogeno	H_2S	$2,2 \times 10^4$	$6,4 \times 10^5$
Amoniaco	NH_3	$3,0 \times 10^4$	$1,8 \times 10^6$
Acetileno	C_2H_2	$2,1 \times 10^4$	$8,0 \times 10^5$

Tabla 4.2 Calor latente de sublimación para diversos componentes que constituyen el núcleo cometario.

Ahora que ya estan establecidos todos los parámetros para los diversos componentes de los hielos cometarios, la ecuación de la presión es entonces

$$P(T_S) = P_o e^{-\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}} \frac{1}{T_S}} \quad (4.7)$$

De acuerdo a los anteriores resultados para la tasa de sublimación, la ecuación de balance de energía 4.1 es entonces

$$\frac{(1 - A_v)S}{R^2} < \cos\phi > = (1 - A_{IR})\sigma T_S^4 + \frac{P_o e^{-\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}} \frac{1}{T_S}}}{\sqrt{2\pi m k T_S}} L(T_S) \quad (4.8)$$

Modelos físicos más rigurosos han sido desarrollados introduciendo un mayor número de aspectos físicos como las propiedades térmicas de la envoltura superficial, el periodo de rotación del núcleo, el calentamiento diurno y enfriamiento nocturno y la porosidad. En la actualidad los más usuales toman en cuenta la forma como se propaga el calor al interior del núcleo y adicionan

el termino $k_S \frac{dT}{dz} |_S$ en el lado derecho de la ecuación 4.8 para representar el flujo de calor por conducción al interior del núcleo. k_S es la conductividad térmica de los componentes de la corteza o envoltura superficial, $\frac{dT}{dz} |_S$ es el gradiente de temperatura superficial y z es la profundidad o espesor de la corteza superficial. (Tancredi G., Rickman H., Greenberg J. M. [30]).

No obstante, los modelos sencillos y básicos son una herramienta conceptual y matemática muy poderosa y robusta para estudiar y analizar cualitativamente y también cuantitativamente la evolución termodinámica de los núcleos de los cometas que ingresan al sistema solar interior.

Capítulo 5

ACTIVIDAD DEL NÚCLEO COMETARIO

INTRODUCCIÓN

La actividad del núcleo de un cometa esta estrechamente relacionada con la historia fotométrica del cometa. De modo que establecer una relación entre su conducta fotométrica y termodinámica conduce a la construcción de una herramienta analítica para estudiar la actividad del núcleo cometario. En la practica, la mencionada herramienta analítica se deriva de la fusión entre la curva de luz del cometa y la ecuación de balance de energía. Este importante resultado permite comparar cometas de acuerdo a la actividad de su núcleo y posiblemente clasificarlos, deducir su temperatura superficial máxima y su magnitud heliocéntrica máxima.

LA MAGNITUD HELIOCÉNTRICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL

Ahora se dispone de todos los ingredientes para establecer el Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial para los Cometas. Con las ecuaciones 3.6 y 4.8 obtenemos:

$$m_{\Delta} = \frac{5}{4}n \text{Log} \left[\frac{(1 - A_v)S < \cos\phi >}{\frac{\mu L(T_S)}{N_{Avog}} \frac{P_o e^{-\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases} T_S}}}{\sqrt{2\pi m k T_S}} + (1 - A_{IR})\sigma T_S^4} \right] + m_o \quad (5.1)$$

El número de Avogadro $N_{Avog} = 6,02 \times 10^{23} \frac{1}{mol}$ desempeña un rol normalizador de unidades. La expresión bajo el logaritmo es adimensional y cada uno de sus componentes en últimas corresponde dimensionalmente a $\frac{W}{m^2}$. Lo anterior implica que el calor latente de sublimación debe ser considerado en $\frac{J}{mol}$. (Deaza P. [10]).

Para estudiar los cometas *Halley*, *Muller*, *Nakamura-Nishimura-Macholz*, *Takamizawa-Levy*, *Hale Bopp*, *Hyakutake*, *Schaumasse*, *Tempel 1* se ha asumido que los componentes volátiles se hallan dominados por el H_2O y para las constantes y parámetros los siguientes valores: $A_v = 0,04$, $S = 1370 \frac{W}{m^2}$, $< \cos\phi > = \frac{1}{4}$, $\mu L(T_S) = 5,1 \times 10^4 \frac{J}{mol}$, $P_o = 356 \times 10^{10} \frac{N}{m^2}$, $\frac{\mu L(T_S)}{R_{gases}} = 6141,667^\circ K$, $m = m_{H_2O} = 3 \times 10^{-26} kg$ es la masa de una molécula de agua, $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{oK}$, $A_{IR} = 0,02$, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

La tabla 5.1 contiene los parámetros de la curva de luz n y m_o para cada cometa. También está indicado el color asignado a la curva de cada cometa.

Cometa	n	m_o	Color
Halley	3.10	4.69	Rojo
Muller	3.40	5.32	Verde
Nakamura-Nishimura-Macholz	3.74	8.33	Azul oscuro
Takamizawa-Levy	4.13	7.06	Violeta
Hale Bopp	4.00	8.10	Azul claro
Hyakutake	6.03	4.56	amarillo
Schaumasse	6.41	8.52	gris
Tempel 1	8.85	6.17	Naranja

Tabla 5.1. Valores deducidos de la curvas de luz publicadas por C. S. Morris/JPL-NASA.

La gráfica en la figura 5.1 exhibe la evolución fotométrica y térmica de cada uno de los cometas en el Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial. En ella se observa la similitud evolutiva de dos grupos de cometas. Los cometas Halley y Muller evolucionan fotométrica y térmicamente de modo similar; también los cometas Nakamura-Nishimura-Macholz, Takamizawa-Levy y Hale Bopp. Los restantes tres cometas, Hyakutake, Schaumasse y Tempel 1 evolucionan de modo diferente.

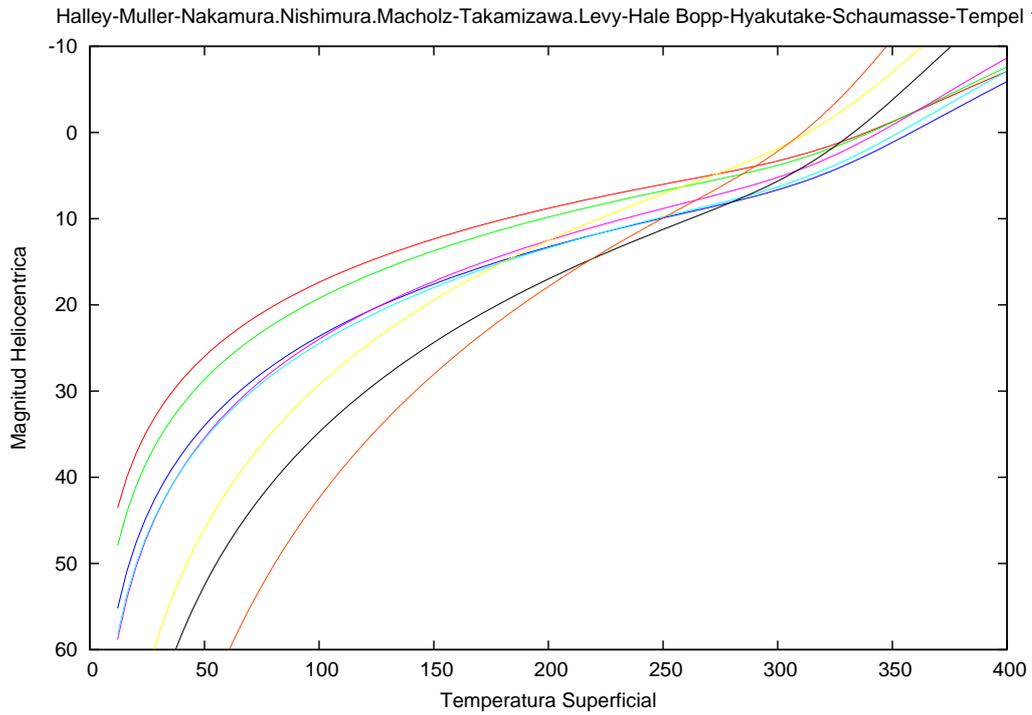


Figura 5.1. Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial antes del perihelio de los cometas listados en la tabla 5.1.

La figura 5.2 muestra los Diagramas separados para cada uno de los casos de evolución similar. Si se tiene en cuenta el orden de magnitud de los parámetros y constantes en la expresión 5.1 y el rol que desempeñan en la

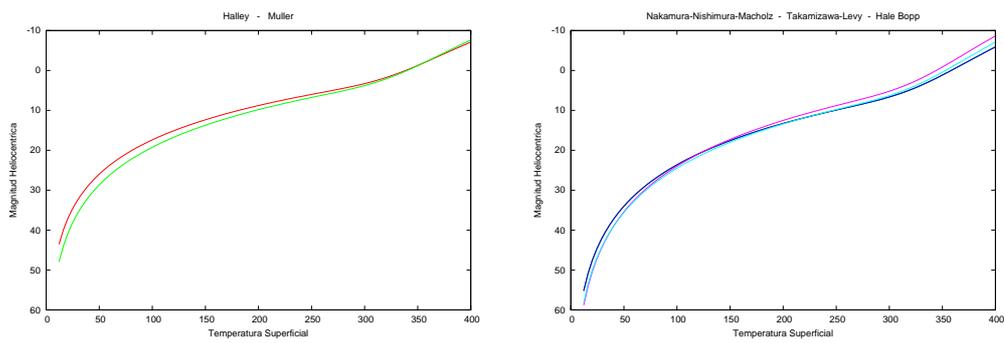


Figura 5.2. Cometas similares en su evolución fotométrica y térmica.

variabilidad funcional de las curvas en el Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial, la similitud entre dos o más cometas implica también similitud en su estructura, abundancia y distribución de sus volátiles. De otro lado la dinámica rotacional debe ser un factor importante en los casos de similitud evolutiva en el Diagrama. No obstante, establecer una relación entre casos de similitud en la evolución fotométrica y térmica y su mecánica orbital para grupos de cometas es más complejo, pero al paso de los cometas por el sistema solar interior y sobre todo en la zona orbital del perihelio, debe existir un rango apreciable de saturación en la respuesta termodinámica del núcleo cometario a la acción del viento solar, que implique una menor incidencia del hecho de que dos cometas tengan orbitas diferentes y sean similares fotométrica y térmicamente.

Una excelente oportunidad para confrontar lo planteado anteriormente para los casos de similitud evolutiva son los eventos de fragmentación cometaria, puesto que los fragmentos deben presentar similitud evolutiva. La tabla 5.2 contiene los parámetros fotométricos de cuatro fragmentos de cometa 73P/Schwassmann-Wachmann-2006, que serán comparados con los cometas de la tabla 5.1 en busca de similaridad evolutiva.

73P/Schwassmann-Wachmann-2006	n	m_o
Componente C	6.6	9.7
Componente B	7.2	11.5
Componente G	4	16
Componente R	4	19

Tabla 5.2. Valores deducidos de las curvas de luz publicadas por Seiichi Yoshida.

El cometa 73P/Schwassmann-Wachmann fue descubierto el 2 de mayo de 1930 por Friedrich Carl Arnold Schwassmann y Arno Arthur Wachmann (Hamburg Observatory, Bergedorf, Germany) en exposiciones fotográficas para el estudio de objetos menores. Su periodo observado fue de 5.4 años. Fue recobrado en posteriores observaciones, las más recientes en 1979, 1990 y 1995. En la aparición de 1995, en diciembre, varios observatorios reportaron la observación de un núcleo múltiple al parecer de cuatro componentes al interior de la coma como resultado de la fragmentación. Los componentes fueron designados como A, B, C, y D de los cuales se considera el principal el C y se asume como descubierto en 1930. La componente G fue observada independientemente por R. A. Tucker (Tucson, Arizona, USA) y E. J.

Christensen (Mt. Lemmon) en la aparición de 2006 en febrero 20 y 22. La componente R fue observada el 23 de marzo de 2006. A partir de la observaciones del 2006 se han reportado un total de 46 fragmentos.

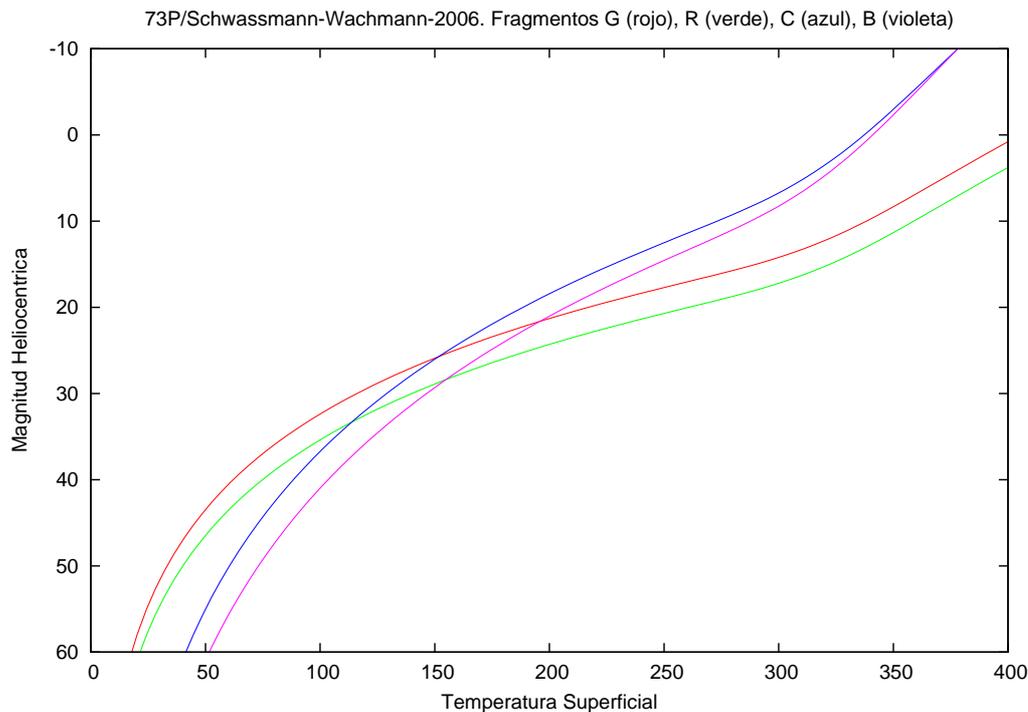


Figura 5.3. Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial antes del perihelio de los fragmentos G, R y C, B del Cometa 73P/Schwassmann-Wachmann-2006.

En la figura 5.3 se presenta el Diagrama de evolución fotométrica y térmica de los fragmentos del cometa 73P/Schwassmann-Wachmann-2006. Se observa una evolución similar de los fragmentos C y B y de los fragmentos G y R. Al comparar los cometas incluidos en la tabla 5.1 con los fragmentos del cometa 73P/Schwassmann-Wachmann-2006 se observa que el cometa Schuamasse presenta una evolución similar a los fragmentos C y B. La figura 5.4 muestra el Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial en el que se comparan los tres objetos.

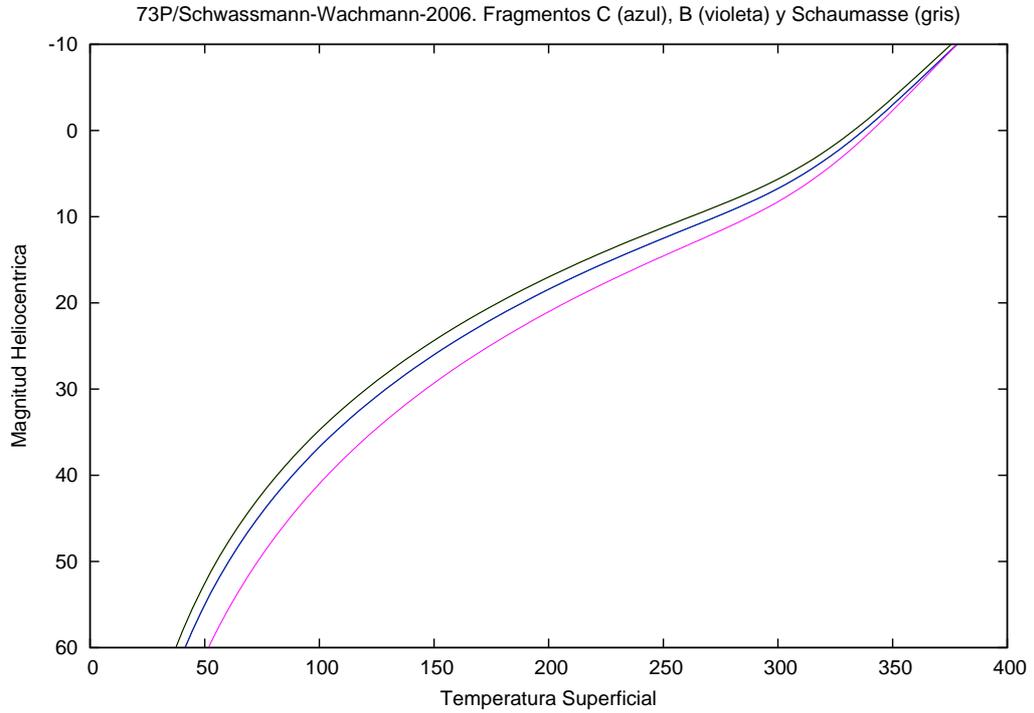


Figura 5.4. Comparación entre los fragmentos C y B del Cometa 73P/Schwassmann-Wachmann-2006 y el Cometa Schaumasse.

TEMPERATURA SUPERFICIAL MÁXIMA

La evolución térmica del núcleo cometario está estrechamente relacionada con los porcentajes o abundancias de los diferentes volátiles, de su distribución y cantidad, de las características orbitales y rotacionales.

Si se dispone de las curvas de luz antes y después del perihelio, se puede usar la ecuación 5.1 para determinar la temperatura superficial en cualquier punto de la trayectoria orbital en la que se desarrollan los procesos de sublimación. La misma expresión también permite calcular un promedio de la temperatura máxima superficial $T_{SMáxima}$.

Para calcular el promedio de la temperatura superficial máxima, se debe construir el Diagrama Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial para un cometa antes y después del perihelio simultáneamente. Generalmente,

las curvas se cortaran en un punto de coordenadas $(m_{\Delta M\acute{a}xima}, T_{SM\acute{a}xima})$. La determinación del punto de corte implica la utilización de algún método numérico como el de iteración de Newton, el de bisección o el método de aproximaciones sucesivas. (Mathews J. H., Fink K. D. [25]). De las curvas de luz publicadas por Andreas Kammerer para el cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp)

- **Pre-perihelio :** $m = -0,5 + 5\log\Delta + 7,7\log R$
- **Post-perihelio:** $m = -1,1 + 5\log\Delta + 9,0\log R$

y para el cometa C/2002 C1 (Ikeya-Zhang)

- **Pre-perihelio:** $m = 6,9 + 5\log\Delta + 9,8\log R$
- **Post-perihelio:** $m = 6,4 + 5\log\Delta + 8,3\log R$

se pueden deducir los parámetros fotométricos requeridos en la expresión 5.1 para la elaboración de los diagramas respectivos. La tabla 5.3 contiene el parámetro n_{B-P} antes del perihelio y n_{A-P} después del perihelio, así como la magnitud absoluta m_{B-P} antes del perihelio y m_{A-P} después del perihelio para los dos cometas.

Cometa	n_{B-P}	n_{A-P}	m_{B-P}	m_{A-P}
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	3.08	3.6	-0.5	-1.1
C/2002 C1 (Ikeya-Zhang)	3.92	3.32	6.9	6.4

Tabla 5.3. Valores deducidos de la curvas de luz publicadas por Andreas Kammerer.

En la figura 5.5 se exhiben las curvas Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial antes del perihelio (curva roja) y después del perihelio (curva azul) para el cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). Calculando el punto de corte se obtiene para la Temperatura Superficial Máxima $T_{SM\acute{a}xima} = 209^{\circ}K$ y para la Magnitud Heliocéntrica Máxima $m_{\Delta M\acute{a}xima} = 3,0$.

Mas allá del punto de corte las curvas no poseen ningun significado físico y por tanto no corresponden a ninguna realidad asociada con la conducta fotométrica y térmica del cometa.

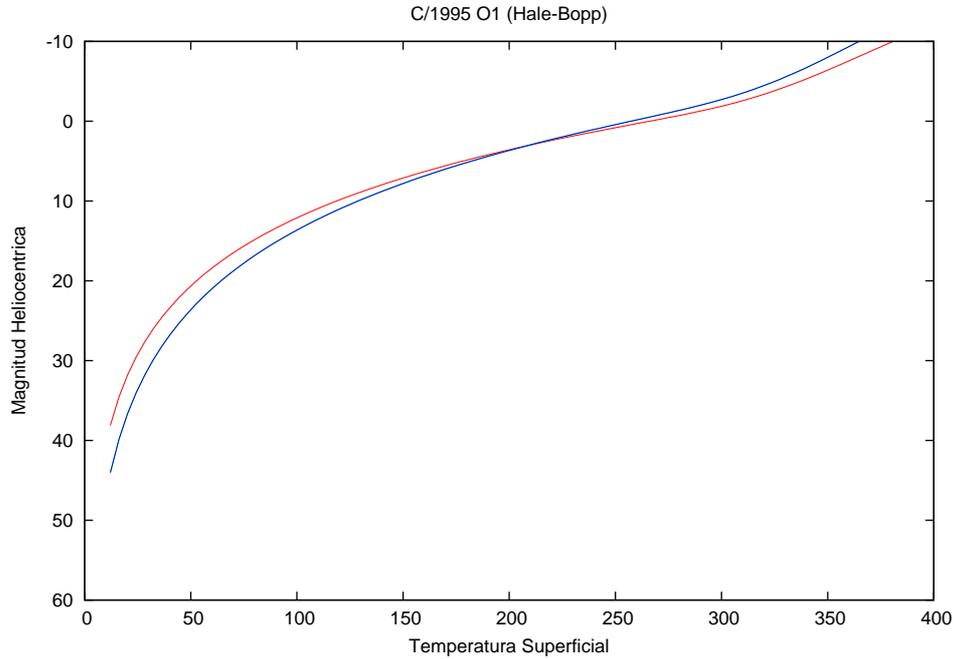


Figura 5.5. Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial antes del perihelio (curva roja) y después del perihelio (curva azul).

La figura 5.6 exhibe las curvas de evolución fotométrica y térmica antes y después del perihelio del Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). El rango de temperaturas cubre de $0^{\circ}K$ a $T_{SMáxima} = 209^{\circ}K$.

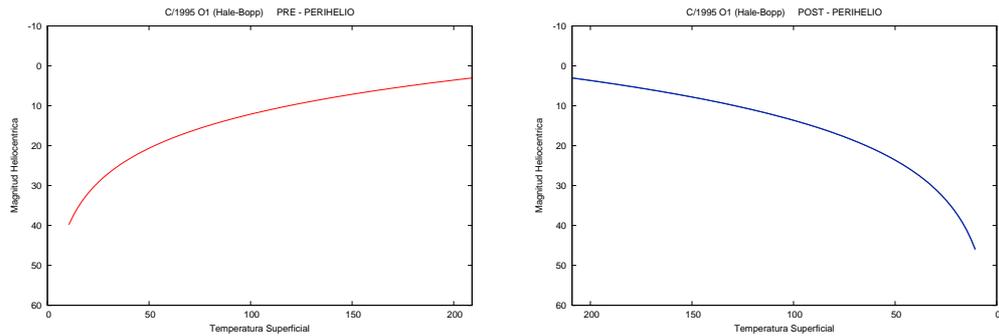


Figura 5.6. Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). Gráficas separadas pre-perihelio y postperihelio. Rango de temperatura de $0^{\circ}K$ a $T_{SMáxima} = 209^{\circ}K$.

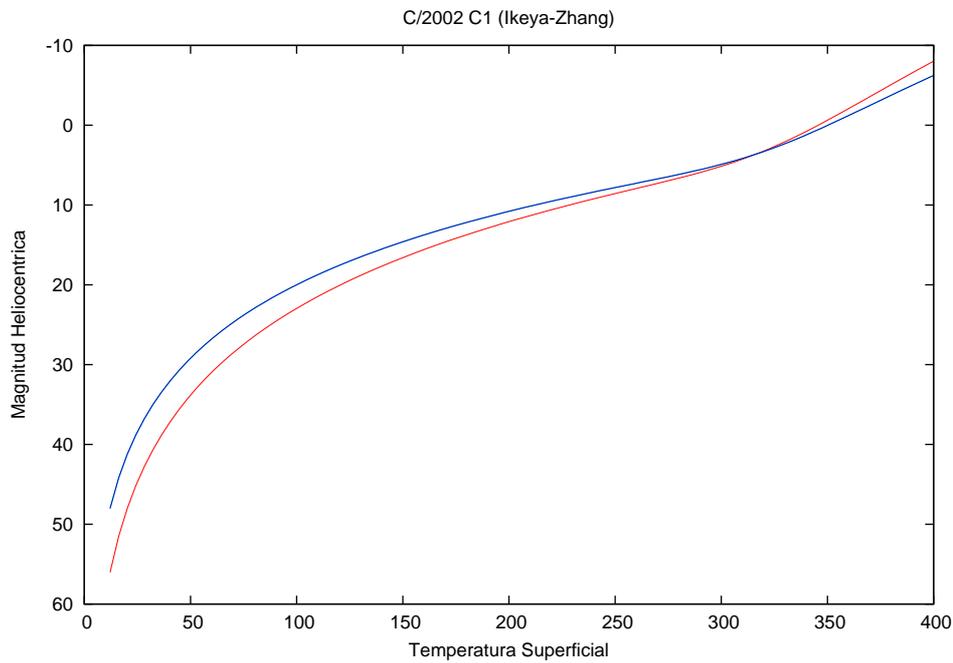


Figura 5.7. Cometa C/2002 C1 (Ikeya-Zhang). Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial antes del perihelio (curva roja) y después del perihelio (curva azul).

Calculando el punto de corte se obtiene para el Cometa C/2002 C1 (Ikeya-Zhang) (ver figuras 5.7 y 5.8) una Temperatura Superficial Máxima $T_{SMáxima} = 316^{\circ}K$ y una Magnitud Heliocéntrica Máxima $m_{\Delta Máxima} = 3,7$.

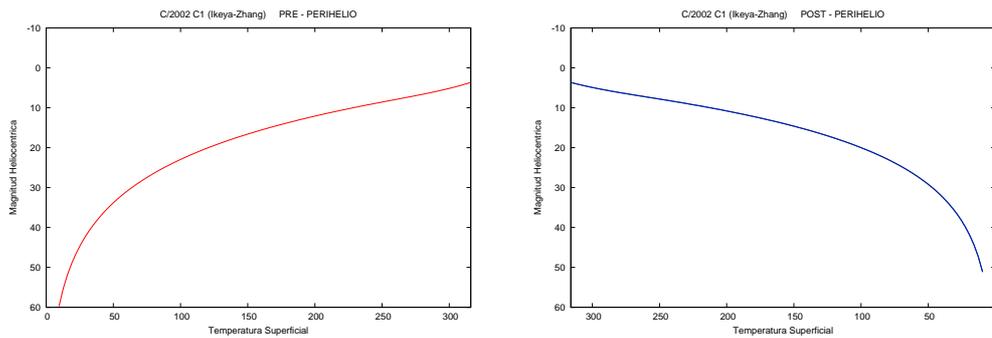


Figura 5.8. Cometa C/2002 C1 (Ikeya-Zhang). Gráficas separadas pre-perihelio y postperihelio. Rango de temperatura de $0^{\circ}K$ a $T_{SMáxima} = 316^{\circ}K$.

Tres cometas más se han incluido y sus parámetros fotométricos se hallan especificados en la tabla 5.4.

Cometa	n_{B-P}	n_{A-P}	m_{B-P}	m_{A-P}
19P/Borrelly - 2001/02	14	6.4	4.4	7.0
21P/Giacobini-Zinner - 1998	5.6	4.0	8.5	9.3
C/2006 A1 (Pojmanski)	4.6	3.52	8.5	7.8

Tabla 5.4. Valores deducidos de la curvas de luz publicadas por Andreas Kammerer.

Un resumen de los cálculos de Temperatura Superficial Máxima $T_{SMáxima}$ y Magnitud Heliocéntrica Máxima $m_{\Delta Máxima}$ se observa en la tabla 5.5

Cometa	$m_{\Delta Máxima}$	$T_{SMáxima}(^{\circ}K)$
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	3.0	209
19P/Borrelly - 2001/02	9.1	255
21P/Giacobini-Zinner - 1998	11.3	245
C/2002 C1 (Ikeya-Zhang)	3.7	316
C/2006 A1 (Pojmanski)	5.4	308

Tabla 5.5. Resumen de cálculos de Temperatura Superficial Máxima y Magnitud Heliocéntrica Maxima para los cinco cometas.

CONCLUSIONES

El estudio fundamental de la ecuación de la Curva de Luz de un cometa y de la ecuación de Balance de Energía aplicada a la superficie del núcleo cometario, permitió construir los conceptos básicos para derivar una expresión en la cual la Magnitud Heliocéntrica de un cometa es función de su Temperatura Superficial y además se puede introducir en la mencionada expresión parámetros fotométricos y termodinámicos que caracterizan a un cometa en particular.

La expresión derivada se constituye en una herramienta conceptual y matemática que implementa global, cualitativa y cuantitativamente una relación entre la fotometría y la termodinámica superficial de un cometa. En síntesis, se tiene, fotometría en función de la termodinámica superficial cometaria.

La funcionalidad establecida, permite realizar un seguimiento fotométrico y térmico de un cometa a su paso por el sistema solar interior. A través de este seguimiento fotométrico y térmico se puede realizar un estudio comparativo entre diversos cometas que conduce a clasificar núcleos cometarios en familias termodinámicas.

A partir de la función Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial, se puede determinar la máxima Temperatura Superficial alcanzada por el núcleo cometario y su máxima Magnitud Heliocéntrica.

PERSPECTIVAS

La relación establecida entre fotometría y termodinámica superficial, es decir, la funcionalidad Magnitud Heliocéntrica - Temperatura Superficial, puede ser profundizada de inmediato estudiando si la Temperatura Superficial máxima del núcleo cometario y la Magnitud Heliocéntrica máxima del cometa son alcanzadas cuando el cometa arriva al perihelio o en otro punto orbital diferente al perihelio. A su vez el resultado de este estudio, puede conducir a conclusiones a cerca de las características morfológicas y rotacionales del núcleo cometario.

Existe la posibilidad de generar cometas téóricos, es decir modelos téóricos de la conducta fotométrica y térmica de los cometas. A partir de los modelos téóricos generados se pueden estudiar comparativamente cometas reales, en busca del componente volátil que controla la sublimación.

La próxima etapa de este trabajo, es el estudio de la fotometría CCD (Charge Coupled Device), para establecer la relación funcional entre la magnitud $Af\rho$ (A : Albedo de Bond, f : Factor de llenado, ρ : Radio del diafragma utilizado para la medición) y la Temperatura Superficial del núcleo cometario y analizar sus consecuencias y resultados.

Apéndice A

CONSTANTES FÍSICAS

Constante	Simbolo	Valor	Unidades
Constante Gravitacional	G	6.67×10^{-11}	$\frac{Nm^2}{kg^2}$
Constante de Boltzmann	k	1.38054×10^{-23}	$\frac{J}{^\circ K}$
Constante de Planck	h	6.6256×10^{-34}	Js
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.6697×10^{-8}	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
Constante Universal de los Gases	R	8.3143	$\frac{J}{^\circ K mol}$
Número de Avogadro	N_A	6.02252×10^{23}	$\frac{1}{mol}$
Constante Solar	S	1370	$\frac{W}{m^2}$
Luminosidad Solar	L_{\odot}	3.9×10^{26}	W
Masa del Electrón	m_e	9.11×10^{-31}	kg
Masa del Protón	m_p	1.67252×10^{-27}	kg
Masa del Neutrón	m_n	1.67482×10^{-27}	kg
Masa Solar	M_{\odot}	1.989×10^{30}	kg
Masa de la Tierra	M_{\oplus}	5.974×10^{24}	kg
Unidad Astronómica	U.A.	1.496×10^{11}	m
Año Sideral		365.2564	d

Apéndice B

GRANDES TELESCOPIOS

Telescopio	Localización	Operacion	Diametro
Gran Canaria	Islas Canarias	2007	11 m
W. M. Keck I	Mauna Kea, Hawaii	1992	10 m
W. M. Keck II	Mauna Kea, Hawaii	1996	10 m
Hobby-Heberle	Mt. Fowlkes, texas	1997	9.2 m
Subaru	Mauna Kea, Hawaii	1999	8.3 m
Antu VLT I	Cerro Paranal, Chile	1998	8.2 m
Kueyen VLT II	Cerro Paranal, Chile	1999	8.2 m
Melipan VLT III	Cerro Paranal, Chile	2000	8.2 m
Gemini Norte	Mauna Kea, Hawaii	1999	8.1 m
Multi-Espejo	Mt. Hopkins, Arizona	1999	6.5 m
Magellan I	Las Campanas, Chile	2000	6.5 m
ETA	Zelenchukskaya, Rusia	1976	6.0 m
Hale	Mt. Palomar, California	1948	5.1 m
William Herschel	Islas canarias	1987	4.2 m
Victor Blanco	Cerro Tololo, Chile	1976	4.0 m
Anglo Australiano	Siding Spring, Australia	1974	3.9 m
Nacional Galileo	Islas Canarias	1996	3.6 m
Isaac Newton	Islas Canarias	1985	2.54 m

Apéndice C

COMETAS

Cometa	P	a	e	ω	Ω	i
Halley	76	17.95	0.967	111.8	58.1	162.2
Muller	8.73	4.24	0.52	49.74	336.12	2.19
Nakamura-Nishimura-Macholz			0.9999	123	158.9	94.4
Takamizawa-Levy			0.999	61.63	306.83	132.87
C/1995 O1 (Hale-Bopp)			0.995	130.7	282.95	89.22
Hyakutake			0.999	130.2	188	124.92
Schaumasse	8.25	4.0	0.7	57.87	79.83	11.75
Tempel 1	5.52	3.124	0.516	178.92	68.9	10.52
73P/Schwassmann-Wachmann-2006 B	5.36	3.062	0.693	198.8	69.88	11.397
73P/Schwassmann-Wachmann-2006 C	5.36	3.061	0.693	198.81	69.89	11.395
73P/Schwassmann-Wachmann-2006 G	5.38	3.068	0.693	198.79	69.9	11.4
73P/Schwassmann-Wachmann-2006 R	5.36	3.064	0.693	198.7	69.958	11.394
19P/Borrelly - 2001/02	6.86	3.6	0.624	353.3	74.8	30.3
21P/Giacobini-Zinner - 1998	6.62	3.53	0.7	172.55	195.44	31.81
C/2002 C1 (Ikeya-Zhang)			1.0	19.24	111.72	26.35
C/2006 A1 (Pojmanski)			0.999	351.2	211.35	92.74
46P/Wirtanen - 1997	5.5	3.12	0.652	356.2	81.6	11.7
4P/Faye - 2006/07	7.34	3.78	0.578	204	198.9	9.1
41P/Tuttle-Giacobini-Kresak - 2006	5.46	3.1	0.656	61.6	140.9	9.2
Encke	3.28	2.2	0.850	186.3	334	11.9
Clark	5.51	3.12	0.501	208.9	59.1	9.5
Forbes	6.14	3.35	0.568	310.6	333.6	7.2
Daniel	7.06	3.68	0.552	11	68.4	20.1
Holmes	7.09	3.7	0.41	23.2	327.3	19.2
Wolf	8.25	4.1	0.406	162.3	203.4	27.5
Whipple	8.53	4.18	0.259	201.9	181.8	9.9
Comas Sola	8.78	4.26	0.57	45.5	60.4	13
Tuttle	13.5	5.65	0.824	206.7	269.8	54.7

Apéndice D

MISIONES A COMETAS

Misión	Pais-Agencia	Lanzamiento	Encuentro	Cometa
ICE (ISEE3)	USA-NASA	12 08 1978	11 09 1985, 28 03 1986	Giacobini-Zinner(1985), Halley (1986)
Giotto	Europa-ESA	02 07 1985	13 03 1986, 10 07 1992	Halley(1986) Grigg-Skjellerup(1992)
Vega I	Rusia	15 12 1984	04 03 1986	Halley
Vega II	Rusia	21 12 1984	09 03 1986	Halley
SAKIGAKE	Japón	07 01 1985	11 03 1986	Halley
SUISEI	Japón	18 08 1985	08 03 1986	Halley
Ulises	NASA-ESA	06 10 1990	1994 No era una misión a Cometas	Borrelly, D'Arrest, Encke, Mueller, Pons-Winnecke, Temple 2, Tuttle, Hale-Bopp y otros.
Galileo	USA-NASA	18 10 1989	07 1994 Misión a Jupiter y Saturno	Colisión fragmentos Shoemaker-Levy 9 con Jupiter
Stardust	USA-NASA	07 02 1999	01 2004	Wild 2
Deep Space I	USA-NASA	15 10 1998	09 2001	Borrelly
Deep Impact	USA-NASA	12 2004	07 2005	Tempel 1
Rosetta	Europa-ESA	26 02 2004	11 2014	Churyumov-Gerasimenko
Soho	NASA-ESA	02 12 1995	Misión al Sol	Cometas muy cerca del sol

Apéndice E

ECUACIÓN DE POGSÓN

La propiedad más notable de una estrella es su brillo o luminosidad aparente, que es la potencia de la radiación electromagnética que detecta un observador. El brillo se puede expresar utilizando una cantidad denominada magnitud, que se fundamenta en un método desarrollado por el astrónomo griego Hiparco y su discípulo Ptolomeo. En el sistema original, las estrellas aparentemente más brillantes se les consideraba de primera magnitud, las inmediatamente menos brillantes de segunda magnitud y sucesivamente hasta las menos brillantes observables a simple vista que correspondían a la sexta magnitud. (Bradley W., Carroll Dale A. Ostlie. [3]).

Con el descubrimiento e implementación del telescopio, la fotografía y demás técnicas de observación el sistema debió ser ampliado y modificado. En la actualidad la escala de magnitudes se fundamenta en el hecho observado de que dos estrellas cuya diferencia en magnitudes es de 5 su correspondiente relación entre sus brillos es de 10^2 , es decir para dos estrellas A y B para las que

$$m_B - m_A = 5 \tag{E.1}$$

implica que la relación entre sus brillos es

$$\frac{B_A}{B_B} = 10^2 \tag{E.2}$$

de las ecuaciones A.1 y A.2 se deduce

$$m_B - m_A = \frac{5}{2} \text{Log} \frac{B_A}{B_B} \tag{E.3}$$

que usualmente se escribe

$$m_B - m_A = -\frac{5}{2} \text{Log} \frac{B_B}{B_A} \quad (\text{E.4})$$

es la ecuación de Pogson. El uso de esta ecuación implicó el establecimiento de estrellas de referencia y en comienzo se eligió la estrella polar a la que se le asignó una magnitud de 2.0. En 1918 se descubrió que la polar era una estrella variable, lo que condujo, a la búsqueda de estrellas de referencia con brillo constante.

Con el nuevo sistema las magnitudes estelares no son necesariamente números enteros. Adicionalmente la escala de magnitudes se amplió por debajo de la primera magnitud y más allá de la sexta magnitud, con lo que muchas estrellas brillantes tienen magnitud 0 o negativa y muchas otras estrellas solo visibles con telescopio tienen magnitudes más allá de seis. Entonces, el sol, la estrella más brillante en nuestro cielo, tiene una magnitud de $-26,7$, la luna una magnitud de $-12,7$. La estrella de menor brillo que puede observarse con el telescopio de Monte Palomar es de magnitud 23.

Apéndice F

ECUACIÓN DE CLAUSIUS CLAPEYRON

Existen cambios de fase usuales como la fusión, la vaporización y la sublimación y otros menos familiares como el paso de una modificación cristalina a otra en los que la temperatura y la presión permanecen constantes mientras que varían la entropía y el volumen. Si se consideran n_o moles en una fase inicial i con entropía molar s^i y volumen molar v^i , tanto s^i como v^i son funciones de la temperatura T y de la presión P y por consiguiente permanecen constantes durante el cambio de fase que finaliza cuando la sustancia alcanza la fase final f con entropía s^f y volumen molar v^f . Sea x la fracción de la fase inicial que se ha transformado en la fase final en un instante cualquiera. Entonces

$$S = n_o(1 - x)s^i + n_o x s^f \quad (\text{F.1})$$

y

$$V = n_o(1 - x)v^i + n_o x v^f \quad (\text{F.2})$$

en los que S y V son funciones lineales de x .

Si el cambio de fase es un proceso reversible, el calor transferido por mol denominado calor latente está dado por la expresión

$$L = T(s^f - s^i) \quad (\text{F.3})$$

En consecuencia, la existencia de un calor latente implica un cambio en la entropía. Como

$$dG = VdP - SdT \quad (\text{F.4})$$

en donde G es la función de Gibbs. Entonces

$$S = -\left[\frac{\partial G}{\partial T}\right]_P \quad (\text{F.5})$$

y

$$V = \left[\frac{\partial G}{\partial P}\right]_T \quad (\text{F.6})$$

Las características de los cambios de fase usuales son las siguientes:

1. *El proceso presenta variaciones de entropía y de volumen.*
 2. *Las derivadas de primer orden de la función de Gibbs son discontinuas.*
- Cualquier cambio de fase que tenga estas características se denomina cambio de fase de primer orden.

Si una mol de sustancia pasa de modo reversible, isoterma e isobara de la fase inicial i a la fase final f con una capacidad calorífica molar a volumen constante c_V entonces

$$TdS = c_V dT + T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V dV \quad (\text{F.7})$$

ecuación que es integrable si las presiones y temperaturas que caracterizan al cambio de fase se ajustan a una relación en la que la presión es función únicamente de la temperatura, independiente del volumen de modo que $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{dP}{dT}$, entonces

$$T(s^f - s^i) = T \frac{dP}{dT} (v^f - v^i) \quad (\text{F.8})$$

El primer miembro de la ecuación B.8, es el calor latente por mol y como consecuencia tenemos

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\mu L}{T(v^f - v^i)} \quad (\text{F.9})$$

La ecuación de Clausius Clapeyron aplicada a la sublimación es

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\mu L}{T(v^g - v^s)} \quad (\text{F.10})$$

v^g es el volumen molar de un gas y v^s el volumen molar de un sólido. El proceso de sublimación ocurre generalmente a baja presión y por ello el gas se asume como un gas ideal y entonces

$$v^g \approx \frac{R_{gases} T}{P} \quad (\text{F.11})$$

Como P es pequeña, v^g es muy grande, de modo que v^s se puede despreciar y con ello $v^g - v^s \approx v^g$ y finalmente la ecuación de Clausius Clapeyron se puede escribir como

$$\frac{dP}{P} = \frac{\mu L}{R_{gases}} \frac{1}{T^2} dT \quad (\text{F.12})$$

cuya integral es

$$\text{Ln}P = -\frac{\mu L}{R_{gases}} \left[\frac{1}{T} \right] + \text{Ln}P_o \quad (\text{F.13})$$

En los procesos de sublimación las presiones se miden usualmente en un intervalo pequeño de temperaturas dentro del cual la gráfica de $\text{Ln}P$ en función de $\frac{1}{T}$ se ajusta a una función lineal cuya pendiente negativa es $\frac{\mu L}{R_{gases}}$ y punto de corte $\text{Ln}P_o$. (Zemansky M. W. [35]).

Bibliografía

- [1] A'Hearn M. F. (2005). Cometary Science: The Present and Future. Comets book. www.uapress.arizona.edu/books/bid1580.htm.
- [2] Artsimóvich L., Lukianov S. (1974). Movimiento de las partículas cargadas en los campos eléctricos y magnéticos. Editorial MIR. Moscú, URSS.
- [3] Bradley W., Carroll Dale A. Ostlie. (1996) An Introduction to Modern Astrophysics, Addison Wesley, Massachusetts, USA.
- [4] Brandt J. C., Niedner M. B. (1986) Estructura de la cola de los cometas. Investigación y Ciencia, marzo, 35-43.
- [5] Calder Nigel. (1986). Que viene el cometa!. Salvat Editores. Barcelona, España.
- [6] Comellas J. L., Cruz M. (1985). El cometa Halley, 1985 86. Salvat Editores. Barcelona, España.
- [7] Cowling T. G. (1968). Magnetohidrodinámica. Editorial Alhambra. Madrid, España.
- [8] Deaza P. (1997). Desconexión de la Cola Iónica de un Cometa. Memorias Congreso Nacional de Astronomía. Barranquilla, Colombia.
- [9] Deaza P. (1998). La Curva de Luz de un Cometa. Memorias Congreso Nacional de Astronomía. Santiago de Cali, Colombia.
- [10] Deaza P. (1999). La Zona de Temperatura Crítica de un Cometa. Memorias Congreso Nacional de Astronomía. Pereira, Colombia.
- [11] Delcroix J. L. (1968). Introducción a la teoría de los gases ionizados. Editorial Alhambra. Madrid, España.

- [12] Edberg S. , Ferrin I. (1985). Manual para la Observacion de los Cometas. IHW, LIADA, ULA. Merida Venezuela.
- [13] Ferrin I. (2005). Secular Light Curves of Comet 28P/Neujmin 1 and of Comets Targets of Spacecrafts. *Icarus*, Vol 178, pág. 493-516.
- [14] Festou M. C., Keller H. U., Weaver H. A. (2005). A Brief Conceptual History of Cometary Science. Comets book. www.uapress.arizona.edu/books/bid1580.htm.
- [15] Grun E., Muller M. <http://galileo.mpi-hd.mpg.de/~mmuller>, <http://galileo.mpi-hd.mpg.de/~gruen>.
- [16] Gibilisco Stan. (1991). Cometas, meteoros i asteroides. McGraw-Hill. Madrid, España.
- [17] González J. J. (2006). Tasas de producción de agua.
- [18] Herman G. , Podolak M. (1985). Numerical Simulation of Comet Nuclei. *Icarus* 61, 252-266.
- [19] Huebner W. F., Benkhoff J., Capria M. T., Coradini A., De Sanctis, C., Orosei R., Prialnik D. (2006). Heat and Gas Diffusion in Comet Nuclei. International Space Science Institute. Netherlands.
- [20] Keller H. U., Britt D., Buratti B. J., Thomas N. (2005). In Situ Observations of Cometary Nuclei. Comets book. www.uapress.arizona.edu/books/bid1580.htm.
- [21] Klinger J.,(1980). Influence of a phase transition of ice on the heat and mass balance of comets. *Science* (Washington, D.C.) 209, 634-641.
- [22] Klinger J., (1981). Some consequences of a phase transition of water ice on the balance of comet nuclei. *Icarus* 47, 320-324.
- [23] Krishna s. K. S. (1997). Physics of Comets. World Scientific. London, UK.
- [24] Lamy P. L., Toth I., Fernandez Y. R., Weaver H. A. (2006). The Sizes, Shapes, Albedos and Colors of Cometary Nuclei. Comets book. www.uapress.arizona.edu/books/bid1580.htm.

- [25] Mathews J. H., Fink K. D. (1999). *Métodos Numéricos con Matlab*. Prentice Hall. Madrid, España.
- [26] Prialnik D., Benkhoff J., Podolak M. (2006). Modeling the structure and activity of comet nuclei. *Comets book*. www.uapress.arizona.edu/books/bid1580.htm.
- [27] Sagan Carl, Druyan Ann. (1986). *El cometa*. Editorial Planeta. Barcelona, España.
- [28] Rodgers S. D., Charnley S. B., Huebner W. F., Boice D. C. (2006). *Physical Processes and Chemical Reactions*. *Comets book*. www.uapress.arizona.edu/books/bid1580.htm.
- [29] Sekanina Z. (1970). Surface Temperature Distribution over the Rotating Nucleus of a Comet Deficient in Volatiles. *Astron. Astrophys.* 7, 109-119.
- [30] Tancredi G., Rickman H., Greenberg J. M. (1994). Thermochemistry of cometary nuclei. *Astron. Astrophys.* 286, 659-682.
- [31] Trigo I R. J. M. (1996). *Meteoros: Fragmentos de cometas y asteroides*. Equipo Sirius. Madrid, España.
- [32] Van Dishoeck E. F., Dalgarno A. (1984) The Dissociation of OH and OD in Comets by Solar Radiation. *Icarus*, Vol 59, p. 305-313.
- [33] Weissman P.R., and H.H. Kieffer (1981). Thermal modelling of cometary nuclei. *Icarus* 47, 302-311.
- [34] Whipple F. L. (1977). La naturaleza de los cometas. *Investigación y Ciencia*. 221-231.
- [35] Zemansky M. W. (1973). *Calor y Termodinámica*. Aguilar Ediciones. Madrid, España.